

- енергосбереження України до 2010 року. Науково-практичне видання. – К.: Агентство з раціонального використання енергії та екології, 1997. – 225 с.
17. Ус А.Г. О некоторых аспектах повышения эффективности работ по энергосбережению /А.Г. Ус, А.И. Коновалов [Электронный ресурс].–Режим доступа: <http://www.gstu.by/sites/default/files/issues/vestnik/2010-03.pdf>.
 18. Устойчивый Крым. Энергетические стратегии XXI века / [под ред. В.С. Тарасенко]. – Симферополь: Сонат, 2001. – 400 с.
 19. Шкрет А.Ф. Методические особенности оценки экономической эффективности энергосберегающих мероприятий / А.Ф. Шкрет // Материалы Четвертой Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности», Ульяновск, 24-25 апреля 2003 г. –Ульяновск, 2003.
 20. Шкурупская И.А. Экономическая эффективность гелиоэнергетического оборудования [Электронный ресурс]. –Режим доступа: <http://www.essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/9079/1/Shkurypska.doc>
 21. Энциклопедия энергосбережения / Данилов Н.И., Щелоков Я.М. –Екатеринбург:Сократ, 2002. – 351 с.
 22. Hay J.E., McKay D.C. Estimating solar irradiance on inclined surfaces: a review and assessment of methodologies // International Journal of Solar Energy. –1985. –Vol. 4, № 4- 5. –P. 203 –240.
 23. Kapur J.C. Role of Renewable Energy for the 21st century // Renewable Energy. –1999. – № 16. –P. 1245-1250.
 24. Mazzuracchio P., Raggi A., Barbiri B. New Method for Assessment the Global Quality of Energy System // Applied Energy. –1996. –Vol. 53. –P. 315-324.
 25. Sarafidis I., Diakoulaki D., Papayannakis L., Zervos A. A regional planning approach for the promotion of renewable energies // Renewable Energy. –1999. –Vol. 18.1. P. 317–30.

УДК 664.085.4-03

ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ПОЛІ

**Яровий І.І., канд. техн. наук, асист., Катасонов О. В., інженер
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса**

В статті відображено один з варіантів вирішення технічної проблеми, пов'язаної зі складністю вимірювання температури в об'ємі дослідного зразка, що обробляється в середовищі потужного мікрохвильового електромагнітного поля. Задля розкриття змісту і важливості проблеми, стаття відображає поточний етап експериментів та їх місце в комплексі досліджень процесів мікрохвильового сушіння рослинної сировини. З метою спрощення процесу вирішення подібних проблем іншими дослідниками, стаття ілюструє процес вирішення проблеми шляхом вибору конкретних зразків обладнання та програмного забезпечення, використаних в ході розробки дослідного стенду і методів досліджень.

The paper describes one of the variants of solving the technical problems associated with the complexity of measuring the temperature in the test sample is processed in the environment of a powerful electromagnetic field. For disclosure of the content and importance of the problem, the article reflects the current stage of experiments and their place in the complex research of the processes of microwave drying of vegetable raw materials. To simplify the process of solving such problems by other researchers, the article illustrates the process of solving problems by selecting specific models of equipment and software used in the course of stand development research and research methods.

Ключові слова: мікрохвильовий нагрів, вологовидалення, сушіння, рослинна сировина, вимірювання температури, надвисокочастотне електромагнітне поле, неконвективні способи сушіння.

Для сучасних технологій сушіння характерне загострення трьох основних проблем: енергетична ефективність процесу вологовидалення, екологічна безпека технології сушіння та безпека отриманих висушених продуктів. На сьогодні сушку рослинної сировини, зернових культур зокрема, здійснюють переважно в шахтних сушильних установках, конвективним способом, застосовуючи в якості сушильно-

го агенту суміш газів – продуктів згоряння вуглеводнів та атмосферного повітря. Не можна вважати таку технологію повністю безпечною ні з точки зору екології ні з позиції безпечності продуктів вироблених із зернової сировини. Далеко не кращим чином виглядають конвективні технології сушіння і з точки зору енергетичних витрат, а на фоні стрімкого подорожчання енергоносіїв, ця сторона проблеми стає все більш актуальною.

При всій різноманітності існуючих методів вологовидалення абсолютна більшість з них використовують конвекційний механізм енергопідводу. А саме недоліки конвективного енергопідводу, як то: декілька разова конверсія, використання агенту сушки, складність контролю та керування процесом нагрівання сировини, висока енергоємність сушильних установок, тощо, не дозволяють прогнозувати значного росту якісних показників сушіння для традиційних способів вологовидалення. Названі недоліки можуть бути лише компенсованими або частково усуненими, так як природа цих недоліків лежить у фізичних явищах та обмеженнях притаманних самому конвективному способу теплопередачі.

Протягом декількох останніх років на кафедрі процесів та енергетичного менеджменту ОНАХТ системно проводяться дослідницькі роботи за проблематикою сушіння рослинної сировини з використанням технологій мікрохвильового (МХ) нагріву. Використання для енергопідводу електромагнітного мікрохвильового поля, вимагає нових підходів до конструювання сушильних МХ апаратів, до принципів управління і контролю за процесом сушіння.

Досвід отриманий при проведенні досліджень пов'язаних з обробкою вологих матеріалів мікрохвильовим електромагнітним полем доводить, що через складність та велику кількість чинників, процес взаємодії надвисокочастотного електромагнітного поля з рослинною сировиною - вологим матеріалом з різномірною, волокнисто-капілярною структурою піддається аналітичному аналізу лише у найбільш узагальненому вигляді. Саме тому основним напрямом робіт в дослідженні процесів вологовидалення у мікрохвильовому електромагнітному полі обрано їх фізичне моделювання, з наступним аналізом результатів.

Для проведення фізичного моделювання процесу мікрохвильової сушки рослинної сировини на кафедрі створено експериментальну сушильну установку, конструкцію якої приведено на рис. 1. Створення діючого зразка мікрохвильової сушарки передувало дослідження впливу мікрохвильового поля на нерухомі зразки рослинної сировини, аналіз та вибір конструктивних характеристик елементів сушарки, побудова окремого сушильного модулю та дослідження характеристик процесу мікрохвильового нагріву рухомого шару рослинної сировини.

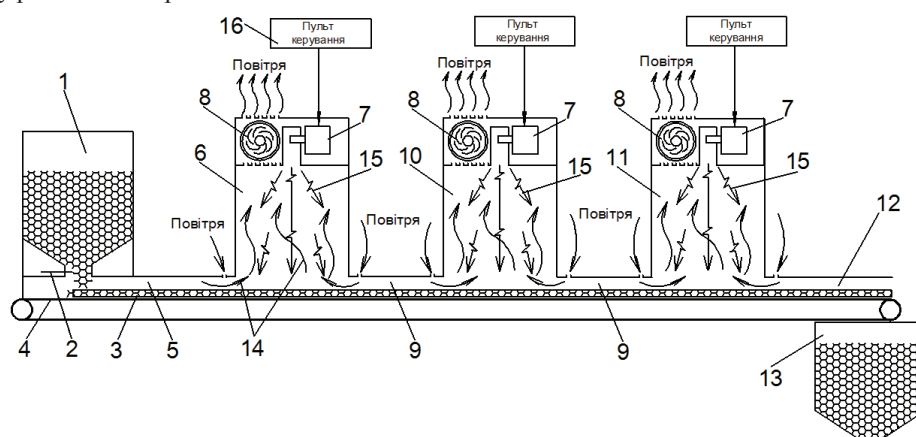


Рис. 1 – Структурна схема модульної мікрохвильової стрічкової сушильної установки.

Установка складається з: бункера для вологого матеріалу 1, з дозуючим пристроєм 2, стрічкового конвеєра 4, для транспортування шару матеріалу 3 через зони сушки, вхідного 5 і вихідного 12 шлюзових тунелів. Основою установки є камери мікрохвильової сушки матеріалу 6, 10 і 11, кожна з яких обладнана магнетроном (генератором мікрохвильового випромінювання) 7 і вентилятором 8. Камери з'єднані між собою шлюзовими тунелями 9. Також сушарка має бункер для обробленого матеріалу 13 і систему управління потужністю магнетронів сушильних камер 16.

В результаті експериментальних випробувань були визначені основні залежності між потужністю мікрохвильового випромінювання, що підводиться до сушильних камер і температурою шару зернової сировини (рис. 2), між температурою шару сировини і швидкістю руху шару сировини через сушильні камери (експозицією сушки) (рис. 3), та деякі інші.

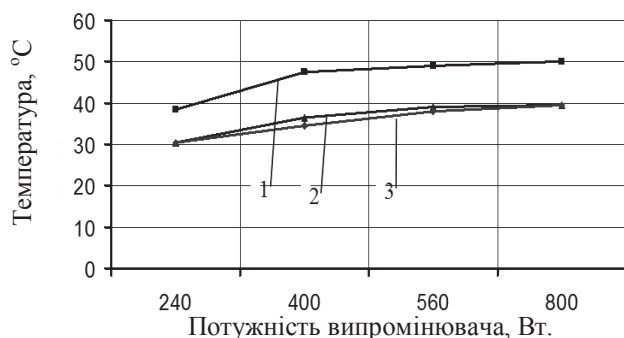


Рис. 2 – Залежність температури шару сировини на виході сушильних камер від потужності МХ випромінювання. 1, 2, 3 – номери камер.

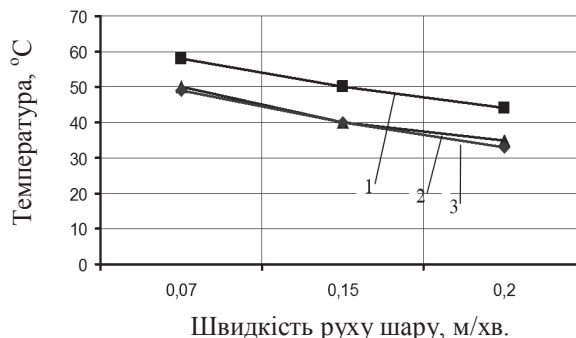


Рис. 3 – Залежність температури шару сировини на виході сушильних камер від швидкості руху шару. 1, 2, 3 – номери камер.

Виявлені залежності температури шару сировини від потужності випромінювання у сушильній камері та від експозиції сушки близькі до лінійних.

Зниження вмісту вологи у сировині, визначалося за результатами вимірювання вологості зерна до і після його обробки, максимальне зниження вологості склало 3,7% при використанні повної потужності МХ випромінювання камер, рис. 4.

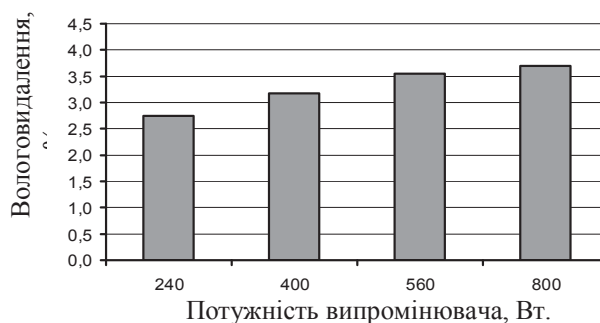


Рис. 4 – Залежність результуючого зниження вологості сировини від потужності випромінювання МХ генераторів

Основні характеристики експериментальної мікрохвильової сушильної установки:

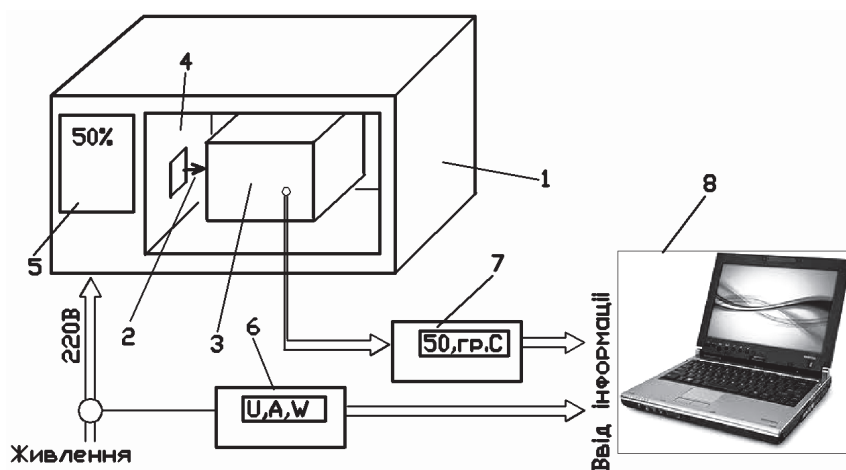
Частота випромінювання МХ генераторів:	2450 ± 50 MHz
Споживана електрична потужність установки:	≤ 2,6 кВт
Споживана електрична потужність МХ генераторів:	≤ 2,4 кВт (регулюється)
Вихідна потужність МХ генераторів:	≤ 1,5 кВт
Швидкість стрічки конвеєра установки:	0-0,3 м/хв.. (регулюється)
Продуктивність сушарки по зерну (20% в.в.):	3-10 кг/год (залежить від режиму)
Продуктивність по вилученій волозі:	0,3-0,4 кг/год.
Габаритні розміри установки (д/ш/в):	3000*600*1200 мм

Подальшим розвитком ідеї використання енергії мікрохвильового електромагнітного поля для нагрівання та сушіння рослинної сировини, після апробації способу на прикладі стрічкової сушильної установки, стало завдання класифікації та оптимізації енергетичних витрат в даному процесі.

Метою поточного етапу дослідження є визначення залежностей, що описують взаємодію МХ поля з об'ємним шаром рослинної сировини, в тому числі матеріалів з різною внутрішньою структурою (в межах декількох типів сировини).

Одним з ключових параметрів, що характеризують динаміку процесу мікрохвильового нагріву є температура шару сировини, що піддається обробці електромагнітним полем. Особливості розподілу мікрохвильової енергії в резонаторі (сушильній камері) та її взаємодії з вологим матеріалом, значно ускладнюють використання традиційних засобів термометрії. Додатково, нерівномірність розподілу енергії в межах об'єму вологого матеріалу – об'єкту сушки, вимагає одночасної, динамічної реєстрації параметрів для декількох рознесених в об'ємі точках, з подальшим усередненням та обробкою результатів.

В одному з останніх експериментів досліджувався об'ємний розподіл виділення тепла в середовищі вологої зернової сировини під впливом МХ випромінювання. Методика проведення експериментів вимагала багатоточкового контролю зміни температури в об'ємі досліджуваного зразка (сипучий матеріал в радіо прозорому контейнері) з високою точністю та динамікою: не гірше ніж $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ та не рідше ніж 1 вимір кожні 10 с.. Для вирішення технічної задачі вимірювання (моніторингу) температурного поля в об'ємі зразка складено дослідний стенд на основі мікрохвильової печі з споживаною електричною потужністю 800 Вт. Конструкція стенду показана на рис. 5.



1 – МХ піч; 2 – МХ випромінювання; 3 – контейнер з дослідним зразком; 4 – МХ камера; 5 – регулятор потужності; 6 – контрольні прилади; 7 – модуль цифрового вводу; 8 – ноутбук.

Рис. 5 – Конструкція стенду для дослідження процесу мікрохвильового нагріву

За планом експериментальних досліджень температура в об'ємі зразка (зернової сировини) вимірювалась в декількох (шести) точках за різними векторами: по осі випромінювання, на паралельних осі векторах по вертикальній та горизонтальній нормалях до осі антени мікрохвильового генератора.

Одним з найбільш складних моментів у питаннях вимірювання температури в умовах потужного МХ поле є те, що традиційні засоби (датчики) контролю, а саме термопари та термометри опору використовувати доволі складно, для перших необхідне якісне екранування від впливу МХ випромінювання, для других проблематичними є їх габаритні характеристики і також необхідне екранування вимірювальної лінії.

Проблему створення багатоканальної системи моніторингу температури вдалось вирішити використанням сучасної елементної бази: цифрових датчиків температури DS18B20 компанії DALLAS-MAXIM з однопровідним інтерфейсом 1-Wire®. Загальний вид датчиків показано на рис. 2б, загальний вигляд вимірювальної «термокоси» з шести датчиків показано на рис 2в.

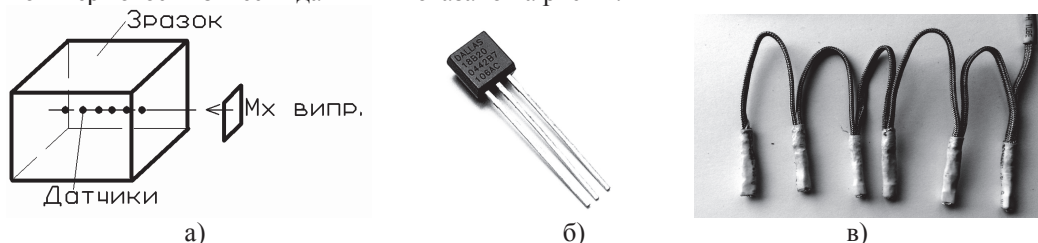


Рис. 6 – Цифрові датчики температури: а – приклад розташування в об'ємі зразка; б – датчик температури DS18B20; в – вимірювальна «термокоса».

Вихідний сигнал датчиків є цифровим, на нього не впливає МХ випромінювання, в діапазоні досліджуваних процесів датчик забезпечує точність до 0,1 °С, періодичність вимірювання (опитування датчиків) складала 3 секунди що краще ніж достатньо для дослідження кінетики МХ нагріву в межах конструкції дослідного стенду.

Впливу МХ випромінювання на датчики вдалось уникнути шляхом екранування як самих датчиків так і вимірювальної лінії. Протягом декількох серій експериментів система багатоканального контролю температури працювала добре. Зразок графіку зміни температури в контрольних точках об'єму зразка приведено на рис. 7а.

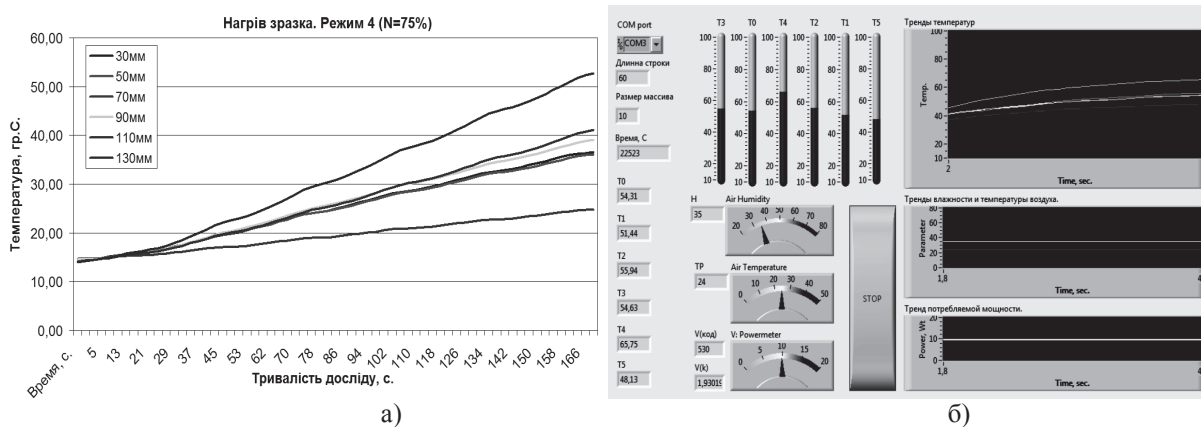


Рис. 7 – Результати моніторингу температури: а – в документі; б – на екрані комп'ютера.

Зважаючи на необхідність візуалізації поточної інформації про динаміку змін температури в досліджуваному зразку, для її відображення та наступної реєстрації використано комплекс у складі цифрового модуля вводу виводу на основі мікропроцесора ATmega328 модель Arduino Uno та програмного комплексу LabVIEW 2012 компанії National Instruments (використовувалась trial-версія програми). Загальний вид віртуального приладу побудованого для метрологічного супроводу експериментів на дослідному стенді показано на рис. 7б. Результати вимірювань за допомогою програмного комплексу, в реальному часі відображались на екрані монітора та фіксувались в електронний файл, зміст якого використовувався в подальшому для документування результатів експериментів.

Таким чином, на основі раніше виконаних досліджень, в процесі експериментального моделювання процесів сушіння вологих матеріалів рослинного походження під впливом мікрохвильового електромагнітного поля, вирішено проблему метрологічного супроводу, моніторингу та документування фізичного експерименту по одному з ключових параметрів процесу.

Література

1. Бурдо, О.Г. Нові принципи термообробки зерна [Текст] / О.Г. Бурдо, Зиков, С. Гайда // Наук. пр. /ОДАХТ. - О, 1999. - Вип. 20. - С. 223-229;
2. Яровой И.И. Разработка ленточной установки для обезвоживания растительного сырья электромагнитным полем. Диссертация на соискание н/с к.т.н.; ОНАПТ, г. Одесса, 2013 г.
3. УДК 66.047.55.086.2-035.2.
4. www.maximintegrated.com/en/products/analog/sensors-and-sensor-interface/DS18B20.html
5. www.arduino.cc/
6. www.ni.com/labview/