

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ВИШНЄВСЬКИЙ ВІТАЛІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 664.8.047

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА КАМЕРНА СУШАРКА З КОМБІНОВАНИМ
НАГРІВОМ ТЕПЛОНОСІЯ**

144 – теплоенергетика

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

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

_____ В.М. Вишнєвський

Науковий керівник – Петрова Жанна Олександрівна, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук.

Київ 2023

АНОТАЦІЯ

Вишневецький В.М. Енергоефективна камерна сушарка з комбінованим нагрівом теплоносія. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню енергетичної ефективності сушарки з комбінованим нагрівом та повною рециркуляцією теплоносія.

Основними параметрами визначені температура теплоносія, швидкість руху теплоносія та вологість сушильного агента, а також напрямок продування матеріалу в тунельних сушарках.

Камерні сушарки широко використовуються в переробці овочів та фруктів в Україні, США, Китаї, Франції та в ін. країнах. Вони призначені для сушіння кускових (штучних) продуктів (хліб, нарізані овочі та фрукти і т. ін.). Камерна сушарка це поєднання одного або більше шаф сушарки в послідовному розташуванні. В 2-х зонній камерній сушарці можна проводити сушіння великих обсягів сировини яка споживає менше енергії у порівнянні з потужністю, яку має кожна сушильна шафа при окремій її експлуатації. Але високі енергетичні витрати на процес сушіння матеріалів при великих цінах на пальне спонукають вирішувати завдання підвищення енергоефективності при створенні нових камерних сушарок із застосуванням електронагрівачів теплоносія.

В Інституті технічної теплофізики НАН України запропоновано використовувати парові теплогенератори в роботі багатозонної тунельної сушарки, що в порівнянні з теплогенераторами на органічному паливі дають можливість економити витрати теплоти в 1,7 – 2,3 рази в порівнянні з існуючими аналогами. Енергетичні витрати теплоти в тунельній сушарці складають 3800 кДж/кг вип. вологи.

Для зменшення енергетичних витрат набули поширення сонячні тунельні сушарки з збільшенням поверхні теплообміну за рахунок максимального розведення піддонів з сировиною під різним кутом. За рахунок впливу сонячної енергії температура сушильного агента може досягати 70°C.

Основним напрямком розвитку сушіння рослинних матеріалів є поєднання існуючих технологій з відновлювальними джерелами енергії, зокрема використання сонячної енергії, теплових насосів, а також мікрохвильове, інфрачервоне та сублимаційне сушіння.

Комбінована технологія сушіння - це поєднання двох або більше різних процесів сушіння, які можуть забезпечити синергетичний ефект, що призводить до зменшення потреби в енергії та скорочення часу сушіння при збереженні більшості характеристик якості, наприклад смаку, поживних речовин, кольору, аромату, текстури тощо.

Розглянуті різні методи комбінованого сушіння, такі як: сонячно-інфрачервона, конвективно-інфрачервона, інфрачервона-мікрохвильова, конвективно-мікрохвильова та багатофункціональна, яка поєднує в собі мікрохвильове-сублимаційне сушіння під вакуумом. Порівняння комбінованих методів значне зниження тривалості сушіння та зменшення енерговитрат, що може бути використано при проектуванні тунельних енергоефективних сушарок.

Зміст дисертаційного дослідження викладено у чотирьох розділах, у яких представлені та обґрунтовані основні результати роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми досліджень, сформульовано мету та завдання дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Надано дані про апробацію результатів дисертації та перелік публікацій.

У першому розділі проведено аналіз літературних джерел сучасних сушильних установок із комбінованим нагрівом теплоносія, який показує, що для підвищення енергоефективності сушильних установок використовують комбінацію конвекції та інфрачервоного випромінювання, мікрохвиль та

інфрачервоного випромінювання, сонячної енергії та інфрачервоного випромінювання. Такі установки є лабораторного типу. В світі немає сушильних установок в яких для підвищення енергоефективності застосовуються товстоплівкові нагрівальні елементи із комбінацією інфрачервоного випромінювання. Тому є необхідною розробка енергоефективної камерної сушарки із комбінованим нагрівом теплоносія промислового типу для широкого використання її у фермерських господарствах із завантаженням 120 кг сировини.

У другому розділі представлені методики для проведення і обробки результатів експериментальних досліджень, наведено опис приладів та установок які підібрані для проведення експериментальних досліджень кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів, наведена похибка досліджень.

У третьому розділі вдосконалено експериментальний стенд для дослідження процесів конвективного сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів шляхом монтажу в сушильній камері ламп інфрачервоного випромінювання. Для перевірки роботи вдосконаленого стенду були проведені дослідження кінетики процесу сушіння капусти білокачанної із застосуванням комбінації конвекції та інфрачервоного випромінювання. Для визначення якості висушеного матеріалу отримано коефіцієнт набухання і відновлюваності капусти білокачанної від режимів сушіння. Для випробовування стенду були проведені дослідження кінетики процесу сушіння кукурудзи амілопектинової. Визначено схожості кукурудзи амілопектинової від температурних режимів сушіння. Досліджені тепломасообмінні процеси при сушінні колоїдних капілярно-пористих матеріалів.

У четвертому розділі представлено розроблену енергоефективну камерну сушарку із комбінованим нагрівом теплоносія та використані в ній товстоплівкові нагрівальні елементи. Досліджена кінетика сушіння картоплі, гарбуза, яблук та поролону. Проведені порівняння двох способів сушіння в камерній сушарці яблук конвективним способом та комбінованим. Проведені розрахунки витрат теплоти на випаровування 1 кг вологи в залежності від температури відпрацьованого сушильного агента. Отримані витрати енергії за весь процес що становлять 4742

кДж/кг випареної вологи, та відповідають ефективним показникам такого типу камерних сушарок.

У загальних висновках автором представлені наукові та практичні результати дисертаційного дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- вперше досліджена кінетика процесу сушіння капусти білокачанної на конвективно-сушильному стенді із встановленим комбінованим нагрівом теплоносія яка показала зменшення тривалості сушіння та підвищення якості матеріалу;

- вперше встановлено оптимальну температуру зневоднення амілопектинової кукурудзи, яка показала рівномірність прогріву матеріалу, що позитивно впливає на якість отриманого продукту;

- вперше проведені експериментальні дослідження на схожість амілопектинової кукурудзи від режимних параметрів сушіння;

- розраховані відносні коефіцієнти та коефіцієнти сушіння із узагальнених кривих сушіння та швидкості сушіння, отримані формули тривалості процесу, похибка дослідної від розрахункової не перевищує 5%;

- досліджено залежність числа Ребіндера (критерій оптимізації сушіння) який показав характер змін витрат енергії на випаровування вологи в процесі сушіння;

- вперше досліджено вплив товстопліткових нагрівальних елементів на енергоефективність сушарки з комбінованим нагрівом теплоносія;

- досліджено витрати теплоти на випаровування 1 кг вологи в залежності від температури відпрацьованого сушильного агента.

Практичне значення одержаних результатів:

- в результаті експериментального та теоретичного дослідження модернізовано дослідний конвективно - сушильний стенд з комбінованим нагрівом теплоносія;

- розроблені режими сушіння в енергоефективній камерній сушарці з комбінованим нагрівом теплоносія;

- вперше використано товстоплівкові нагрівальні елементи в камерній сушарці з комбінованим нагрівом теплоносія;

- розроблена енергоефективна камерна сушарка з комбінованим нагрівом теплоносія на яку отриманий паспорт;

Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджується актами впровадження: 1. Апробація сушильної установки Інституту технічної теплофізики НАН України для розробки оптимальних режимів сушіння чаполочі пахучої (*Hierochloe odorata*, зубрівки). 2. Дослідження з підбору оптимального технологічного режиму по зневодненню зерна восковидної кукурудзи з використанням новітніх методів сушіння сировини для отримання аналітичних результатів та продуктів для їх подальших досліджень фізико-хімічних властивостей для оптимізації виробничих процесів.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджено заявкою на одержання патенту України на винахід. № а202008082 від 17.12.2020.

Ключові слова: енергоефективні способи сушіння, тепломасообмін, теплофізичні властивості, товстоплівкові нагрівальні елементи, інфрачервоне випромінювання, комбіноване сушіння.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Снежкін, Ю.Ф., Пазюк, В.М., Петрова, Ж.О. & Вишнєвський, В.М. (2019). Розробка енергоефективних режимів насіння зернових культур. Наукові праці, 83(2), 121-127. doi:10/15673/swonaft.v2i83.1515 [Фахове видання] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
2. Petrova, Zh.O., Slobodianiuk, K.S., Samoilenko, K.M. & Vishnevsky, V.M. (2020). Universal modes of technological processing of colloid capillary-porous materials by convective drying method. Енергетика і автоматика, 6, 15-27. doi:10.31548/energiya2020.06.015 [Фахове видання, Google scholar] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
3. Zhanna Petrova, Kateryna Samoilenko. & Vitaly Vishnevsky. (2020). Process of Heat and Mass Transfer during Drying of Red Beetroot. Energy Engineerring and Control Systems, 6(2), 81-87. doi:10.23939/jeeecs2020.02.081 [Фахове видання] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
4. Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., Вишнєвський, В.М., Граков, Д.П. & Граков, О.П. (2021). Сушіння капусти білокачанної на конвективному сушильному стенді. Теплофізика та теплоенергетика, 43(3), 24-28. doi:10.31472/ttpe.3.2021.3 [Фахове видання] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
5. Vadim Paziuk, Vitalii Vyshnevskiy, Oleksii Tokarchuk. & Ihor Kupchuk. (2021). Substation of the energy efficient schedules of drying grain seeds. Bulletin of the transilvania Univercity of Brasov Series II: Forestry • Wood Industry • Agricultural Food Engineering, 14(63), 137-146. doi:10.31926/but.fwiafe.2021.14.63.2.13 [Іноземне видання наукометричної бази SCOPUS, Q4] (Внесок здобувача:

проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

- Petrova, Zh.O., Slobodianiuk, K.S., Samoilenko, K.M., Vishnevsky, V.M.. & Grakov, O.P. (2022). Research of the Kinetics of the Drying Process of Combined Plant Materials. Scientific Works, 1(86), 69-77. doi:10.15673/ swonaft.v86i1.2406 [Фахове видання] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

- Petrova, Zh., Grakov, O. & Vishnevsky, V. (2021). Overview of existing researches of the process of drying purple cabbage. Збірник тез доповідей ХХ всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 22-24. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
- Пазюк, В.М. & Вишнівський, В.М. (2021). Дослідження кінетики сушіння білокачанної капусти. Тези доповідей VIII Міжнародної наукової конференції «Інноваційні енерготехнології». Одеса: ОНАХТ, 23-25. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
- Петрова, Ж.О., Слободянюк, К.С., Вишнівський, В.М. & Граков, О.П. (2022). Дослідження кінетики сушіння червонокочанної капусти на конвективній сушарці. Збірник тез доповідей ХХХ всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів». Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 25-27. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
- Петрова, Ж.О., Слободянюк, К.С., Вишнівський, В.М. & Граков, О.П. (2022). Дослідження кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів у

конвективній сушильній установці. Збірник тез доповідей ХІХ Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв». Одеса: ОНТУ, 14-16. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

Наукові праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:

11. Пазюк, В.М., Рубаненко, О.О. & Вишнівський, В.М. (2018). Підвищення енергоефективності сушіння насіння зернових культур шляхом застосування теплових насосів. Вісник Хмельницького національного університету, 4(263), 251-253. ISSN 2307-5732 [Інше видання] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
12. Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., Вишнівський, В.М. & Граков, Д.П. (2021). Напрями підвищення ефективності процесу сушіння в тунельних та комбінованих сушарках. Збірник наукових праць ХДУХТ, 1(33), 109-130. [Інше видання] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

ANNOTATION

Vyshnevskiy V.M. Energy-efficient chamber dryer with combined heating of the coolant. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 144 - Thermal Power Engineering. – Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation work is devoted to increasing the energy efficiency of a dryer with combined heating and full coolant recirculation.

The main parameters are the temperature of the coolant, the speed of the coolant and the humidity of the drying agent, as well as the direction of material blowing in the tunnel dryers.

Chamber dryers are widely used in the processing of vegetables and fruits in Ukraine, the USA, China, France, etc. countries They are intended for drying lump (artificial) products (bread, chopped vegetables and fruits, etc.). A chamber dryer is a combination of one or more dryer cabinets in a sequential arrangement. In a 2-zone chamber dryer, it is possible to dry large volumes of raw materials that consume less energy compared to the power that each drying cabinet has during its separate operation. But the high energy costs for the process of drying materials with high fuel prices encourage us to solve the problem of increasing energy efficiency when creating new chamber dryers using electronic heaters of the coolant.

The Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine proposed to use steam heat generators in the operation of a multi-zone tunnel dryer, which, in comparison with organic fuel heat generators, makes it possible to save heat consumption by 1.7-2.3 times compared to existing analogues. Energy consumption of heat in the tunnel dryer is 3800 kJ/kg of evaporated moisture.

In order to reduce energy costs, solar tunnel dryers with an increase in the heat exchange surface due to the maximum separation of pallets with raw materials at

different angles have become widespread. Due to the influence of solar energy, the temperature of the drying agent can reach 70°C.

The main direction of the development of drying plant materials is the combination of existing technologies with renewable energy sources, in particular the use of solar energy, heat pumps, as well as microwave, infrared and sublimation drying.

Combined drying technology is the combination of two or more different drying processes that can provide a synergistic effect, resulting in reduced energy requirements and reduced drying time while maintaining most of the quality characteristics, such as taste, nutrients, color, aroma, texture, etc.

Different methods of combined drying are considered, such as: solar-infrared, convective-infrared, infrared-microwave, convective-microwave and multifunctional, which combines microwave-sublimation drying under vacuum. Comparison of combined methods significantly reduces the duration of drying and reduces energy consumption, which can be used in the design of tunnel energy-efficient dryers.

The content of the dissertation research is presented in four chapters, in which the main results of the work are presented and substantiated.

The introduction substantiates the relevance of the chosen research topic, formulates the goal and task of the research, outlines the scientific novelty and practical significance of the obtained results. Data on the approval of the dissertation results and a list of publications are provided. In the first chapter, an analysis of literary sources of modern drying units with combined heating of the coolant is carried out, which shows that to increase the energy efficiency of drying units, a combination of convection and infrared radiation, microwaves and infrared radiation, solar energy and infrared radiation is used. Such installations are of the laboratory type. There are no drying units in the world that use thick-film heating elements with a combination of infrared radiation to increase energy efficiency. Therefore, it is necessary to develop an energy-efficient chamber dryer with combined heating of an industrial-type coolant for its wide use in farms with a load of 120 kg of raw materials.

The second chapter presents methods for conducting and processing the results of experimental studies, a description of the devices and installations selected for conducting experimental studies of the drying kinetics of colloidal capillary-porous materials is given, and the error of the studies is given.

In the third chapter, an experimental stand for researching the processes of convective drying of colloidal capillary-porous materials by installing infrared lamps in the drying chamber is improved. In order to check the performance of the improved stand, studies were conducted on the kinetics of the process of drying white cabbage using a combination of convection and infrared radiation. To determine the quality of the dried material, the coefficient of swelling and recovery of white cabbage from the drying regimes was obtained. To test the stand, studies of the kinetics of the drying process of amylopectin corn were carried out. The similarities of amylopectin corn depending on the temperature conditions of drying were determined. Heat and mass transfer processes during drying of colloidal capillary-porous materials were studied.

The fourth chapter presents the developed energy-efficient chamber dryer with combined heat carrier heating and the thick film heating elements used in it. The drying kinetics of potatoes, pumpkins, apples, and foam rubber were studied. Comparisons were made of two methods of drying apples in a chamber dryer, convective and combined. Calculations of heat consumption for evaporation of 1 kg of moisture depending on the temperature of the spent drying agent were carried out. The obtained energy consumption for the entire process, which is 4742 kJ/kg of evaporated moisture, corresponds to the effective indicators of this type of chamber dryers.

In the general conclusions, the author presents the scientific and practical results of the dissertation research.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

- for the first time, the kinetics of the drying process of white cabbage on a convective-drying stand with installed combined heating of the coolant was investigated, which showed a decrease in the duration of drying and an increase in the quality of the material;

- for the first time, the optimal temperature of dehydration of amylopectin corn was established, which showed the uniformity of heating of the material, which positively affects the quality of the obtained product;

- for the first time, experimental studies were carried out on the similarity of amylopectin corn depending on the parameters of the drying regime;

- relative coefficients and drying coefficients are calculated from generalized drying curves and drying speed, formulas for the duration of the process are obtained, the error between the experimental and the calculated does not exceed 5%;

- the dependence of Rebinder's number (drying optimization criterion) was investigated, which showed the nature of changes in energy consumption for moisture evaporation in the drying process;

- for the first time, the influence of thick-film heating elements on the energy efficiency of a dryer with combined heat carrier heating was investigated;

- the heat consumption for the evaporation of 1 kg of moisture was investigated, depending on the temperature of the spent drying agent.

Practical significance of the obtained results:

- as a result of experimental and theoretical research, an experimental convective drying stand with combined heating of the coolant was modernized;

- developed drying modes in an energy-efficient chamber dryer with combined heat carrier heating;

- an energy-efficient chamber dryer with combined heat carrier heating was developed, for which a passport was obtained;

- an energy-efficient chamber dryer with combined heating of the coolant was developed and implemented at the Evriday Food enterprise, which was confirmed by the act of implementation;

The practical significance of the results of the dissertation was confirmed by the application for a patent of Ukraine for the invention. No. a202008082 dated 12/17/2020

Keywords: energy-efficient methods of drying, heat and mass transfer, thermophysical properties, thick-film heating elements, infrared radiation, combined drying.

LIST OF PUBLICATIONS

Scientific papers, in which the main scientific results of the thesis are published:

1. Snezhkin, Y.F., Pazyuk, V.M., Petrova, Zh.O. & Vyshnevskiy, V.M. (2019). Development of energy-efficient seed regimes of grain crops. Scientific works, 83(2), 121-127. doi:10/15673/swonaft.v2i83.1515 [Professional edition] (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
2. Zh.O. Petrova., K.S. Slobodianiuk., K.M. Samoilenko. & V.M. Vishnevsky. (2020). Universal modes of technological processing of colloid capillary-porous materials by convective drying method. Energy and automation, 6, 15-27. doi:10.31548/energiya2020.06.015 [Professional edition, Google scholar] (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
3. Zhanna Petrova, Kateryna Samoilenko. & Vitaly Vishnevsky. (2020). Process of Heat and Mass Transfer during Drying of Red Beetroot. Energy Engineering and Control Systems, 6(2), 81-87. doi:10.23939/jeeecs2020.02.081 [Professional edition] (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
4. Petrova, Z.O., Pazyuk, V.M., Vyshnevskiy, V.M., Grakov, D.P. & Grakov, O.P. (2021). Drying white cabbage on a convective drying stand. Thermal physics and thermal energy, 43(3), 24-28. doi:10.31472/ttpe.3.2021.3 [Professional edition] (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).

5. Vadim Paziuk, Vitalii Vyshnevskiy, Oleksii Tokarchuk. & Ihor Kupchuk. (2021). Substation of the energy efficient schedules of drying grain seeds. Bulletin of the Transylvania University of Brasov Series II: Forestry • Wood Industry • Agricultural Food Engineering, 14(63), 137-146. doi:10.31926/but.fwiafe.2021.14.63.2.13 [Foreign edition of SCOPUS scientometric database, Q4] (Contribution of the acquirer: conducting experimental research, processing and analysis of experimental data).
6. Petrova, Zh.O., Slobodianiuk, K.S., Samoilenko, K.M., Vishnevsky, V.M. & Grakov, O.P. (2022). Research of the Kinetics of the Drying Process of Combined Plant Materials. Scientific Works, 1(86), 69-77. doi:10.15673/swonaft.v86i1.2406 [Professional edition] (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).

Scientific works confirming the approbation of the materials of the thesis:

7. Petrova, Zh., Grakov, O. & Vishnevsky, V. (2021). Overview of existing researches of the process of drying purple cabbage. Collection of abstracts of the 20th All-Ukrainian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Resource-energy-saving technologies and equipment" (pp. 22-24). Kyiv: "KPI named after Igor Sikorsky". (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
8. Pazyuk, V.M. & Vyshnevskiy, V.M. (2021). Study of drying kinetics of white cabbage. Abstracts of reports of the VIII International Scientific Conference "Innovative Energy Technologies". (p. 23-25). Odesa: ONAKHT. (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
9. Petrova, Z.O., Slobodyaniuk, K.S., Vyshnevskiy, V.M. & Grakov, O.P. (2022). Study of drying kinetics of red cabbage on a convective dryer. A collection of abstracts of reports XXX of the All-Ukrainian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Equipment of chemical production and

building materials enterprises". (p. 25-27). Kyiv: "KPI named after Igor Sikorsky". (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).

10. Petrova, Z.O., Slobodyaniuk, K.S., Vyshnevskyi, V.M. & Grakov, O.P. (2022). Study of drying kinetics of colloidal capillary-porous materials in a convective drying unit. Collection of abstracts of reports of the 19th International Scientific Conference "Improvement of processes and equipment of food and chemical industries". (pp. 14-16). Odesa: ONTU. (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).

Scientific works, which additionally represent the scientific results of the thesis:

11. Pazyuk, V.M., Rubanenko, O.O. & Vyshnevskyi, V.M. (2018). Increasing the energy efficiency of grain seed drying by using heat pumps. Bulletin of the Khmelnytskyi National University, 4(263), 251-253. ISSN 2307-5732 [Other edition] (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
12. Petrova, Z.O., Pazyuk, V.M., Vyshnevskyi, V.M. & Grakov, D.P. (2021). Directions for increasing the efficiency of the drying process in tunnel and combined dryers. Collection of Scientific Papers of KhDUHT, 1(33), 109-130. [Other edition] (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ..... | 19 |
| ВСТУП..... | 20 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СУШИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ..... | 26 |
| 1.1. Способи сушіння рослинної сировини..... | 26 |
| 1.2. Обладнання для зневоднення термолабільних матеріалів..... | 28 |
| 1.3. Напрямки вдосконалення сушильного обладнання та технології процесу сушіння термолабільних матеріалів..... | 53 |
| 1.4. Висновок до розділу 1..... | 55 |
| РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ..... | 56 |
| 2.1. Характеристика рослинної сировини як об'єкта сушіння..... | 56 |
| 2.2. Експериментальний стенд для дослідження процесів конвективного сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів..... | 57 |
| 2.3. Методи дослідження фізико-хімічних властивостей рослинних матеріалів..... | 59 |
| 2.3.1. Методика визначення схожості зерна кукурудзи..... | 59 |
| 2.3.2. Методика визначення вологості..... | 60 |
| 2.3.3. Методика визначення коефіцієнту набухання..... | 61 |
| 2.4. Похибка досліджень..... | 62 |
| 2.5. Висновок до розділу 2..... | 64 |
| РОЗДІЛ 3. ТЕПЛОМАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ ПРИ СУШІННІ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ..... | 65 |
| 3.1. Вдосконалення експериментального стенду для дослідження процесів конвективного сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів..... | 65 |
| 3.2. Дослідження кінетики процесу сушіння капусти білокачанної на експериментальному стенді..... | 67 |
| 3.3. Дослідження кінетики процесу сушіння капусти білокачанної на вдосконаленому стенді з інфрачервоним випромінюванням..... | 71 |

| | |
|---|-----|
| 3.4. Визначення коефіцієнту набухання і відновлюваності капусти білокачанної від режимів сушіння..... | 73 |
| 3.5. Дослідження кінетики процесу сушіння кукурудзи амілопектинової на експериментальному стенд..... | 75 |
| 3.5.1. Визначення вологості кукурудзи..... | 75 |
| 3.5.2. Дослідження процесу сушіння насіння кукурудзи..... | 76 |
| 3.6. Визначення схожості кукурудзи амілопектинової від температурних режимів сушіння..... | 87 |
| 3.7. Дослідження тепломасообмінних процесів при сушінні колоїдних капілярно-пористих матеріалів..... | 89 |
| 3.8. Висновки до розділу 3..... | 96 |
| РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ КАМЕРНОЇ СУШАРКИ З ТОВСТОПЛІВКОВИМИ НАГРІВАЛЬНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ..... | 98 |
| 4.1. Використання в камерній сушарці технології нагріву товстоплівковими нагрівальними елементами | 98 |
| 4.2. Розробка та випробування енергоефективної камерної сушарки з комбінованим нагрівом теплоносія | 101 |
| 4.3. Дослідження кінетики сушіння в камерній сушарці..... | 106 |
| 4.4. Розрахунок витрат теплоти на випаровування 1 кг вологи в залежності від температури відпрацьованого сушильного агента..... | 110 |
| 4.5. Висновки до розділу 4..... | 116 |
| ВИСНОВКИ..... | 118 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ..... | 120 |
| ДОДАТОК А. Список опублікованих праць за темою дисертації..... | 127 |
| ДОДАТОК Б. Акт впровадження..... | 130 |
| ДОДАТОК В. Акт впровадження..... | 131 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

a_m , - коефіцієнт дифузії вологи в капілярно-пористому матеріалі, м²/с;

ε - коефіцієнт фазового перетворення;

m – маса, кг;

Q – кількість теплоти, кДж;

T – температура, °С;

t – час, с або хв.;

r , - питома теплота випаровування, Дж/кг;

V – об'єм, м³;

W – відносна вологість матеріалу, %;

U - питомий вологовміст матеріалу, кг/м³

ρ - ефективна густина матеріалу, кг/м³;

λ - ефективна теплопровідність матеріалу;

δ_t - термоградієнтний коефіцієнт, кг/(м³К);

φ - відносна вологість повітря;

p_0 - тиск у пароповітряній суміші,

p_v - парціальний тиск водяної пари,

R_v ; R_a - газові сталі для водяної пари та сухого повітря відповідно.

Скорочення

ТЕН – тепловий енергонагрівач

ІЧВ– інфрачервоне випромінювання

ВПГ – викиди парникових газів

у.п. – умовне паливо

ТН – тепловий насос

АПК – агропромисловий комплекс

НЕ – нагрівач електричний

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

Процеси сушіння відносяться до складних енергоємних технологічних процесів, в кожному конкретному випадку необхідно зберігати біологічну активність, харчові властивості сировини, бактеріальні вимоги до продукту. Для галузей, які використовують процеси сушіння, характерні розсереджене енергоспоживання та низький к.к.д. використання енергії близько 40 – 50 %. [1]

Недосконалість технологічних процесів і експлуатація застарілого сушильного обладнання щорічно призводять до нераціональних витрат великої кількості енергоресурсів та значному забрудненню оточуючого середовища водяними парами, які відносяться до парникових газів. Частина витрат за енергію в загальній собівартості продукції вже досягає, в деяких випадках 70 %, і з ростом цін на паливо вона буде збільшуватись. Ціни на велику кількість продуктів будуть рости вище світових, що знизить їх конкурентну спроможність на вітчизняному і світовому ринках.

В Україні головні галузі промисловості, в яких найбільше використовуються сушильні установки це агропромисловий комплекс, хіміко-фармацевтична, будівельна індустрія, паливна та деревопереробна. Важливим чинником є їх енергоефективність та екологічна безпека.

Агропромисловий комплекс (АПК) традиційно відіграє в Україні важливу роль. Він включає в себе сільське господарство та харчову промисловість.

В сільському господарстві велика кількість сушильних установок використовується для сушки зерна. Актуальність проблеми енергозбереження при зневодненні зерна пов'язана із великими об'ємами врожаю 60 – 66 млн.т на рік. Від 50 до 80 %, а при несприятливих погодних умовах навіть 100 % щорічно вирощеного врожаю зерна підлягає сушінню. Питомі витрати умовного палива на сушіння однієї планової тонни при зниженні вологості зерна від 20 до 14 % складають 14 – 18 кг умовного палива, а електроенергії 2,5 – 3,2 кВт, тобто загальні витрати перевищують 18 кг умовного палива або більше 5000 кДж на кг

випареної вологи, чим і обумовлено низький К.К.Д. Витрати енергії на сушіння при цьому по Україні становлять біля 0,5 млн тонни умовного палива (т.у.п.). При цьому в оточуюче середовище надходить біля 3 млн т водяної пари.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно плану НДР Інституту технічної теплофізики НАН України у відділі «Тепломасопереносу в теплотехнологіях» за науковою тематикою: 1.7.1.879 «Наукові засади підвищення енергоефективності теплотехнологій при зневодненні колоїдних капілярно-пористих матеріалів» (ДР 0112U002650), 1.7.1.897 «Інтенсифікація тепломасопереносу при зневодненні колоїдних капілярно-пористих матеріалів та розроблення енергоефективного сушильного обладнання» у якій автор бере участь як виконавець, приймає участь в проведенні експериментальних досліджень, аналізі та обробці дослідних даних, підготовці публікацій.

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження - підвищення енергоефективності сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів в енергоефективній камерній сушарці шляхом застосування рециркуляції теплоносія та встановлення між зонами сушіння нових нагрівальних електричних елементів.

Для досягнення мети були поставлені та вирішені наступні задачі дослідження:

- на основі проведеного літературного огляду проаналізувати сучасний стан розвитку сушильного обладнання;
- розглянути різні методи комбінованого сушіння;
- порівняння комбінованих методів сушіння для використання при проектуванні енергоефективних сушарок;
- вдосконалити експериментальний стенд для дослідження процесів конвективного сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів шляхом монтажу в сушильній камері ламп інфрачервоного випромінювання;

- дослідити кінетику процесу сушіння капусти білокачанної на конвективно-сушильному стенді із встановленим комбінованим нагрівом теплоносія;
- визначити оптимальну температуру зневоднення амілопектинової кукурудзи;
- дослідити вплив товстоплівкових нагрівальних елементів на енергоефективність сушарки з комбінованим нагрівом теплоносія;
- дослідити витрати теплоти на випаровування 1 кг вологи в залежності від температури відпрацьованого сушильного агента.

Об'єкт дослідження: тепломасообмінні процеси при сушінні колоїдних капілярно-пористих матеріалів.

Предмет дослідження: енергоефективність процесу та якісні характеристики рослинного матеріалу.

Методи досліджень. При проведенні досліджень застосували експериментальні методи з використанням сучасних засобів вимірювання параметрів сушіння: часу проведення досліду, температури теплоносія та зменшення маси матеріалу за допомогою автоматизованої системи збору та обробки інформації в розробленій програмі "Sooshka", на спеціально спроектованому та вдосконаленому стенді для сушіння. Для обробки експериментальних даних використовувались методи математичного планування експерименту, а отримані дані оброблялись у інтегрованій системі Excel. Для оцінки якості матеріалу використані стандартні методи досліджень. Теоретичні дослідження проведені з використанням методів, що ґрунтуються на основних положеннях теорії тепло- і масообміну, теорії подібності, що оброблялись за допомогою комп'ютерних технологій.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються:

Достовірність наукових положень та висновків отриманих в дисертаційній роботі обґрунтовано методами та збігом теоретичних та експериментальних результатів досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше досліджена кінетика процесу сушіння капусти білокачанної на конвективно-сушильному стенді із встановленим комбінованим нагрівом теплоносія яка показала зменшення тривалості сушіння та підвищення якості матеріалу;
- вперше встановлено оптимальну температуру зневоднення амілопектинової кукурудзи, яка показала рівномірність прогріву матеріалу, що позитивно впливає на якість отриманого продукту;
- вперше проведені експериментальні дослідження на схожість амілопектинової кукурудзи від режимних параметрів сушіння;
- розраховані відносні коефіцієнти та коефіцієнти сушіння із узагальнених кривих сушіння та швидкості сушіння, отримані формули тривалості процесу, похибка дослідної від розрахункової не перевищує 5%;
- досліджено залежність числа Ребіндера (критерій оптимізації сушіння) який показав характер змін витрат енергії на випаровування вологи в процесі сушіння;
- вперше досліджено вплив товстоплівкових нагрівальних елементів на енергоефективність сушарки з комбінованим нагрівом теплоносія;
- досліджено витрати теплоти на випаровування 1 кг вологи в залежності від температури відпрацьованого сушильного агента.

Практичне значення одержаних результатів:

- в результаті експериментального та теоретичного дослідження модернізовано дослідний конвективно - сушильний стенд з комбінованим нагрівом теплоносія;
- розроблені режими сушіння в енергоефективній камерній сушарці з комбінованим нагрівом теплоносія;
- вперше використано товстоплівкові нагрівальні елементи в камерній сушарці з комбінованим нагрівом теплоносія;
- розроблена енергоефективна камерна сушарка з комбінованим нагрівом теплоносія на яку отриманий паспорт;

Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджується актами впровадження: 1. Апробація сушильної установки Інституту технічної теплофізики НАН України для розробки оптимальних режимів сушіння чаполочі пахучої (*Hierochloe odorata*, зубрівки). 2. Дослідження з підбору оптимального технологічного режиму по зневодненню зерна восковидної кукурудзи з використанням новітніх методів сушіння сировини для отримання аналітичних результатів та продуктів для їх подальших досліджень фізико-хімічних властивостей для оптимізації виробничих процесів.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджено заявками на одержання патенту України на винахід. № а202008082 від 17.12.2020.

Особистий внесок здобувача. Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, що виносяться на захист, отримані самостійно. Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні і доказі наукових положень, постановці та проведенні експериментальних досліджень і отриманні наукових результатів вказаних у дисертації. Підготовка доповідей та статей.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи обговорювались та отримали схвалення на XX Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання» (Київ 2021), VIII Міжнародній науковій конференції «Інноваційні енерготехнології» (Одеса 2021), XXX Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» (Київ 2022), XIX Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» (Одеса 2022).

Публікації. Основні положення та наукові результати викладено у 12 публікаціях наукових робіт, у тому числі: 5 статей у наукових спеціалізованих виданнях України, перелік яких затверджено МОН України; 1 стаття представлена у виданні, яке включено до міжнародної наукометричної бази даних

SCOPUS; 2 статті у наукових виданнях України; опубліковано 4 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій; подано 1 заявку патенту України на винахід.

Структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 132 сторінках, складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг основного тексту дисертаційної роботи становить 119 сторінок, включно 70 рисунків, 5 таблиць та 1 додаток. Список використаних джерел містить 72 найменування.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СУШИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

1.1. Способи сушіння рослинної сировини

Підрахунок витрат енергії на сушіння в різних галузях промисловості України показує, що найбільші вони в виробництві будівельних матеріалів (приблизно 2,1 млн т.у.п.), пиломатеріали, деревинна та аграрна біомаса 1,5 млн т.у.п., вугілля і торф біля 1,4 млн т.у.п., АПК біля 1,2 млн т.у.п., хімічні, фармацевтичні матеріали, папір, тканини та інш. 0,4 млн т.у.п. Разом це дорівнює 6,6 млн т.у.п. рис. 1.1.

Викиди парникових газів (ВПГ) найбільші при сушінні: 1. Вугілля і торф - 9,5 млн. тонн ВПГ; 2. АПК - 4,7 млн. тонн ВПГ; 3. Пиломатеріали, деревина та аграрна біомаса - 1,7 млн. тонн ВПГ; 4. Хімічні, фармацевтичні матеріали, папір, тканини - 1,4 млн. тонн ВПГ; 5. Будівельні матеріали - 0,6 млн. тонн ВПГ.

Загальна кількість ВПГ в навколишнє середовище щорічно становить 17,5 млн. тонн. [2]

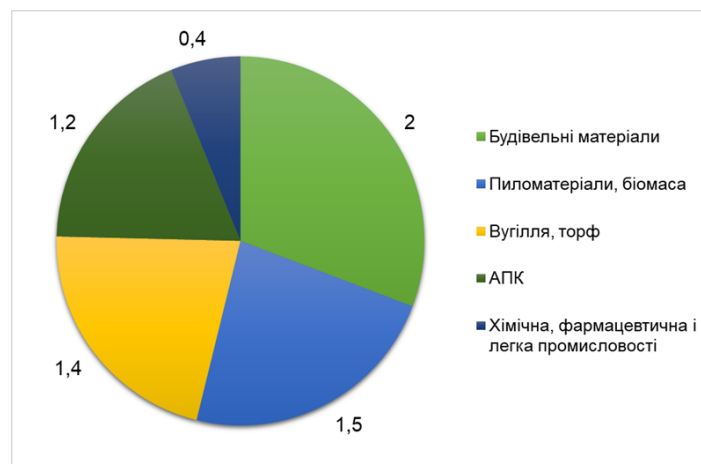


Рис. 1.1. Енергетичні витрати на процеси сушіння в різних галузях промисловості (млн. т. у.п.) [2]

Конденсаційний метод сушіння з використанням теплового насоса сьогодні в світі найефективніший як для зневоднення пиломатеріалів так і для інших матеріалів. Він найбільш термолабільний по відношенню до матеріалів, що зневоднюються, тому що своїм показникам повністю відповідає природньому сушінню. Витрати енергії на 1 кг випареної вологи в багатьох випадках нижче

теоретично можливих для теплової сушки і дорівнюють 2000 – 2200 кДж за рахунок високого коефіцієнта перетворення енергії, який може сягати 5. А також це єдиний екологічно безпечний метод сушіння, тому що вся випарена з матеріалу волога конденсується в випарнику теплового насоса і збирається у вигляді води не загрожуючи забрудненню оточуючого середовища. За цим методом майбутнє в техніці і технології сушіння.

Потенціал енергозбереження для цієї галузі оцінюється в 0,3 млн т.у.п., а скорочення викидів водяної пари в оточуюче середовище біля 0,2 млн тонн.

Гібридні технології сушіння. Гібридна технологія сушіння - це поєднання двох або більше різних процесів сушіння, які можуть забезпечити синергетичний ефект, що призводить до зменшення потреби в енергії та скорочення часу сушіння при збереженні більшості характеристик якості, наприклад смаку, поживних речовин, кольору, аромату, текстури тощо [3]. Продемонстровано, що оптимізовані комбіновані та гібридні технології сушіння мають низьке питоме енергоспоживання [4]. Потрібно створити комбіновану техніку сушіння, щоб поєднати переваги різних методів сушіння та мінімізувати обмеження кожного окремого методу сушіння. [5] Наприклад, повідомляється, що більшість методів сушіння за допомогою електромагнітного поля, таких як інфрачервоне, мікрохвильове та ультрафіолетове сушіння, покращують якість висушених продуктів із значною економією енергоспоживання та зменшують вплив на навколишнє середовище. [6,7] Вибір відповідної технології сушіння залежить від характеристик продукту, що сушиться. Пропагуються гібридні технології сушіння подолати недоліки звичайної сушки методи і мінімізують деградацію продукту і тим не менше виготовити продукт із бажаною залишковою вологою.

Комбіновані технології сушіння за допомогою сонячної енергії.

Сушка на сонці - традиційна техніка, яка використовує сонячну енергію шляхом прямого впливу для збереження швидкопсувних рослин у тропічних та субтропічних країнах. [8] Цей процес має багато недоліків: зіпсовані продукти через небажані кліматичні умови, погіршення поживності, втрата продукту через

шкідників, птахів та тварин. Крім того, процес трудомісткий і вимагає великої площі для розподілу продуктів насухо. Технологія сонячної сушки це екологічно чистий процес, який пропонує овочі та фрукти у чистому, гігієнічному та санітарному стані. Для цього рекомендується сушити в закритих камерах та використовувати сонячну інсоляцію для нагрівання повітря для сушіння у добре спроектованих сонячних колекторах. Системи сонячної енергії широко використовуються в процесах сушіння завдяки їхній простій технології та простоті складання. Вони можуть бути використані як пряма сонячна сушка, коли зразок знаходиться під прямим сонцем, як опосередкована або конвективна сонячна сушка, так і змішаний режим або гібридна сонячна сушка.

У сучасному світі розроблених технологій гібридні сонячні сушарки є альтернативною системою швидкого сонячного висушування продуктів бажаної якості. [9] У літературі було обговорено кілька гібридних сушарок, де сонячна енергія допомагала допоміжному нагрівачу повітря, [10–12], примусовій конвекції, [13–17] та хімічному тепловому насосу [18].

Гібридні технології вирішують наступні завдання:

1. Використання нової гібридної технології сушіння для економії енергії, а також для виробництва висушеного продукту без істотних втрат кольору, зовнішнього вигляду, смаку, смаку та хімічних компонентів.
2. Розробка економічно ефективних технологій, особливо для виробництва продуктів харчування.
3. Нові технології сушіння харчових продуктів можуть запобігти забрудненню навколишнього середовища.

1.2. Обладнання для зневоднення термолабільних матеріалів

В Інституті технічної теплофізики НАН України для зерносушіння розроблено конденсаційний метод зневоднення, який використовує тепловий насос (ТН). Витрати енергії на випаровування вологи в теплонасосних сушарках нижче витрат енергії ніж в існуючих сушарках в 1,5-2 рази.

Вперше в Україні нами було розроблено сушильно-енергетичний комплекс для виробництва електричної та теплової енергії на базі двигуна-генератора ДвГА-630. Запропонований комплекс забезпечує цілорічну потребу сільгоспідприємства в електричній та тепловій енергії, а також сезонну потребу в енергоносіях для тепловологісної обробки рослинної сировини, в першу чергу, зерна. Комплекс забезпечує коефіцієнт використання палива 0,94 – 0,96 та зниження енерговитрат на видалення 1 кг вологи в 1,6 рази. Питомі капітальні витрати на 1 кВт встановленої потужності знаходиться в межах 300 – 400 доларів США при терміні окупності 2 – 4 роки.

Система підготовки теплоносія на базі теплового насосу з тепловим двигуном має найвищий коефіцієнт використання палива, тому що на привід ТН використовується тепловий двигун, а відпрацьований теплоносієм сушарки є низькопотенційним джерелом енергії для ТН (рис. 1.2).

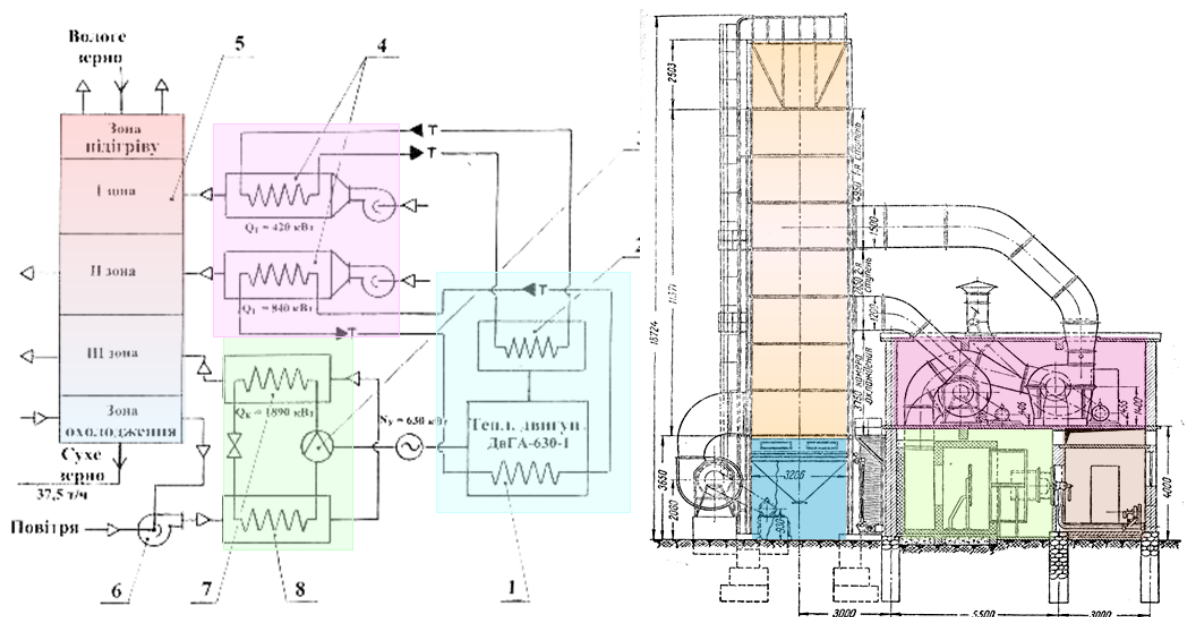


Рис. 1.2. Принципова схема теплонасосної установки на базі двигуна ДвГА-630 для зерносушарки ДСП-32:

1 – газовий двигун-генератор; 2 - теплообмінник утилізаційний; 3 – компресор теплового насосу; 4 – повітряні калорифери; 5 – конвективна 3-х зона зерносушарка; 6 – циркуляційний вентилятор; 7 – конденсатор теплового насосу; 8 – випарник теплового насосу.

Принципова схема теплонасосної установки на базі двигуна ДвГА-630 для зерносушарки ДСП-32 представлена на рис. 1.2. Енерговитрати на видалення 1 кг вологи біля 2700 кДж, що майже в 1,6 рази менша ніж в існуючому обладнанні [19].

Створена в інституті конденсаційна насіннева зерносушарка, яка використовує ТН рис. 1.3. дозволяє знизити витрату теплової енергії на випаровування 1 кг вологи на 30% від нормативних витрат для насінневого зерна, забезпечує схожість насіння на рівні 100% і є екологічно безпечною, тому що вся випарена волога конденсується в випарнику ТН [20].

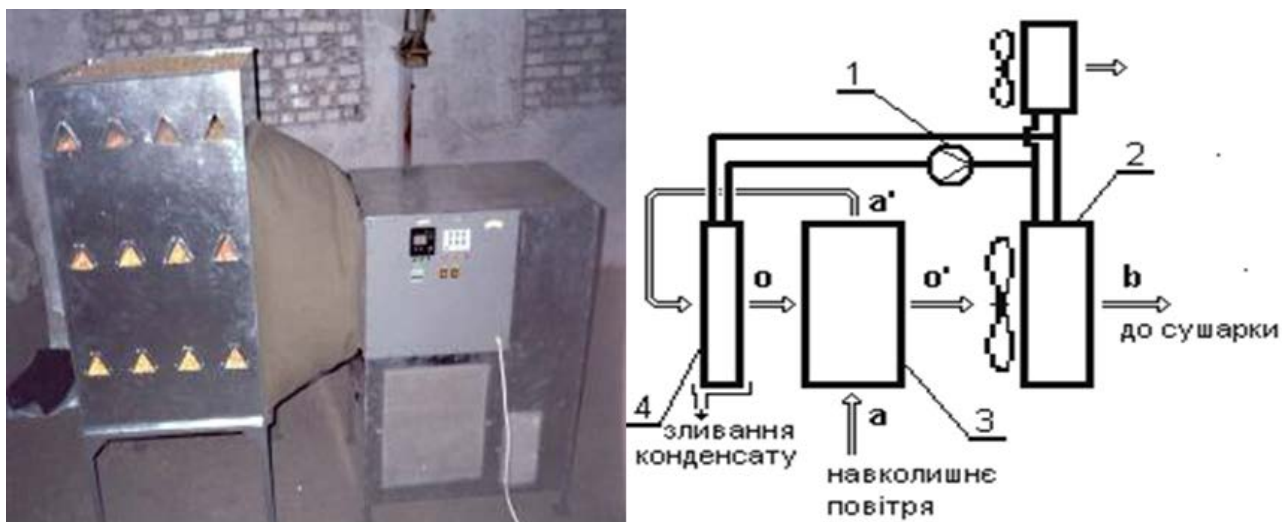


Рис. 1.3. Конденсаційна зерносушарка:

- 1 – компресор; 2 – повітряний конденсатор; 3 – рекуператор;
4 – випарник.

Загальний потенціал енергозбереження при сушінні зернових та зернобобових культур біля 0,2 млн т.у.п., а зменшення водяної пари, яка надходить в навколишнє середовище дорівнює при цьому 0,9 млн тонн.

Другою по значенню «галуззю сушіння» в АПК є виробництво сушених овочів, фруктів, їх вичавок, бурякового жому, макаронних виробів та інших харчових продуктів.

Виробництво тільки свіжих овочів, їхніх вичавок та бурякового жому складає 22 - 26 млн т на рік. Сушінню, за нашими розрахунками, підлягає не менше 10 % сільськогосподарської сировини. Витрати енергії на її сушіння становлять понад 0,7 млн т. у. п. В оточуюче середовище надходить понад 1,7 млн тонн водяної пари.

В інституті розроблено багатостадійний метод сушіння рис. 1.4. Суть методу полягає в застосуванні в процесах сушіння максимальної температури теплоносія на всьому процесі зневоднення і вона залежить від максимально допустимої температури матеріалу. Багатостадійні режими сушіння знижують питомі теплові витрати на випаровування 1 кг вологи на 15-25 % [21].

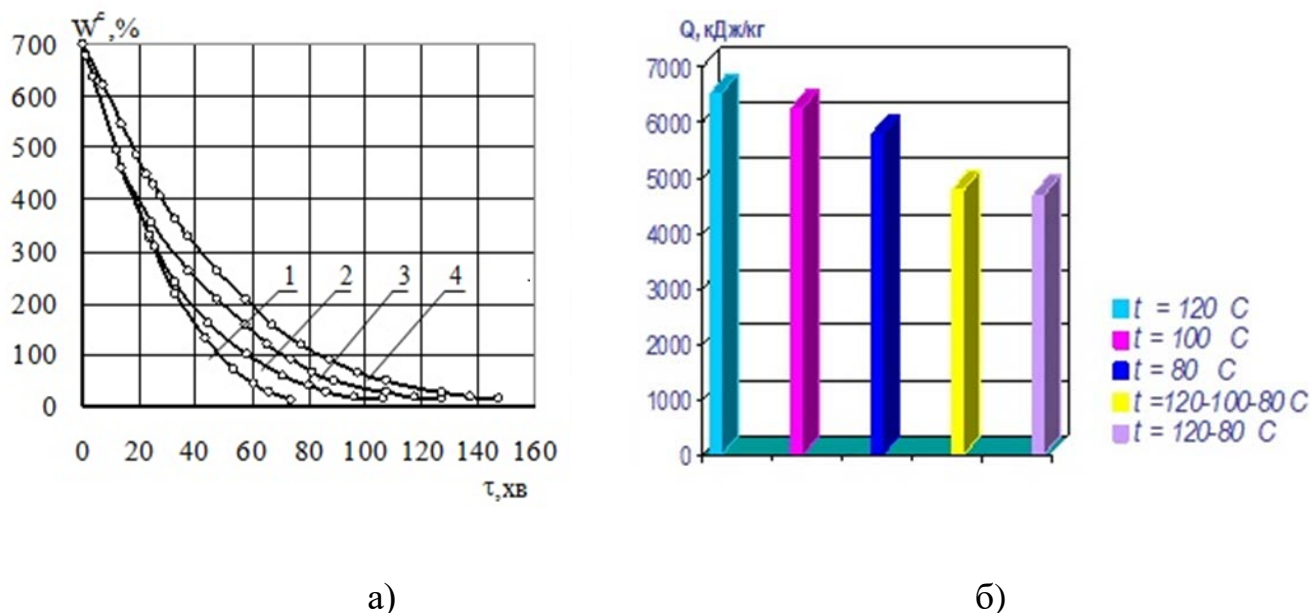


Рис. 1.4. Багатостадійне сушіння:

а) стадійні режими сушіння: столовий буряк $V = 1 \text{ м/с}$; $d = 10 \text{ г/кг}$ сухого повітря; $g = 6,3 \text{ кг/м}^2$; 1 – $120 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $120 \dots 100 \dots 80 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $120 \dots 80 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

б) питомі теплові витрати на випаровування 1 кг вологи.

Для використання цього методу сушіння створенні багатозонні тунельні сушарки потужністю від 0,1 до 1,1 т/год по сировині рис. 1.5. В кожній зоні такої сушарки підтримується окремий температурно-вологісний режим зневоднення.

Витрати енергії на 1 кг випареної вологи в 1,5-2 рази нижчі за існуючі аналоги [22].

Для зневоднення рослинної сировини в умовах високовологого клімату створено чотирьохзонну сушарку на теплогенераторах і використанням ТН в кінцевій 4-х зоні сушарки. Це дозволило в високовологих кліматичних умовах В'єтнаму вперше в світі отримати натуральні харчові порошки з ананасів і бананів, та на 10-15% знизити витрати енергії на сушарках такого типу.



Рис. 1.5. Зовнішній вигляд двозонної сушарки.

Для реалізації багатостадійного методу сушіння створена багатозонна стрічкова сушарка рис. 1.6. Вона має зону високотемпературної вологої обробки матеріалу, вісім температурних та зону охолодження. Потужність сушарки 1,2 тонни сировини на годину. Витрати теплоти на 1 кг випареної вологи у 1,4-2,7 рази нижчі порівняно з існуючими аналогами [23].

Загальний потенціал енергозбереження при сушінні фруктово-овочевої сировини і бурякового жому біля 0,2 млн т.у.п, в оточуюче середовище при цьому надходить 0,5 млн тонн водяної пари.

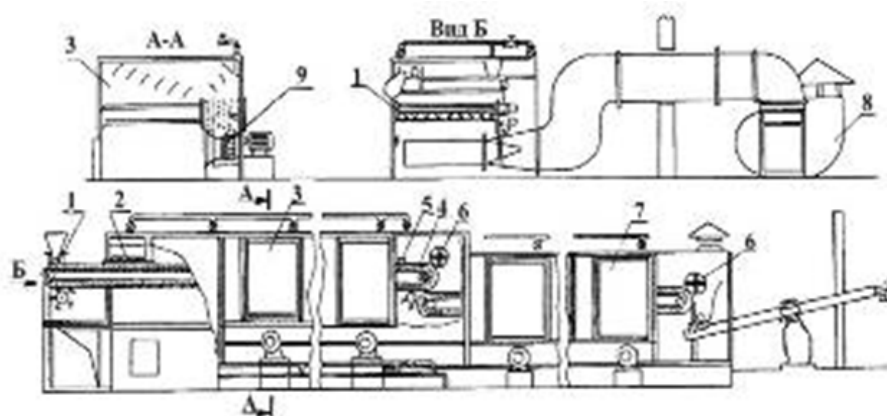


Рис. 1.6. Багатозонна стрічкова сушильна установка:

- 1 – шнек-розкладник; 2 – зона гіротермічної обробки; 3 – зона сушіння;
4 – сушильна стрічка; 5 – розпушувач; 6 – скидач; 7 – зона охолодження;
8 – викидний вентилятор; 9 – вентилятор сушильної зони.

В Україні великий «парк» випарних та розпилюючих сушарок, які працюють в харчовій та хіміко-фармацевтичній промисловості. На них виробляють тисячі тонн цукру, сухого знежиреного і цільного молока, підсирної сироватки, розчинної кави, пеніциліну, стрептоміцину та інше. В більшості випадків на ці процеси сушіння витрачається в 2,5 – 3,0 рази більше енергії, ніж необхідно для перетворення вологи в пару. Витрати енергії на ці процеси складають 0,2 – 0,3 млн т.у.п. і в оточуюче середовище надходить біля 0,6 млн тонн водяної пари.

В інституті створені ступеневі випарно-сушильні агрегати розпилюючої дії. Використання цього обладнання дозволяє одночасно вирішити: збереження БАР при зневодненні термолабільних матеріалів; концентрування розчинів; збільшення виходу продукту за рахунок процесу «мокрого» вловлювання; вирішення питань захисту навколишнього середовища та скорочення теплових витрат на 18-25%.

Потенціал енергозбереження при сушінні на розпилюючих сушарках харчових та хіміко-фармацевтичних продуктів та матеріалів становить біля 0,05 млн т.у.п. в оточуюче середовище при цьому надходить біля 0,2 млн тонн водяної пари.

В промисловості будівельних матеріалів сушарки використовують при виробництві цегли та керамічної облицювальної плитки (рис. 1.7.). Виробництво їх в Україні досягає 6 млрд. шт. умовної цегли на рік. Будівельна промисловість традиційно використовує для сушіння цегли тунельні сушарки в середньому потужністю 300 штук умовної цегли на годину або до 1 т/год по сухому матеріалу. Питомі витрати енергії на 1 кг випареної вологи біля 6000 кДж, що перевищують нормативні на 50 – 60 %. Витрати енергії при виробництві будівельних матеріалів в Україні перевищують 2 млн т. у. п., при цьому в оточуюче середовище надходить біля 0,6 млн тонн водяної пари.

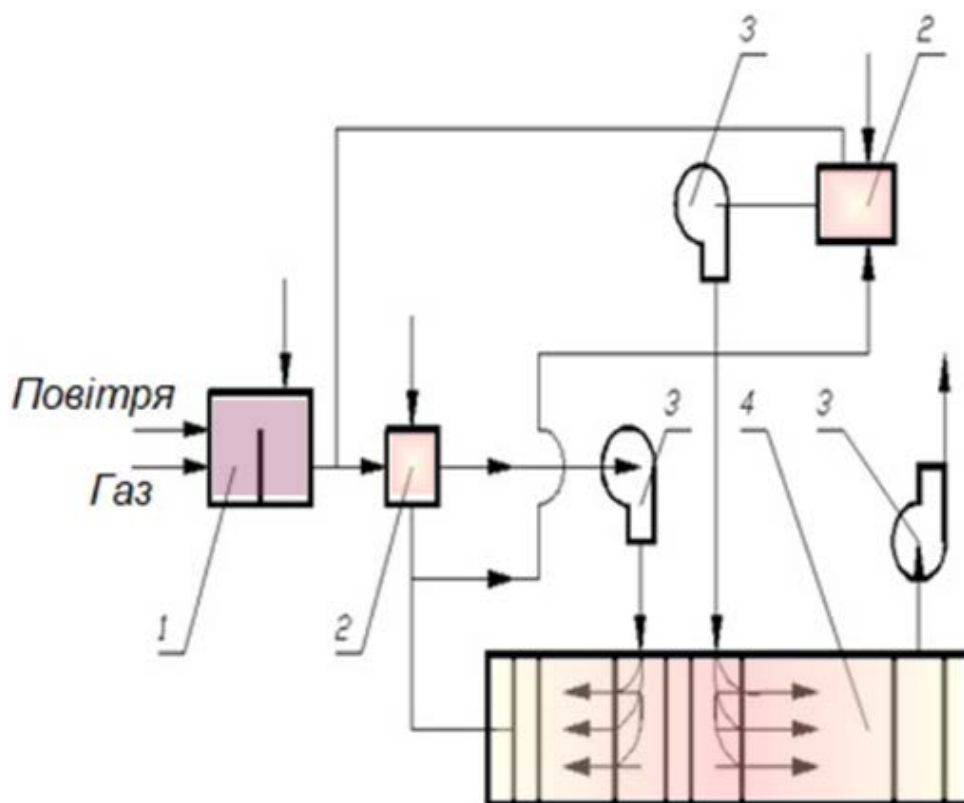


Рис. 1.7. Двоступенчата установка для сушіння цегли пластинчастого формування: 1 – теплогенератор; 2 – повітря-розподільники; 3 – відцентрові вентилятори; 4 – сушарка.

Розроблений в інституті високотемпературний високовологий метод сушіння дозволяє значно підвищити внутрішній перенос вологи з внутрішніх шарів матеріалу до його поверхні за рахунок підвищення температури матеріалу в період постійної швидкості сушки, тим самим інтенсифікує процес більше ніж в 2 рази.

Потенціал енергозбереження при сушінні будівельних матеріалів біля 0,7 млн т.у.п. та зменшення викидів водяної пари в оточуюче середовище можливо на 0,2 млн тонн.

Сушіння в підготовці палива (вугілля, торф) до використання обумовлено їх достатньо великою вологістю після видобування. Так початкова вологість вугілля 28 – 43 %, а торфу 40 – 50 %, а згідно вимогам до транспортування залізничним транспортом вологість не повинна перевищувати 7,5 %. В Україні використовують близько 50 млн тонн цього палива. Сушильна техніка представлена барабаними сушарками, сушарками киплячого і зваженого шару, а також пневмосопловими і трубними сушарками.

Питомі витрати енергії становлять до 6300 кДж на 1 кг випареної вологи, що обумовлено потужністю (90 – 400 т/год), зносом та неефективністю сушарок. Витрати енергії при сушінні вугілля та торфу становлять біля 1,4 млн т.у.п. в оточуюче середовище надходить 9,5 млн тонн водяної пари.

Розроблені енергоефективні конструкції пневмосушарок з комбінованим рухом теплоносія та проміжною стадією подрібнення рис. 1.8. Це забезпечує зниження питомих енерговитрат до 20%.

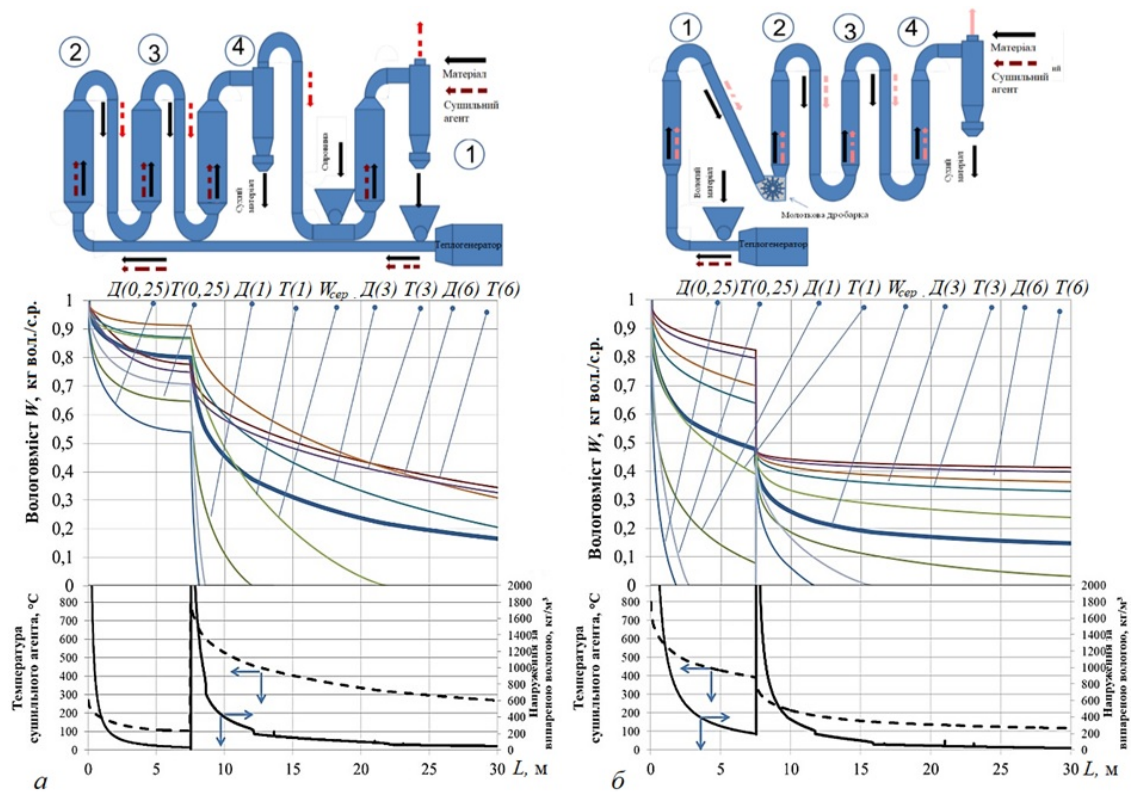


Рис. 1.8. Пневмосушарка для зневоднення палива: а – схема з розширенням висхідних каналів та комбінованим рухом сушильного агента; б – схема сушарки з проміжною стадією подрібнення.

Потенціал енергозбереження при сушінні палива до 0,4 млн т.у.п. при можливому скороченні надходження водяної пари в оточуюче середовище біля 2 млн тонн.

В Україні вирощується значна кількість лісів, що дозволяє виготовляти щорічно біля 2 млн m^3 пиломатеріалів. На лісопильних заводах обсяги сушіння складають не менш ніж 80 % обсягу виготовляємих пиломатеріалів, а пиломатеріали внутрішнього ринку повністю підлягають сушінню. Сушильна техніка цієї галузі має, в основному, застарілі сушарки періодичної і безперервної дії широкого діапазону потужності від 10 – 20 m^3 до 200 – 300 m^3 . Питомі витрати теплоти на випарювання 1 кг вологи знаходяться в діапазоні від 4000 до 8000 кДж. Загальні витрати теплоти в цій галузі біля 1 млн т.у.п., а в оточуюче середовище викидається приблизно 0,6 млн тонн водяної пари (ВП).

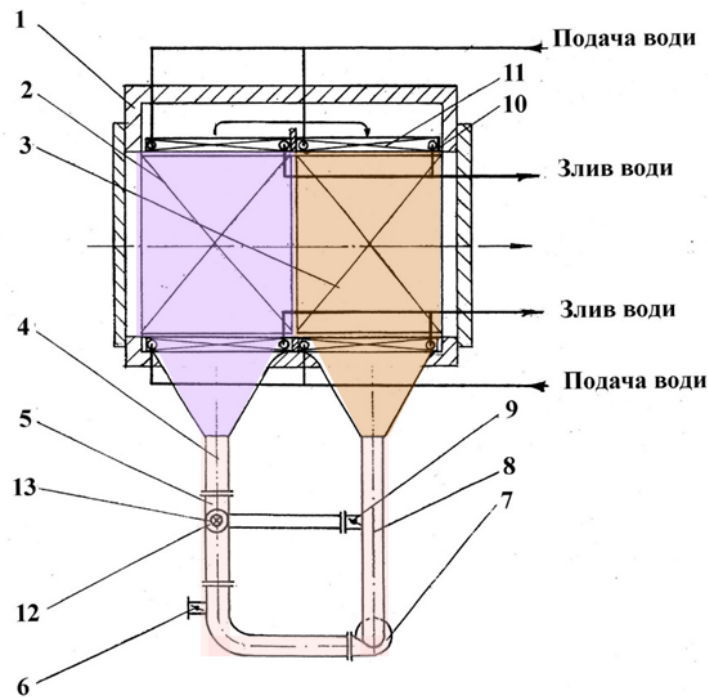


Рис. 1.9. Геотермальна сушарка: 1 – сушильна камера; 2,3 – візки; 4,5 – повітропроводи; 5 – теплогенератор; 6,9 – патрубок із заслонкою; 10,11,14,15 – калорифери; 12 – утилізатор теплоти; 13 – димова труба.

Розроблена енергоефективна геотермальна сушарка тунельного типу на водяних калориферах, в якості палива використовують термальну воду з температурою 45-70 °С. Витрати енергії в цій сушарці тільки на привід вентилятора і циркуляційного насоса для геотермальної води і тому значно нижчі ніж в аналогічних сушарках працюючих на парових калориферах рис. 1.9.

Тунельні сушарки широко використовуються в виробництві сушених плодів в США, Франції, Румунії та в ін. країнах. Вони використовуються для сушіння кускових (штучних) продуктів (хліб, нарізані овочі та фрукти, яблучні вижимки і т. ін.) [24].

Тунельна сушарка це поєднання двох або більше шаф сушарки в послідовному розташуванні всередині тунелю. В тунельних сушарках можна проводити сушіння великих обсягів сировини та використовувати менше енергії у

порівнянні з потужністю, яку має кожна сушильна шафа при окремій її експлуатації.

Класифікацію тунельних сушарок можна провести наступним чином:

1. За способом подачі сушильного агенту в робочий канал сушарки поділяються на:

- прямоточні – потік теплоносія переміщується паралельно руху візків з сировиною; температура теплоносія максимальна на вході в сушильний канал;
- протиточні – теплоносій рухається назустріч візкам з сировиною; максимальна температура реєструється на виході візків з сушарки;
- комбіновані – прямоточно-протиточні двохзонні сушарки;
- з перехресним потоком теплоносія – потік направлений перпендикулярно руху продукту; теплоносій в кожній зоні циркулює автономно, підтримуючи задані параметри.

2. За організацією сушильного процесу:

- викид відпрацьованого сушильного агенту назовні;
- з рециркуляцією сушильного агенту;
- з розподіленою подачею сушильного агенту;
- з додатковим підігріванням сушильного агенту в сушильній камері.

3. За способом нагрівання сушильного агента:

- з електричними нагрівачами;
- вогневими калориферами;
- паровими калориферами;
- водяними калориферами.

4. За кількістю сушильних зон:

- однозонні;
- багатозонні.

5. За видом сушильного агенту:

- повітряна;
- газова;

- газоповітряна;

- парова

6. За режимом роботи сушильної установки:

- періодичної дії;

- безперервної дії;

- циклічної дії.

Основним недоліком є використання ручної праці при завантаженні піддонів з матеріалом; використання топкових газів, що в свою чергу може викликати утворення канцерогенних речовин; а також паралельний рух повітря і матеріалу при цьому зменшується контакт і теплообмін між ними.

За кордоном дослідники вивчали сушіння в тунелях. Касерес-Уамбо та Менегаллі [24] працювали над моделюванням та оптимізацією напівнеперервних тунельних сушарок для фруктів, Маруліс та Саравакос [25] також працювали над моделюванням та проектуванням процесів сушіння, а Чоу та ін. [26] досліджували сушіння харчового продукту в тунельній сушарці, Ajala et al., [27] працював над статистичним моделюванням та моделюванням процесу сушіння в тунелях. Однак, за даними Nindo, et al., [28] та Abonyi, et al., [29], ефективність тунельної сушарки становить 38-42%.

На рис.1.10. представлена схема тунельної сушарки з розподіленням повітрям, що складається з вентилятора, підігрівача, тунелю по якому рухаються візки. Візки рухаються протитоком з напрямком руху нагрітого повітря, що значно інтенсифікує процес.

При дослідженні процесу сушіння в даній сушарці особливу увагу приділяли впливу факторів на тривалість сушіння, зокрема вплив відносної вологості повітря, швидкості руху повітря та температури теплоносія.

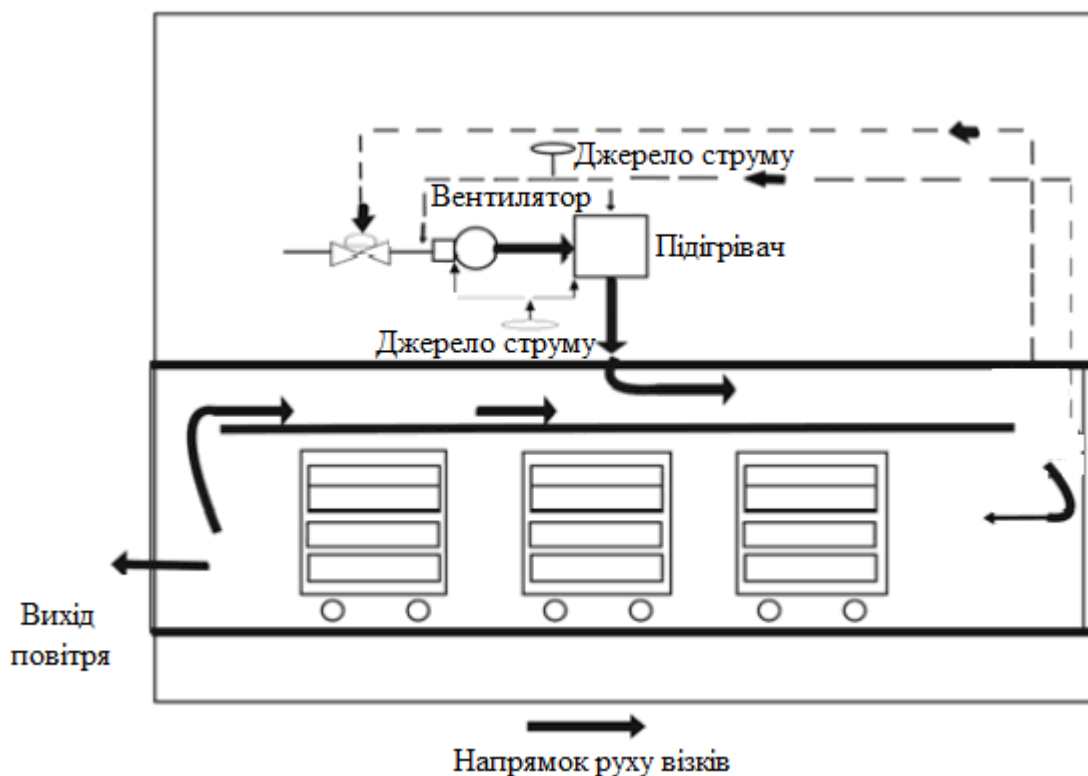


Рис.1.10. Схема тунельної сушарки з розподіленням повітря.

При дослідженні процесу сушіння рослинних матеріалів в тунельних сушарках дослідники досліджували наступні фактори:

1. Вплив відносної вологості повітря на тривалість сушіння.

На рисунку 1.11а, вологість зростала, коли візок переходив з менш гарячого напрямку на більш гарячий; це пов'язано з тим, що, коли холодний матеріал обдувався гарячим повітрям, швидкість видалення вологи була вищою. Дійсно настільки вище, що він перевищив термодинамічний ефект підвищення температури при зменшенні відносної вологості. Звідси зросла вологість повітря. На відміну від цього, на рисунку 1.11б показано, що при одночасному висушуванні вологість зменшується із часом сушіння.

Вологість повітря впливала на сушіння, оскільки чим вища вологість повітря, що сушиться, тим довша тривалість сушіння. Це саме спостереження було повідомлено з попередніх досліджень Касерес-Уамбо та Менегаллі [24]. Інша функція відносної вологості повітря полягає в тому, що збільшення

відносної вологості повітря зменшило б градієнт тиску водяної пари між поверхнею матеріалу та навколишнім повітрям, тим самим зменшуючи швидкість зовнішнього масообміну. На відміну від цього, зменшення відносної вологості повітря, що сушиться, збільшить градієнт між поверхнею матеріалу та навколишнім повітрям, а отже, і швидкість висихання, як повідомляють Heldman and Hartel [30].

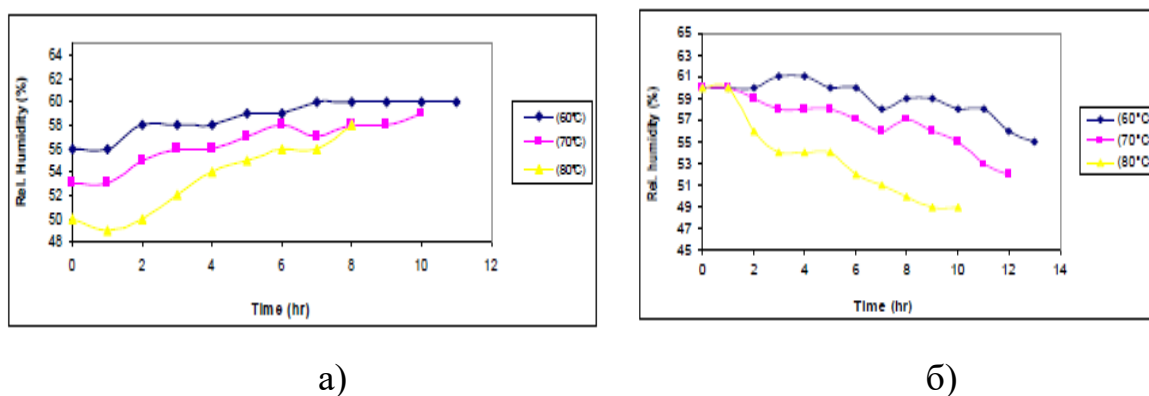


Рис. 1.11. Вплив відносної вологості повітря на тривалість сушіння в тунельній сушарці при прямотоку (а) та протитоку (б) в сушильній камері при сушінні чипсів із маніоки

2. Вплив швидкості руху повітря на тривалість сушіння.

Кілька дослідників вивчали вплив швидкості руху повітря на швидкість висихання різних зразків їжі (Ajala et al., [31]; Kashaninejad et al., [32], Bullent et al., [33], Marque et al., [34] та Nurul-Asyikin et al., [35]). У цих дослідженнях повідомлялося, що швидкість повітря не впливала так швидко, як температура. Однак Касанінежад та ін. [32] встановили, що вплив швидкості руху повітря був більш вираженим у випадку низької температура сушіння при 25 °C або нижче.

3. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння.

Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння в тунельній сушарці представлено на рисунку 1.12а та 1.12б, було показано, що на висихання 2 кг стружки при температурі 60°C в протиточному режимі пішло 11 годин, тоді як 13 годин для висушування тієї ж маси при 60°C при прямоточному.

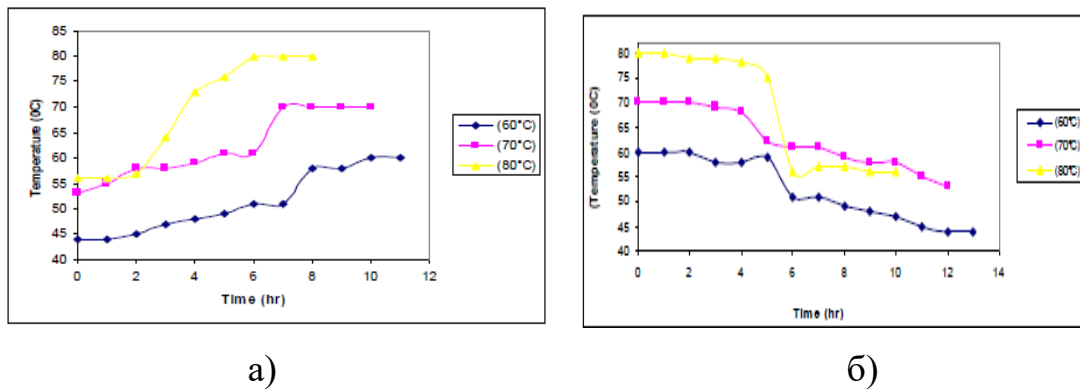


Рис. 1.12. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння в тунельній сушарці при прямотоку (а) та протитоку (б) в сушильній камері при сушінні чипсів із маніоки.

Суть у тому, що при протитоку зазвичай сушіння займає менше часу, ніж при прямотоці, і це підтвердило роботу інших дослідників, таких як Sing and Heldman [35]. Кінетика в значній мірі залежить від температури харчових продуктів, як повідомляють Ajala et al., [36]. Температура всередині продукту змінює активність води і впливає на інші фактори, такі як приховане тепло випаровування вологи, яке змінюється залежно від температури. Підвищення температури повітря покращує сушіння, впливаючи як на зовнішні, так і на внутрішні механізми потоку вологи. Однак надзвичайно високі температури можуть спричинити втрату якості продукту.

Ефективність сонячної тунельної сушарки оцінювали для сушіння часнику, чилі, пажитника та цукерок аонли відповідно до їх наявності. На сушіння продуктів пішло 4-8 днів. Температура в тунелі завжди була вищою, ніж стартові умови. На рис. 1.13 показана сонячна тунельна сушарка в умовах повного завантаження.



Рис. 1.13. Сонячна тунельна сушарка в умовах повного завантаження при завантаженні часником, перцем чилі, пажитником та агрусом амла.

З рисунка 1.14 видно, що швидкість сушіння була вищою при більш високому вмісту вологи і зменшувалась із зменшенням вмісту вологи. На початковій стадії сушіння вміст вологи був високим, і більше вологи випаровувалось із зовнішньої поверхні. У міру продовження процесу сушіння кількість вільної вологи, яка є на поверхні, зменшується і відбувається менше випаровування, а отже, швидкість сушіння значно зменшується із часом сушіння, а також вмістом вологи.

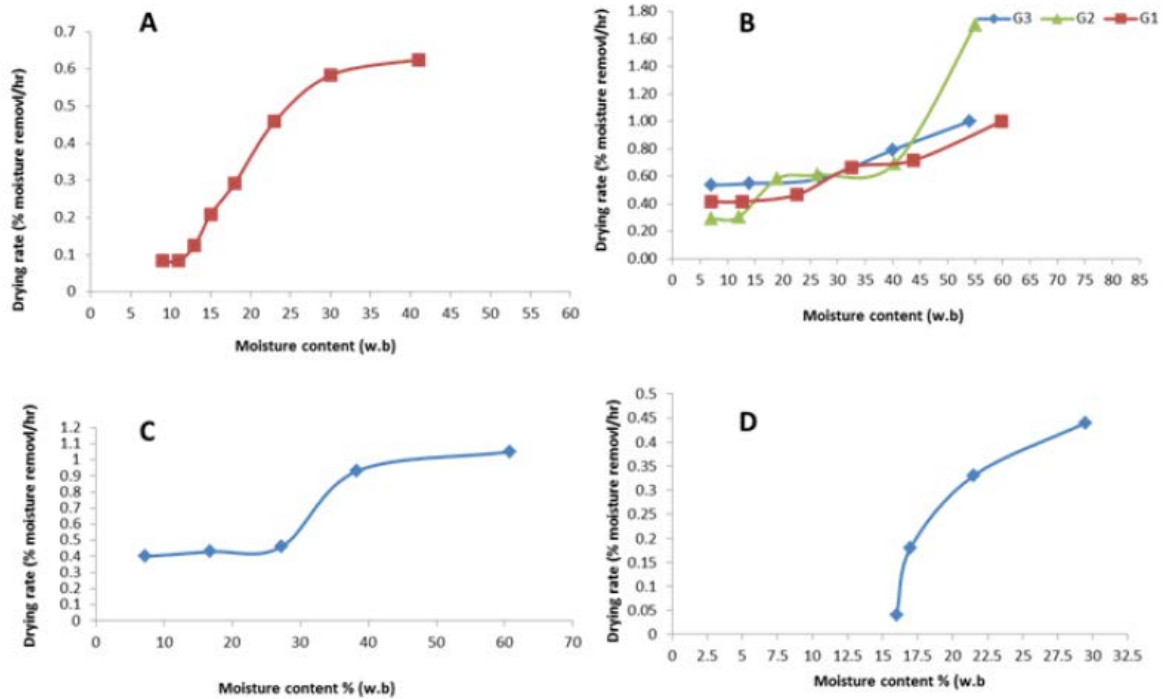


Рис.1.14. Зміна швидкості сушіння від вмісту води матеріалу:
 (а) часник, (б) червоний перець, (с) пажитник та (д) агрус амла.

Температура всередині сушарки була оптимальною для сушіння. Більш висока температура не є корисною для деяких харчових продуктів, як Vega-Galvez et al. [38] та Turhan et al., [39] припускають, що для сушіння використовують температуру вище 70°C.

Сонячно-інфрачервона сушарка. Доведено, що поєднання інфрачервоного (ІЧ) випромінювання з іншими методами сушіння має синергетичний ефект. Гібридна інфрачервоно-ліофільна сушка [40] ефективно застосовується для підвищення ефективності зневоднення. [41] Інфрачервоне сушіння засноване на дії ІЧ випромінювання від джерела тепла, що підвищує його температуру та сприяє випаровуванню води. [42] Під час сушіння інфрачервоні промені потрапляють у вологий зразок на глибину і підвищують температуру, не нагріваючи навколишнє повітря. Хоча інфрачервоне випромінювання може прискорити процес сушіння, чутливі до нагрівання матеріали, такі як сільськогосподарські матеріали, можуть бути пошкоджені разом із погіршенням якості, якщо інтенсивність випромінювання неправильно застосовувати. [43].

Експериментальна сонячно-інфрачервона установка складалася з трьох секцій, сонячного колектора, сушильної шафи, регулятора температури виробу, димоходу, джерела інфрачервоного випромінювання, контролера потужності інфрачервоного випромінювання та фотовольтажної панелі. Принципова схема цієї сушарки показана на рис. 1.15 [44].

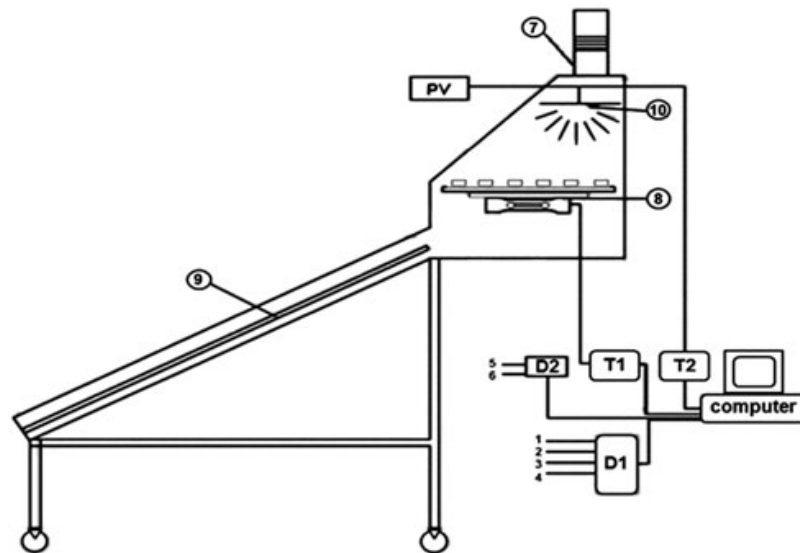


Рис.1.15. Схема сонячно-інфрачервоної сушарки [48]:

1 – 4 – датчики температури; 5,6 – датчики вологості та температури;
 7 – димохід; 8 – тензодатчик; 9 – алюмінієва абсорбуюча пластина;
 10 – інфрачервоне джерело. PV – фотоелектрична панель. D1 – реєстратор даних температури. D2 – реєстратор даних температури та вологості.

T1 – тензодатчик. T2 – ватметр.

Споживання електричної енергії допоміжної сушарки за допомогою фотоелектричної системи було зменшено мінімум на 40% і максимум на 69%. Ziaforoughi та ін. [44] досягли мінімальної та максимальної електричної енергії від 6,44 до 15,66 МДж / кг. Сушіння скибочок картоплі проводилось при температурі теплоносія 50, 60 та 70°C.

Сонячно-інфрачервона сушарка з рекуператором теплоти. Інфрачервона сушарка з рекуперацією сонячного тепла (SHRAIRD) складається з трьох блоків, включаючи сушильну камеру, сонячний повітряний колектор (SAC) та блок рекуперації тепла (рис. 1.16) [45].

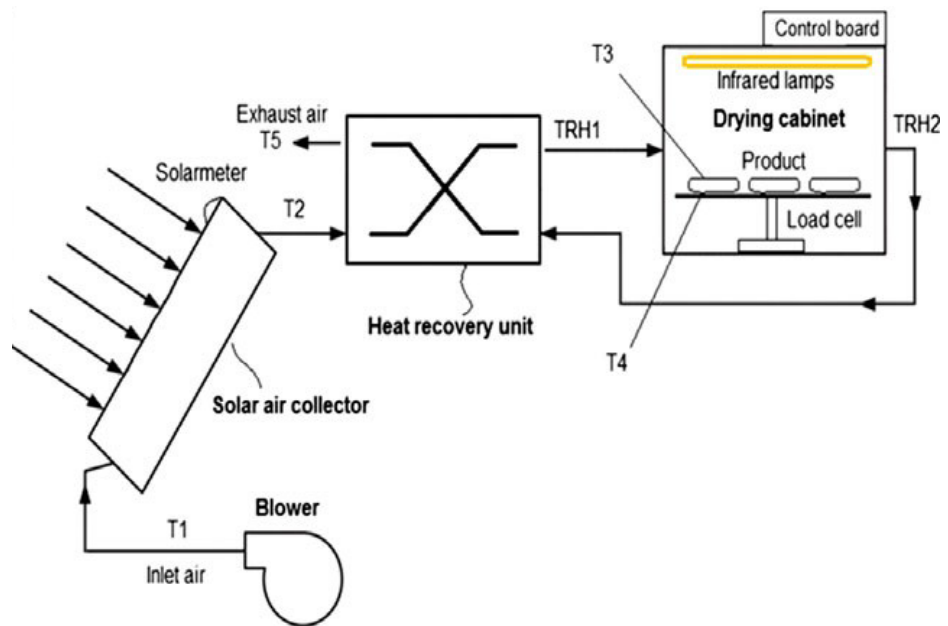


Рис. 1.16. Інфрачервона сушарка із підтримкою сонячної рекуперації (SHRAIRD) [45]

Споживання енергії можна зменшити, поєднавши сонячний колектор з блоком рекуперації тепла в інфрачервоній сушарці. Скибочки дині сушили від 9 г води / г сухої речовини до 0,044 г води / г сухої речовини вмісту вологи. Сонячний колектор та блок рекуперації тепла в значній мірі зменшили споживання енергії без будь-яких небажаних наслідків для якості продукту. Спочатку повітря нагрівали в сонячному повітряному колекторі, потім температуру повітря підвищували, проходячи через блок рекуперації тепла в сушильну камеру. У сушильній камері шість стержневих типів біля інфрачервоних ламп, кожен з яких випромінює, були встановлені в три ряди.

Сонячно-інфрачервона сушарка показала чудові характеристики завдяки внеску сонячної енергії та рекуперації тепла. Експерименти проводились при температурі поверхні продукту 50–60°C. Середні значення в сонячному повітряному колекторі отримані як 7,45 МДж / кг при 50°C та 11,23 МДж / кг при 60°C. Час сушіння нарізаної дині становить 510 хв та 400 хв при 50°C та 60°C відповідно. Відповідно, час висихання зменшувався при більш високій температурі поверхні продукту. Порівняння кількох умов сушіння показало, що

50°C було визнано найкращим з точки зору споживання енергії, тоді як 60°C було визнано найкращим з точки зору часу сушіння.

Конвективна сушарка з інфрачервоним випромінюванням. Конвективна сушарка з інфрачервоним випромінюванням складається з сушильної камери в якій знаходяться лотки з матеріалом з встановленими нагрівальними лампами з інфрачервоним випромінюванням та вентилятором. Для зміни режиму сушіння передбачені перемикачі, що регулюють оберти вентилятора та інтенсивність випромінювання (рис.1.17).

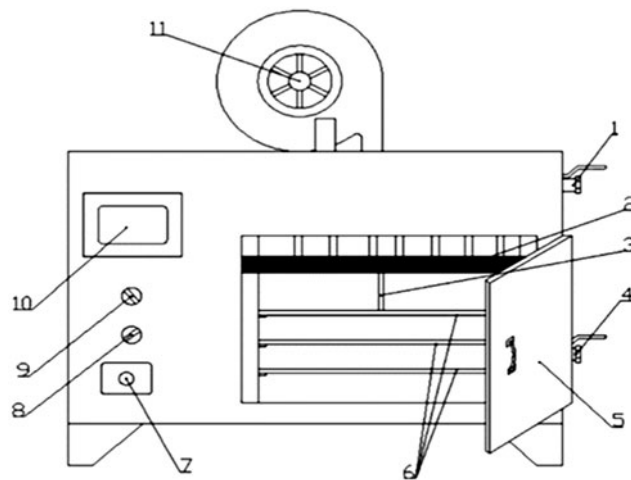


Рис. 1.17. Конвективна сушарка з інфрачервоним випромінюванням:

- 1 – забір повітря; 2 – радіаційна трубка; 3 – датчик температури;
4 – вихід повітря; 5 – двері; 6 – навантажувальний матеріал; 7 – регулятор повітря;
8 – перемикач (регулятор вентилятора); 9 – перемикач (регулююча нагрівальна трубка); 10 – екран дисплея; 11 – вентилятор [46].

Інфрачервоно-мікрохвильова сушарка. Мікрохвилі - це електромагнітні хвилі з довжиною хвиль від 1 м до 1 мм, з частотами від 300 МГц до 300 ГГц відповідно [46,47]. Найбільша загальна частота мікрохвильовок, що використовуються, становить 915 МГц для промислового застосування та 2450 МГц для комерційного, побутового та промислового використання в більшості країн. [48].

Сушіння в мікрохвильовій печі має багато переваг щодо звичайних методів сушіння, таких як швидка інтенсивність зневоднення, [49] можливість отримання точного конденсату [50]. Оптимальними умовами для щільності потужності, температури повітря та швидкості були 0,30 Вт/г, 89,9°C і 0,50 м/с, питоме споживання енергії складає 0,02 МДж/кг, 25,08 мг/100 г аскорбінової кислоти та 10,3 хв сушіння.

Існують методи комбінованого інфрачервоно-мікрохвильового сушіння. На рис. 1.18 представлена схема комбінованої інфрачервоно-мікрохвильової сушарки для гарячого повітря, яка дозволяє проводити нагрівання в два етапи.

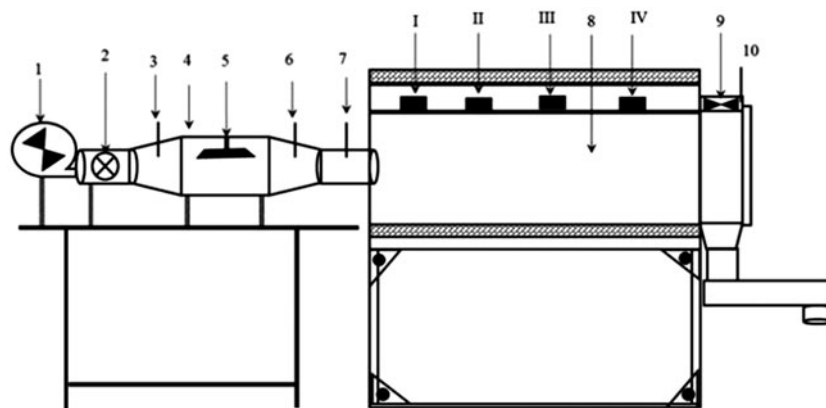


Рис. 1.18. Принципова схема комбінованої інфрачервоно-мікрохвильової сушарки для гарячого повітря.

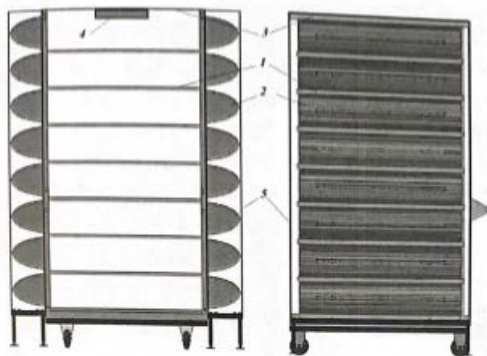
1 – вентилятор; 2 – клапан регулювання повітряного потоку; 3 - датчик температури вхідного повітря (термопара типу К); 4 - камера повітряного нагріву; 5 - ІЧ лампа (ІЧ лампа FSC , 1000 Вт, 230 В) для нагрівання повітря; 6 - датчик температури на виході (термопара типу К); 7 - анемометр для вимірювання швидкості повітря; 8 - сушильна камера; 9 – витяжний вентилятор; 10 - датчик температури повітря та вологості на виході.

I, II, III та IV - магнетрони (по 1 кВт кожен) [51].

Інфрачервона сушка гарячим повітрям зменшує питоме споживання енергії порівняно із звичайною сушкою, зберігаючи якість продукту. Завершення сушіння скибочок лимона, висушених на гарячому повітрі, проводилося методом мікрохвильової сушки гарячим повітрям.

Антал та ін. [52] досліджували три методи сушіння, тобто сублімаційне сушіння з температурою в камері 23°C, сушіння середньо-інфрачервоним заморожуванням та сушіння в інфрачервоному режимі для сушіння кубиків груші при чотирьох різних температурах сушіння (40, 50, 60 і 70°C). Застосування суцільної інфрачервоної сублімаційної сушки підвищило швидкість сушіння та значно зменшило питоме споживання енергії для зразків груш. Швидкість зневоднення для кубиків груші була вищою, ніж для сублімаційного сушіння, і була нижчою, ніж для інфрачервоного режиму. Загальний час висихання, необхідний для методів середньо-інфрачервоним заморожуванням становив 720—1080 хв, що на 43—14% менше порівняно з чистим сублімаційним 1260 хв.

На рис. 1.19. показаний пристрій для інфрачервоного сушіння. [53] Пристрій має від 8 до 18 ярусів, на кожному із яких встановлені 2 дотичних між собою лотки розміром 500x1000 мм. Лотки виконані у вигляді дерев'яної рами із рейок поперечним перерізом 20x30 мм, на яку натягнута сітка із оцинкованого дроту.



- 1 – сітчастий лоток;
- 2 – бічний відбивач;
- 3 – верхній відбивач;
- 4 – витяжний вентилятор;
- 5 – корпус.



Рис. 1.19. Багаторярусний шафний пристрій для інфрачервоного сушіння.

Лотки встановлюються на направляючі кутники. Корпус оснащений повітряпроводами та блоком із шести витяжних вентиляторів. Внутрішні бокові стінки корпусу пристрою виконані дзеркально відбиваючими.

Корпус розміщений на візку і встановлений між двома секціями, обладнаними випромінювачами – блоками що складаються із трьох джерел випромінювання і бокового дзеркального відбивача. Джерелами випромінювання є газонаповнені лампи розжарювання потужністю 100 – 150 Вт. Всі дзеркальні поверхні виконані із дзеркально полірованого листового алюмінію товщиною 0,4 – 0,5 мм.

Для завантаження пристрою візок з лотками витягують із простору між секціями випромінювачів, витягують лотки із направляючих кутників. Висота шару продукту сушіння становить 20 – 50 мм.

Теплонасосна сушильна шафа ТНШ-4 (рис. 1.20.) призначена для сушіння термолабільних матеріалів із застосуванням теплонасосних циклів.

За допомогою теплонасосної сушарки можливо здійснювати зневоднення різноманітних матеріалів рослинного та тваринного походження, синтетичних матеріалів і виробів, лікарських трав та грибів, овочів, фруктів.

Сушіння відбувається у замкнутому циркуляційному контурі з вимушеним осушенням сушильного агенту методом конденсації вологи і утилізації теплоти конденсації, яка використовується для випаровування холодильного агенту.

У теплонасосній сушильній шафі зневоднювальний матеріал розміщують на піддонах 1 (рис. 1.20.) і завантажують до сушильної камери 2 (у технологічний відсік), де циркулює гарячий сушильний агент [54]. При вмиканні циркуляційного вентилятора, теплонасосного агрегату та інфрачервоних нагрівачів 9 потік сухого повітря з температурою (60 °С), яку задають на пульті управління, направляють до технологічного відсіку, де потік проходить над вихідним матеріалом. Проходячи над матеріалом, повітря нагріває його і зневоднює, змінюючи при цьому свій вологовміст, а сушильний агент охолоджується (до 50 °С) і зволожується. Частина відпрацьованого вологого сушильного агенту надходить

на всмоктування до циркуляційного вентилятора 3. Далі ділиться на два потоки, перший із яких подають на змішування з осушеним повітрям, а другий подають до нижнього атмосферного теплообмінника 4, де охолоджують (до 42,5 °С) за рахунок передачі тепла фреону, який тече по трубкам. Далі охолоджене повітря надходить до випарника фреону 5.

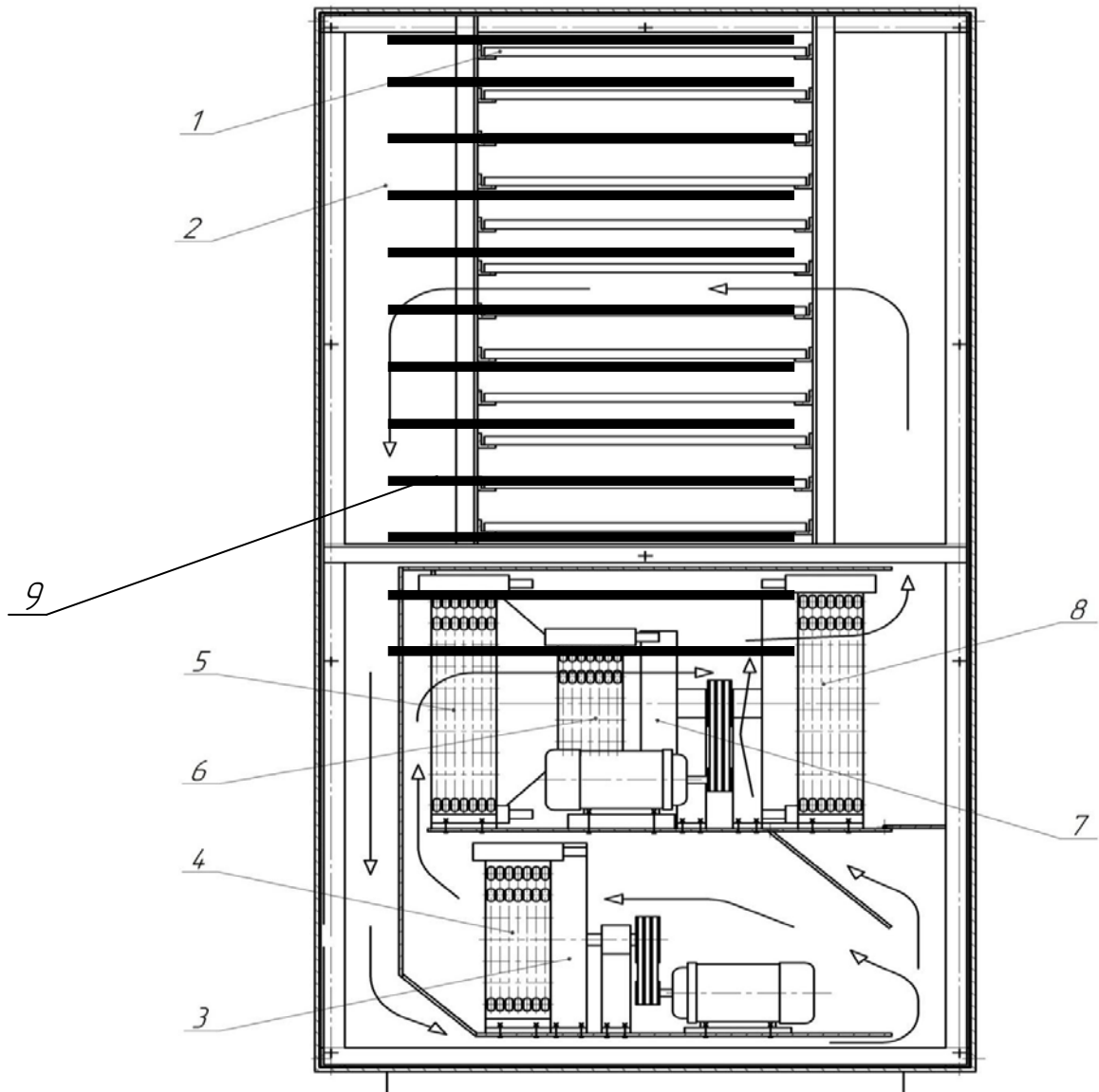


Рис. 1.20. Теплонасосна сушильна шафа з інфрачервоними нагрівачами:
 1 – піддони; 2 – корпус сушильної шафи; 3 – циркуляційний вентилятор;
 4 – атмосферний теплообмінник (нижній); 5 – випарник фреону;
 6 – атмосферний теплообмінник (верхній); 7 – вентилятор;
 8 – конденсатор фреону; 9 – інфрачервоні нагрівачі.

У випарнику сушильний агент охолоджують до температури точки роси і з нього вилучають скраплену вологу, яку виводять із сушарки. Зневоднений сушильний агент (з 13 °С) надходить до верхнього теплообмінника 6, де нагрівається (до 23 °С) за рахунок тепла охолодження фреону після його конденсації. Після виходу з теплообмінника сушильний агент змішують з відпрацьованим сушильним агентом і далі вентилятором 7 (з 35 °С) подають на конденсатор фреону 8, де нагрівають до заданої кінцевої температури (60 °С). Після виходу з конденсатора гарячий зневоднений сушильний агент знову направляють до сушильної камери.

Між конденсатором і випарником відбувається циркуляція фреону R11. З випарника фреон у вигляді пари надходить до компресора, де пара стискується. При стисненні фреон нагрівається і надходить до конденсатора. У конденсаторі нагрітий фреон віддає тепло повітрю і нагріває його, а сам охолоджується і конденсується.

Далі сконденсований фреон повертається до випарника, де випаровується за рахунок передачі тепла від повітря до фреону, і тим самим повітря охолоджується і з нього виводиться скраплена волога.

Тобто охолодження і зневоднення сушильного агенту у випарнику та його нагрівання у конденсаторі проходить за умов реалізації теплонасосного циклу в компресійному холодильному агрегаті із додатковим інфрачервоним підігрівом, при якому утилізується приховане тепло та скраплення пари сушильного агенту, що дозволяє значно скоротити витрати енергії та скоротити процес сушіння із збереженням всіх корисних властивостей термолабільних матеріалів.

По технічному рівню технологія і зразок сушарки відповідає сучасному світовому рівню розвитку техніки, а саме: енерговитрати, завантаженість об'єму сушарки, теплообмінної поверхні і зняття готової продукції відповідають показникам такого ж типу сушарок, що виготовляються за кордоном. Джерелом енергії для роботи теплонасосної сушарки із комбінованим теплопідводом є електрика.

Технічні характеристики теплонасосної сушильної установки представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Технічні характеристики теплонасосної сушарки

| | |
|---|----------|
| Маса вологого матеріалу, що надходить на сушку, кг, | 12 |
| Маса висушеного матеріалу | 9,15 |
| Загальна кількість вологи, що видаляється із матеріалу за час сушіння, кг | 2,85 |
| Максимальна температура сушильного агента, К (0С), | 333 (60) |
| Температура кипіння холодоагенту у випарнику, К (0С), | 238 (0) |
| Встановлена потужність електродвигуна, кВт, | 1 |
| Маса сушильної установки, кг | 547 |
| Габаритні розміри сушарки | |
| а) довжина, м | 1,83 |
| б) ширина, м | 1,37 |
| в) висота, м | 3,77 |

1.3. Напрямки вдосконалення сушильного обладнання та технології процесу сушіння термолабільних матеріалів

Найбільше застосування в теперішній час одержали конвективні сушильні установки, перевагами яких є простота конструкції та експлуатації.

У зв'язку з цим актуальним постає питання подальшого вдосконалення техніки та технології сушіння плодоовочевої продукції, направлених на подальше зниження питомих витрат палива та електроенергії.

Процеси термічного зневоднення та термовологісна обробка термолабільних сировинних матеріалів характеризуються з одного боку, як будь який тепловий процес, високою енергоємністю та низьким коефіцієнтом корисної дії, а з другого – підвищеними вимогами до якості кінцевого продукту та його безпечності. Натуральність сушених продуктів і екологічна чистота технологічного процесу виступають на перший план. Критерії якості та економічності процесу поєднуються в одну задачу – підвищення ефективності

процесу сушіння та створення неенергоємних теплотехнологій і обладнання для їхньої реалізації (рис. 1.21).



Рис. 1.21. Способи підвищення енергетичної ефективності сушарок.

Шляхи зниження питомих енерговитрат під час сушіння, розроблення способів інтенсифікації процесу залежно від певного методу та об'єкту зневоднення, теплотехнології і сушильного обладнання ґрунтуються на узагальненні закономірностей тепломасообміну і є предметом теоретичних й експериментальних досліджень багатьох вітчизняних та іноземних вчених і достатньо широко висвітлено в наукових працях А.А. Долінського, К.Д. Малецької, О.Г. Бурдо, В.М. Атаманюка, В.О. Потапова, М.І. Погожих, С.П. Рудобашти, П.В. Акуліча, Т. Kudra, Ю.Ф. Снежкіна, Ж.О. Петрової, В.М. Пазюка.

З метою раціонального та ефективного використання енергоресурсів під час конвективного зневоднення проведено аналіз витрат теплоти, відповідно з яким для більшості сушильних процесів тільки 35...45% теплоти використовується корисно на випаровування вологи з матеріалу, решта – 65...55%, невинуваті витрати: з відпрацьованим теплоносієм у навколишнє середовище, на нагрівання матеріалу і вологи, через поверхню сушильної установки. В середньому

співвідношення витрат становить 40:60%, що вказує на їх неефективність. Підвищення ефективності сушіння досягається різними способами, починаючи з підготовки матеріалу, інтенсифікації зневоднювання й встановлення оптимальних параметрів ведення процесу до вибору малоенергоємного сушильного обладнання і базується на результатах експериментальних досліджень та дослідно-промислових випробувань. [55]

Огляд обладнання для сушіння рослинної сировини показує, що є значна кількість сушильних установок, які відрізняються за продуктивністю, способом підведення теплоти до матеріалу (конвективний чи кондуктивний або поєднанням обох способів), станом матеріалу (у вигляді пасти, рідини чи зерен або шматочків нарізаного матеріалу), станом шару матеріалу в сушарці (щільний шар або псевдорозріджений) тощо. Серед конвективних сушильних установок домінують камерні сушильні установки, потім – стрічкові, тунельні, вакуумні та барабанні, а їхня продуктивність коливається в широкому діапазоні від 0,06 до 5 т/годину і вибір типу сушильного обладнання залежить від обраної схеми технологічного , об'єму сировини та матеріальних можливостей підприємства.

З аналізу літературного огляду видно, що не дивлячись на різні комбінації методів сушіння досить високе споживання теплової енергії і становить 6440 – 15660 кДж/кг випареної вологи. Тому потрібно спроектувати комбіновані методи сушіння для тунельних сушарок, що більш енергоефективно з максимальним збереження нативності сировини.

1.4. Висновок до розділу 1

1. Огляд обладнання для сушіння рослинної сировини показує, що є значна кількість сушильних установок, серед них домінуючі камерні сушильні установки.

2. З аналізу літературного огляду видно, що не дивлячись на різні комбінації методів сушіння спостерігається досить високе споживання теплової енергії яке становить 6440 – 15660 кДж/кг випареної вологи.

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика рослинної сировини як об'єкта сушіння.

Особливості амілопектинової кукурудзи як об'єкта сушіння

Центром походження кукурудзи вважають Південно-Мексиканські та Центральні-Американські території. По мірі розвитку людського суспільства встановлювалися зв'язки між окремими племенами і народами, виникали обмін і торгівля, що сприяли просуненню різноманітних культурних рослин в нові райони обробітку. В Європу кукурудза була завезена Христофором Колумбом.

Крохмалиста кукурудза. Зерно має дуже тонкий шар рогової ендосперми, розміщеного по периферії зернівки. Зерно округлої форми, рихло розташоване на качанці. Основна частина зерна заповнена борошністим ендоспермом, що надає зерну матовий відтінок. Зерно сильно поглинає вологу і в порівнянні з другими підвидами швидше вражається хворобами та шкідниками, слабо стійке при зберіганні. По технологічним якостям зерно цього підвиду є хорошою сировиною для крохмало-патокового та спиртового-горілчаного виробництва у зв'язку із підвищеним вмістом крохмалю, його гарною якістю і легкою відокремлюваністю зародка від ендосперма.

Основна особливість зерна кукурудзи як об'єкта сушіння полягає в більшій спроможності до вологовіддачі в порівнянні із зерном колоскових культур. Інтенсивність тепла і вологообміну між зерном і агентом сушіння залежить від розмірів і форми зерна, визначаючих його питому поверхню, а також від будови і хімічного складу зерна [56].

Питома поверхня зерна кукурудзи приблизно в два рази менша питомої поверхні зерна пшениці, тоді як кількість води, що видаляється за одиницю часу в процесі сушіння, пропорційна поверхні випарювання і теплообміну. Щільна оболонка зернівки кукурудзи ускладнює процес випарення. Вода, яка проникає в зерно в основному через зародок, нерівномірно розподіляється в різних частинах зернівки. Тому при сушінні зерна виникають неоднакові внутрішні напруження, які призводять до неоднакової усадки тканин і до появи в ендоспермі

внутрішніх тріщин, які не виходять на поверхню зернівки, тобто не порушують цілісності оболонки. Інтенсивне охолодження або нагрівання збільшує тріщинуватість зерна внаслідок нерівномірної усадки різних частин, що містять не однакову кількість вологи.

Внутрішня тріщинуватість зерна знижує його міцність. При неодноразових переміщеннях зерна, що має внутрішню тріщинуватість (при падінні з великої висоти в процесі завантаження в силоси елеватора, при падінні з одного транспортера на інший), може відбуватися розколювання зерен по лінії тріщин, що призводить до збільшення кількості битих зерен. При переробці зерна кукурудзи в харчовій промисловості внутрішня тріщинуватість вважається негативним явищем. Крохмале-патокова та харчова промисловість пред'являють до якості зерна кукурудзи, а відповідно і до його сушіння, високі вимоги.

Щоб зберегти високу якість зерна кукурудзи, необхідно застосовувати м'які режими сушіння і охолодження. Інтенсифікація процесу для скорочення тривалості сушіння і підвищення продуктивності сушильних засобів можливі при використанні максимально допустимих температур. Для цього потрібно застосовувати такі високі температури нагріву, при яких зерно кукурудзи не втрачає природних якостей, в тому числі і схожості [2].

2.2. Експериментальний стенд для дослідження процесів конвективного сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів

Дослідження кінетики процесу сушіння функціональної антиоксидантної сировини рослинного походження проводились на експериментальному конвективному стенді, принципова схема якого зображена на рис 2.1.

Технічна характеристика конвективного сушильного стенду:

| | |
|---------------------------|-------------|
| Температура теплоносія | 30 – 150°C |
| Швидкість руху теплоносія | 0,5 – 5 м/с |

Експериментальний стенд складається з робочої камери 1, зони нагріву теплоносія 2, вентилятора 3, потенціометра 4, щита управління 5, ваг 6, генератора водяної пари 7, регулюючого автотрансформатора 8, психрометра 9 і трубки Піто 10 з мікроманометром 11 [57].

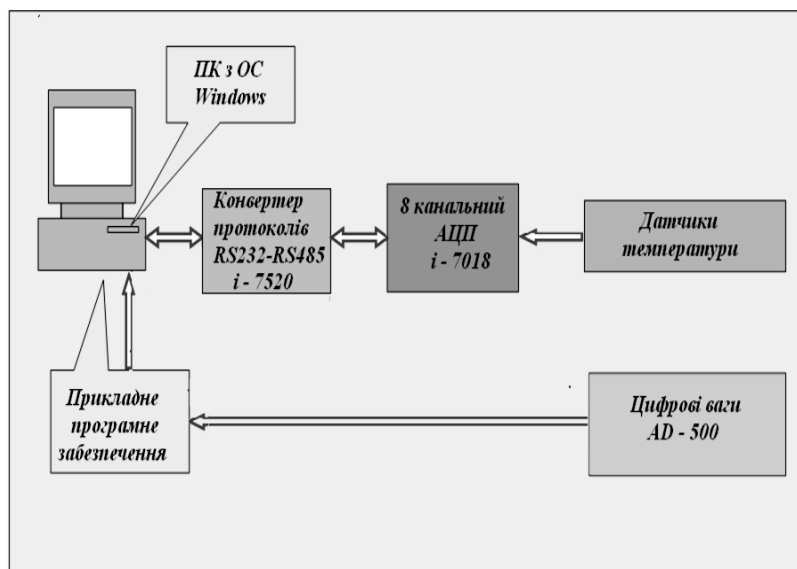


Рис. 2.1. Структурна схема автоматизованого збору та обробки інформації із конвективного сушильного стенду

Експериментальний стенд складається із системи ізольованих повітропроводів з пристроями для нагрівання та циркуляції теплоносія, сушильних камер, системи контролю і підтримання температури теплоносія, автоматичного збору і обробки інформації про перебіг процесу зневоднення матеріалу.

Стенд доукомплектований допоміжним обладнанням (рис. 2.1.): аналоговим цифровим перетворювачем *i-7018*, конвертором-інтерфейсом *i-7520* та персональним комп'ютером, що дозволяє проводити процес сушіння в автоматичному режимі за допомогою розробленої прикладної програми "Sooshka". Програмою досліджень передбачено виявлення основних закономірностей сушіння рослинної сировини в широкому діапазоні зміни факторів з проведенням автоматичного збору та обробки інформації про зміну маси, температури зразка та розрахунків кінетики.

2.3 Методи дослідження фізико-хімічних властивостей рослинних матеріалів

2.3.1. Методика визначення схожості зерна кукурудзи

Методи аналізування схожості насіння кукурудзи проведено за ДСТУ 4138-2002 [58]. Метою дослідження було встановити кількість насінин у відсотках, здатних утворювати нормально розвинені проростки за оптимальних умов пророщування.

До нормальних проростків відносять такі, у яких найбільш важливі структури (корінці, підсім'ядольне та надсім'ядольне коліна, брунечка, сім'ядолі, колеоптиль) добре і пропорційно розвинуті, цілі, здорові, а також з незначними дефектами тих структур, що не впливають на нормальний розвиток проростка. До них відносять й нормально розвинуті проростки з ознаками поверхневої інфекції, набутої від сусідніх хворих насінин.

До аномальних проростків відносять такі, які неспроможні розвинути у повноцінні рослини навіть за сприятливих умов. До них відносять:

- проростки, у яких відсутня або сильно пошкоджена будь-яка структура, що робить неможливим подальший пропорційний їх розвиток;
- слаборозвинені проростки внаслідок фізіологічних порушень, а також проростки з деформованими структурами;
- згнилі проростки.

Підготовка посуду для проведення аналізу включає в себе наступні етапи: термостати та посуд перед кожним аналізуванням, миють гарячою водою з мийними засобами і дезинфікують 1 %-м розчином марганцевокислого калію або спиртом. У робочу камеру термостата ставлять піддон із водою. Чашки Петрі та Коха стерилізують у сушильній шафі за (130 ± 2) °C протягом години або кип'ятять у воді протягом 40 хв.

Дослідником обирається режим, найбільш прийнятний за забезпеченістю лабораторії, враховуючи стан насіння. Рекомендовано віддавати перевагу режимові змінних температур, як біологічно більш природньому.

Якщо обраний режим аналізування не дає змоги об'єктивно оцінити насіння (у результаті невідповідного режиму, але не помилок), аналізування потрібно повторити за інших умов. Якщо ж останній результат аналізування підтверджує попередній, у документі зазначають середньоарифметичне між ними за умови допустимих розбіжностей.

Під час аналізування використовують фільтрувальний папір (Ф) або пісок (П). Фільтрувальний папір як субстрат для ложе, використовують за двома варіантами: «на папері» (нФ) та «в папері» (вФ). Для зволоження папір занурюють у воду, виймають і дають стекти надлишку води (під час натискання пальцем водяна плівка навколо нього не утворюється).

Під час аналізування «на папері» насіння розкладають на одному чи декількох шарах зволоженого паперу, укладеного у ростильні або чашки Петрі. Верхні ростильні накривають скляними пластинами або порожніми ростильнями, а чашки Петрі — накривками.

Під час аналізування «в папері» насіння розкладають між двома шарами зволоженого паперу (краще розміщувати рядками, що полегшить окомірну оцінку проростків). Папір можна використовувати у вигляді конвертів, рулонів, «гофрів» різного профілю (W, M тощо), вкладати його горизонтально чи вертикально (насінини розміщують зародками донизу). Для кращої вентиляції між шарами паперу рекомендовано вкладати пластини або рамки з вологонепроникного матеріалу. Підготовлений таким чином пристрій з насінням ставлять у ростильні, посудини або безпосередньо на полиці термостата.

Для кукурудзи термін проведення аналізу згідно ДСТУ 4138-2002 становить 7 діб. Підрахунок наклюнутих чи пророслих насінин починають із 3-4 дня.

2.3.2. Методика визначення вологості

Перед проведенням досліджень визначаємо початкову вологість матеріалу за ДСТУ 7804:2015 [59]. Сировину поміщуємо в бюкси і на протязі 5 годин при температурі 105 °C висушуємо в сушильній шафі. Після закінчення сушіння бюкси

виймають з сушильної шафи і ставлять в ексікатор для охолодження на 15 –30 хв. Охолоджені бюкси з гранулами зважують у закритому стані на терезах.

Вологість гранул відносно маси сухої речовини обчислюють у відсотках:

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

m_1 – маса порожньої бюкси (з кришкою), г;

m_2 – маса бюкси з наважкою до сушіння, г;

m_3 – маса бюкси з наважкою після сушіння, г.

2.3.3. Методика визначення коефіцієнту набухання

Досліди проводилися за ваговим методом Б.В. Зозулевича.

Порядок визначення:

В зараня підготовлені бюкси зважується матеріал, заливається водою у співвідношенні 1:10. Витримуються в термостаті, центрифугується на протязі 10 хв. Відновлений продукт зважується і розраховується коефіцієнт набухання.

Температура витримки 45 °С, час – 30 хв.

Розрахунок:

Оцінка набухання проводиться за допомогою коефіцієнта набухання K_n який показує відносне збільшення маси продукту після набухання і визначає здатність до відновлення початкових якостей матеріалу при зневодненні.

Коефіцієнт набухання визначається за формулою:

$$K_n = \frac{G_2}{G_1} \text{ або } K_n = \frac{\Delta G}{G_1} \quad (2.2)$$

де K_n – коефіцієнт набухання;

G_1 та G_2 – маса матеріалу до і після набухання відповідно, г;

ΔG – приріст маси на протязі набухання, г.

Відновлюваність матеріалу B – величина, яка показує наскільки вологість відновленого матеріалу наближується до вихідної маси, яка приймається за 100%. Визначається за формулою:

$$B = \frac{S_0}{S_1} * K_H * 100\% \quad (2.3)$$

де S_0 – вміст сухих речовин у вихідному матеріалі, %;

S_1 – вміст сухих речовин у висушеному матеріалі, %.

$$S_1 = 100\% - W_{\text{кін}}$$

$$S_0 = 100\% - W_{\text{поч}}$$

2.4. Похибка досліджень

Після проведення дослідів проводили статистичну обробку результатів вимірювань за відомою методикою [60].

За результатами дослідів визначили:

а) середнє арифметичне значення отриманих даних:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (2.4)$$

де y_i – результат i – го дослідів;

n – кількість дослідів.

б) середню квадратичну похибку по виборці:

$$S_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}, \quad (2.5)$$

в) стандартне відхилення закону розподілу:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}}, \quad (2.6)$$

г) середню арифметичну похибку середнього арифметичного:

$$\sigma = \frac{S_c}{\sqrt{n}}, \quad (2.7)$$

в) коефіцієнт варіації:

$$V_m = \frac{S_c}{y} \cdot 100\% , \quad (2.8)$$

д) похибка досліду:

$$v = \pm \frac{S_c}{(y \cdot \sqrt{n})} \cdot 100\% , \quad (2.9)$$

Для перевірки того, що розсіювання експериментальних даних носить випадковий характер, визначаємо коефіцієнти асиметрії g і ексцесу E за формулами:

$$g = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^3}{\left[\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \cdot \sqrt{n} , \quad (2.10)$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^4}{\left[\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2 \right]^2} \cdot n - 3 , \quad (2.11)$$

Розсіювання вважаємо випадковим, якщо воно значно перевищує величину σ_g і σ_E , які визначаються виразами:

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{6 \cdot (n-1)}{(n-1) \cdot (n+3)}} , \quad (2.12)$$

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{24 \cdot n \cdot (n-2) \cdot (n-3)}{(n-1)^2 \cdot (n+3) \cdot (n+5)}} , \quad (2.13)$$

Якщо $g > 3 \cdot \sigma_g$ і $E > 3 \cdot \sigma_E$ тоді проводяться додаткові вимірювання.

Результати досліджень були середніми не менше, ніж трьох повторень. Закономірності підтверджувались в кожному паралельному дослідженні. Експериментальні дані оброблялись за Фішером – Стьюдентом на рівні 0,95.

2.5. Висновок до розділу 2

1. Представлені у розділі методики для проведення і обробки результатів експериментальних досліджень.
2. Наведено опис приладів та установок які підібрані для проведення експериментальних досліджень кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів.
3. Наведена похибка досліджень.

РОЗДІЛ 3. ТЕПЛОМАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ ПРИ СУШІННІ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

3.1. Вдосконалення експериментального стенду для дослідження процесів конвективного сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів

Експериментальний конвективний стенд представлений на рис. 3.1. розроблений в Інституті технічної теплофізики НАН України складається з таких основних частин: сушильної камери, системи нагрівання та подачі вентилятором теплоносія в камеру сушки, ізольованих повітропроводів.

Дільниця теплової підготовки повітря виконана у вигляді прямокутного короба, в якому розміщений трьохсекційний електронагрівач потужністю 4,5 кВт, який дозволяє підтримувати та регулювати температуру повітря в широких діапазонах. Для точної підтримки заданої температури встановлений терморегулятор Овен ТРМ 101 з точністю спрацювання сигнальних контактів $\pm 0,5$ °С та термометрів опору ТСМ-50.

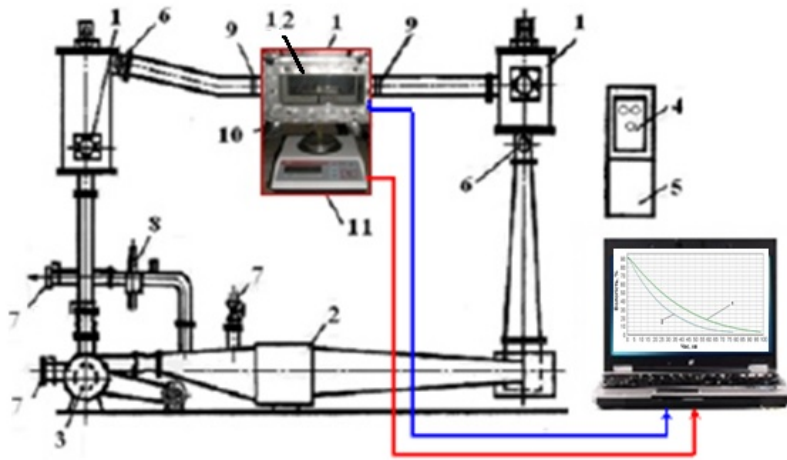


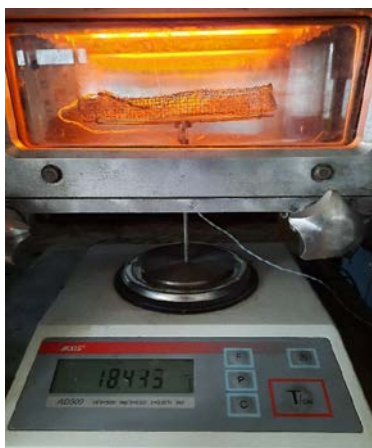
Рис. 3.1. Схема експериментального конвективного стенду

1 – сушильні камери; 2 – калорифер; 3 – вентилятор; 4 – регулятор температури; 5 – щит керування; 6 – датчики температури; 7 – заслінки; 8 – психрометр; 9 – спеціальні решітки; 10 – штанга ваг; 11 – ваги; 12 – джерело інфрачервоного випромінювання.

Зміна в широкому діапазоні швидкості руху теплоносія та його температури досягається регулюванням роботи вентилятора на щиті керування регулятором швидкості. Швидкість руху теплоносія змінюються шляхом зміни подачі повітря відцентровим вентилятором за допомогою частотного перетворювача при регулюванні вручну. Співвідношення між відпрацьованим та свіжим повітрям можна регулювати за допомогою шиберів на патрубках.

Для вдосконалення існуючого стенду в камеру встановлений блок інфрачервоних ламп з можливістю регулювання теплового потоку до 3800 Вт/м^2 . Зміна потужності ламп відбувається регулятором реостатного типу. [61-63]

Випробування удосконаленого експериментального стенду проводились на такому матеріалі як капуста білокачанна. Нарізана капуста на стружку накладається в сітчасту корзину і встановлюється на ваги в сушильній камері. Камера має прозоре скло через яке можна спостерігати за станом матеріалу в процесі сушіння. Вигляд капусти білокачанної під час сушіння за допомогою ламп інфрачервоного випромінювання представлений на рис. 3.2. Детальний опис цих експериментів представлено в наступних розділах.



(а)



(б)

Рис. 3.2. Сушіння капусти білокачанної від інфрачервоних ламп в сушильній камері

а) сушильна камера, б) кошик з нарізаною білокачанною капустою.

3.2. Дослідження кінетики процесу сушіння капусти білокачанної на експериментальному стенді

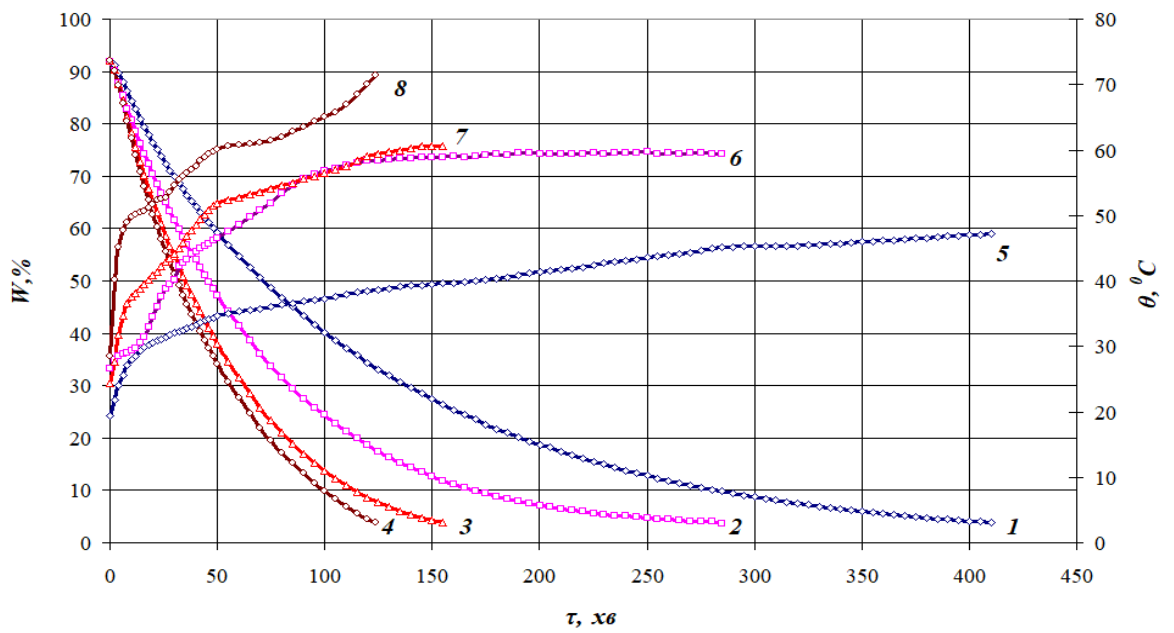
Для визначення впливу вологовмісту сушильного агента та інтенсивність процесу сушіння та визначення оптимальних режимів роботи для інтенсифікації були проведенні експериментальні дослідження, в яких було відпрацьовано режими із застосуванням комбінації інфрачервоного та конвективного сушіння на експериментальному модернізованому стенді та в тунельній сушарці.

Сушіння капусти в нашій країні не поширене, хоча її можна використовувати при приготуванні в якості добавки в супи та в другі страви. Сушити капусту слід тоді, коли у неї сезон збирання, і ціни на овочі будуть найнижчими в році. Білокачанна капуста збирається з вересня по листопад. Капуста багата на вітамін С, В і РР. Містить фосфор, калій і кальцій.

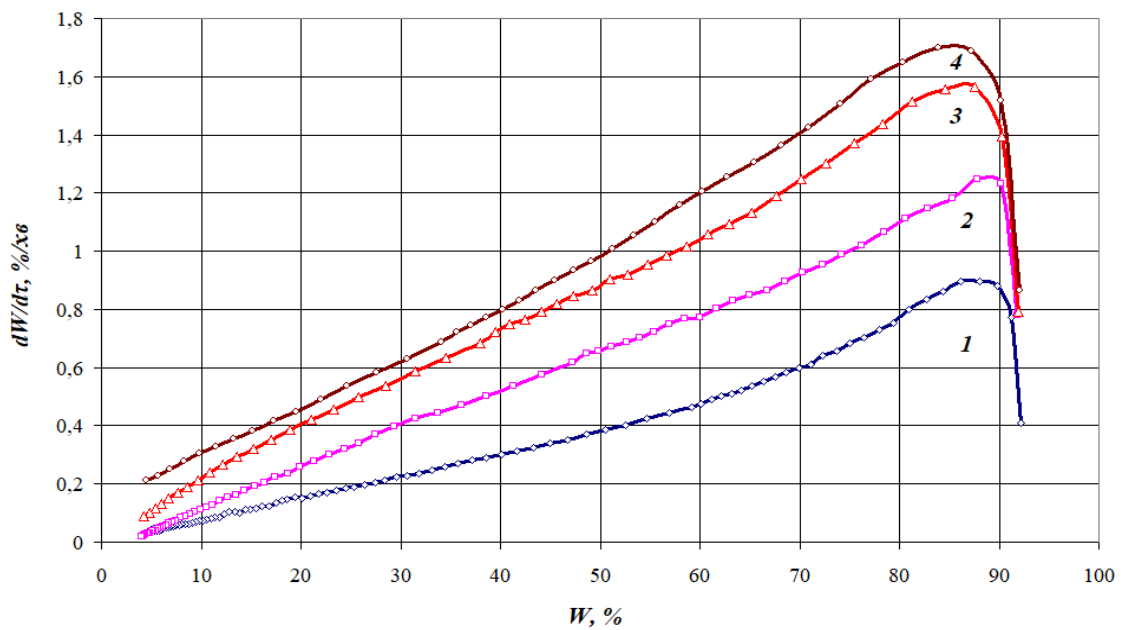
Спосіб виробництва сушеної капусти включає миття, очищення, бланшування, нарізання стружкою, сушіння капусти при температурі 65...70°C протягом 12...24 год, охолодження [64].

Перед проведенням сушіння капусти білокачанної її попередньо миють, інспектують, нарізають на стружку. Експериментальні дослідження кінетики сушіння капусти білокачанної проводили на конвективному сушильному стенді із автоматичною програмою збору та обробки інформації (рис.3.2) [57].

На рис. 3.3. представлено вплив температури теплоносія на тривалість сушіння капусти білокачанної при конвективному сушінні.



а)



б)

Рис. 3.3. Зміна вологовмісту та температури всередині шару (а) та зміна швидкості сушіння за різних температур теплоносія (б) капусти білокачанної

$$V = 3 \text{ м/с}, \delta = 15 \text{ мм}, d = 10 \text{ г/кг с.п.}$$

1,5 - 50°C; 2,6 - 60°C; 3,7 - 70°C; 4,8 - 80°C.

1,2,3,4 – зміна вологовмісту; 5,6,7,8 – зміна температури всередині шару (а)

1,2,3,4 – зміна швидкості сушіння за різних температур (б).

Підвищення температури теплоносія від 50 до 80°C зменшує тривалість сушіння в 3,23 рази. Кінцева температура прогрівання матеріалу збільшується від 48,5 до 72°C (рис. 3.3,а). Процес сушіння капусти білокачанної проходить періоди прогрівання та падаючої швидкості сушіння. При сушінні капусти білокачанної з температурою теплоносія 50°C швидкість сушіння становить 0,9%/хв., при 60°C – 1,2%/хв., 70°C – 1,5%/хв., 80°C – 1,7%/хв. (рис. 3.3,б).

Підвищення температури теплоносія від 50 до 80 °C знижує якість матеріалу який набуває коричнюватого відтінку, що візуально можна оцінити за кольором білокачанної капусти (рис. 3.4). Як видно з рисунку 3.4, із збільшенням температури відбувається потемніння, що свідчить про наявність мелаїдінової реакції. Найбільш оптимальною температурою за тривалістю та якістю білокачанної капусти є температура 60°C.

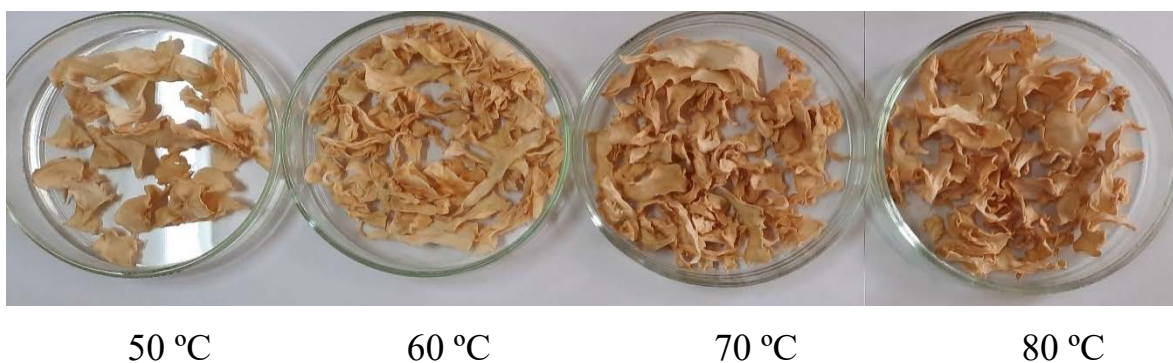


Рис. 3.4. Вплив температури теплоносія на якість білокачанної капусти

Для підвищення інтенсивності сушіння запропонований ступеневий режим сушіння 80/60°C, при цьому зменшується тривалість сушіння на 50 хв в порівнянні з режимом сушіння 60°C (рис. 3.5).

Ступеневий режим сушіння 80/60°C передбачає сушіння при температурі 80°C на протязі 50 хв до температури матеріалу 60°C з наступним продовженням процесу при температурі теплоносія 60°C.

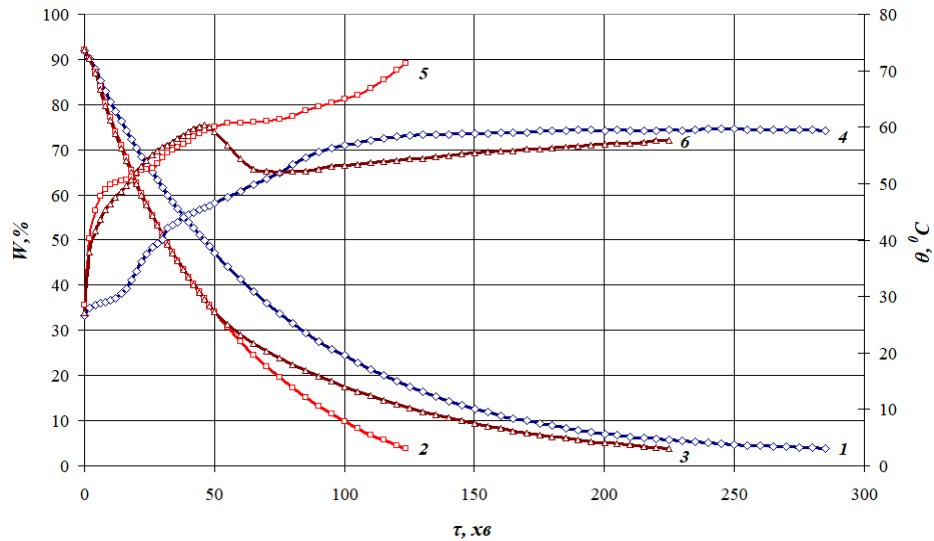


Рис. 3.5. Зміна вологовмісту та температури всередині шару капусти

білокачанної, при $V = 3$ м/с, $\delta = 15$ мм, $d = 10$ г/кг с.п.:

1,4 - 60°C; 2,5 - 80°C; 3,6 – 80/60°C

1,2,3 – зміна вологовмісту; 4,5,6 – зміна температури всередині шару.

На кривих сушіння в ступеневому режимі сушіння 80/60°C при вологості 30 – 38% видно різку зміну швидкості сушіння білокачанної капусти від 0,76 до 0,4%/хв. при переході від режиму сушіння 80 до 60°C (рис. 3.6) [65,66].

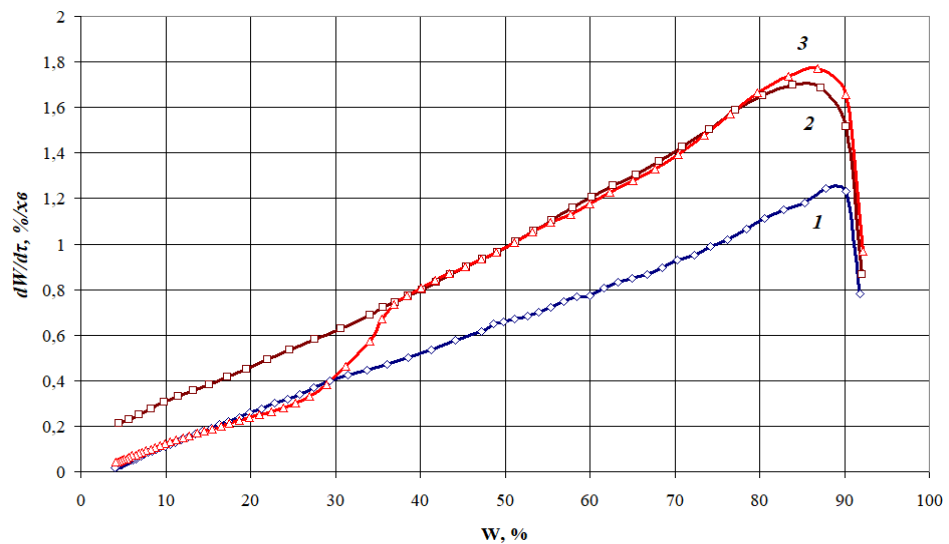


Рис. 3.6. Зміна швидкості сушіння капусти білокачанної від впливу

температури теплоносія, $V = 3$ м/с, $\delta = 15$ мм, $d = 10$ г/кг с.п.:

1 - 60°C; 2 - 80°C; 3 – 80/60°C.

3.3 Дослідження кінетики процесу сушіння капусти білокачанної на вдосконаленому стенді з інфрачервоним випромінюванням.

Для інтенсифікації процесу застосовуємо комбіновану дію конвективного та інфрачервоного випромінювання при температурі теплоносія 60°C, що прискорює процес на 80 хв при збереженні якості матеріалу (рис. 3.7).

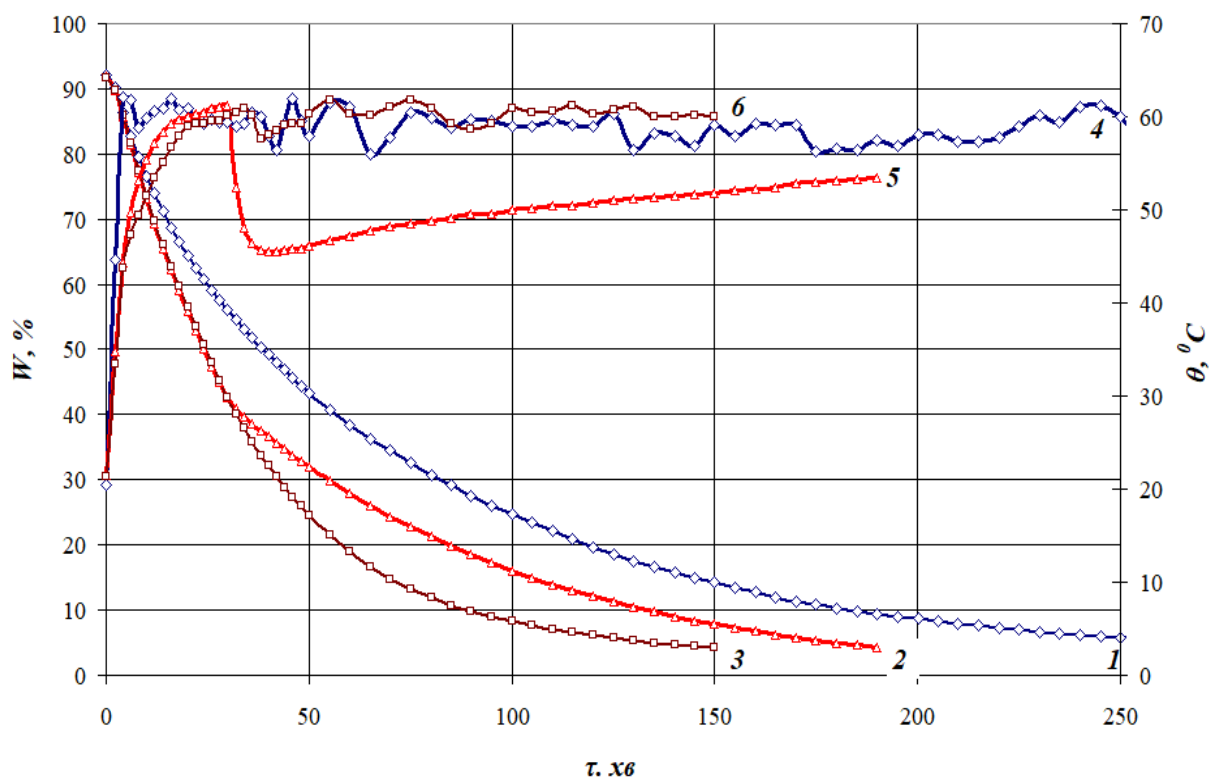


Рис. 3.7. Вплив інфрачервоного випромінювання та конвективного сушіння на тривалість сушіння капусти білокачанної, $V = 3$ м/с, $\delta = 15$ мм, $d = 10$ г/кг с.п.: 1,4 – інфрачервоне випромінювання; 2,5 – інфрачервоне випромінювання 30 хв + конвективне сушіння; 3,6 – інфрачервоне випромінювання + конвективне сушіння.

1,2,3 – зміна вологовмісту; 4,5,6 – зміна температури.

Крива 1,4 (інфрачервоне випромінювання) характеризується найбільшою тривалістю сушіння 250 хв., матеріал має явно виражені ознаки підгорілого. Крива 3,6 (інфрачервоне випромінювання + конвективне сушіння) характеризується найменшою тривалістю сушіння, в порівнянні з іншими методами і становить 150 хв., матеріал також має ознаки підгорілого. Крива 2,5

(конвективне сушіння + ІЧВ з тривалістю 30 хвилин і з подальшим відключенням). Після вимкнення ІЧВ температура в матеріалі знижується на 12°C від 60 °С до 48°C. За час використання ІЧВ (30 хв.) зразок втратив 50% своєї маси. За тривалістю сушіння даний спосіб поступається способу конв. + ІЧВ на 30 хв., але випереджає ІЧВ спосіб на 70 хв., капуста має кращу якість та не має ознак згорілого.

Температура нагрівання матеріалу в різних режимах сушіння не перевищувало 60°C. Скачки температур нагрівання капусти при інфрачервоному випромінюванні пов'язано з інерційністю випромінювання інфрачервоних ламп.

Сушіння білокачанної капусти при інфрачервоному випромінюванні істотно впливає на якість матеріалу, в зв'язку з тим що він нагрівається безпосередньо і тому підгорає. Згідно проведених досліджень доцільно використовувати комбінований метод інфрачервоного випромінювання та конвективного сушіння (рис. 3.8).



ІЧВ

Конвекція

ІЧВ 30 хв + конвекція

Рис. 3.8. Вплив методу сушіння на якість білокачанної капусти при температурі матеріалу 60°C

Для зменшення впливу інфрачервоного випромінювання при комбінованому методу сушіння зменшуємо тривалість до 30 хв, що зберігає якість матеріалу [67,68].

3.4. Визначення коефіцієнту набухання і відновлюваності капусти білокачанної від режимів сушіння

Незворотність термодинамічних процесів, що відбуваються під час сушіння призводить до незворотних змін не лише на рівні розсіювання енергії, але і в самому зневодненому матеріалі. При цьому змінюються фізико-хімічні характеристики матеріалу: густина, теплоємність, пружність, пористість, хімічний склад та інші.

Однак не всі ці зміни позначаються на показниках якості готової продукції, як харчових композиційних сумішей. У зв'язку з цим, властивості сушених харчових продуктів можна розділити на два класи: 1- харчові та біологічні, до яких відносяться хімічний склад, вітамінний вміст, калорійність, травлення, мікробіологічне обсіменіння; 2- технологічні, до яких слід віднести тривалість відновлення в змочувальній рідині, насипну густину, умови зберігання та транспортування. З вищесказаного випливає основне завдання сушильного виробництва: визначити такі регламенти та умови проведення процесу зневоднення, які забезпечили б максимальну збереженість властивостей вихідної сировини [22].

До основних характеристик, що достатньо об'єктивно дають оцінку якості сушеної продукції і відповідно правильності підбору режимів зневоднення слід віднести: залишковий вологовміст продукції, гігроскопічні властивості, значення відновлення, втрата вітамінів при зневодненні, колір. Такі показники, як вміст вуглеводів, жирів, білків, мікроелементів не можуть вважатися безпосередньо залежними від режимів сушки, а визначаються сортовими властивостями, якістю вихідної сировини.

Вплив температури на рослинну клітину призводить до втрати органічними речовинами нативних властивостей та інших факторів, які мають вплив на фізико-хімічні та біологічні властивості сировини.

Один із критеріїв оцінки якості сушеного продукту – це його властивість до набухання. Властивість матеріалу відновлюватись залежить від багатьох факторів, насамперед, від хімічного складу сировини, його структури, фізико-хімічних властивостей, а також від ступеня тих змін, які він зазнав під час сушіння. Властивість матеріалу відновлюватись характеризується значенням коефіцієнта набухання K_H , який показує відносне збільшення маси продукту після набухання та визначає здібність відновлювання початкових властивостей матеріалу при зневодненні. Коефіцієнт набухання визначали за методом Б.В. Зозулевича. [22] На рис. 3.9 представлено результати коефіцієнту набухання та відновлюваності за наступними режимами: 1 - конвекція 60 °С; 2 – ступеневий режим 80/60 °С; 3 – ІЧВ + конвекція 60 °С; 4 – ІЧВ. При температурі сушіння 60 °С та ступеневому режимі 80/60 °С коефіцієнт набухання становить майже 6 одиниць. Відновлюваність при цих режимах однакова і становить 71% що свідчить про якість розроблених режимів сушіння.



Рис. 3.9 Відновлюваність та коефіцієнт набухання.

1 - Конвекція 60 °С; 2 – ступеневий режим 80/60 °С; 3 – ІЧВ + конвекція 60 °С;
4 - ІЧВ

Сушіння способом ІЧВ та ІЧВ + конвекція 60°С має надзвичайно низький коефіцієнт набухання та відновлюваність, які відповідно становлять 3,6 та 3,3 Кн

та 62% і 54% відповідно.

Конвекція при 60°C має довшу тривалість сушіння ніж комбінований спосіб ГЧВ з конвекцією, але при цьому якість матеріалу краща, що підтверджується вищою в 1,14 рази відновлюваністю, а спосіб ГЧВ взагалі руйнує матеріал.

3.5. Дослідження кінетики процесу сушіння кукурудзи амілопектинової на експериментальному стенді

3.5.1. Визначення вологості кукурудзи

Вологість кукурудзи коливається в залежності від різниці в рельєфі ділянки, часу появи сходів і родючості ґрунту. Змінюється вона також в межах однієї і тієї рослини кукурудзи від місця утворення початку (верхній або нижній ярус) та в межах одного і того ж початку в залежності від часу зав'язування і розвитку зернівок. Нерівномірне розподілення вологи і в середині зернівок.

Під час проведення експерименту на початку процесу сушіння визначалась початкова вологість кукурудзи.

Таблиця 3.1. Початкова вологість насіння сортів кукурудзи

| Назва с/г | Куниче | Городківка | Яланець | Вільшанка | Вільшанка |
|--------------|--------|------------|----------|-----------|-----------|
| Сорт | Р 9074 | Р 9074 | ДКС 3511 | Р 9718 | ДКС 3511 |
| Вологість, % | 16,3 | 21,3 | 27,8 | 21 | 24,5 |

Продовження таблиці 3.1.

| Назва с/г | Клембівка | Шарапанівка | Заболотне |
|--------------|-----------|-------------|-----------|
| Сорт | ДКС 3511 | ПР 35А75 | ПР 35А75 |
| Вологість, % | 24,5 | 24,5 | 24,7 |

Як видно з таблиці 1 вологість матеріалу більше залежить від географічного розташування поля, ніж від сорту кукурудзи. Кукурудза з полів, які розташовані поряд (Вільшанка, Клембівка, Шарапанівка) має однакову вологість в межах 24,5% і не залежить від сорту.

Початкова вологість зібраного матеріалу кукурудзи залежить від умов під час збору врожаю, умов зберігання до теплової обробки та рельєфу поля.

3.5.2. Дослідження процесу сушіння насіння кукурудзи

Дослідження процесу сушіння насіння кукурудзи проводились на конвективному сушильному стенді, де насипалась на піддон, який встановлюється на штангу терезів.

Експериментальні дослідження проводились при температурі теплоносія від 50 до 80°C на 8 зразках, що показало вплив сортових ознак з різною початковою вологістю на тривалість сушіння.

Вивчення кінетики процесу сушіння кукурудзи, не зважаючи на різні режими 50, 60, 70, 80°C, температурні криві та криві тривалості сушіння мають подібний характер. Це означає рівномірний прогрів матеріалу і процес випаровування вологи відбувається з постійною швидкістю. Зміна режиму сушіння впливає лише на інтенсивність нагріву та випаровування вологи із зерна, характер кривих залишається незмінним. Збільшення температури теплоносія зменшує тривалість сушіння, температура в середині зерна кукурудзи змінюється. На початку процесу температура підвищується швидко на протязі 6 – 8 хвилин, потім прогрівання матеріалу відбувається повільно. (рис. 1,3,5,7,9,11,13,15).

Тривалість сушіння кукурудзи сорту Р 9074 (с. Куниче) при різних температурних режимах наведено в таблиці 3.2.

Як видно з таблиці 3.2, з підвищенням температури теплоносія скорочується тривалість сушіння. Кукурудза вологістю 16,2% при температурі теплоносія 50°C до вологи 13% висушується на протязі 90 хв., а 60°C – 60 хв.

Таблиця 3.2. Тривалість сушіння кукурудзи при різних температурних режимах

| Сорт | Температурний режим, °С | Тривалість сушіння, хв |
|--------------------|-------------------------|------------------------|
| Р 9074 (с. Куниче) | 50 | 90 |
| | 60 | 60 |
| | 70 | 42 |
| | 80 | 33 |

Характер кривих швидкості сушіння від впливу температури теплоносія подібний до сушіння капілярно-пористих матеріалів. На початку процесу матеріал прогрівається, потім йде випаровування вологи з насіння кукурудзи в точці максимального значення швидкості сушіння. Далі спостерігається період падаючої швидкості сушіння. Період постійної швидкості сушіння на кривих сушіння не спостерігається. Із графіків видно, що інтенсивність випаровування вологи залежить від початкової вологи зерна. Процес випаровування вологи з поверхні зерна кукурудзи відрізняється від процесу випаровування вільної поверхні (рис. 3.10 - 3.25).

Значення максимальної швидкості сушіння при температурі теплоносія від 50 до 80°С зведені в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3. Значення максимальної швидкості сушіння насіння кукурудзи

| Назва с/г, сорт | Максимальна швидкість сушіння, %/хв. при температурі, °С | | | |
|--------------------------------------|--|-------|-------|-------|
| | 50 | 60 | 70 | 80 |
| <i>с. Куниче, сорт Р 9074</i> | 0,087 | 0,103 | 0,138 | 0,148 |
| <i>с. Городківка, сорт Р 9074</i> | 0,185 | 0,221 | 0,256 | 0,348 |
| <i>с. Яланець, сорт ДКС 3511</i> | 0,2 | 0,236 | 0,349 | 0,482 |
| <i>с. Вільшанка, сорт ДКС 3511</i> | 0,128 | 0,179 | 0,231 | 0,323 |
| <i>с. Клембівка, сорт ДКС 3511</i> | 0,133 | 0,164 | 0,246 | 0,328 |
| <i>с. Вільшанка, сорт Р 9718</i> | 0,113 | 0,143 | 0,174 | 0,215 |
| <i>с. Шарапанівка, сорт ПР 35А75</i> | 0,133 | 0,174 | 0,225 | 0,293 |
| <i>с. Заболотне, сорт ПР 35А75</i> | 0,169 | 0,246 | 0,323 | 0,4 |

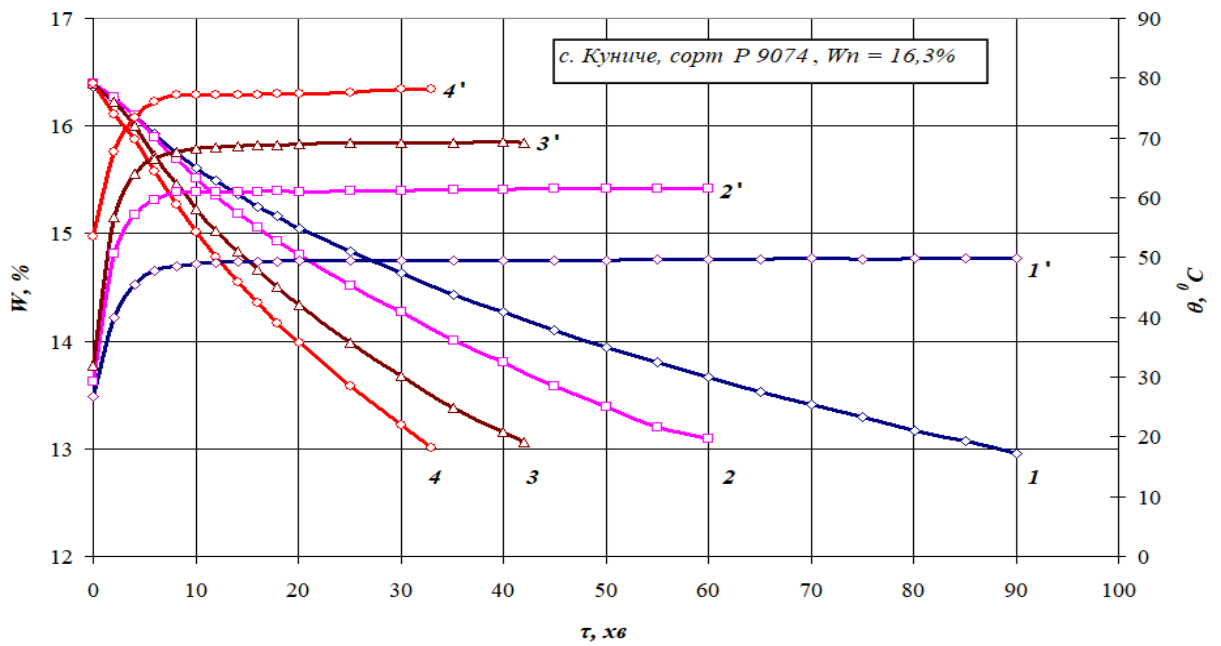


Рис. 3.10. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння насіння кукурудзи (с. Куниче, сорт Р 9074):

1,1' - 50°C; 2,2' - 60°C, 3,3' - 70°C; 4,4' - 80°C; ($\delta = 4$ мм, $V = 3$ м/с,

$d = 10$ г/кг с.п.)

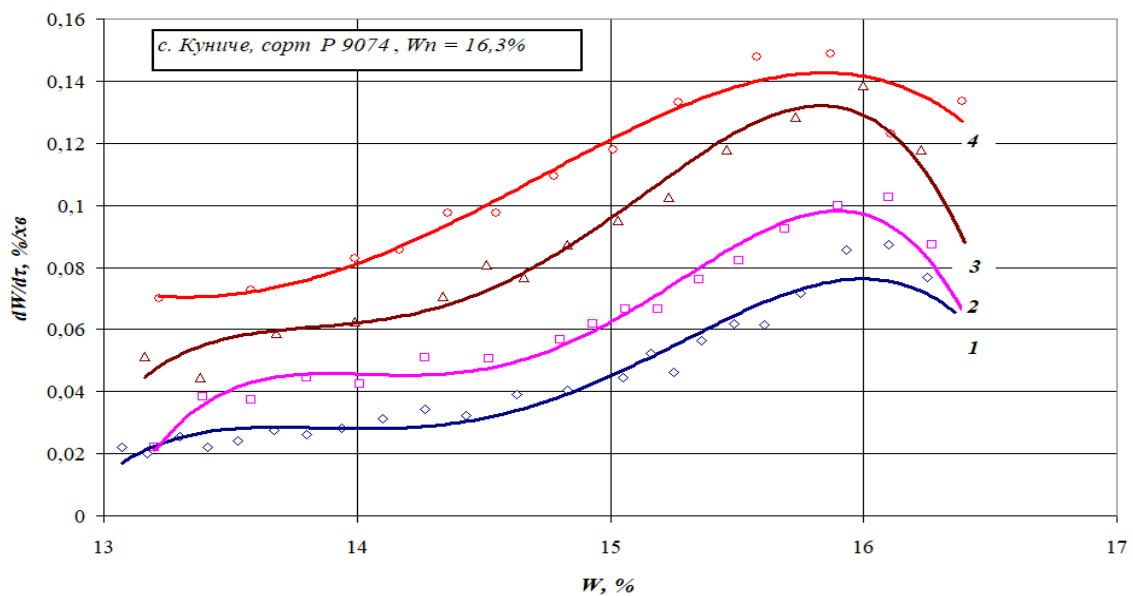


Рис. 3.11. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння насіння кукурудзи (с. Куниче, сорт Р 9074):

1 - 50°C; 2 - 60°C, 3 - 70°C; 4 - 80°C; ($\delta = 4$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.)

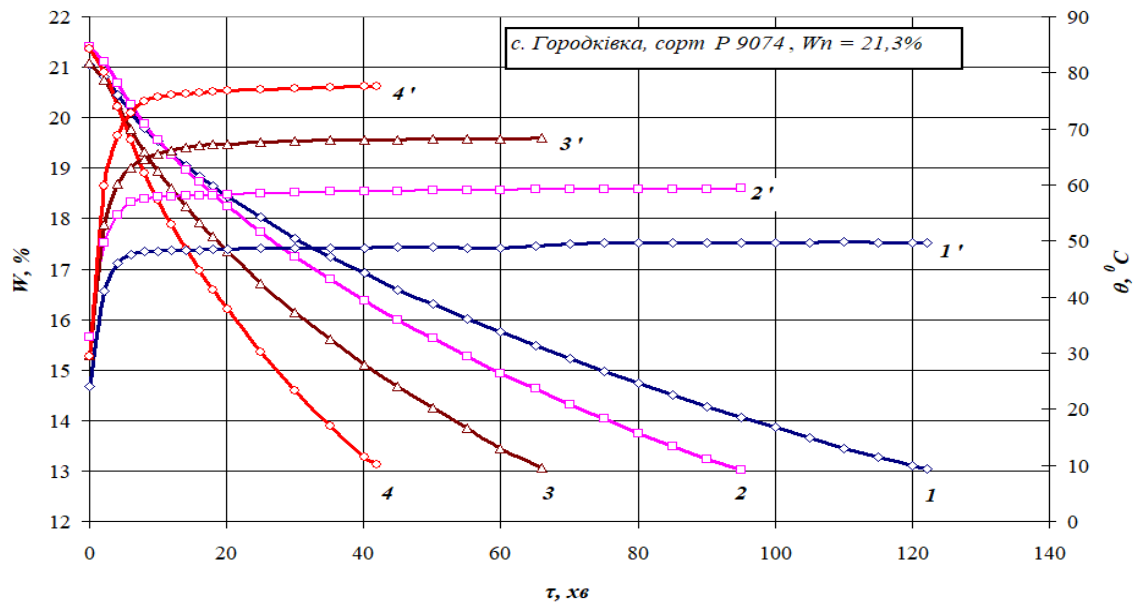


Рис. 3.12. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння насіння кукурудзи (с. *Городківка*, сорт Р 9074):

1,1' - 50°C; 2,2' - 60°C, 3,3' - 70°C; 4,4' - 80°C; ($\delta = 4$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$

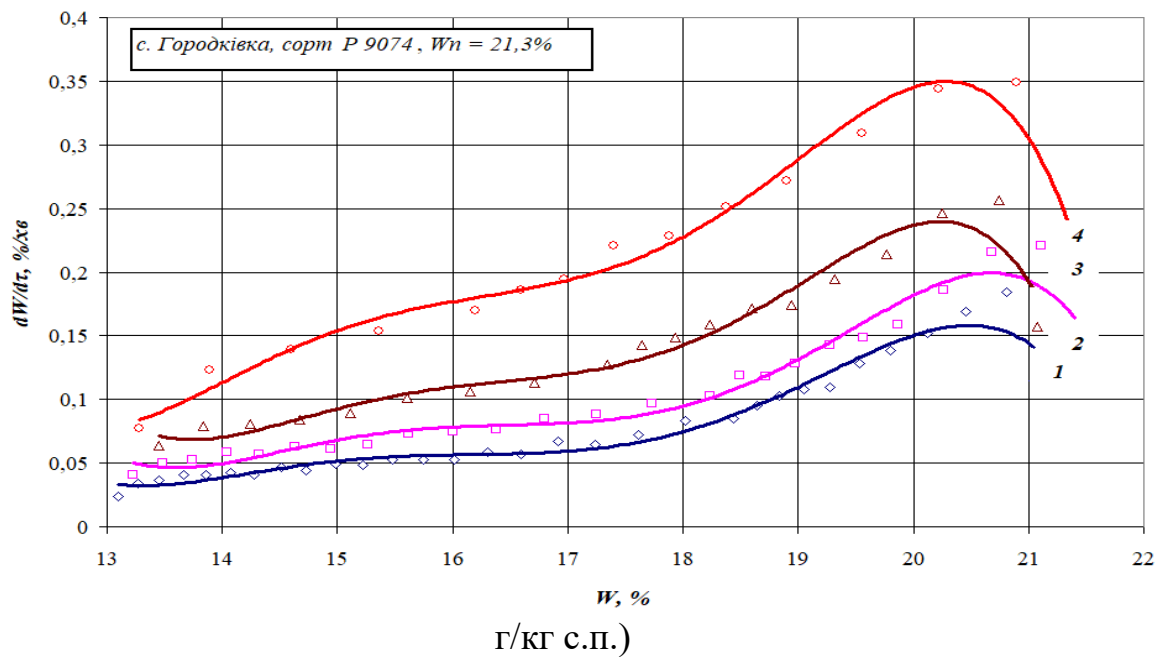


Рис. 3.13. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння насіння кукурудзи (с. *Городківка*, сорт Р 9074):

1 - 50°C; 2 - 60°C, 3 - 70°C; 4 - 80°C; ($\delta = 4$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.)

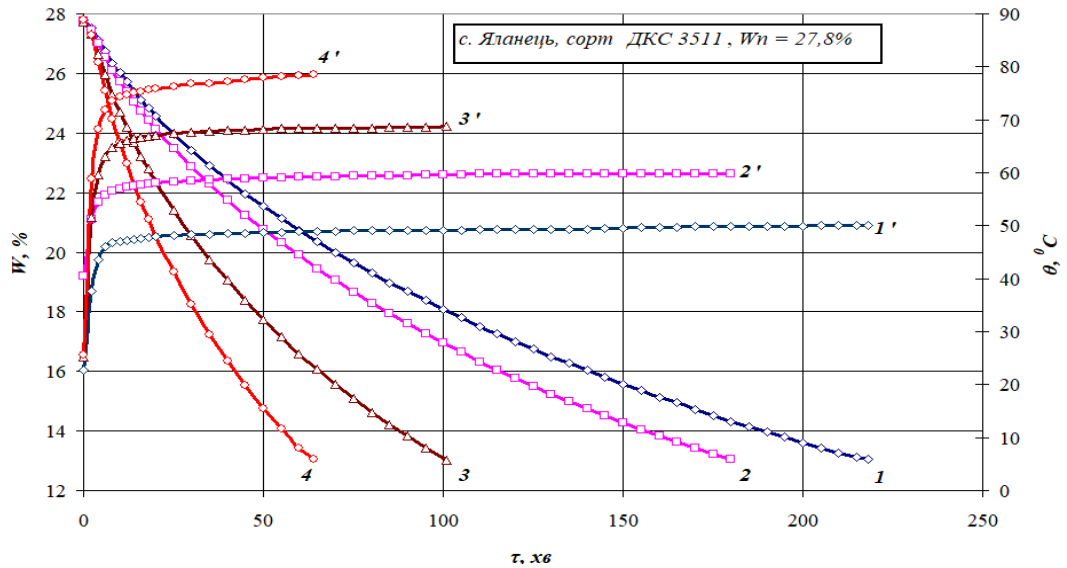


Рис. 3.14. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння насіння кукурудзи (с. Яланець, сорт ДКС 3511):

1,1' - 50°C; 2,2' - 60°C, 3,3' - 70°C; 4,4' - 80°C; ($\delta = 4$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.)

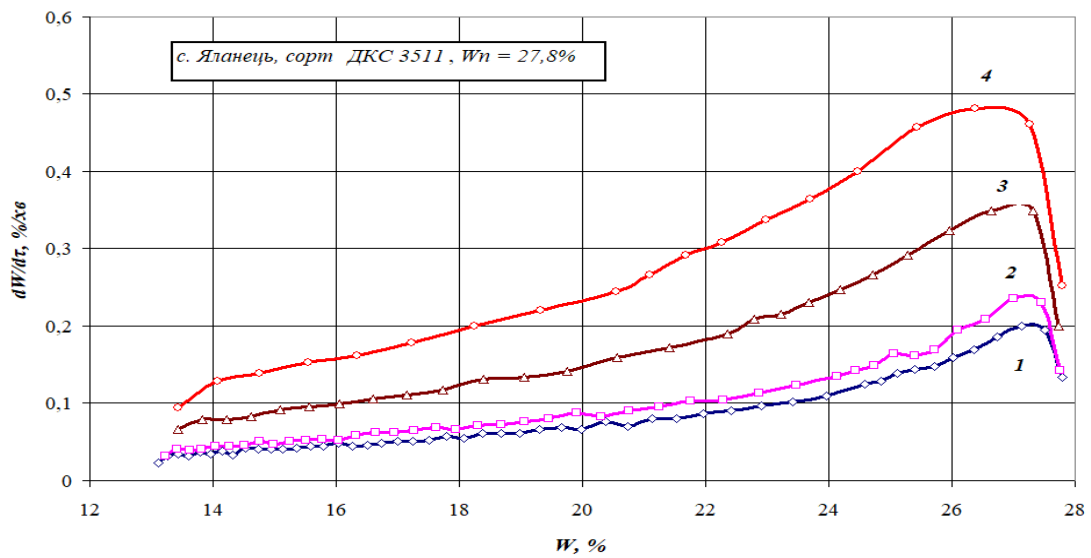


Рис. 3.15. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння насіння кукурудзи (с. Яланець, сорт ДКС 3511):

1 - 50°C; 2 - 60°C, 3 - 70°C; 4 - 80°C; ($\delta = 4$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.)

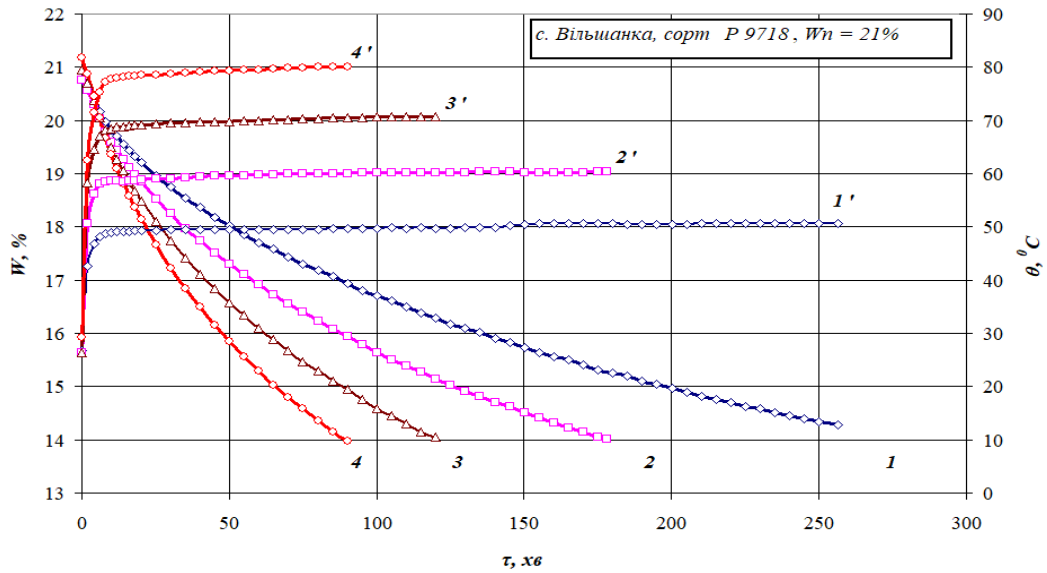


Рис. 3.16. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння насіння кукурудзи (с. Вільшанка, сорт Р 9718):

1,1' - 50°C; 2,2' - 60°C, 3,3' - 70°C; 4,4' - 80°C; ($\delta = 4$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.)

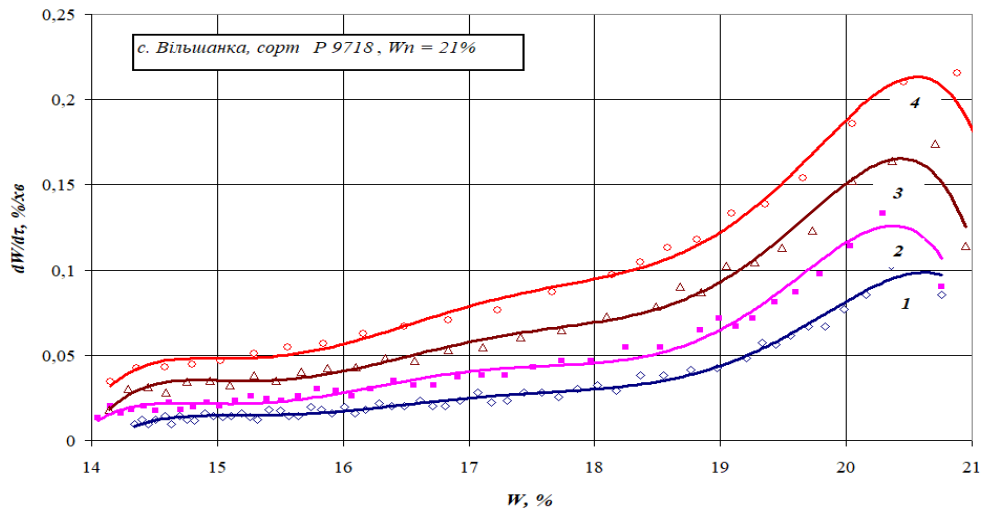


Рис. 3.17. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння насіння кукурудзи (с. Вільшанка, сорт Р 9718):

1 - 50°C; 2 - 60°C, 3 - 70°C; 4 - 80°C; ($\delta = 4$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.)

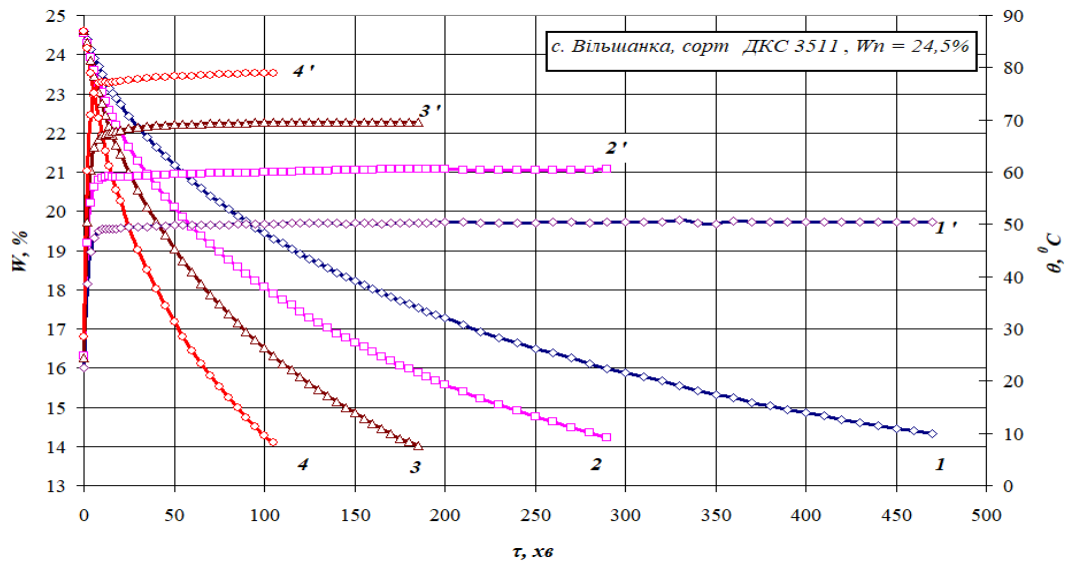


Рис. 3.18. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння насіння кукурудзи (с. Вільшанка, сорт ДКС 3511):

1,1' - 50°C; 2,2' - 60°C, 3,3' - 70°C; 4,4' - 80°C; ($\delta = 4$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.)

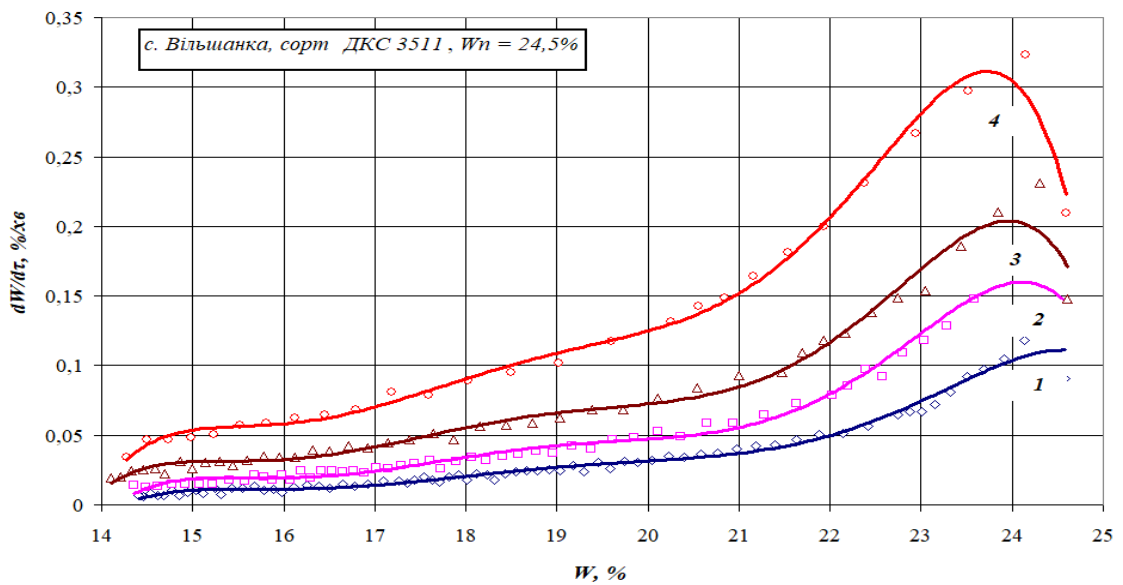


Рис. 3.19. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння насіння кукурудзи (с. Вільшанка, сорт ДКС 3511):

1 - 50°C; 2 - 60°C, 3 - 70°C; 4 - 80°C; ($\delta = 4$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.)

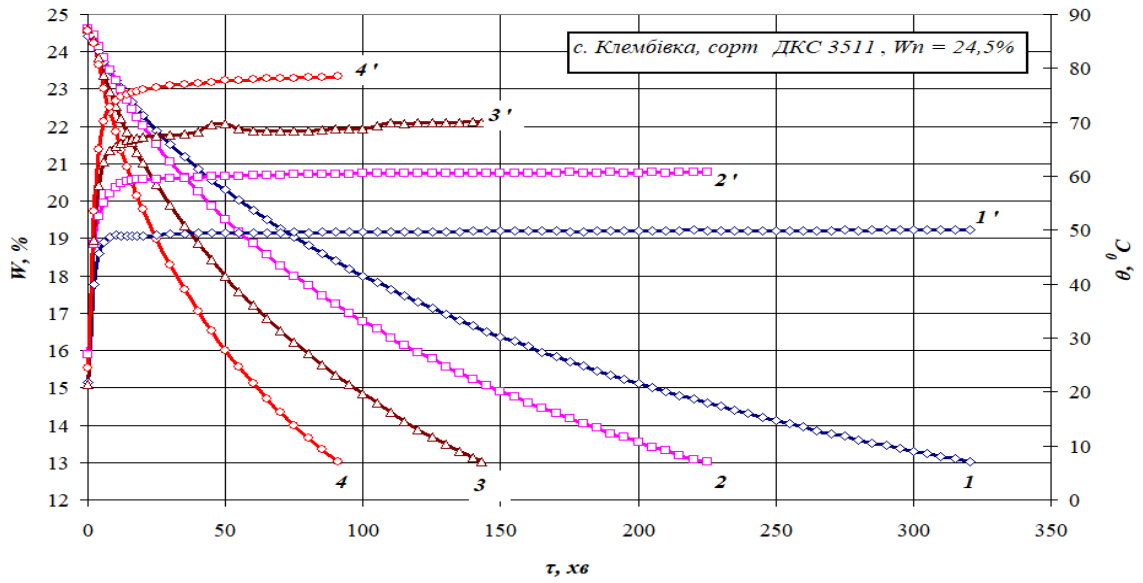


Рис. 3.20. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння насіння кукурудзи (с. Клембівка, сорт ДКС 3511):

1,1' - 50°C; 2,2' - 60°C, 3,3' - 70°C; 4,4' - 80°C; ($\delta = 4$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.)

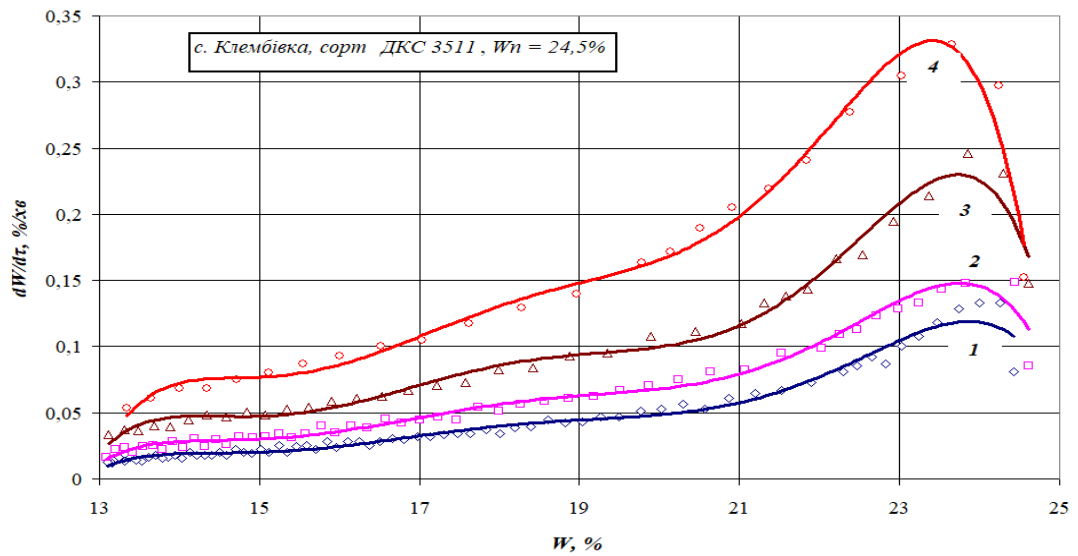


Рис. 3.21. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння насіння кукурудзи (с. Клембівка, сорт ДКС 3511):

1 - 50°C; 2 - 60°C, 3 - 70°C; 4 - 80°C; ($\delta = 4$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.)

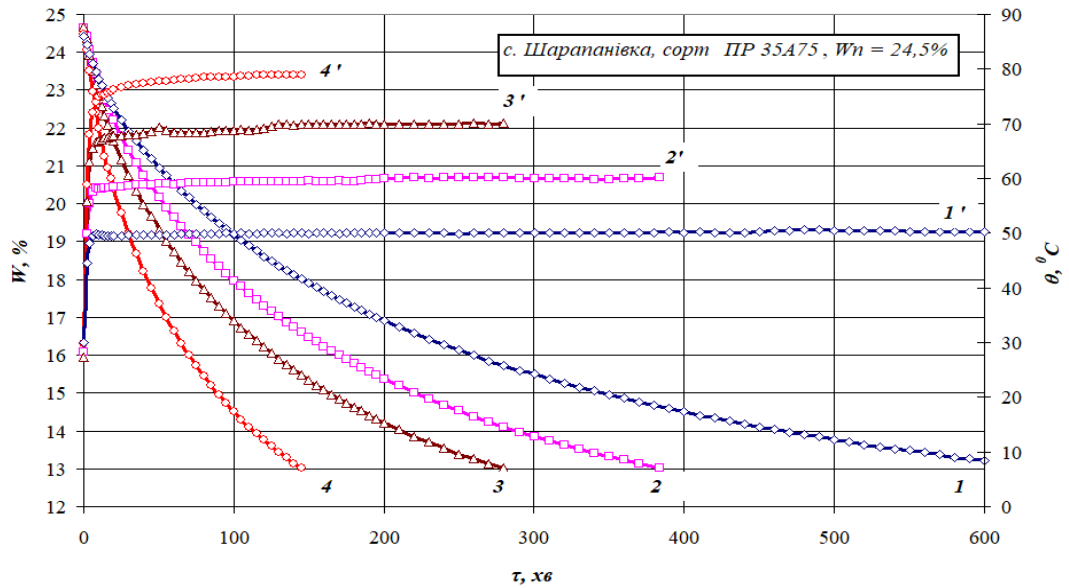


Рис. 3.22. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння насіння кукурудзи (с. Шарпанівка, сорт ПР 35А75):

1,1' - 50°C; 2,2' - 60°C, 3,3' - 70°C; 4,4' - 80°C; ($\delta = 4$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.)

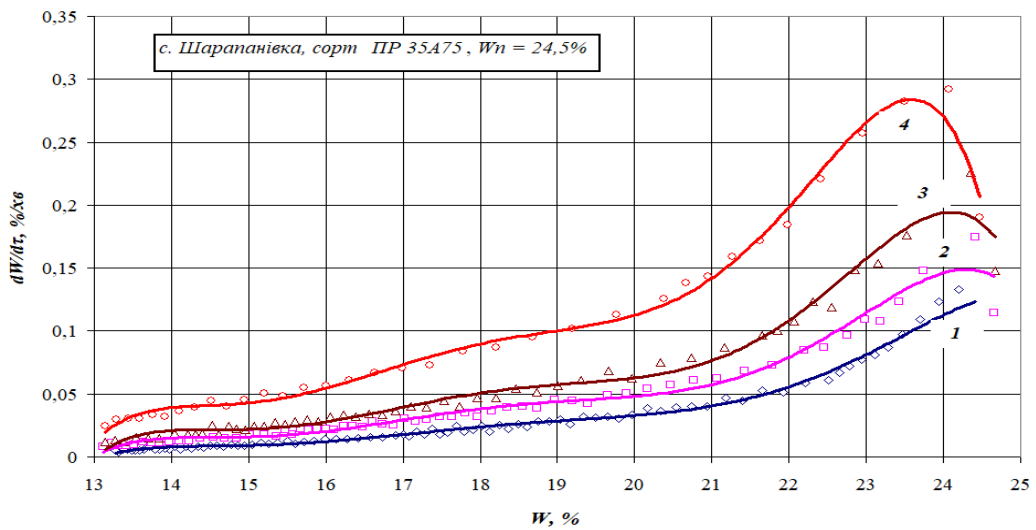


Рис. 3.23. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння насіння кукурудзи (с. Шарпанівка, сорт ПР 35А75):

1 - 50°C; 2 - 60°C, 3 - 70°C; 4 - 80°C; ($\delta = 4$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.)

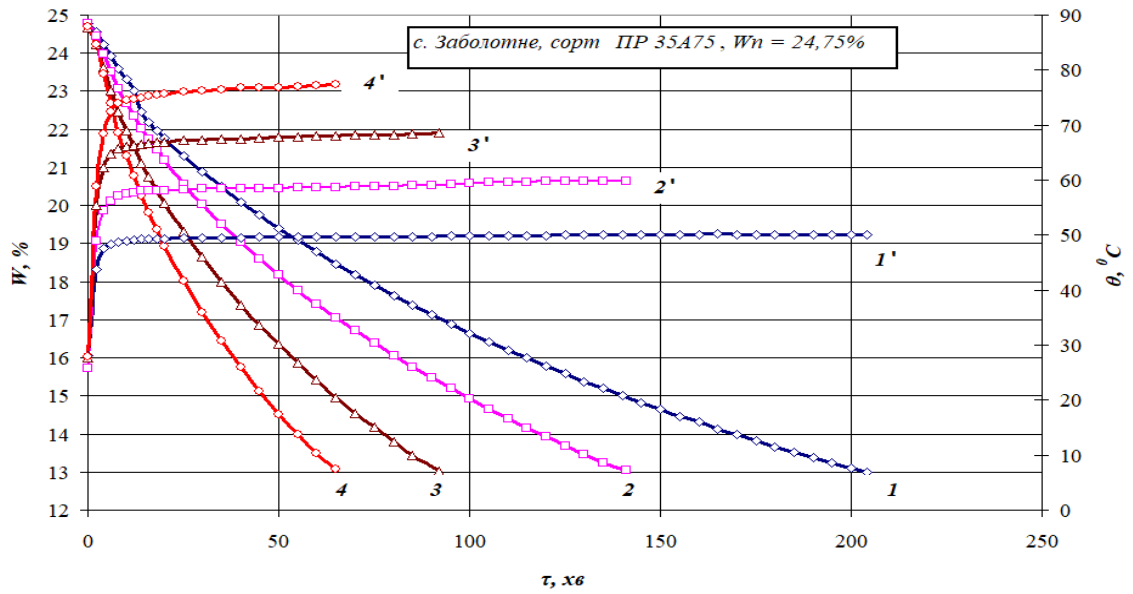


Рис. 3.24. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння насіння кукурудзи (с. Заболотне, сорт ПР 35А75):

1,1' - 50°C; 2,2' - 60°C, 3,3' - 70°C; 4,4' - 80°C; ($\delta = 4$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.)

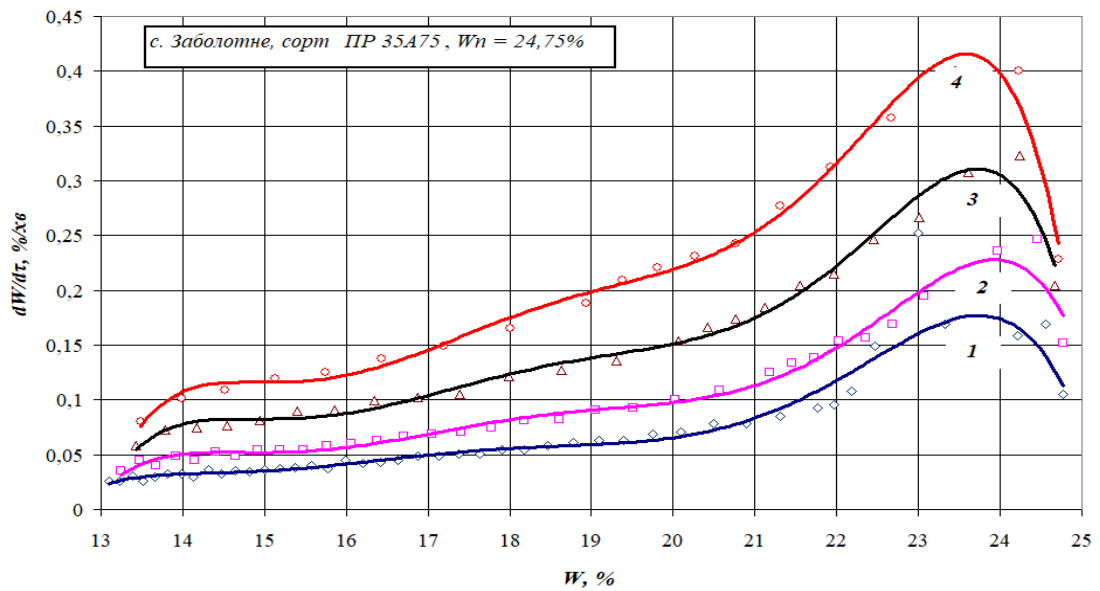


Рис. 3.25. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння насіння кукурудзи (с. Заболотне, сорт ПР 35А75):

1 - 50°C; 2 - 60°C, 3 - 70°C; 4 - 80°C; ($\delta = 4$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.)

Отже, як показали температурні криві, рівномірний прогрів матеріалу на модернізованому стенді дає можливість підняти температуру теплоносія при сушінні до 60°C.

3.6. Визначення схожості кукурудзи амілопектинової від температурних режимів сушіння

Для підбору оптимального режиму зневоднення насіння кукурудзи були проведені дослідження із визначення схожості, як фактору якості насінневого матеріалу.

Дослідні зразки насіння кукурудзи були відібрані у Вінницькій обл село Куниче Р9074, село Вільшанка Р9718, село Заболотне (ПР35А75) та досліджені на вдосконаленому конвективному стенді. Для кожного дослідження було взято по 20 шт насіння кукурудзи.

Починаючи із 5 дня дослідження, як вихідна сировина, так і режими 50, 60 °С мають схожість 100 % (рис. 3.26 а, 3.26 б, 3.26 в). При температурному режимі 70 °С (рис. 3.26 г) на 5 день проросло 2 насінини із 20 шт, при 80 °С – 0 (рис 3.26 д).

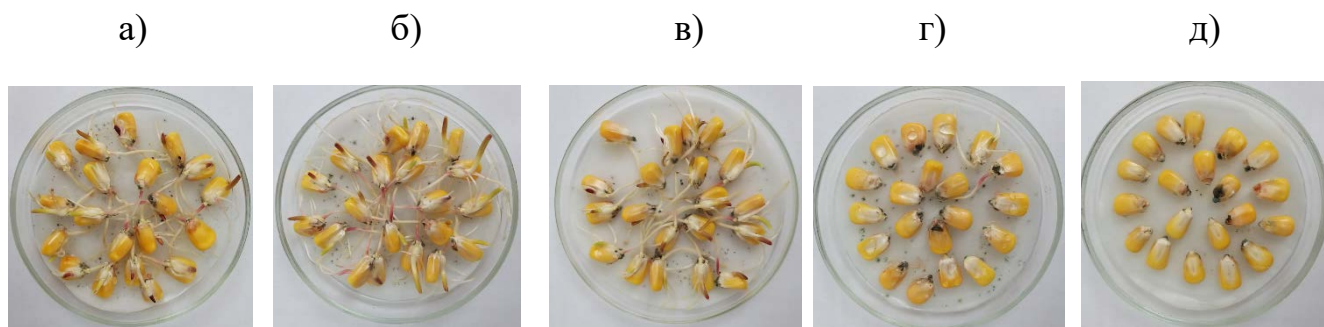


Рис. 3.26. Дослідження схожості зерна кукурудзи (село Куниче) Р9074 на 5 день пророщування

а) – вихідна сировина, б) – $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 3$; $\varphi = 72$, в) – $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 3$; $\varphi = 72$, г) – $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 3$; $\varphi = 76$, д) – $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 3$; $\varphi = 76$

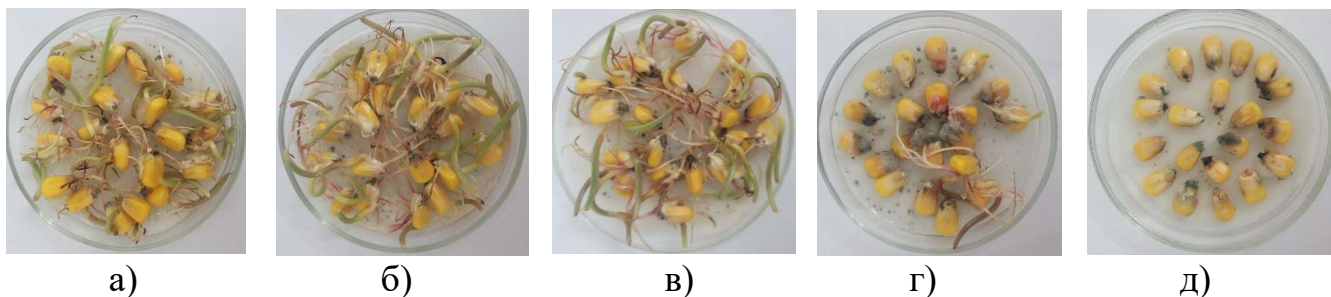


Рис. 3.27. Дослідження схожості зерна кукурудзи (село Куниче)

Р 9074 на 10 день пророщування

а) – вихідна сировина, б) – $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 3$; $\varphi = 72$, в) – $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 3$; $\varphi = 72$, г) – $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 3$; $\varphi = 76$, д) – $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 3$; $\varphi = 76$

Як видно із рис. 3.27, на десятий день дослідження вихідна сировина та режими при 50, 60 °С ростки та корінці нормально розвинені (рис. 3.27 а, б, в), а при температурі сушіння 70, 80 °С (рис. 3.27. г, д) продовжується ураження бактеріями. В таблиці 3.4. наведені результати схожості насіння кукурудзи на 10 добу від режимних параметрів сушіння. При температурі теплоносія 50-60 °С схожість матеріалу 100%. Отже для збереження якісних характеристик кукурудзи цю температуру перевищувати недоцільно [69].

Таблиця 3.4. Схожість сушіння кукурудзи при різних температурних режимах на вдосконаленому стенді

| | | 10 доба | |
|----------------------|--|------------|--|
| № | Режим сушіння | %, пророщ. | |
| КУНИЧЕ Р 9074 | | | |
| 1 | Вихідна сировина ($W = 16.3\%$) | 100 | |
| 2 | $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 3\text{ м/с}$; $\varphi = 72\%$ | 100 | |
| 3 | $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 3\text{ м/с}$; $\varphi = 72\%$ | 100 | |
| 4 | $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 3\text{ м/с}$; $\varphi = 76\%$ | 25 | |
| 5 | $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 3\text{ м/с}$; $\varphi = 76\%$ | 0 | |

Були проведені дослідження сушіння насіннєвого матеріалу зернових культур із застосуванням теплових насосів в процесах сушіння, зокрема пшениці, ячменю та вівса засвідчили зменшення енергетичних витрат на процес та високу схожість насіння [70,71].

3.7. Дослідження тепломасообмінних процесів при сушінні колоїдних капілярно-пористих матеріалів

Експериментальні дослідження кінетики вологообміну при сушінні насіння кукурудзи амілопектинової на конвективному сушильному стенді оброблялись за методикою Краснікова В.В.

Рівняння кривої сушіння в першому періоді має вигляд:

$$W = W_n - N\tau,$$

$$W_n \geq W \geq W_{k_1}, \quad (3.1)$$

де W , W_n та W_{k_1} –поточний, початковий та кінцевий вологовміст, %;

N – швидкість сушіння в перший період, %/хв.;

τ – поточний час, хв.

Знаходимо рівноважну вологість матеріалу W_p при вологості атмосферного повітря $\varphi = 60\%$ становить 12%.

Другий період сушіння починається при всіх режимах із W_{k_1} і часу τ_1 , рівного тривалості першого періоду сушіння. Цей час можна прийняти за початок першого періоду сушіння. З рис. 1. крива сушіння в другий період побудована в напівлогарифмічних координатах $\lg(W - W_p)$, τ і складається з двох частин.

Рівняння для першої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - W_p) = \lg(W_{k_1} - W_p) - K_1\tau_1 \quad (3.2)$$

$$W_{k_1} \geq W \geq W_{k_2}$$

де K_1 – коефіцієнт сушіння 1-ої частини другого періоду;

τ_1 – час, який відраховується від початку 1-ої частини другого періоду.

Рівняння для другої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - Wp) = \lg(W\kappa_2 - Wp) - K_2\tau_2 \quad (3.3)$$

$$W\kappa_2 \geq W \geq W\kappa_3$$

де K_2 – коефіцієнт сушіння 2-ої частини другого періоду;

τ_2 – час, який відраховується від початку 2-ї частини другого періоду.

Рівняння для третьої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - Wp) = \lg(W\kappa_3 - Wp) - K_3\tau_3 \quad (3.4)$$

$$W\kappa_3 \geq W \geq W\kappa_4$$

де K_3 – коефіцієнт сушіння 3-ої частини другого періоду;

τ_3 – час, який відраховується від початку 3-ї частини другого періоду.

$$\lg(W - Wp) = \lg(W\kappa_4 - Wp) - K_4\tau_4 \quad (3.5)$$

$$W\kappa_4 \geq W \geq W\kappa$$

де K_4 – коефіцієнт сушіння 4-ої частини другого періоду;

τ_4 – час, який відраховується від початку 4-ї частини другого періоду.

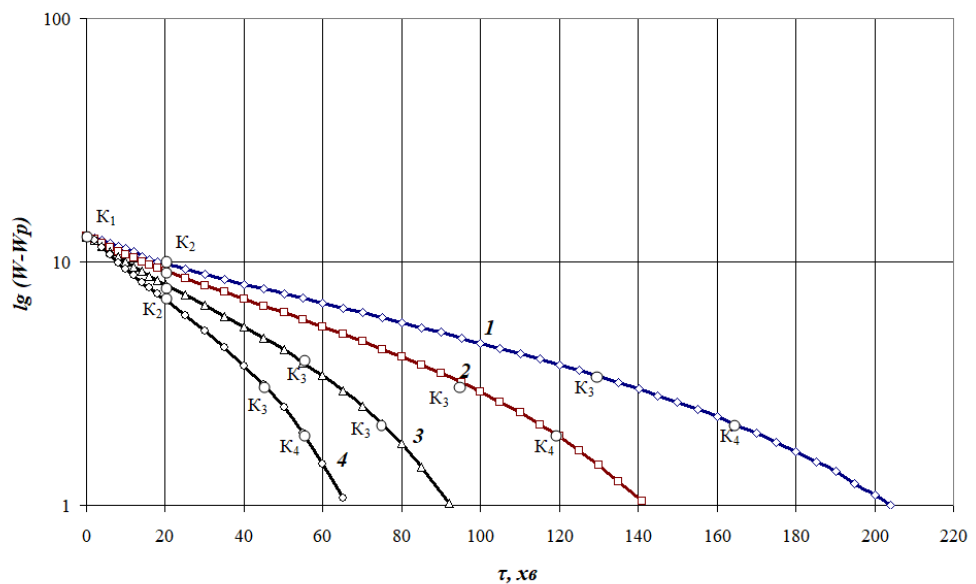


Рис. 3.28. Кінетика сушіння кукурудзи при наступних режимах:

1) 50°C; 2) 60 °C; 3) 70 °C; 4) 80 °C.

При математичному описанні кінетики вологообміну при сушінні в другому періоді повинні враховуватись величини, вірніше, емпіричні коефіцієнти, які

обумовлені властивостями даного матеріалу. Ці коефіцієнти повинні визначатися безпосередньо з досліду по сушінню ріпаку. Відносний коефіцієнт сушіння χ визначається лише формулою зв'язку вологи з матеріалом, його структурою, щільністю і не залежить від режиму обробки.

Величини відносних коефіцієнтів сушіння кукурудзи в другому періоді рівні і визначаємо з рис. 3.28 на прикладі режиму 4, які рівні:

$$\chi_1 = \frac{\lg W_{\kappa_1} - \lg W_{\kappa_2}}{N\tau_1} = \frac{\lg 24,75 - \lg 18,94}{0,4 \cdot 20} \approx 0,015 \quad (3.6)$$

$$\chi_2 = \frac{\lg W_{\kappa_2} - \lg W_{\kappa_3}}{N\tau_2} = \frac{\lg 18,94 - \lg 15,13}{0,4 \cdot 25} \approx 0,01 \quad (3.7)$$

$$\chi_3 = \frac{\lg W_{\kappa_3} - \lg W_{\kappa_4}}{N\tau_3} = \frac{\lg 15,13 - \lg 13,98}{0,4 \cdot 10} \approx 0,009 \quad (3.8)$$

$$\chi_4 = \frac{\lg W_{\kappa_4} - \lg W_{\kappa}}{N\tau_4} = \frac{\lg 13,98 - \lg 13,07}{0,4 \cdot 10} \approx 0,007 \quad (3.9)$$

Коефіцієнти сушіння в другому періоді сушіння рівні:

$$K_1 = \chi_1 \cdot N = 0,015 \cdot 0,4 \approx 0,006 \text{ хв}^{-1}$$

$$K_2 = \chi_2 \cdot N = 0,01 \cdot 0,4 \approx 0,004 \text{ хв}^{-1}$$

$$K_3 = \chi_3 \cdot N = 0,009 \cdot 0,4 \approx 0,0036 \text{ хв}^{-1}$$

$$K_4 = \chi_4 \cdot N = 0,007 \cdot 0,4 \approx 0,0028 \text{ хв}^{-1}$$

Розрахунок тривалості процесу сушіння за В.В. Красниковим базується на застосуванні рівнянь кінетики, попередньо описуючи процес.

Рівняння кінетики сушіння насіння ріпаку для двох частин другого періоду записується у вигляді:

$$W = Wk_1 \exp(-2,3\chi_1 N\tau_1), \quad (3.10)$$

$$W = Wk_2 \exp(-2,3\chi_2 N\tau_2). \quad (3.11)$$

Загальна тривалість процесу сушіння τ_T (без врахування періоду прогріву) складається з тривалості сушіння в першому періоді τ_1 , та в другому періоді τ_2 :

$$\tau_T = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4,$$

Загальна тривалість процесу:

$$\tau_T = \frac{1}{N} \left(\frac{1}{\chi_1} \lg \frac{Wk_1}{Wk_2} + \frac{1}{\chi_2} \lg \frac{Wk_2}{Wk_3} + \frac{1}{\chi_3} \lg \frac{Wk_3}{Wk_4} + \frac{1}{\chi_4} \lg \frac{Wk_4}{Wk} \right) \quad (3.12)$$

Узагальнена крива кінетики сушіння насіння кукурудзи амілопектинової при різних режимах розрахована за методом В.В. Красникова представлена в координатах $W - (N_{\max} \tau)$ на рис. 3.29.

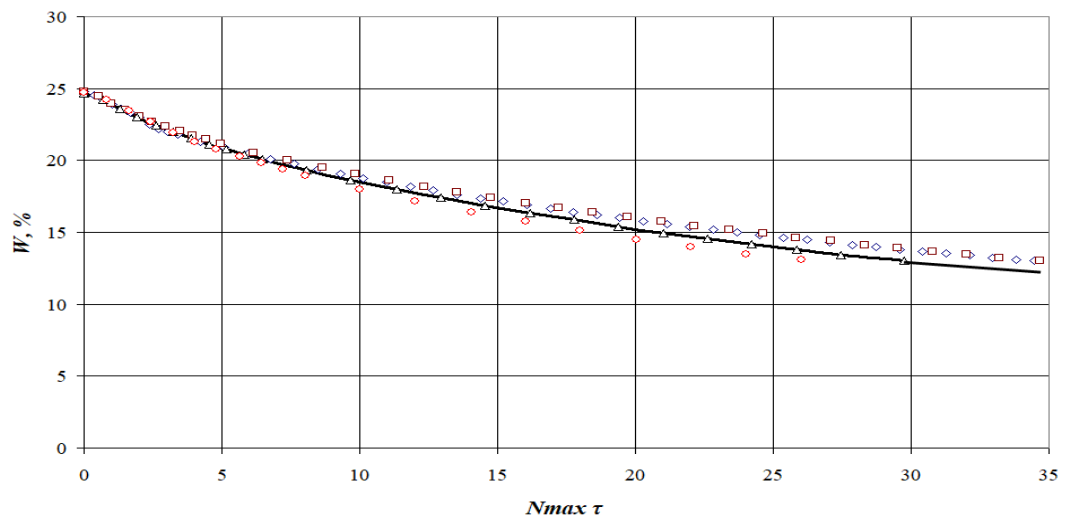


Рис. 3.29. Узагальнена крива кінетики сушіння кукурудзи в координатах $W - (N_{\max} \tau)$:

◇ – $t = 50^\circ\text{C}$; □ – $t = 60^\circ\text{C}$; △ – $t = 70^\circ\text{C}$; ○ – $t = 80^\circ\text{C}$

Суміщення кривих сушіння в одну криву підтверджує, що рівняння (3.6 – 3.9) правильно описує процес і що коефіцієнт $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4$ не залежить від режиму сушіння.

Середнє арифметичне відхилення результатів за методом

В.В. Красникова становить $\Delta = 3,2\%$, середня квадратична похибка $S_c = 0,52$, похибка теоретичних розрахунків від експериментальних даних відрізняється на $v = 2,65\%$.

В. А. Данилов [20] розробив інший метод узагальнення кривих сушіння. Він показує, що існує пропорційність між швидкістю сушіння в перший період N при будь-якому режимі і оберненою величиною тривалості процесу τ_T від початкового вологовмісту W_n до кінцевого W_k , причому ця пропорційність зберігається при всіх режимах.

$$N \approx \frac{1}{\tau_T} \quad (3.13)$$

$$N_1 \tau_1 = N_2 \tau_2 = \dots = N_n \tau_n = (N\tau)_W = \text{const} \quad (3.14)$$

де: N_1, N_2, \dots, N_n – швидкість сушіння в перший період (при відсутності першого періоду – максимальна швидкість сушіння) при різних режимах;

$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ – проміжний час сушіння, на протязі якого вологість змінюється від початкової вологості W_n до вологості W .

Змінна $N\tau$ є стійким комплексом величин, характерних для процесу сушіння, тому у відповідності з основами теорії подібності і аналізу розмірностей [20] величину $N\tau$ назвали узагальненою змінною або узагальненим часом сушіння. Підставляємо рівняння (3.13) в рівняння (3.14) отримаємо:

$$\frac{\tau}{\tau_{T1}} = \frac{\tau}{\tau_{T2}} = \dots = \left(\frac{\tau}{\tau_T} \right) = \text{const} \quad (3.15)$$

Це означає, що для даного проміжного вологовмісту W при незмінних W_n та W_k величина $\frac{\tau}{\tau_T}$ зберігається постійною незалежно від режиму сушіння.

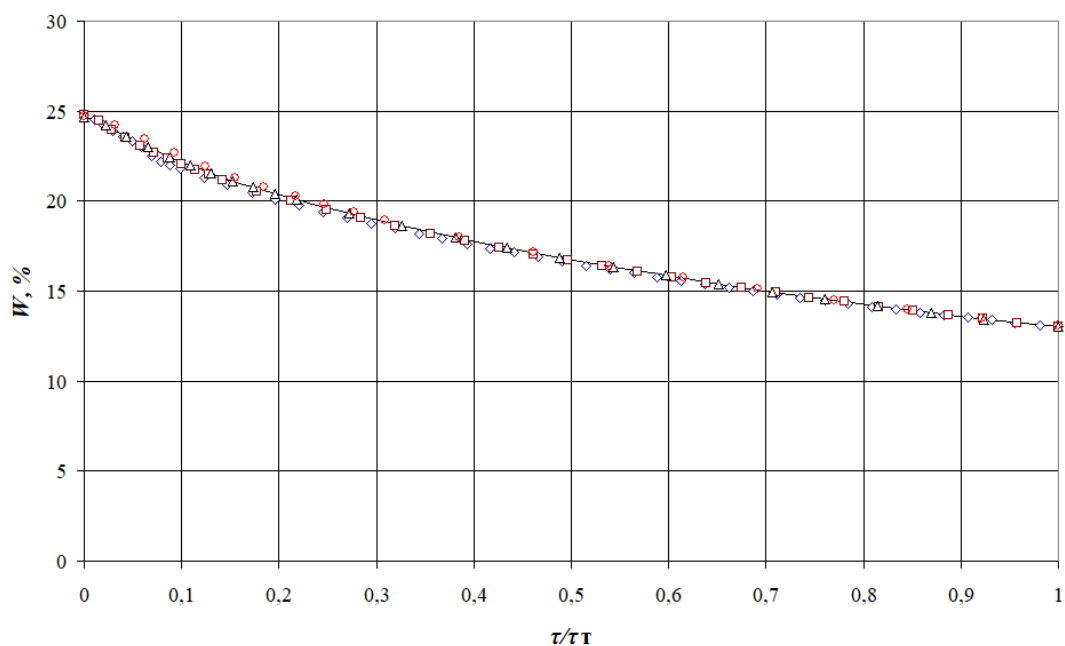


Рис. 3.30. Узагальнена крива кінетики сушіння кукурудзи
амілопектинової в координатах $W - (\tau/\tau_T)$

◇ – $t = 50^\circ\text{C}$; □ – $t = 60^\circ\text{C}$; △ – $t = 70^\circ\text{C}$; ○ – $t = 80^\circ\text{C}$.

На рис. 3.30 зображена крива сушіння насіння кукурудзи амілопектинової, яка перенесена в систему координат $W - (\tau/\tau_T)$ та трансформувалась в єдину узагальнену криву сушіння.

Узагальнені криві кінетики сушіння насіння кукурудзи амілопектинової за методом Красникова В.В. та Данилова В.А. гарно співпадають з різними режимами сушіння (рис. 3.29, 3.30). Узагальнена крива сушіння може бути побудована по одній дослідній кривій сушіння насіння кукурудзи амілопектинової, отриманій при будь якому режимі сушіння, що значно спрощує проведення дослідження кінетики сушіння [72].

Кінетика теплообміну при сушінні може бути повністю виявлена по даним кінетики вологообміну.

Значення величини $\frac{d\bar{t}}{d\bar{W}}$ визначає зміну середньої температури висушуваного матеріалу на одиницю зміни її середньої вологості за нескінченно малий проміжок часу і носить назву температурний коефіцієнт сушіння.

$$b = \frac{d\bar{t}}{d\bar{W}} \quad (3.16)$$

Величина b є функцією інтегрального вологості $b = f(\bar{W})$

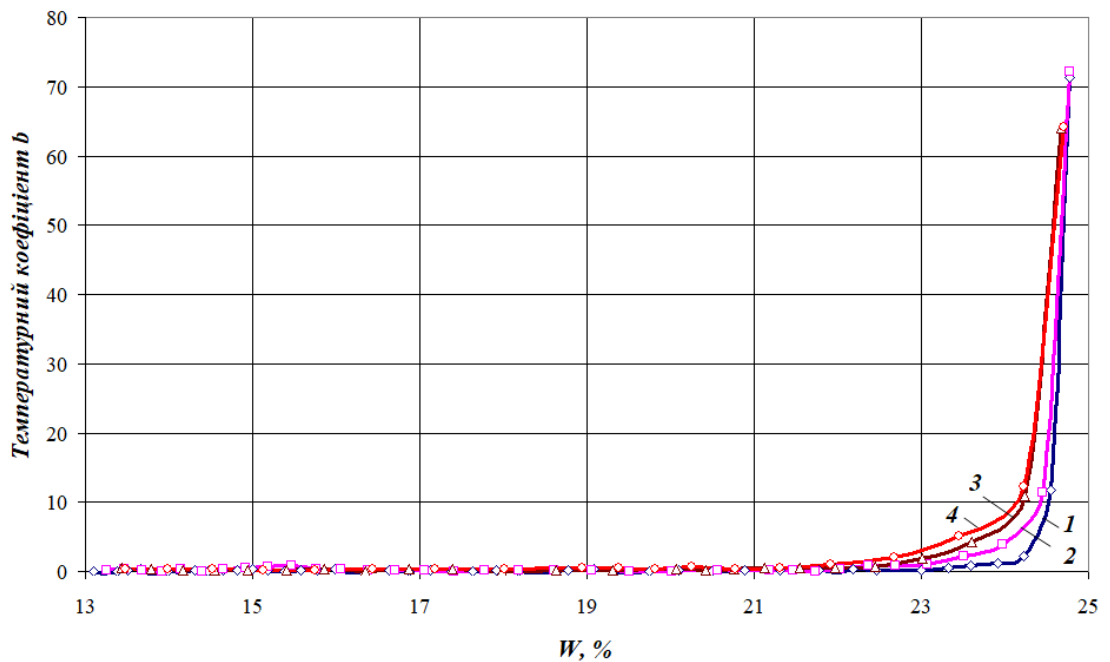


Рис. 3.31. Зміна температурного коефіцієнту від вологості кукурудзи при температурі теплоносія: 1 - 50°C; 2 - 60°C; 3 - 70°C; 4 - 80°C.

Загальна змінна $b\frac{\bar{c}}{r}$, як видно з рівняння (3.15) є інтегральною характеристикою кінетики процесу сушіння. Вона визначає відношення кількості теплоти на нагрівання матеріалу при сушінні та на випаровування вологи за нескінченно малий проміжок часу. Цей основний критерій сушіння названий критерієм Ребіндера:

$$Rb = b\frac{\bar{c}}{r} = \frac{\bar{c}}{r} \left(\frac{d\bar{t}}{d\bar{W}} \right) \quad (3.17)$$

Величина числа Rb залежить від температурного коефіцієнту сушіння, питомої теплоємності вологого матеріалу та питомої теплоти випаровування, а відповідно від форми зв'язку вологи з матеріалом.

Аналіз проведених методів показав, що вони успішно можуть бути застосовані до дослідження кінетики тепловологообміну [21].

3.8 Висновки до розділу 3

1. В результаті експериментального та теоретичного дослідження модернізовано дослідний конвективно - сушильний стенд з комбінованим нагрівом теплоносія.

2. Вперше досліджена кінетика процесу сушіння капусти білокачанної на конвективно-сушильному стенді із встановленим комбінованим нагрівом теплоносія яка показала зменшення тривалості сушіння та підвищення якості матеріалу.

3. Визначення початкової вологості матеріалу показало залежність від географічного розташування поля, ніж від сорту кукурудзи. Початкова вологість зібраного матеріалу кукурудзи залежить від умов під час збору врожаю, умов зберігання до теплової обробки та рельєфу поля.

4. Проведені дослідження по кінетиці сушіння кукурудзи на конвективному стенді встановили залежність режимів сушіння від гібриду.

5. Сушіння в елементарному шарі на експериментальному конвективному стенді показало рівномірність прогріву матеріалу, що позитивно впливатиме на якість отриманого продукту.

6. Рекомендовані режими сушіння на сушарках з високою продуктивністю та щільним шаром зерна не повинні перевищувати температуру матеріалу 55°C для збереження якості.

7. Розраховано тривалість зневоднення кукурудзи, похибка дослідної від розрахункової не перевищує 5%.

8. Досліджено залежність числа Ребіндера (як критерій оптимізації сушння) від вологовмісту матеріалу що обґрунтовує ефективність запропонованих режимів.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ КАМЕРНОЇ СУШАРКИ З ТОВСТОПЛІВКОВИМИ НАГРІВАЛЬНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

4.1. Використання в камерній сушарці технології нагріву товстоплівковими нагрівальними елементами

В сушильних установках широко використовують трубчасті електронагрівачі ТЕНи. В основі їх конструкції знаходяться провідники з високим опором і температурою плавлення (вольфраму, ніхрому та ін. сплавів) які запресовані в діелектричний шар і поміщені в металеву трубку. Така конструкція нагрівального елемента має ряд суттєвих недоліків:

- погана теплопередача від нагрівального провідника до поверхні ТЕНа, що призводить до його перегріву та як наслідок до швидкого зношування;
- слабкий захист провідника від контактування із повітрям, що призводить до його окислення та виходу з ладу;
- відбувається вигорання кисню в результаті контактування перегрітого провідника із повітрям;
- невисока питома потужність розсіювання тепла.

Використані нами в камерній сушарці новітні перетворювачі електричної енергії в теплову розроблені ДП «Інженерний Центр Сушка» ІТТФ НАНУ, мають кращу енергетичну ефективність та є оптимальними нагрівальними елементами для конвективних сушарок.

В основі нагрівального елемента є розроблена система різних по своїх властивостях композиційних наноструктурних матеріалів – паст.

На базі цієї системи матеріалів створена технологія виробництва нових нагрівальних елементів з унікальними можливостями.

Виготовлені за інноваційною технологією нагрівачі являють собою металеву основу із діелектричним покриттям (рис. 4.1) товщиною 1-8 мм практично будь якої геометричної конфігурації. На металевій основі типографічним способом резистивною пастою наноситься струмопровідний рисунок, що представляє

собою контур опору електричного кола, що надійно ізольований як від основи так і від навколишнього середовища.

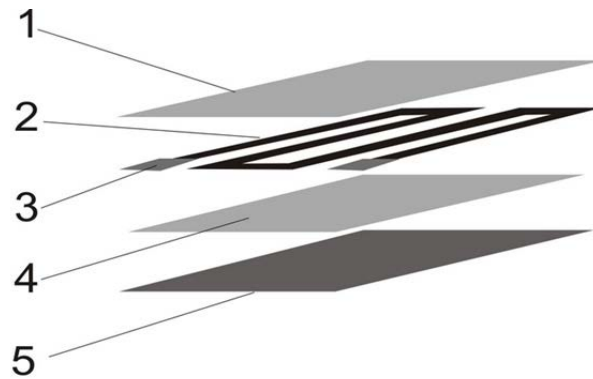


Рис. 4.1. Будова товстоплівкового нагрівального елемента

1,4 - захисний діелектричний шар, 2 - резистивний шар, 3 - контактна паста,
5 – металева або керамічна основа.

Технічні характеристики нагрівальних елементів:

- основа нагрівачів – н/ж сталь типу AISI 430, аналог 12X17 або кераміка типу ВК 94;
- композиційні пасти - ТУ У 24.7-14307699-001-2003 діелектрична, резистивна, контактна;
- напруга живлення від 1,5 В до 720 В як змінного так і постійного струму;
- питомий поверхневий опір резистивного шару Ом/квадрат – 0,05-50;
- зміна опору в процесі експлуатації за 10000 годин - не більше 5%;
- пробивна напруга – не менше 1250 В;
- максимальна питома потужність розсіювання до – 50 Вт/см²;
- максимальна робоча температура – 500 °С.

Переваги нагрівачів:

- зменшене енергоспоживання;
- надійність;
- саморегулювання споживаної потужності;
- низька теплова інерційність;

- направлене теплове випромінювання;
- рівномірний нагрів;
- універсальність;
- висока технологічність.

Нагрівальні елементи можуть працювати без зовнішнього регулювання тому що резистивні пасти володіють т.н. позисторним ефектом (високим позитивним температурним коефіцієнтом опору). Із підвищенням температури зростає електричний опір нагрівального елемента, який обмежує струм і відповідно потужність. (рис. 4.2) Таким чином ми отримуємо зменшення споживання електричної енергії при збільшенні електричного опору нагрівального елемента.

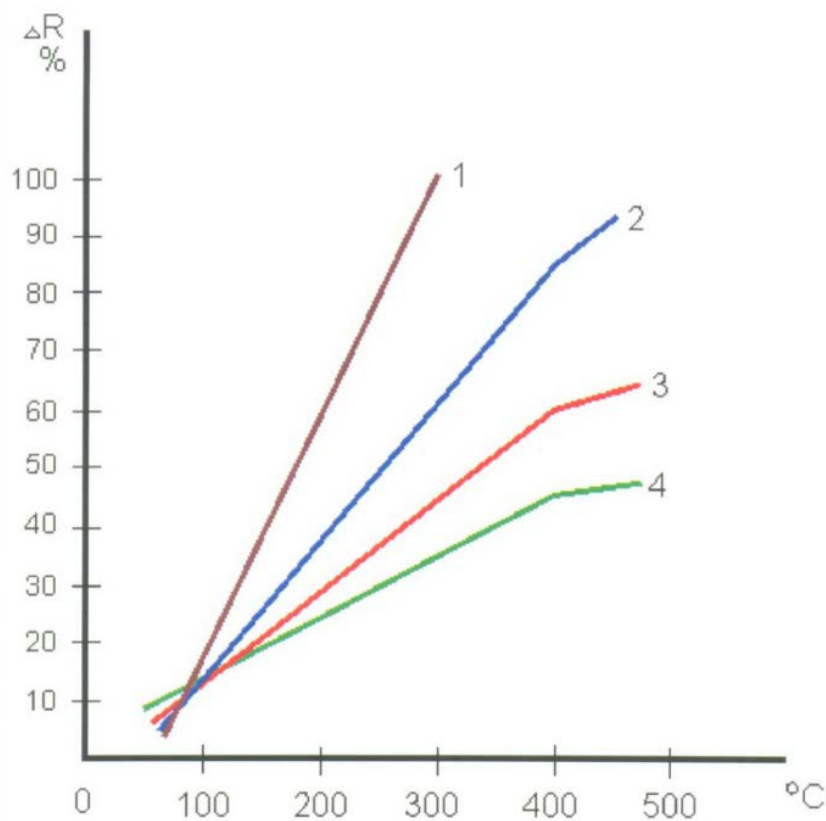


Рис. 4.2. Залежність опору нагрівальних елементів від температури, виготовлених із паст з різним питомим опором.

1. ПРН – 0,1 ом/□;
2. ПРН – 0,2 ом/□;
3. ПРН – 1,0 ом/□;
4. ПРН – 2,0 ом/□.

4.2. Розробка та випробування енергоефективної камерної сушарки з комбінованим нагрівом теплоносія

В Інституті Технічної Теплофізики були розроблені багатозонні тунельні сушильні установки які використовуються при завантаженні від 200 кг за годину до 1000 кг., в яких використовувались парові теплогенератори або на газу, які призначені підігрівати повітря що подається в сушарку. За допомогою згоряння природного газу відбувається нагрівання повітря. Прямий контакт між продуктами згоряння та підігрівом повітря відсутні. Парові сушарки працюють на парових калориферах. Недоліком цих сушарок є використання газу і пару які мають високу вартість. Для використання в малих фермерських господарствах з різноманітною сировиною та об'ємом виробництва до 200 кг на добу, їх використовувати недоцільно. Тому нами була розроблена енергоефективна камерна сушарка з комбінованим нагрівом теплоносія з використанням товстоплівкових нагрівальних елементів та ламп інфрачервоного випромінювання.

Камерна сушарка (рис. 4.3.) складається із сушильної камери (1) в яку заїжджають два візки (5,7). Корпус, в свою чергу, поділяється на внутрішній та зовнішній. Сушильна камера (1) ізолювана базальтовою ватою, товщина шару якої коливається від 0,2 до 0,35 м. Встановлений вентилятор відцентрового типу (2) (продуктивність 4000 м. куб/год., робочий тиск 360 Па) на вході в сушильну камеру. Для нагріву теплоносія встановлені електричні товстоплівкові нагрівальні елементи (4,6) загальною потужністю 42 кВт. Кабелі, котрі живлять нагрівальні елементи всередині камери, використали негорючого типу НГ із температурним допуском + 110 °С. Для роботи камерної сушарки передбачені автоматичні пристрої для регулювання:

- температури теплоносія (реле температури ТК - 6);
- час роботи (реле часу Т - 2);
- швидкість руху теплоносія (частотний регулятор) .

В середині камери (1) також розміщені три реле для вимірювання вологи та температури РКВТ – 2/16. Вони розміщені на вході в сушарку теплового агента, між візками та на виході із сушарки теплоносія. Для регулювання викиду відпрацьованого теплоагенту в камерній сушарці передбачені шибер (9) та компенсаційний шибер (10) для підводу свіжого повітря.

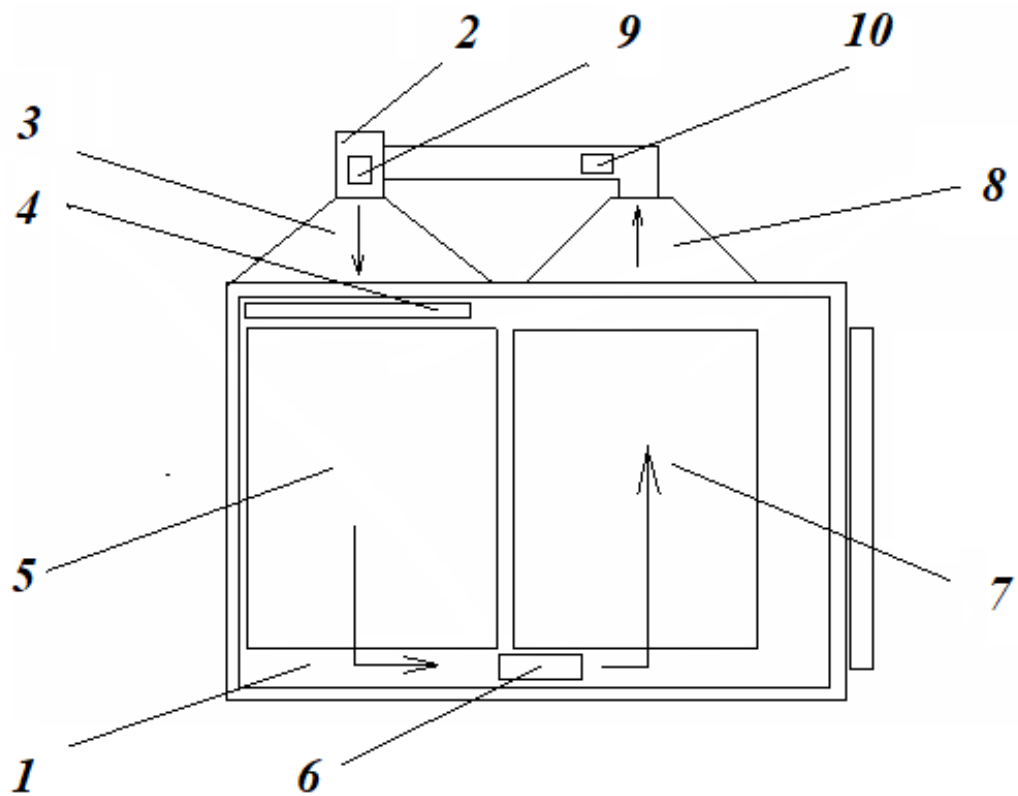


Рис. 4.3. Схема камерної сушарки

1 – камера, 2 – відцентровий вентилятор, 3 – дифузор, 4 – перша батарея нагрівальних елементів, 5 – перший візок, 6 – друга батарея нагрівальних елементів, 7 – другий візок, 8 – конфузор, 9 – шибер, 10 – компенсаційний шибер.

Розроблена нами сушарка являє собою камеру (1) в яку заїжджають два візки загальною площею сушіння 20 м² (рис. 4.6). Для збільшення ефективності всередині камери змонтовані нагрівальні елементи, відповідно до руху теплового агента, нагрівальні елементи встановлені перед візками по всій їх висоті та розміщені навпроти піддонів. Відцентровий вентилятор (2) нагнітає повітря через

дифузор (3) до першої батареї нагрівальних елементів (4), де воно нагрівається і потрапляє на перший візок (5). Після того як тепловий агент проходить перший візок, він насичується випареною вологою із матеріалу, та його температура знижується. Після першого візка тепловий агент потрапляє на другу батарею нагрівальних елементів (6), де догрівається та проходить другий візок (7) ще більше насичуючись випареною вологою із матеріалу, і його температура знижується. Після другого візка тепловий агент насичений вологою через конфузор (8) потрапляє до вентилятора (2) який нагнітає його знову в камеру, але перед цим через шибер (9) певна кількість відпрацьованого теплоносія виводиться за межі сушарки, через компенсуючий шибер (10), завдяки зоні розрідження, частково всмоктується свіже повітря. Таким чином сушильна установка працює з частковою рециркуляцією теплоносія. Якщо шибери (9,10) зачинені, то сушарка працює з повною рециркуляцією теплоносія.

Нагрівальний елемент рис. 4.4. який використаний в тунельній сушарці в кількості 42 шт.

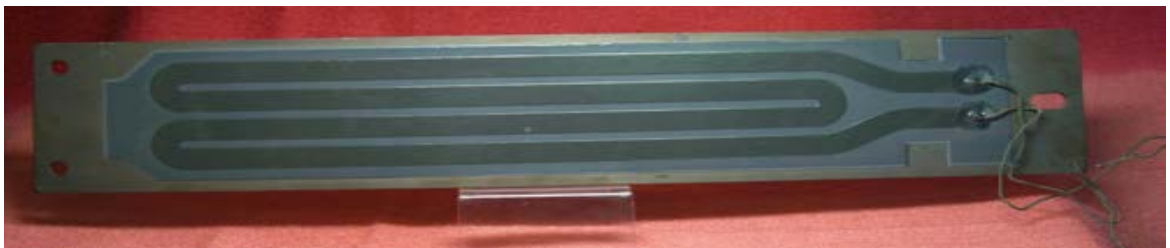


Рис. 4.4. Товстоплівковий нагрівальний елемент тип якого використаний в тунельній сушарці

HE 385x75x3мм; U-220 В; P-1000 Вт.

Нагрівальні елементи розміщені на протилежних стінках тунельної сушарки по 21 шт. рис. 4.5.



Рис. 4.5. Товстоплівкові нагрівальні елементи встановлені в тунельній сушарці

Кількість нагрівальних елементів 21 + 21 шт., потужність кожного елемента 1 кВт, відстань між елементами 60 мм.



а)

б)

в)

Рис. 4.6. Енергоефективна камерна сушарка для сушіння рослинної сировини.
а – вигляд зпереду, б – шафа керування, в – вигляд з візками.

ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА КАМЕРНОЇ СУШАРКИ

| | |
|--|----------------|
| Продуктивність по вологій сировині, кг | 100 |
| Температура сушіння матеріалу, °С | 50 – 100 |
| Швидкість руху теплоносія, м/с | 1 - 5 |
| Загальна потужність установки, кВт | 43,5 |
| Продуктивність вентилятора, м ³ /год. | 3000 |
| Тиск вентилятора, Па | 380 |
| Кількість візків в установці, шт. | 2 |
| Кількість піддонів на візку, шт. | 20 |
| Загальна площа сушіння, м ² | 20 |
| Габаритні розміри сушарки, м | 1,43x1,87x1,79 |

Процес сушіння матеріалу здійснюється наступним чином: сировина проходить стадію очистки та миття, нарізається пластинками на овоченарізній машині та укладається моношаром на візки (рис. 4.7).



Рис. 4.7. Візки із матеріалом перед роботою.

Завантажені візки закриваються в камеру та сушарка зачиняється ролетою (рис. 4.6,а). Шибери переводимо в положення «закрито». Виставляємо на реле часу та температури необхідні режими сушіння і запускаємо сушарку. Температура в камері при повній рециркуляції теплоносія швидко зростає та

досягає потрібного значення і сушарка виходить на режим, після чого шибери переводять в робоче положення «відкрито».

4.3. Дослідження кінетики сушіння в камерній сушарці

Яблука для переробки поступають на інспекційний стіл, після чого їх подають на миття. Після миття яблука яблука нарізають на овоченарізній машині товщиною шматків 5 мм. Потім їх розміщують в один шар на піддонах з перфорацією. Піддони в кількості 20 шт завантажують у візок. Після чого візок заїжджає в сушильну камеру, в яку вміщуються два завантажені візки.

На рис. 4.8. зображена кінетика сушіння матеріалу в створеній енергоефективній камерній сушарці.

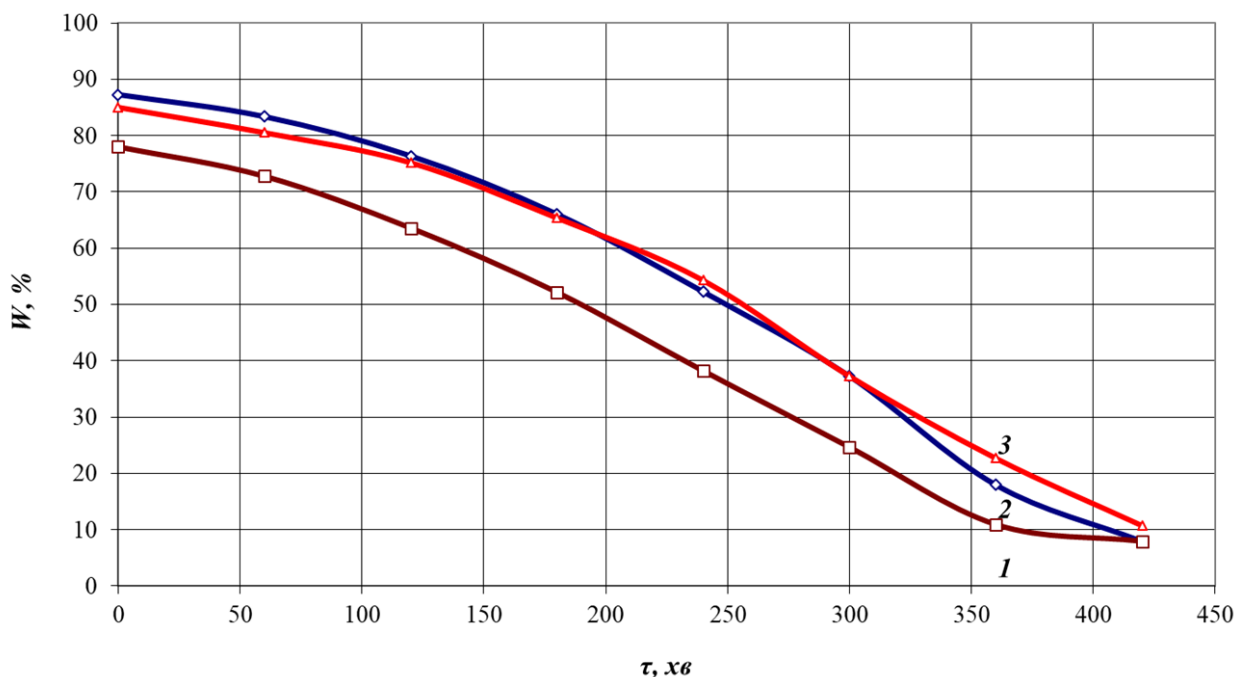


Рис. 4.8. Кінетика сушіння картоплі (1), гарбуза (2), та яблук (3) в енергоефективній камерній сушарці.

$$V = 3 \text{ м/с}, \delta = 4 \text{ мм}, d = 10 \text{ г/кг с.п.}, t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

Форми кривих сушіння характерні для колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Криві сушіння характеризуються зміною середньої вологості матеріалу $W\%$ та часу τ . Аналіз цих кривих показує що на початку процесу

відбувається короткочасний прогрів, при цьому зменшується вологість матеріалу. Прогрів матеріалу всіх трьох кривих має однаковий характер. Випаровування вологи в першому періоді змінюється по прямій лінії. Потім швидкість випаровування вологи починає зменшуватися і починається другий період процесу сушіння. В кінці сушіння після рівноважної вологи крива сушіння відповідає даному режиму сушіння і швидкість наближається до нуля.

Тривалість сушіння овочів становить 420 хв. та температурі матеріалу 60 °С, вологості від 4 до 8 %.

На рис. 4.9. представлені криві швидкості сушіння які показують зміну вологи матеріалу за одиницю часу $dW/d\tau$.

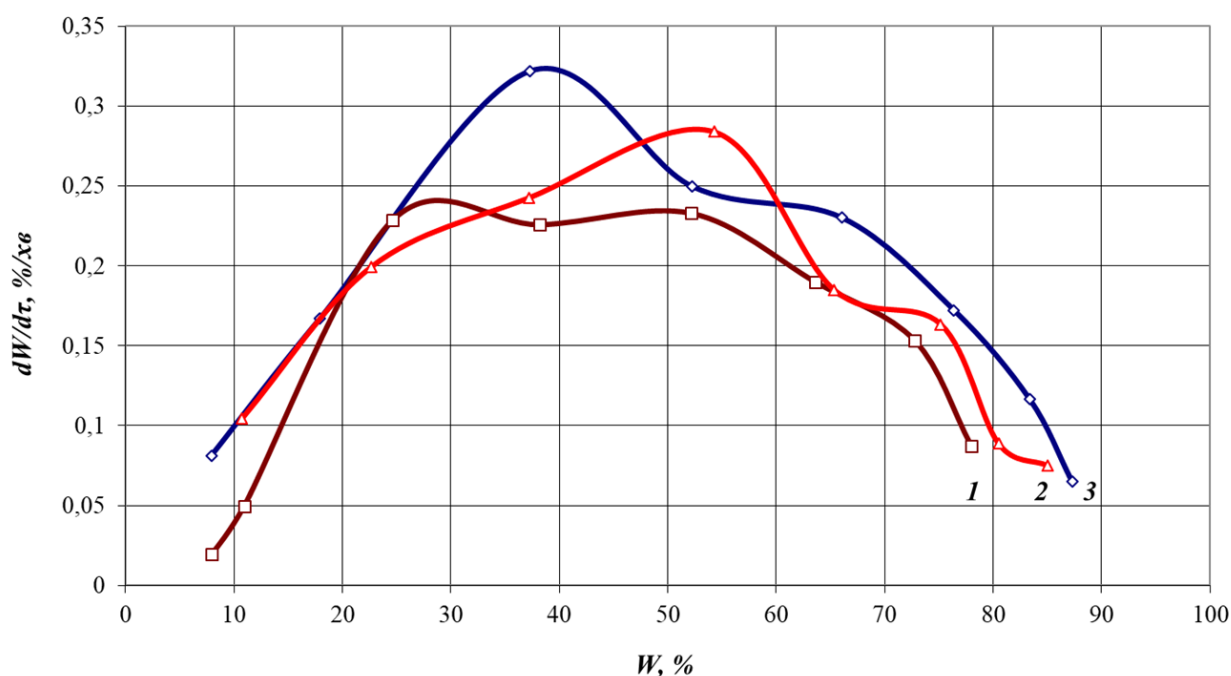


Рис. 4.9. Криві швидкості сушіння картоплі (1), яблука (2) та гарбуза (3)

$$V = 3 \text{ м/с}, \delta = 4 \text{ мм}, d = 10 \text{ г/кг с.п.}, t = 60 \text{ °С}$$

Як видно з кривих швидкості сушіння на початку процесу з прогрівом матеріалу швидкість сушіння збільшується від 0 до максимального значення 0,32 %/хв у гарбуза. Відповідно у картоплі та яблука 0,24 %/хв та 0,28%/хв. Після цих

точок починається падіння швидкості сушіння. Після рівноважної вологи 20% у всіх зразках відбувається падіння швидкості до 0.

Проводилося сушіння нарізаних яблук двома способами, конвективним та комбінованим (ІЧ + конвекція) (рис. 4.10).

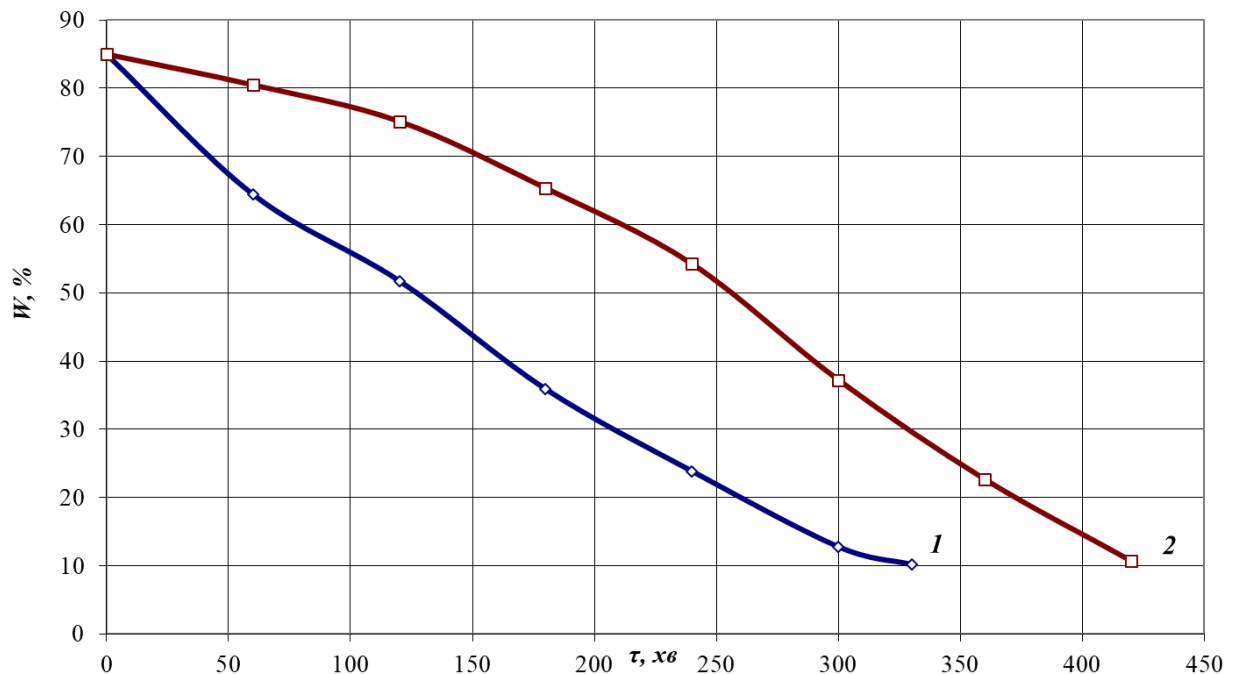


Рис. 4.10 Криві сушіння яблук комбінованим (1) та конвективним (2) способом: $V = 3$ м/с, $\delta = 4$ мм, $d = 10$ кг/Г с.п., $t = 60$ °С.

Під час сушіння конвективним способом від початкової вологи $W_{\text{поч}} = 87\%$ до кінцевої $W_{\text{кін}} = 5\%$ тривалість сушіння склала 420 хв.

Для підвищення інтенсифікації процесу запропоновано на початковому етапі прогрівання матеріалу застосовувати ІЧ випромінювання, що різко підвищує видалення вологи протягом 60 хв., після чого ІЧ випромінювання вимикається і матеріал сушиться конвективно до завершення процесу.

Така схема обробки та тривалість з використанням ІЧ випромінювання пов'язана з якісними характеристиками матеріалу (збільшення тривалості впливу ІЧ випромінювання призводить до підгоряння матеріалу). За термін використання ІЧ випромінювання протягом 60 хв. продукт втратив 20% вологи з матеріалу, а при

конвективному способі сушіння продукт втратив 20% вологи з матеріалу на 180-й хвилині, тому ми спостерігаємо пришвидшення процесу на 120 хв., або в 3 рази.

Порівняння двох способів сушіння в камерній сушарці вказує на те що ІЧ випромінювання при нагріванні матеріалу збільшує швидкість видалення вологи в 4,85 рази. При досягненні вологості матеріалу $W = 65\%$ швидкість сушіння становить $0,21\%/хв.$ Після чого спостерігається збільшення швидкості сушіння при конвективному способі сушіння у порівнянні із комбінованим, що пов'язано із вимкненням ІЧ випромінювачів (рис. 4.11).

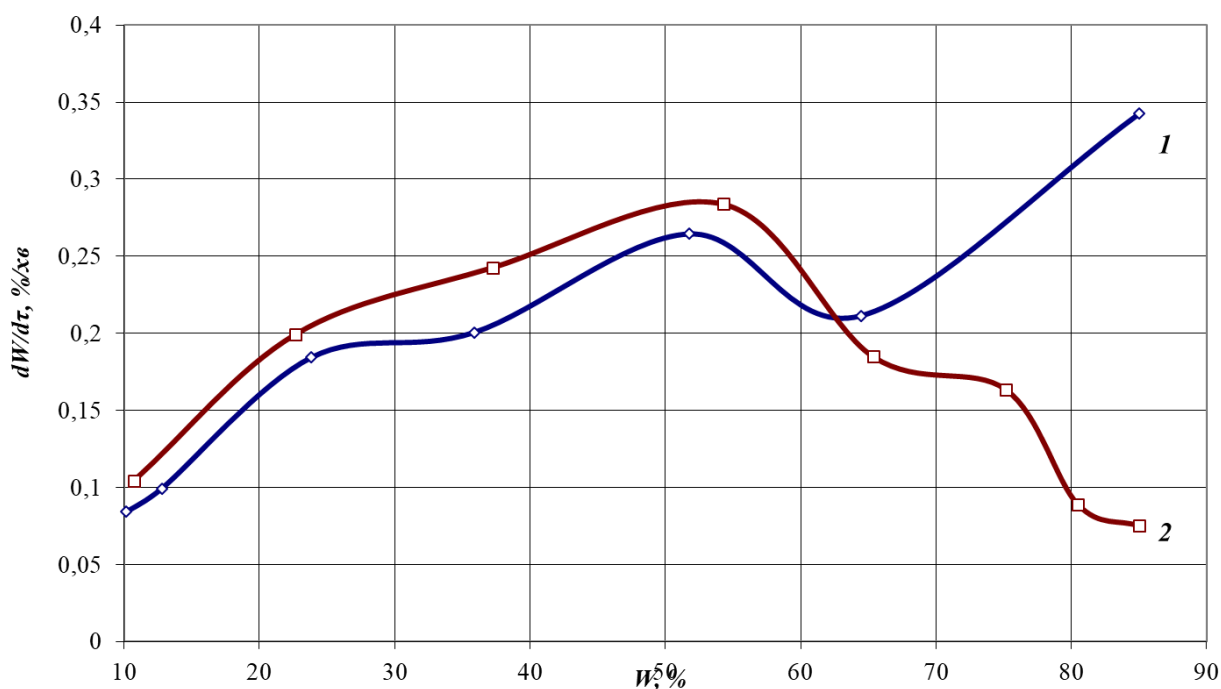


Рис. 4.11 Криві швидкості сушіння яблук комбінованим (1)

та конвективним (2) способом

$$V = 3 \text{ м/с}, \delta = 4 \text{ мм}, d = 10 \text{ кг/Г с.п.}, t = 60 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Характер кривих після значення вологості $W = 65\%$ однаковий, що вказує на конвективну складову процесу. На початковому етапі при комбінованому способі сушіння швидкість видалення вільної вологи більша ніж при конвективному способі, що пояснюється зниженням швидкості сушіння в другому етапі.

4.4. Розрахунок витрат теплоти на випаровування 1 кг вологи в залежності від температури відпрацьованого сушильного агента

Оцінка якості сушарки оцінюється за її енергетичним к.к.д., який визначається співвідношенням корисної енергії до всієї витраченої на процес:

$$\eta = \frac{q_{\text{кор}}}{q_{\text{витр}}} \quad (4.1)$$

Для будь якої сушильної установки використаною теплотою потрібно вважати тільки ту теплоту, яка затрачена на випарення вологи. Ця теплота (кДж/кг с.г.), віднесена до 1 кг сухого газу (повітря), записується у вигляді:

$$q_{\text{кор}} = r \frac{d_2 - d_1}{1000} \quad (4.2)$$

де: r – питома теплота пароутворення; вона приймається по середній температурі матеріалу:

$$r = \frac{r_1 + r_2}{2} \quad (4.3)$$

Якщо матеріал висушується до низької вологості, враховується також величина Δr – витрата енергії на подолання зв'язку вологи з матеріалом.

Витрачена теплота для конвективних сушарок являє собою теплоту, що приймає 1 кг газу в калорифері:

$$q_{\text{витр}} = c_p (t_1 - t_0) \quad (4.4)$$

Якщо рахувати на 1 кг випареної вологи, тоді:

$$\eta = \frac{r}{q_{\text{калориф}}}, \text{ або } \eta = \frac{r + \Delta r}{q_{\text{калориф}}} \quad (4.5)$$

де: r – питома теплота пароутворення, 2400 кДж/кг для вільної вологи, +10% для зв'язаної що становить 2640 кДж/кг;

$q_{\text{калориф}}$ – витрачена енергія, кДж/кг.

Для визначення ефективності тепломасообміну при сушінні картоплі та гарбуза в камерній сушильній установці побудовано аналіз числа Ребіндера (рис. 4.12).

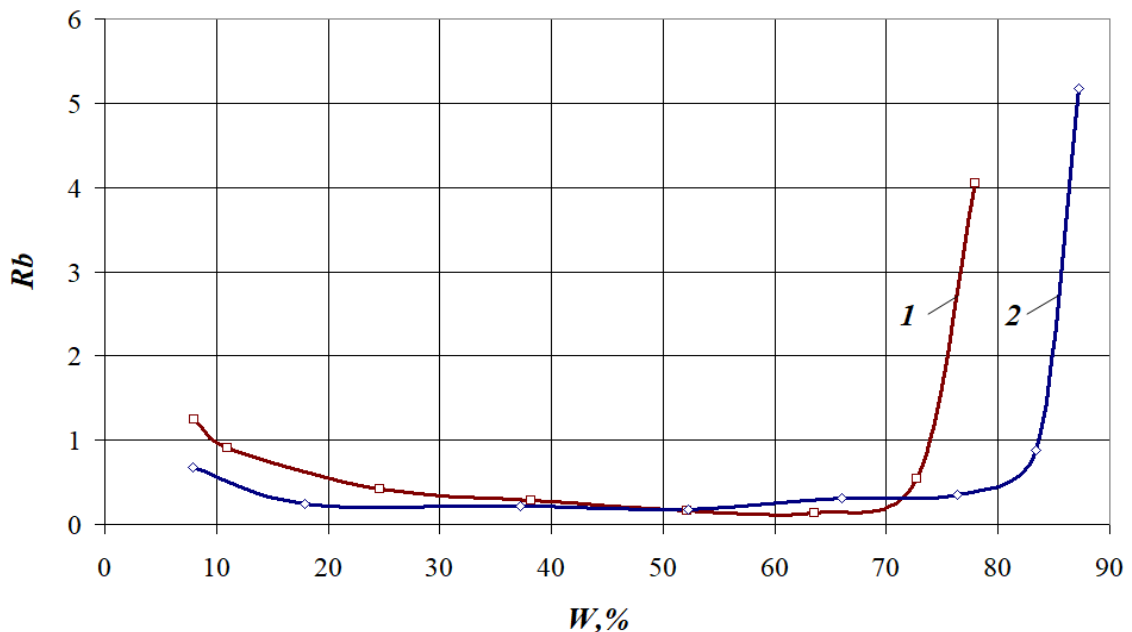


Рис. 4.12. Зміна числа Ребіндера від вологості картоплі (поз. 1) та гарбуза (поз. 2): $V = 3$ м/с, $\delta = 4$ мм, $d = 10$ г/кг с.п., $t = 60$ °С.

Аналіз числа Ребіндера показує, що на початку процесу сушіння (біля 90 хвилин у гарбуза і 60 хвилин у картоплі) процес теплообміну неефективний, більшість енергії витрачається на нагрів матеріалу, а не на випаровування з нього вологи. З вологості у картоплі $W = 70\%$, а у гарбуза $W = 80\%$, процес тепломасообміну при зневодненні цих матеріалів ефективний, числа Ребіндера значно менше 1, а на деяких ділянках наближаються до 0. Це вказує що більшість енергії витрачається на випаровування вологи з матеріалу, а не на його нагрівання. На заключному етапі сушіння з вологості матеріалів $W = 20 - 30\%$ процес тепломасообміну при зневодненні картоплі і гарбуза уповільнюється, більшість енергії витрачається на нагрів матеріалу ніж на процес випаровування вологи, число Ребіндера збільшується.

На рис. 4.13 представлена діаграма погодинних витрат енергії на випарену вологу та затрачена на неї енергія.



Рис. 4.13 Діаграма погодинних витрат енергії на випарену вологу при завантаженні сушарки на 50% при $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Камерна сушарка була завантажена матеріалом на 50% масою 45 кг. Тривалість процесу становила 420 хв. Із діаграми видно що під час прогріву матеріалу інтенсивно випарувалась волога в кількості 9,89 кг на протязі 60 хв., при цьому було витрачено 5457 кДж/кг випаруваної вологи енергії, це свідчить що випаровувалась вільна волога. В наступні 60 хв. подібний процес, що свідчить також про випарення вільної вологи. Процес інтенсифікується при випаренні вологи у кількості 9,94 кг, витрати енергії зменшились. Це пов'язано із тим що на 120-й хвилині процесу матеріал вже прогрівся і енергія витрачається лише на випаровування вільної вологи. На 180-й хвилині починають зростати енерговитрати, а кількість випареної вологи зменшується. Це пояснюється тим що вільна волога майже випарувалась. В подальшому з 240-ї хвилини відбувається процес видалення зв'язаної вологи. Що характеризується зменшенням видаленої вологи до 4,87 кг вологи на яку витрачено 5173 кДж/кг випаруваної вологи енергії. В подальшому на діаграмі ми бачимо зменшення кількості випареної вологи та збільшення витрат енергії. Після 360-ї хвилини

процес доцільно завершувати, тому що йде різке зростання енергетичних витрат при мінімальному видаленні вологи і подальший процес сушіння стає енергозатратний. Це також підтверджується кривими кінетики сушіння та швидкості сушіння. (рис.4.10, 4.11).

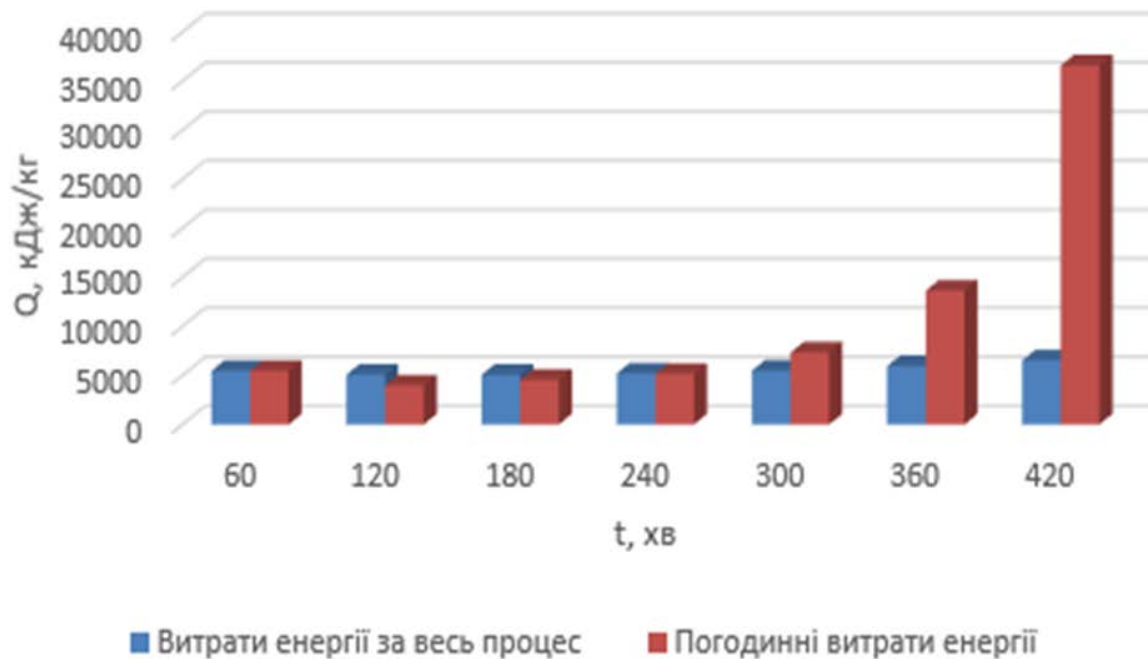
На рисунку 4.14 представлена діаграма погодинних витрат енергії при завантаженості сушарки 100% масою сировини 80 кг.



Рис. 4.14 Діаграма погодинних витрат енергії на випарену вологу при завантаженні сушарки на 100% при $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Характер зміни випаруваної вологи та затраченої на те енергії подібний до діаграми яка представлена на рис. 4.13. Як видно з рис. 4.14 при більшому завантаженні інтенсивність процесу зростає, в результаті чого ми маємо менші витрати енергії на кілограм випареної вологи. На відміну від попередніх досліджень процес сушіння можна завершувати на 300-й хвилині якщо нам потрібно отримати сухофрукти.

Були проведені розрахунки погодинних витрат енергії та за весь процес при завантаженні сушарки на 50% масою сировини 45 кг рис. 4.15.

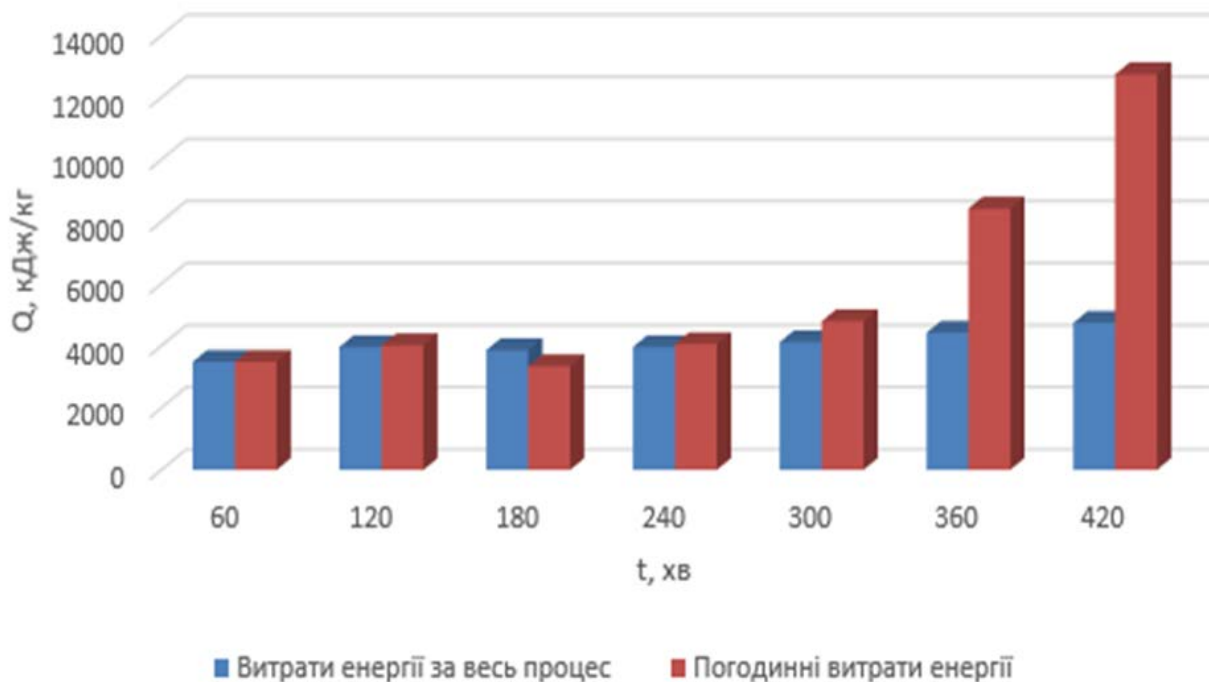


| | | | | | | | |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| ■ Витрати енергії за весь процес | 5457 | 5083 | 5076 | 5204 | 5489 | 5956 | 6534 |
| ■ Погодинні витрати енергії | 5457 | 3981 | 4550 | 5173 | 7344 | 13647 | 36608 |

Рис. 4.15. Діаграма погодинних витрат енергії та за весь процес із завантаженням сушарки на 50% масою 45 сировини кг сировини, при $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Із діаграми видно що витрати енергії за весь процес склали 6534 кДж/кг випареної вологи.

Були проведені розрахунки погодинних витрат енергії та за весь процес при завантаженні сушарки 100% масою сировини 80 кг рис. 4.16. Із діаграми видно що витрати енергії за весь процес склали 4742 кДж/кг випареної вологи. Порівняння загальних енергетичних витрат при завантаженні сушарки 45 кг та 80 кг показали що енергоефективність сушарки підвищується при більшому завантаженні в 1,37 рази.



| | | | | | | | |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| ■ Витрати енергії за весь процес | 3484 | 3960 | 3858 | 3960 | 4120 | 4420 | 4742 |
| ■ Погодинні витрати енергії | 3484 | 4017 | 3340 | 4057 | 4791 | 8420 | 12751 |

Рис. 4.16. Діаграма погодинних витрат енергії та за весь процес із завантаженням сушарки 100% масою сировини 80 кг, при $t = 60$ °С.

Використовуючи формулу 4.5 був розрахований к.к.д. сушарки. При завантаженні сушарки на 50% та тривалості сушіння 420 хв. к.к.д. становить $\eta = 45,5\%$. При завантаженні сушарки на 100% та тривалості сушіння 420 хв. к.к.д. становить $\eta = 62,3\%$. Оскільки при тривалості сушіння 360 хв. вологість матеріалу становила 8 %, якої достатньо для отримання порошків, тому процес на цьому етапі доцільно завершити. К.к.д. сушарки при цьому становитиме $\eta = 63,4$ %.

При виробництві порошків 80% енергії затрачається на процес сушки. Тому створення енергоресурсозберігаючої технології вимагає використання режимів сушки і сушильних установок з мінімальними енергозатратами.

Витрата теплоти на випарення 1 кг води з врахуванням ступеню насичення сушильного агента водяними парами в залежності від t_1 та t_2 показаний на рис. 4.17.

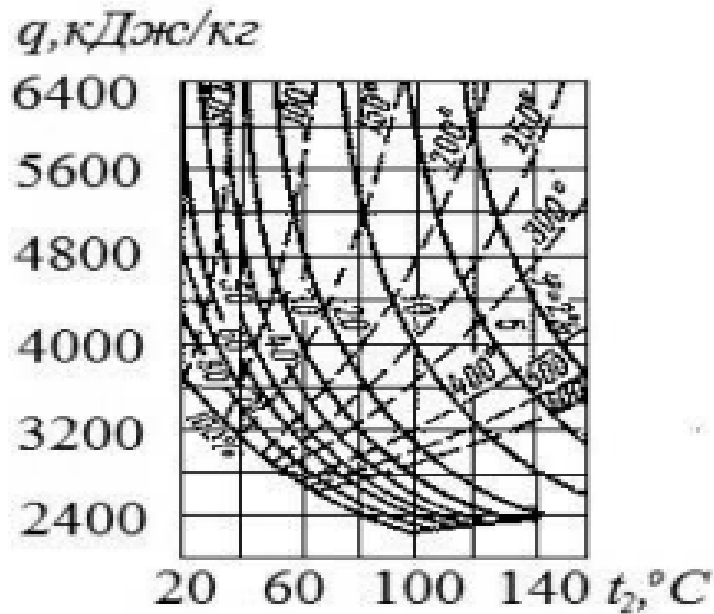


Рис. 4.17. Витрата теплоти на випарення 1 кг вільної вологи в теоретичній сушарці в залежності від температури відпрацьованого сушильного агента t_2 – при різних вологостях сушильного агента (суцільні криві); при різних початкових температурах (пунктирні криві). Вихідні розрахункові дані: температура повітря – $10\text{ }^\circ\text{C}$; вологість – 80%; тиск – 98,0 кПа.

Із рисунку видно, що t_1 має основний вплив на питомий розхід теплоти, який прямо пропорційний термічному к.к.д. Так, при $t_1 = 50\text{ }^\circ\text{C}$ і насиченості 40 %, розхід теплоти $q = 5600\text{ кДж/кг}$, а при тій же насиченості, но при $t_1 = 150\text{ }^\circ\text{C}$, $q = 3700\text{ кДж/кг}$ або на 34 % менше. Отже, підвищення температурного рівня процесу сушки з теплотехнічної точки зору є корисним. [55]

4.5. Висновки до розділу 4

1. Випробовування в камерній сушарці товстоплівкових нагрівальних елементів показали що, на відміну від звичайних трубчатих ТЕНів, вони мають кращу енергетичну ефективність та є оптимальними нагрівальними елементами для конвективних сушарок.

2. Розраховано зміну кривих числа Ребіндера від вологості в камерній сушильній установці, які показали характер змін витрат енергії на випаровування вологи в процесі сушіння.

3. Проведено дослідження кінетики сушіння картоплі, гарбуза та яблук в камерній сушарці при завантаженні матеріалу 45 кг та 80 кг, показали кращу ефективність установки при більшому завантаженні, в 1,37 рази.

3. Проведено порівняння двох способів сушіння в камерній сушарці, яке вказує на те що інфрачервоне випромінювання при нагріванні матеріалу збільшує швидкість видалення вологи в 4,85 рази.

3. Витрати енергії на 1 кг випареної вологи в створеній камерній сушарці відповідають ефективним показникам такого типу камерних сушарок і становлять 4742 кДж/кг вип. вологи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлені результати розробки та виконання енергоефективної камерної сушарки з комбінованим нагрівом теплоносія та випробування в ній товстоплівкових нагрівальних елементів, проведені кінетики та швидкості сушіння із застосуванням ступінчатого та комбінованого способу сушіння.

1. З аналізу літературного огляду видно, що не дивлячись на різні комбінації методів сушіння спостерігається досить високе споживання теплової енергії яке становить 6440 – 15660 кДж/кг випареної вологи.

2. В результаті експериментального та теоретичного дослідження модернізовано дослідний конвективно - сушильний стенд з комбінованим нагрівом теплоносія.

3. Вперше досліджена кінетика процесу сушіння капусти білокачанної на конвективно-сушильному стенді із встановленим комбінованим нагрівом теплоносія яка показала зменшення тривалості сушіння та підвищення якості матеріалу.

4. Визначення початкової вологості матеріалу показало залежність від географічного розташування поля, ніж від сорту кукурудзи. Початкова вологість зібраного матеріалу кукурудзи залежить від умов під час збору врожаю, умов зберігання до теплової обробки та рельєфу поля.

5. Проведені дослідження по кінетиці сушіння кукурудзи на конвективному стенді встановили залежність режимів сушіння від гібриду.

6. Сушіння в елементарному шарі на експериментальному конвективному стенді показало рівномірність прогріву матеріалу, що позитивно впливатиме на якість отриманого продукту.

7. Рекомендовані режими сушіння в сушарках з високою продуктивністю та щільним шаром зерна не повинні перевищувати температуру матеріалу 55°C для збереження якості.

8. Розраховано тривалість зневоднення кукурудзи, похибка дослідної від розрахункової не перевищує 5%.

9. Досліджено залежність числа Ребіндера (як критерій оптимізації сушіння) від вологовмісту матеріалу що обґрунтовує ефективність запропонованих режимів.

10. На основі проведених досліджень розроблена енергоефективна камерна сушарка з комбінованим нагрівом теплоносія.

11. Випробовування в енергоефективній камерній сушарці товстоплівкових нагрівальних елементів показали що, на відміну від звичайних трубчатих ТЕНів, згідно вимірювання споживання енергетичних витрат, вони мають кращу енергетичну ефективність та є оптимальними нагрівальними елементами для конвективних сушарок.

12. Розраховано зміну кривих числа Ребіндера від вологості в енергоефективній камерній сушарці, які показали характер змін витрат енергії на випаровування води в процесі сушіння.

13. Проведено дослідження кінетики сушіння картоплі, гарбуза та яблук в енергоефективній камерній сушарці при завантаженні матеріалу 45 кг та 80 кг, показали кращу ефективність установки при більшому завантаженні в 1,37 рази.

14. Проведено порівняння двох способів сушіння в енергоефективній камерній сушарці, яке вказує на те що інфрачервоне випромінювання при нагріванні матеріалу збільшує швидкість видалення води в 4,85 рази.

15. Витрати енергії на 1 кг випареної води в створеній енергоефективній камерній сушарці відповідають ефективним показникам такого типу камерних сушарок і становлять 4742 кДж/кг вип. води.

Список використаної літератури

1. Petrova, Zh., Sniezhkin, Yu. & Samoilenko, K. (2021). Blending and drying of antioxidant raw materials. Monograph. Vinnitsa: LLC «TVORY», 6-8.
2. Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., Вишнівський, В.М., & Граков, Д.П. (2021). Напрями підвищення ефективності процесу сушіння в тунельних та комбінованих сушарках. Збірник наукових праць ХДУХТ. Харків, 1 (33). 109-130.
3. Raso, J., Barbosa-Canovas. & G. V. Nonthermal. (2003). Preservation of Foods Using Combined Processing Techniques. Crit. Rev. Food Sci. Nutrit, 43, 265–285.
4. El-Mesery, H. S., & Mao, H. (2017). Investigation of Infrared. Assisted Dryer Effect on Energy Consumption. During Drying of Tomato. Int. J. Adv. Appl. Sci, 4, 68–72.
5. Huang, L. L., Zhang, M., Wang, L. P., Mujumdar, A. S. & Sun, D. F. (2012). Influence of Combination Drying Methods on Composition, Texture, Aroma and Microstructure of Apple Slices. LWT—Food Sci. Technol, 47, 183–188.
6. Maskan, M. (2000). Microwave/Air and Microwave Finish Drying of Banana. J. Food Eng, 44, 71–78.
7. Kose, B. & Erenturk, S. (2010). Drying Characteristics of Mistletoe (*Viscum Album L.*) in Convective and UV Combined Convective Type Dryers. Ind. Crops Prod, 32, 394–399.
8. Diamante, L. M. & Munro, P. A. (1993). Mathematical-Modeling of the Thin-Layer Solar Drying of Sweet-Potato Slices. Sol. Energy, 51, 271–276.
9. Kumar, M., Sansaniwal, S. K. & Khatak, P. (2016). Progress in Solar Dryers for Drying Various Commodities. Renew. Sustain Energy Rev, 55, 346–360.
10. Ferreira, A. G., Charbel, A. L. T. & Silva, J. G. (2007). Experimental Analysis of a Hybrid Dryer. Thermal Eng, 6, 3–7.
11. Lopez-Vidana, E. C., Mendez-Lagunas, L. L. & Rodriguez-Ramirez, J. (2013). Efficiency of a Hybrid Solar–Gas Dryer. Sol. Energy, 93, 23–31.

12. Reyes, A., Mahn, A. & Vasquez, F. (2014). Mushrooms Dehydration in a Hybrid-Solar Dryer, Using a Phase Change Material. *Energy Convers Manag*, 83, 241–248.
13. Sarsavadia, P. N. (2007). Development of a Solar-Assisted Dryer and Evaluation of Energy Requirement for the Drying of Onion. *Renew. Energy*, 32, 2529–2547.
14. Juraev, E. T. & Akhatov, J. S. (2009). Study of Mixed-Mode Forced Convection Solar Drier. *Appl. Sol. Energy*, 45, 61–64.
15. Slama, R. B. & Combarous, M. (2011). Study of Orange Peels Dryings Kinetics and Development of a Solar Dryer by Forced Convection. *Sol. Energy*, 85, 570–578.
16. Singh, P. L. (2011). Silk Cocoon Drying in Forced Convection Type Solar Dryer. *Appl. Energy*, 88, 1720–1726.
17. Banout, J., Ehl, P., Havlik, J., Lojka, B., Polesny, Z. & Verner, V. 2011. Design and Performance Evaluation of a Double-Pass Solar Drier for Drying of Red Chilli (*Capsicum Annum L.*). *Sol. Energy*, 85, 506–515.
18. Fadhel, M. I., Sopian, K. & Daud, W. R. W. 2010. Performance Analysis of Solar-Assisted Chemical Heat-Pump Dryer. *Sol. Energy*, 84, 1920–1928.
19. Патент України № 49118. Снежкін, Ю.Ф.; Пазюк, В.М.; Шаврин, В.С.; Чалаєв, Д.М. & Уланов, М. Теплонасосна зерносушарка.
20. Снежкін, Ю.Ф., Пазюк, В.М., Петрова, Ж.О. & Чалаєв, Д.М. 2012. Теплонасосна зерносушарка для насінневого зерна. Київ: ТОВ «Поліграф-Сервіс». 154.
21. Петрова, Ж.О. & Снежкін, Ю.Ф. (2018). Енергоефективні теплотехнології переробки функціональної сировини: [монографія]. Київ: Наукова думка. 187.
22. Снежкін, Ю.Ф. & Петрова, Ж.О. (2007). Теплообмінні процеси під час одержання каротиновмісних порошків. «Академперіодика». Київ, 1-162.

23. Патент України № 113700. Снежкін, Ю.Ф., Сорокова, Н.М. & Шапар, Р.О. Стрічкова сушарка для термолабільних матеріалів.
24. Cáceres-Huambo, B.N. & Menegalli, F.C. (2009). Simulation and Optimization of Semicontinuous Industrial Tunnel Dryers for Fruits. *Drying Technology*, 27: 428–436.
25. Maroulis, Z. B. & Saravacos G. D. (2002). Modelling, simulation and design of drying processes, *Proceedings of the 13th International Drying Symposium*. Beijing, China, A, 38
26. Chou, S.K., Hawlader, M.N.A. & Chua, K.J. (1997). “On the drying of food product in a tunnel dryer”. *Drying Technology Journal*, 15:857-880
27. Ajala, A.S., Ngoddy, P.O. & Olajide, J.O. (2012). Statistical modeling and simulation of drying cassava chips in tunnel dryer. *Intl. Journal of Emerging Trend in Engineering and Development*, 2(7), 585-586
28. Nindo, C.I., Sun, T., Wang, S.W., Tang, J. & Powers, J.R., (2003). “Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus” (*Asparagus officinalis*, L.), *Lebensm. -Wiss u.-Technol*, 36, 507-516.
29. Abonyi, B.I., Tang, J. & Edwards, C.G. (1999). “Evaluation of energy efficiency and quality retention for the Refractance Window™ drying system”. *Research Report*, Washington State University, Pullman WA, 34-36
30. Heldman, D. & Hartel, R. (1997). *Principles of Food Processing*. New York: International Thomson Publishing, 6
31. Ajala, A.S., Babarinde, G.O. & Olatunde, S.J. (2012). Effect of temperatures, air velocity and flow rate on quality attributes of dried cassava chips. *Asian Economic and Social Society*, 2 (4), 530-532
32. Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A. & Tabil, L. G. (2007). Thin-Layer Drying Characteristics and Modeling of Pistachio Nuts. *Journal of Food Engineering*, 78 (1), 98-108

33. Bulent, K., Murat, T., Ibrahim, H., & Hassan, V. (2007). "Solar drying of red peppers: Effect of air velocity and product size". *Journal of Applied Sciences*, 7 (11), 1490-1496
34. Marquez, C. A., De Michelis, A. & Giner, S. A. (2006). "Drying Kinetics of Rose Hip Fruits (*Rosa Eglantheria L.*)". *Journal of Food Engineering* 77 (3): 566-574
35. Nurul-Asyikin, M.Z. , Liza,M.S, Ida-Idayu, M. and Fadzilah-Adibah, A.M. (2005). Effect of drying parameters and geometry cut on papaya quality. *Proc. KUSTEM 4th Annual Seminar 2005*. Primula Beach Resort, Kuala Terengganu. P : 1-4
36. Singh Paul R. and Heldman Dennis R.. (1993). *Introduction of Food Engineering*. 2nd Edition: Academic Press, Inc. Chapter 12 pg 415.
37. Ajala, A.S. Ajala, F.A. and Tunde-Akintunde, T.Y. (2012). Study on drying kinetics of fermented corn grains. *Food Science and Quality Management Vol. 5*, pp 12
38. Vega-Galvez, A., Lemus-Mondaca, R., Bilbao-Sainz, C., Fito, P. & Andres, A. (2008). Effect of air drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper. *Journal of Food Engineering*, 85, 42-50.
39. Turhan, Mahir, K., Nazan Turhan. & Ferhunde Sahbaz. (1997). "Drying kinetics of red pepper." *Journal of food processing and preservation*, 21(3), 209-223.
40. Wang, H. C., Zhang, M. & Adhikari, B. (2015). Drying of Shiitake Mushroom by Combining Freeze-Drying and Mid-Infrared Radiation. *Food Bioprod. Process*, 94, 507–517.
41. Pan, Z. L., Shih, C., McHugh, T. H. & Hirschberg, E. (2008) Study of Banana Dehydration Using Sequential. Infrared Radiation Heating and Freeze-Drying. *LWT—Food Sci. Technol.*, 41, 1944–1951.
42. Celma, A. R., Rojas, S. & Lopez-Rodriguez, F. (2008) Mathematical Modelling of Thin-Layer Infrared Drying of Wet Olive Husk. *Chem. Eng. Process.*, 47, 1810–1818.
43. Nimmol, C. (2010). Vacuum Far-infrared Drying of Foods and Agricultural Materials. *J. KMUTNB*, 20 (1), 37–44.

44. Ziaforoughi, A. & Esfahani, J. A. (2016). A Salient Reduction of Energy Consumption and Drying Time in a Novel PV-Solar Collector-Assisted Intermittent Infrared Dryer. *Sol. Energy*, 136, 428–436.
45. Aktas, M., Sevik, S., Amini, A. & Khanlari, A. (2016). Analysis of Drying of Melon in a Solar-Heat Recovery Assisted Infrared Dryer. *Sol. Energy*, 137, 500–515.
46. Dm, P. (2005). *Microwave Engineering*; Wiley: Hoboken.
47. S, R. & B, G. (2010). *Microwave and RF Engineering*; Wiley: New York.
48. Vadivambal, R. & Jayas, D. S. (2010). Non-Uniform Temperature Distribution during Microwave Heating of Food Materials—a Review. *Food. Food Bioprocess Technol.*, 3, 161–171.
49. Wray, D. & Ramaswamy, H. S. (2015). Novel Concepts in Microwave Drying of Foods. *Dry. Technol.*, 33, 769–783.
50. Wang, J., Xiong, Y. S. & Yu, Y. (2004). Microwave Drying Characteristics of Potato and the Effect of Different Microwave Powers on the Dried Quality of Potato. *Eur. Food Res. Technol.*, 219, 500–506.
51. Deepika, S. & Sutar, P. P. (2018). Combining Osmotic–Steam Blanching with Infrared–Microwave–Hot Air Drying: Production of Dried Lemon (*Citrus Limon L.*) Slices and Enzyme Inactivation. *Dry. Technol.*, 36 (14), 1719–1737.
52. Antal, T., Tarektilistyak, J., Cziaky, Z. & Sinka, L. (2017). Comparison of Drying and Quality Characteristics of Pear (*Pyrus Communis L.*) Using Mid-Infrared-Freeze Drying and Single Stage of Freeze Drying. *Int. J. Food Eng.*, 13.
53. Завалий, А.А., & Снежкин, Ю.Ф. (2016). Разработка и тепловое моделирование устройств инфракрасной сушки термолабильных материалов. Симферополь ИТ «АРИАЛ», 263.
54. Снежкін, Ю.Ф., Чалаєв, Д.М., Шаврин, В.С. & Дабіжа, Н.О. (2008). Теплові насоси в системах теплохолодопостачання. Київ, 104.
55. Ю.Ф. Снежкін. & Р.О. Шапар. (2021). Енергоефективність процесів сушіння: Тематичний збірник статей у 2-х томах. Київ: Тропеа, – Т.2., 268.

56. Голик, М.Г. (1968). Хранение и обработка початков и зерна кукурузы. «Колос», Москва.
57. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О. & Пазюк, В.М. (2016). Енергоефективне виробництво функціональних харчових порошків. Монографія. Вінниця: видавництво «РВВ ВНАУ», 458.
58. ДСТУ 4138-2002 Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначання якості.
59. ДСТУ 7804:2015 Продукти перероблення фруктів та овочів. Методи визначання сухих речовин або вологи.
60. Пилипчук, М.І., Григор'єв, А.С. & Шостак, В.В. (2007). Основи наукових досліджень. Підручник. – Київ, Знання, 270.
61. Petrova, Zh., Grakov, O. & Vishnevsky, V. (2021). Overview of existing researches of the process of drying purple cabbage. Збірник тез доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 22 – 24
62. Петрова, Ж.О., Слободянюк, К.С., Вишнівський, В.М. & Граков О.П. (2022). Дослідження кінетики сушіння червонокочанної капусти на конвективній сушарці. Збірник тез доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів». Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 25-27.
63. Петрова, Ж.О., Слободянюк, К.С., Вишнівський, В.М. & Граков, О.П. (2022). Дослідження кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів у конвективній сушильній установці. Збірник тез доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв». Одеса: ОНТУ, 14-16.
64. Назаренко, В.О., Юдічева, О.П. & Жук, В.А. (2012). Формування якості товарів. Частина 1. Навчальний посібник. Київ: Центр учбової літератури, 386.

65. Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., Вишнєвський, В.М., Граков, Д.П. & Граков, О.П. (2021). Сушіння капусти білокачанної на конвективному сушильному стенді. *Теплофізика та теплоенергетика*, 43(3), 24-29.
66. Пазюк, В.М. & Вишнєвський, В.М. (2021). Дослідження кінетики сушіння білокачанної капусти. Тези доповідей VIII Міжнародної наукової конференції «Інноваційні енерготехнології». Одеса, 23 – 25.
67. Petrova, Zh.O., Slobodianiuk, K.S., Samoilenko, K.M. & Vishnevsky, V.M. (2020). Universal modes of technological processing of colloid capillary-porous materials by convective drying method. *Енергетика та автоматика*, 6, ISSN 2223-0858.
68. Petrova, Zh., Slobodianiuk, K., Samoilenko, K., Vishnievsky, V. & Grakov, O. Research of the Kinetics of the Drying Process of Combined Plant Materials. *Scientific Works*, 86(1), 69-76.
69. Снежкін, Ю.Ф., Пазюк, В.М., Петрова, Ж.О. & Вишнєвський, В.М. (2019). Розробка енергоефективних режимів насіння зернових культур. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса, 83(2), 121 – 127.
70. Пазюк, В.М., Рубаненко, О.О. & Вишнєвський, В.М. (2018). Підвищення енергоефективності сушіння насіння зернових культур шляхом застосування теплових насосів. *Вісник Хмельницького національного університету*. Хмельницький, 4 (263), 251 – 253.
71. Paziuk, V., Vyshnevskiy, V., Tokarchuk, O. & Kupchuk, I. (2021). Substation of the energy efficient schedules of drying grain seeds. *Bulleting of the Transilvania University of Brasov. Series 2: Forestry. Wood industry. Agricultural food. Engineering*, 14(63), 137 – 146.
72. Petrova, Z., Samoilenko, K. & Vishnevsky, V. (2020). Processes of heat and mass transfer during drying of red beetroot. *Energy Engineering and Control Systems*, 6 (2), 81 – 87.

Список опублікованих праць за темою дисертації
Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати
дисертації:

1. Снежкін, Ю.Ф., Пазюк, В.М., Петрова, Ж.О. & Вишнівський, В.М. (2019). Розробка енергоефективних режимів насіння зернових культур. Наукові праці, 83(2), 121-127. doi:10/15673/swonaft.v2i83.1515 [Фахове видання] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
2. Petrova, Zh.O., Slobodianiuk, K.S., Samoilenko, K.M. & Vishnevsky, V.M. (2020). Universal modes of technological processing of colloid capillary-porous materials by convective drying method. Енергетика і автоматика, 6, 15-27. doi:10.31548/energiya2020.06.015 [Фахове видання, Google scholar] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
3. Zhanna Petrova, Kateryna Samoilenko. & Vitaly Vishnevsky. (2020). Process of Heat and Mass Transfer during Drying of Red Beetroot. Energy Engineerring and Control Systems, 6(2), 81-87. doi:10.23939/jeeecs2020.02.081 [Фахове видання] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
4. Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., Вишнівський, В.М., Граков, Д.П. & Граков, О.П. (2021). Сушіння капусти білокачанної на конвективному сушильному стенді. Теплофізика та теплоенергетика, 43(3), 24-28. doi:10.31472/ttpe.3.2021.3 [Фахове видання] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
5. Vadim Paziuk, Vitalii Vyshnevskiy, Oleksii Tokarchuk. & Ihor Kupchuk. (2021). Substation of the energy efficient schedules of drying grain seeds. Bulletin of the transilvania Univercity of Brasov Series II: Forestry • Wood Industry • Agricultural

Food Engineering, 14(63), 137-146. doi:10.31926/but.fwiafe.2021.14.63.2.13 [Іноземне видання наукометричної бази SCOPUS, Q4] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

6. Petrova, Zh.O., Slobodianiuk, K.S., Samoilenko, K.M., Vishnevsky, V.M. & Grakov, O.P. (2022). Research of the Kinetics of the Drying Process of Combined Plant Materials. Scientific Works, 1(86), 69-77. doi:10.15673/swonaft.v86i1.2406 [Фахове видання] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Petrova, Zh., Grakov, O. & Vishnevsky, V. (2021). Overview of existing researches of the process of drying purple cabbage. Збірник тез доповідей XX всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 22-24. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
8. Пазюк, В.М. & Вишнівський, В.М. (2021). Дослідження кінетики сушіння білокачанної капусти. Тези доповідей VIII Міжнародної наукової конференції «Інноваційні енерготехнології». Одеса: ОНАХТ, 23-25. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
9. Петрова, Ж.О., Слободянюк, К.С., Вишнівський, В.М. & Граков, О.П. (2022). Дослідження кінетики сушіння червонокочанної капусти на конвективній сушарці. Збірник тез доповідей XXX всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів». Київ: «КПІ ім. Ігоря

Сікорського», 25-27. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

10. Петрова, Ж.О., Слободянюк, К.С., Вишнівський, В.М. & Граков, О.П. (2022). Дослідження кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів у конвективній сушильній установці. Збірник тез доповідей ХІХ Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв». Одеса: ОНТУ, 14-16. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

***Наукові праці, що додатково відображають наукові результати
дисертації:***

11. Пазюк, В.М., Рубаненко, О.О. & Вишнівський, В.М. (2018). Підвищення енергоефективності сушіння насіння зернових культур шляхом застосування теплових насосів. Вісник Хмельницького національного університету, 4(263), 251-253. ISSN 2307-5732 [Інше видання] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
12. Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., Вишнівський, В.М. & Граков, Д.П. (2021). Напрями підвищення ефективності процесу сушіння в тунельних та комбінованих сушарках. Збірник наукових праць ХДУХТ, 1(33), 109-130. [Інше видання] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

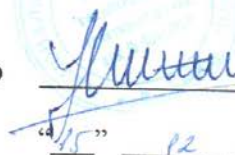
«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Генеральний директор
ПрАТ «ДНІПРОВСЬКИЙ КПК»



О.В. Майстренко

2021 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор Інституту
технічної теплофізики НАН України
академік НАН України

 Ю.Ф. Снежкін
"15" 12 2021 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
(впровадження енергоефективних режимів сушіння
зерна восковидної кукурудзи)

Даний акт складено про впровадження результатів наукових досліджень з підбору оптимального технологічного режиму по зневодненню 8 гібридів зерна восковидної кукурудзи з використанням новітніх методів сушіння в рамках Договору №ІНТ404/2786 від 12 листопада 2021 р. між Інститутом технічної теплофізики НАН України та ПрАТ «ДНІПРОВСЬКИЙ КПК».

| Найменування впровадженого результату | Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект |
|---|---|
| Дослідження з підбору оптимального технологічного режиму по зневодненню зерна восковидної кукурудзи з використанням новітніх методів сушіння сировини для отримання аналітичних результатів та продуктів для їх подальших досліджень фізико-хімічних властивостей для оптимізації виробничих процесів | <ol style="list-style-type: none"> 1. Апробовані енергоефективні режими сушіння зерна восковидної кукурудзи. Температура теплоносія становила 50°C, 60°C, 70°C. 2. Зерно восковидної кукурудзи сушили до встановленої вологості 12-14% на вибраних зразках зерна, а саме 8 зразків: 4 гібриди кукурудзи з найменшим та найбільшим вмістом вологи (%). |

Генеральний директор
ПрАТ «ДНІПРОВСЬКИЙ КПК»




О.В. Майстренко

2021 р.

Гол. наук. співр., д-р техн. наук
відділу ТМІТ ІТТФ НАН України

 Ж.О. Петрова

М.н.с. відділу ТМІТ ІТТФ

 В.М. Вишнівський
"15" 12 2021 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 ТОВ "ТЕХНО ІНВЕСТ ГРУП",
 ЕДРПОУ 33508587
 Юридична адреса фірми:
 03194, м. Київ, вул Зодчих, кв 23
 Є.З. Мельник



«_15_» вересня 2021 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор Інституту
 технічної теплофізики НАН України
 член-кор. НАН України
 Ю.Ф. Єнежкін



15 вересня 2021 р.

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
 результатів наукової роботи**

Даний акт складено про впровадження результатів наукової роботи Інституту технічної теплофізики НАН України та ТОВ "ТЕХНО ІНВЕСТ ГРУП". Результати сушіння представлені в додатку А.

| Найменування впровадженого результату | Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект |
|--|---|
| Апробація сушильної установки Інституту технічної теплофізики НАН України для розробки оптимальних режимів сушіння чаполочі пахучої (<i>Hierochloë odorata</i> , зубрівки). | 1. Встановлено додаткове обладнання для підвищення температури теплоносія з 90 °С до 120 °С. 2. Чаполоч пахуча (<i>Hierochloë odorata</i> , зубрівка) УКТЗЕД 1211908690 50 кг, була термічно оброблена при температурі 120 °С на протязі 40 хв. з подальшою досушкою до вологи матеріалу 7 % для фірми ТОВ «ТЕХНО ІНВЕСТ» |



Директор
 ТОВ "ТЕХНО ІНВЕСТ ГРУП"
 Є.З. Мельник

«_15_» вересня 2021 р.

Гол. наук. співр., д-р техн. наук
 відділу ТМІТ ІТТФ НАН України



Ж.О. Петрова

«_15_» вересня 2021 р.