

Ministry of Education and Science of Ukraine  
**ODESSA NATIONAL ACADEMY OF  
FOOD TECHNOLOGIES**

International Competition of  
Student Scientific Works

# **BLACK SEA SCIENCE 2018**

## **PROCEEDINGS**



April, 4, 2018  
**ODESSA, ONAFT 2018**

Ministry of Education and Science of Ukraine  
Odessa National Academy of Food Technologies

International Competition of Student Scientific Works

# **BLACK SEA SCIENCE 2018**

**Proceedings**

**April 4, 2018**

Odessa, ONAFT 2018

Міністерство освіти і науки України  
Одеська національна академія харчових технологій

Міжнародний конкурс студентських наукових робіт

## **BLACK SEA SCIENCE 2018**

**Матеріали**

**4 квітня 2018 року**

Одеса, ОНАХТ 2018

**UDC 001(262.5):378.4.091.27(08)**  
**BBC 421D221**  
**B64**

Editorial board:

**Prof. B. Yegorov**, D.Sc., Rector of the Odessa National Academy of Food Technologies, Editor-in-chief

**Prof. M. Mardar**, D.Sc., Vice-Rector for Scientific and Pedagogical Work and International Relations, Editor-in-chief

**Dr. I. Solonytska**, Ph.D., Assoc. Professor, Director of the M. V. Lomonosov Technological Institute of Food Industry, Head of the jury of «Food Science and Technology»

**Dr. O. Kalaman**, Ph.D., Assoc. Professor, Director of the G. E. Weinstein Institute of Applied Economics and Management, Head of the jury of «Economics and Administration»

**Prof. V. Volkov**, D.Sc., Head of the Department of Applied Mathematics and Programming, Head of the jury of «Automation»

**Prof. S. Artemenko**, D.Sc., Head of the Department of Computer Engineering, Head of the jury of «IT Technologies and Cybersecurity»

**Prof. B. Kosoy**, D.Sc., Director of the V. S. Martynovsky Institute of Refrigeration, Cryotechnology and Ecoenergetics, Head of the jury of «Renewable Energy Sources and Environmental Protection»

**Prof. L. Morozyuk**, D.Sc., Professor of the Department of Cryogenic Engineering, Head of the jury of «Refrigerating Machines and Equipment»

**Dr. V. Kozhevnikova**, Ph.D., Assistant Professor of the Department of Hotel and Catering Business, ONAFT, Technical Editor

**Black Sea Science 2018**: Proceedings of the International Competition of Student Scientific Works, April 4, 2018, Odessa / Odessa National Academy of Food Technologies; B. Yegorov, M. Mardar (editors-in-chief.) [*et al.*]. – Odessa: ONAFT, 2018. – 827 p.

Proceedings of International Competition of Student Scientific Works «Black Sea Science 2018» contain the works of winners of the competition.

The author of the work is responsible for the accuracy of the information.

**ISBN 978-966-289-181-2**

Odessa National Academy of Food Technologies

УДК 001(262.5):378.4.091.27(08)  
ББК 421D221  
В64

Редакційна колегія:

**Єгоров Б.В.** – д.т.н., професор, ректор Одеської національної академії харчових технологій, відповідальний редактор

**Мардар М.Р.** – д.т.н., професор, проректор з науково-педагогічної роботи та міжнародних зв'язків, відповідальний редактор

**Солоницька І.В.** – к.т.н., доцент, директор технологічного інституту харчової промисловості ім. М.В. Ломоносова, голова журі напрямку «Харчова наука і технологія»

**Каламан О.Б.** – к.е.н., доцент, директор інституту прикладної економіки та менеджменту ім. Г.Е. Вейнштейна, голова журі напрямку «Економіка і управління»

**Волков В.Е.** – д.т.н., професор, зав. кафедри прикладної математики і програмування, голова журі напрямку «Автоматизація»

**Артеменко С.В.** – д.т.н., професор, зав. кафедри комп'ютерної інженерії, голова журі напрямку «ІТ технології та кібербезпека»

**Косой Б.В.** – д.т.н., професор, директор інституту холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського, голова журі напрямку «Відновлювані джерела енергії та охорона навколишнього середовища»

**Морозюк Л.І.** – д.т.н., професор кафедри кріогенної техніки, голова журі напрямку «Холодильні машини і установки»

**Кожевнікова В.О.** – к.т.н., асистент кафедри готельно-ресторанного бізнесу, технічний редактор

**Black Sea Science 2018:** Матеріали Міжнародного конкурсу студентських наукових робіт, 4 квітня 2018 р., Одеса / Одеська національна академія харчових технологій; Б. В. Єгоров, М. Р. Мардар (відп. ред.) [та ін.]. – Одеса: ОНАХТ, 2018. – 827 с.

Збірник включає матеріали робіт переможців Міжнародного конкурсу студентських наукових робіт «Black Sea Science 2018».

За достовірність інформації відповідає автор публікації.

### **Organizing committee:**

**Prof. Bogdan Yegorov**, D.Sc., Rector of Odessa National Academy of Food Technologies, Head of the Committee

**Prof. Maryna Mardar**, D.Sc., Vice-Rector for Scientific and Pedagogical Work and International Relations of Odessa National Academy of Food Technologies, Deputy Head of the Committee

**Prof. Stefan Dragoev**, D.Sc., Vice-Rector on Research and Business Partnerships of University of Food Technologies (Bulgaria)

**Prof. Baurzhan Nurakhmetov**, D.Sc., First Vice-Rector of Almaty Technological University (Kazakhstan)

**Prof. Andrzej Kowalski**, Dr. habil., Director of Institute of Agricultural and Food Economics (Poland)

**Dr. Olivera Djuragic**, Ph.D., Director of Scientific Institute of Food Technology of University of Novi Sad (Serbia)

**Prof. Mircea Bernic**, Dr. habil., Vice-Rector on Research and Doctorate of Technical University of Moldova (Moldova)

**Prof. Jacek Wrobel**, Dr. habil., Rector of West Pomeranian University of Technology (Poland)

**Prof. Michael Zinigrad**, D.Sc., Rector of Ariel University (Israel)

**Dr. Mei Lehe**, PhD, Vice-President of Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University (China)

**Prof. Plamen Kangalov**, Ph.D., Vice-Rector on Education of “Angel Kanchev” University of Ruse (Bulgaria)

**Dr. Alexander Sychev**, Ph.D., Assoc. Professor of Sukhoi State Technical University of Gomel (Belarus)

**Dr. Hanna Lilishentseva**, Ph.D., Assoc. Professor, Head of the Department of Merchandise of Foodstuff of Belarus State Economic University (Belarus)

**Prof. Heinz Leuenberger**, Ph.D., University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland (Switzerland)

### **Організаційний комітет:**

**Сторов Богдан Вікторович** – д.т.н., професор, ректор – Одеська національна академія харчових технологій – голова оргкомітету

**Мардар Марина Ромиківна** – д.т.н., професор, проректор з науково-педагогічної роботи та міжнародних зв'язків – Одеська національна академія харчових технологій – заступник голови оргкомітету

**Драгоєв Стефан Георгієв** – д.т.н., професор, проректор з наукової роботи і бізнес партнерства – Університет харчових технологій (Болгарія)

**Нурахметов Бауржан Кумаргалієвич** – д.т.н., професор, перший проректор – Алматинський технологічний університет (Казахстан)

**Ковальські Анджей** – доктор-хабілітат, професор, директор інституту економіки сільськогосподарської та харчової промисловості – Інститут сільськогосподарської та продовольчої економіки (Польща)

**Дюрагіц Олівера** – доктор, директор інституту харчових технологій – Університет в м. Нові Сад (Сербія)

**Бернік Мірча** – доктор-хабілітат, професор, проректор з наукової роботи та докторантури – Технічний університет Молдови (Молдова)

**Вробель Яцек** – доктор-хабілітат, професор, ректор – Західнопоморський технологічний університет (Польща)

**Зініград Михайл** – доктор наук, професор, ректор – Аріельський університет (Ізраїль)

**Лехе Мей** – доктор, віце-президент – Технологічний інститут Нінбо Чжэцзянського університету (Китай)

**Кангалов Пламен** – професор, доктор, проректор з навчальної роботи – Русенський університет «Ангел Канчев» (Болгарія)

**Сичев Олександр Васильович** – к.т.н, доцент, проректор з навчальної роботи – Гомельський державний технічний університет ім. П. Й. Сухого (Білорусь)

**Лілішенцева Анна Миколаївна** – к.т.н, доцент, зав. кафедрою товарознавства продовольчих товарів – Білоруський державний економічний університет (Білорусь)

**Леунбергер Хайнц** – доктор, професор – Університет прикладних наук і мистецтв Північно-західної Швейцарії (Швейцарія)

## **INTENSIFICATION OF THE MATERIAL DRYING PROCESS WITH USE OF THE MICROWAVE FIELD ENERGY**

Author – Mykhailova O.

Supervisor – Boshkova I.

*Odessa National Academy of Food Technologies*

*The results of an experimental study of the kinetics of drying using the energy of the microwave field in various combinations with convective drying are presented. The influence of various parameters such as the magnetron power, the duration of the process, the conditions of microwave heating on the drying rate and the specific energy of microwave; microwave pulsating, cyclic microwave convection drying (at different air temperatures) and continuous microwave-convection method are experimentally studied. Analysis of results on such indicators as drying rate, specific energy costs, temperature of material allowed to justify which method and in what mode is optimal and can be recommended.*

## **ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭНЕРГИИ МИКРОВОЛНОВОГО ПОЛЯ**

Автор – Михайлова О.В.

Руководитель – Бошкова І.І.

*Одесская национальная академия пищевых технологий*

### **Введение.**

#### **Актуальность исследования микроволновой сушки зерна**

В последние три десятилетия наблюдается взрывной рост исследований в поиске эффективных технологий сушки. Этот рост стимулирован энергетическим кризисом и увеличением потребительского спроса на более качественную продукцию [1, 2]. Основой для организации сушки материалов является нагрев, и этот процесс, наиболее распространенный промышленности за последние 50 лет [3], в то же время наименее контролируемый. Микроволновой (МВ) нагрев основывается на физическом

эффекте биполярной поляризации, он широко используется в пищевой промышленности [4, 5], сушке [6, 7, 8], в медицине [9]. В особый раздел следует отнести технологии сушки диэлектрических материалов пищевой промышленности и агропромышленного комплекса [10, 11]. К современным работам, которые относятся к области организации сушки с использованием микроволновой техники, относятся [12, 13, 14].

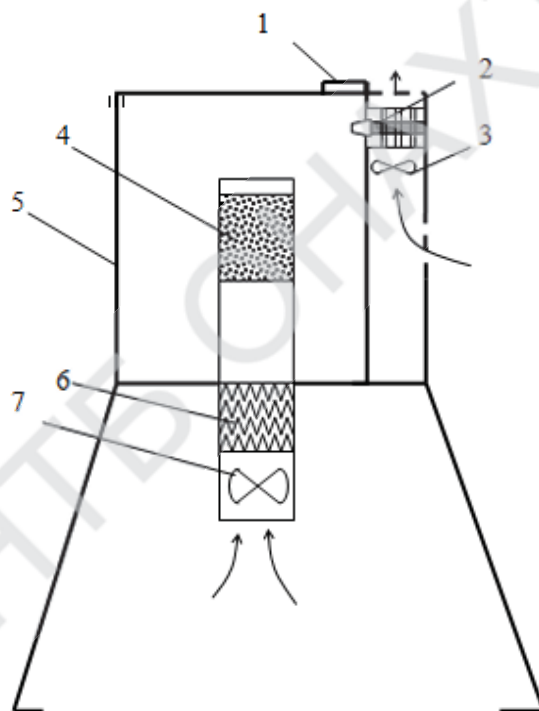
В операциях сушки диэлектрический нагрев от микроволнового поля часто имеет некоторые преимущества, включающие высокую энергетическую эффективность [15]. В [16] отмечается, что микроволновые технологии относятся к разряду энергосберегающих в силу их естественной специфики, однако для создания действующего оборудования необходимо проведение комплексных исследований с целью определения условий процесса, при которых будет достигаться высокая скорость сушки в сочетании с энергетической эффективностью, обеспечиваться равномерность поля внутри камеры, безаварийность и безопасность работы. Авторы [17] отмечают, что сушку в микроволновом поле целесообразно вести при значениях влагосодержания на уровне 20%, что в основном соответствует влагосодержанию зерновых культур на входе в сушильный аппарат.

Имеющиеся на настоящее время данные позволяют рекомендовать микроволновые технологии к разработке. Однако, как показывает современная практика, попытки создания нового оборудования, в частности, для микроволновой сушки, и его дальнейшее использование без предварительного исследования кинетики процесса не приводили к желаемому результату. Основой для конструирования новых установок являются экспериментально определенные требования к режимным параметрам процесса и условиями, при которых будет целесообразно применение того или иного способа сушки.

### **1 Экспериментальная установка и методика исследования**

Цель исследований – установить, какой способ подвода энергии (микроволновой, микроволново-конвективный, конвективный) и какие режимные характеристики обеспечивают высокую интенсивность процесса сушки и необходимое качество готового продукта при минимальных энергозатратах. Для решения этих задач при каждом способе проводились эксперименты при различных режимах. При обработке опытных данных определялись закономерности изменения среднеинтегральных влагосодержаний и температур, скорость сушки, затраты энергии на 1 кг испаренной влаги.

Экспериментальная установка представлена на рис. 1. Установка обеспечивает проведение исследований при микроволновой, микроволново-конвективной и конвективной сушке. Внутри рабочей камеры установлен воздуховод из радиопрозрачного материала, в который помещалась ячейка, изготовленная в форме параллелепипеда из радиопрозрачного сетчатого материала. В экспериментальную ячейку засыпалось нужное количество материала. Размеры ячейки строго соответствовали размерам воздуховода, с тем, чтобы при продувке материала воздухом не происходило боковых перетечек.



**Рис. 1. Схема установки для исследования кинетики сушки зерновых материалов при микроволновом и конвективном нагреве:**

1 – дверца, 2 – магнетрон, 3 – вентилятор системы охлаждения магнетрона, 4 – экспериментальная ячейка с материалом для исследований, 5 – рабочая камера, 6 – электронагреватель, 7 – вентилятор

Установка работает следующим образом. При исследовании микроволновой сушки зерно помещается в ячейку и размещается в микроволновой камере. Включается магнетрон 2 и по секундомеру отслеживается заданное время экспозиции. Затем магнетрон отключается, ячейка с зерном изымается и взвешивается на электронных весах. Измеряется температура в нескольких точках по толщине материала. В зависимости от методики, далее зерно может быть помещено в камеру для дальнейшей сушки либо заменено на новую порцию. При исследовании микроволново-конвективной сушки включается магнетрон и вентилятор 3, который продувает воздух через слой зерна. Для исследования микроволново-конвективной сушки нагретым воздухом совместно с вентилятором 7 работает нагреватель 6 с регулируемой мощностью, который обеспечивает нагрев воздуха до требуемой температуры. Во всех опытах начальное влагосодержание составляло 0,2 кг/кг, высота слоя 57мм, масса 100 г.

Методика исследований процессов сушки в плотном слое заключалась в следующем.

1) Пульсирующий и непрерывный микроволновой подвод энергии.

При пульсирующем режиме периоды микроволнового подвода чередуются с паузами. Изучается влияние длительности включения магнетрона  $\tau_{MB}$  и пауз  $\tau_n$  на закономерности изменения температур и влагосодержания материала, скорость сушки и удельные энергозатраты. Проводятся 3 серии опытов, различающихся длительностью микроволнового подвода. Каждая серия включает 4-5 опытов с разной длительностью пауз  $\tau_n = var$  при  $\tau_{MB} = idem$ . Каждый опыт заканчивается паузой. Количество включений магнетрона и количество пауз во всех опытах одинаково:  $n_{MB} = idem$ ,  $n_n = idem$

В опытах измеряют мощность магнетрона, начальные и конечные массы ( $m_0, m_k$ ) и температуры ( $t_0, t_k$ ), продолжительность и количество включений магнетрона ( $\tau_{MB}, n_{MB}$ ) и пауз ( $\tau_n, n_n$ ). При обработке данных определяют следующие величины:

- убыль влаги

$$\Delta m = m_0 - m_k, \text{ кг} \quad (1)$$

- начальное и конечное влагосодержание материала

$$u_0 = \frac{m_0}{m_{сух}}, \quad u_k = \frac{m_k}{m_{сух}}, \text{ кг/кг} \quad (2)$$

где  $m_{\text{сх}}$  – масса абсолютно сухого материала,

- общую продолжительность процесса сушки

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{MB} \cdot n_{MB} + \tau_n \cdot n_n, \text{ с} \quad (3)$$

- скорость сушки

$$N = \frac{u_0 - u_{\kappa}}{\tau_{\Sigma}}, \text{ с}^{-1} \quad (4)$$

- суммарные энергозатраты

$$Q_{\Sigma} = N_c \cdot \tau_{MB} \cdot n_{MB} \quad (5)$$

- полезный тепловой поток, израсходованный на испарение влаги и нагрев материала:

$$Q_{\text{пол}} = \Delta m \cdot r + \frac{m_0 + m_{\kappa}}{2} c_{\text{вл.м}} (t_{\kappa} - t_0), \text{ Дж} \quad (6)$$

где  $c_{\text{вл.м}}$  – теплоемкость влажного материала, Дж/(кгК)

- удельные энергозатраты

$$q_{\text{уд}} = \frac{Q_{\Sigma}}{\Delta m}, \text{ Дж/кг.вл} \quad (7)$$

- КПД установки, т.е. соотношение полезных и суммарных энергозатрат, позволяющие оценить эффективность использования энергии:

$$\eta = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\Sigma}}, \quad (8)$$

При непрерывном микроволновом подводе проводят несколько опытов при  $N_c = \text{idem}$ ,  $\tau_{MB} = \text{var}$ . В каждом опыте измеряют  $m_0, m_{\kappa}, t_0, t_{\kappa}, \tau_{MB}$ . Обработку данных ведут по вышеприведенным формулам.

## 2) Циклический микроволново-конвективный подвод

При циклическом режиме периоды микроволнового подвода чередуются с периодами продувки воздухом, нагретым и ненагретым. Изучается влияние длительности продувки  $\tau_{\kappa}$ , а также температуры воздуха, продувающего слой, на закономерности изменения температур и влагосодержаний материала, скорость сушки и удельные энергозатраты. При этом

длительность включения магнетрона  $\tau_{MB}$  во всех опытах была одинаковой. Полученные исходные данные позволяют определить убыль влаги и среднюю температуру слоя, а также рассчитать влагосодержание, удельные затраты энергии после каждого из периодов. Каждый опыт заканчивается паузой. Количество включений магнетрона и количество пауз во всех опытах одинаково:  $n_{MB} = idem$ ,  $n_k = idem$

В опытах измеряют начальные и конечные массы ( $m_0, m_k$ ) и температур ( $t_0, t_k$ ) и продувки ( $\tau_k$ ). При обработке данных определяют следующие величины:

- убыль влаги по формуле (1); начальное и конечное влагосодержание материала по формуле (2); общую продолжительность процесса сушки:

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{MB} \cdot n_{MB} + \tau_k \cdot n_k, \text{ с} \quad (9);$$

- скорость сушки по формуле (4); – суммарные энергозатраты:

$$Q_{\Sigma} = N_c \cdot \tau_{MB} \cdot n_{MB} + N_{\text{вент}} \cdot \tau_k \cdot n_k \quad (10);$$

- полезный тепловой поток, израсходованный на испарение влаги и нагрев материала определяется по формуле (6); удельные энергозатраты определяются по формуле (7); КПД установки по формуле (8).

В опытах с продувкой нагретым воздухом расчет проводится по приведенной выше методике, однако суммарные энергозатраты учитывают также количество теплоты, которое было затрачено на нагрев воздуха:

$$Q_{\Sigma} = N_c \cdot \tau_{MB} \cdot n_{MB} + N_{\text{вент}} \cdot \tau_k \cdot n_k + G_{\text{в}} \cdot c_{\text{пв}} \cdot (t_{\text{в}}^k - t_{\text{о.с.}}) \cdot \tau_k, \text{ Дж} \quad (11)$$

3) Одновременный микроволново-конвективный подвод.

Изучается влияние скорости и температуры воздуха, продуваемого через слой, а также времени процесса, на конечное влагосодержание материала и удельные энергозатраты. Методика расчета соответствует приведенной выше.

## 2 Результаты исследования сушки зерна в условиях действия МВ поля

Непрерывный МВ подвод приводит к быстрому разогреву материала и развитию недопустимо высоких температур, при испарении влаги происходит охлаждение материала. При микроволновом подводе испарение вследствие большого диффузионного сопротивления влагопереноса в зерновке проходит менее интенсивно, чем нагрев – удаление с испарив-

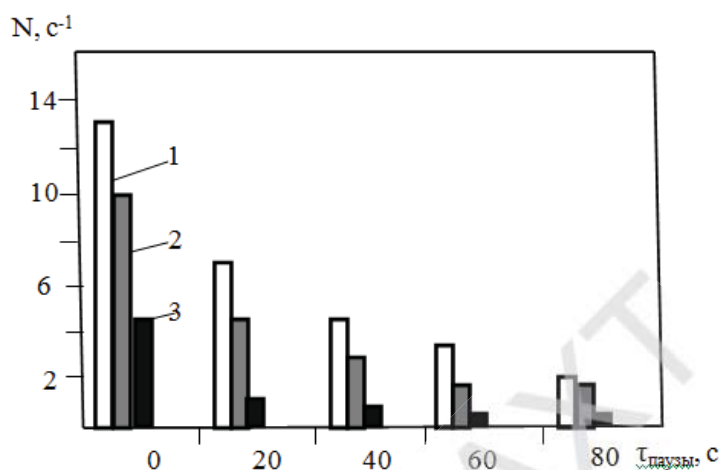
шейся влагой теплоты недостаточно ограничивает рост температуры. При пульсирующем СВ нагреве в период паузы влага испаряется, температура несколько снижается, поэтому можно вести процесс сушки в щадящем для зерна режиме. При этом режим пульсирующего СВ нагрева можно осуществлять, периодически включая и выключая магнетрон при постоянной мощности. Эти результаты целесообразно сопоставить с циклическим СВ-конвективным режимом, когда в период паузы слой продувается.

### **2.1. Результаты экспериментальных исследований сушки при пульсирующем и непрерывном СВ подводе энергии**

Расчет затрат энергии на единицу массы удаленной влаги проводился по формуле:  $Q = N_c \cdot \tau_m / \Delta m$ , где  $\tau_m$  – полное время работы магнетрона,  $\Delta m$  – масса удаленной из зерна влаги,  $N_c$  – мощность магнетрона. Во всех опытах начальное влагосодержание зерна составляло 20%, масса образца – 100 г, толщина слоя – 57,5 мм, мощность магнетрона – 600 Вт. По результатам опытов массу испарившейся влаги можно примерно определить по длительности СВ воздействия. Практически независимо от длительности паузы, при 30 с – удаляется около 1,25 г, 60 с – около 5 г, 90 с. около 9,5 г.

Ниже представлены графики зависимости скорости сушки от длительности паузы для каждого из опытов, различающихся длительностью работы магнетрона (рис. 2). В соответствии с данными, скорость сушки практически не зависела от длительности пауз. Результаты показывают, что с увеличением длительности паузы отмечается падение скорости сушки, причем для опыта с длительностью СВ нагрева 30 с влияние длительности паузы более заметно, чем для опытов с длительностью СВ нагрева 10 с.

Наибольшая скорость сушки соответствует непрерывному СВ нагреву. По сравнению с непрерывным СВ подводом продолжительностью 30 с, при переходе к пульсирующему режиму наблюдается резкое снижение скорости сушки, после чего при увеличении длительности пауз падение скорости сушки становится незначительным. Уменьшение длительности СВ нагрева приводит к выравниванию скоростей сушки, независимо от длительности паузы, Увеличение длительности СВ нагрева приводит к росту скорости сушки при уменьшении длительности паузы. При СВ нагреве с длительностью однократного подвода энергии 10 с (суммарное время – 30 с) влаги удаляется меньше, чем при 20 с (суммарное время – 60 с) и 30 (суммарное время – 90 с), при этом отмечается нелинейная зависимость количества удаленной влаги от этой длительности – при увеличении длительности СВ воздействия в 2 раза, влаги удаляется в 4 раза больше, при увеличении в 3 раза – в 7,6 раз.



**Рис. 2. Зависимость скорости сушки от длительности паузы при непрерывном и пульсирующем МВ подводе энергии:**  
 1 –  $\tau_{\text{МВ}}=30$  с, 2 –  $\tau_{\text{МВ}}=20$  с, 3 –  $\tau_{\text{МВ}}=10$  с.

Эти значения существенно зависят от массы, что можно объяснить тем, что при  $\tau_{\text{МВ}} = 10$  с и массе 100 г сам процесс сушки только начинается, в основном энергия расходуется на нагрев материала; в периоде паузы (отлежки) происходит естественная сушка, но материал теряет столько теплоты, что во время следующего включения магнетрона большой процент энергии также расходуется на нагрев. При увеличении длительности МВ нагрева зерно успевает нагреться до такой температуры, что основная доля энергии идет на испарение влаги.

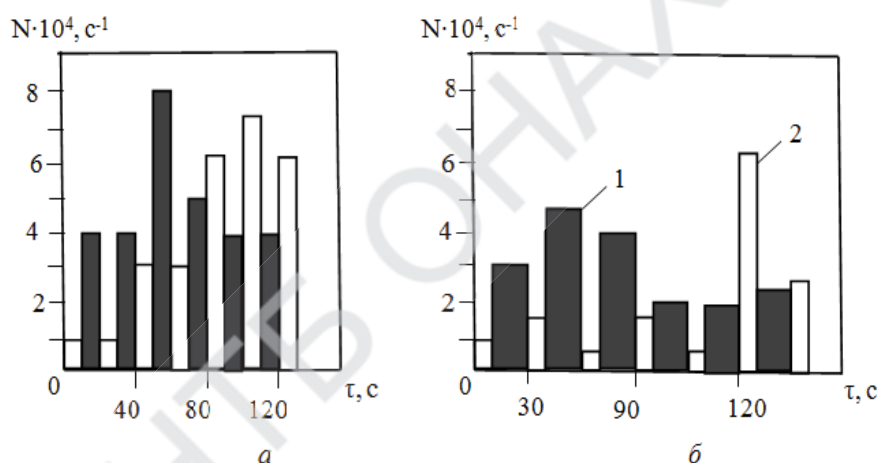
Увеличение длительности МВ импульса приводит к увеличению температуры материала, влагосъема, скорости сушки и снижению удельных затрат энергии. Особенно резкое изменение наблюдается при переходе от импульса в 10 с к импульсу 20 с., переход от 20 с к 30 с привел к менее значительным изменениям. Эти опыты подтверждают предыдущие эксперименты, когда также отмечался непропорциональный рост скорости сушки при переходе от 10 с к 20 и 30 с.

Получено, что увеличение продолжительности МВ воздействия приводит к увеличению скорости сушки в 1,6 раз, и снижению удельных затрат энергии – в 1,7 раза. Температуры слоя при этом различались незначительно (70,3 °С и 73,7 °С). Отличие наблюдалось в длительности опытов: 90 с – 3 включения магнетрона по 10 с, и 180 с – 6 включений

магнетрона по 10 с. Процесс сушки в первую очередь определяется температурой и длительностью выдержки материала при этой температуре. Также очень важно создать условия для удаления влаги из слоя. Результаты исследований показали, что при пульсирующей МВ сушке основное количество влаги удаляется в периоды подвода МВ энергии, а паузы позволяют предотвратить перегрев материала.

### 2.2 Результаты экспериментальных исследований сушки зерна при МВ-конвективном циклическом подводе энергии

Результаты расчетов, проведенных на основании экспериментальных исследований сушки зерна при МХ-конвективном циклическом подводе энергии, представлены на рис. 3 – при продувке воздухом с температурой окружающей среды, и рис. 4 – при продувке нагретым до 50°C воздухом.

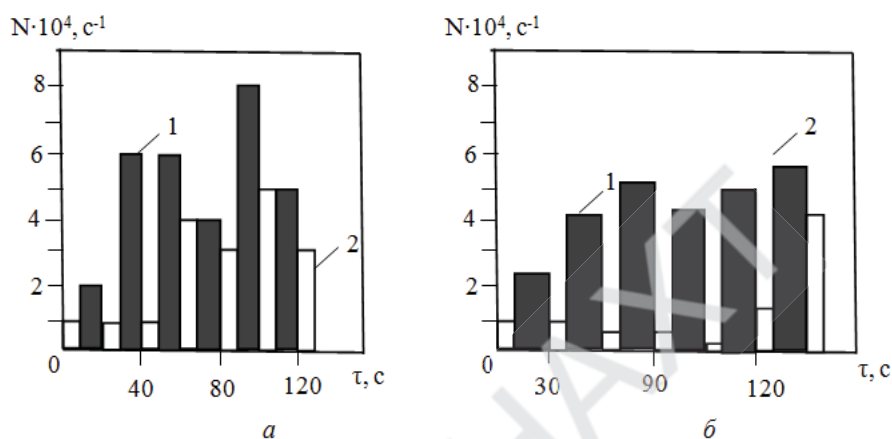


**Рис. 3. Зависимость скорости сушки от продолжительности периода продувки воздухом без предварительного подогрева при циклическом режиме (овес): 1 – период продувки, 2 – период МХ нагрева.**

Продолжительность МХ нагрева – 10 с: а – продувка 10 с,  
б - продувка 20 с.

Результаты исследований показали, что при пульсирующей МВ сушке основное количество влаги удаляется в периоды подвода МВ энергии, а паузы позволяют предотвратить перегрев материала. Длительность периодов подвода МВ энергии должна быть такой, чтобы в их конце температура материала не превышала рекомендуемых технологами значений, а длительность пауз такой, чтобы температура снижалась не более, чем на

3-5 °С. Такой режим позволяет обеспечить высокую скорость сушки, умеренные энергозатраты и необходимое качество готовой продукции.



**Рис. 4. Зависимость скорости сушки от продолжительности периода продувки нагретым воздухом при циклическом режиме сушки (овес):**  
 1 – период продувки, 2 – период МВ нагрева. Продолжительность ГО нагрева – 10 с. а – продувка 10 с, б - продувка 20 с.

### 2.3 Результаты экспериментальных исследований сушки зерна при МВ-конвективном одновременном подводе энергии

При одновременном МВ-конвективном подводе исследовалось влияние длительности процесса, скорости продуваемого воздуха, температуры, мощности магнетрона на конечные температуру, влагосодержание и удельные затраты энергии. Материалом для исследования, как и в предыдущих опытах, был овес, масса засыпки – 100 г, начальное влагосодержание 20%.

Удельные затраты энергии при продувке нагретым воздухом температурой 50 °С увеличиваются (по сравнению с продувкой ненагретым воздухом) на 49 % и на 89 % – при температуре 70 °С. В сравнении с МВ сушкой без продувки, за 30 с влаги удалилось примерно в два раза больше, при этом температура воздуха практически не влияет.

Анализ результатов приводит к следующим заключениям о влиянии мощности магнетрона. С увеличением мощности магнетрона конечное влагосодержание падает, причем за 60 с влагосодержание при 600 Вт меньше влагосодержания при 450 Вт на 13%, а за 30 с – на 9,6%, что

говорит о том, что в первые 30 с большая (по сравнению с 60 с) доля микроволновой энергии пошла на нагрев материала. Это же явление отражается на графике для скорости сушки – ее изменение менее заметно за 30 с по сравнению с 60 с. Увеличение мощности магнетрона в 1,33 раза приводит к увеличению средней скорости сушки в 1,3 раза и увеличению удельных затрат энергии, которое резко снижается с ростом длительности сушки: с 20% при 30 с до 3% при 60 с. Поскольку конечное влагосодержание после 60 с соответствует норме при ведении сушки на производстве, можно заключить, что увеличение мощности магнетрона целесообразно.

Увеличение скорости воздуха в 1,86 раз увеличивает скорость сушки в 1,35 раз (за 30 с) и 1,1 раз (за 60 с), способствует снижению затрат энергии в 1,36 раз (за 30 с) и 1,07 раз (за 60 с). Принимая во внимание, что за 60 с энергия в большей мере расходуется на испарение влаги, а на нагрев затрачивается меньшая часть, можно заключить, что на затраты энергии увеличение скорости влияет слабо. Усредненные по трем повторам результаты экспериментов приведены в табл. 1.

**Таблица 1 – Продувка с одновременным МВ-нагревом.  
Мощность магнетрона 600 Вт. Температура воздуха 19 °С.  
Скорость воздуха 1,3 м/с.**

Длительность процесса, с	Масса образца в конце процесса, $m_k$ , г	Убыль влаги $\Delta m$ , г	Влагосодержание в конце процесса, $W_k$ , кг/кг	Средняя скорость сушки, $N$ , с <sup>-1</sup>	Средняя температура материала в конце процесса, $\bar{t}$	Удельные затраты энергии $q_{уд}$ , МДж/кг
30	98.3	1.7	0.1797	0,0006	69.27	11.54
60	93.98	6.02	0,12778	0,1211	89,1	6,04
70	92.74	7.26	0,1129	0,00135	94	5,82
80	91,92	8,09	0,103	0,00121	106,5	5,95
90	90,28	9,72	0,0832	0,00130	110,55	5,57

В табл. 2 приведены данные по сушке при режимах, обеспечивающих наиболее благоприятные характеристики процесса.

**Таблица 2 – Характеристики процессов сушки при разных способах подвода энергии**

Вид и режим подвода энергии	Скорость сушки, $c^{-1}$	Конечная температура, $^{\circ}C$	Удельные затраты энергии, МДж/кг	Коэффициент использования энергии, $\frac{Q_{пол}}{Q_{затр}}$
МВ непрерывный $\tau_{\Sigma} = 30 c, N_c = 600 \text{ Вт}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	81,7	15,79	0,906
МВ-пульсирующий $\tau_{\Sigma} = 120 c, \tau_{MB} = \tau_n = 20, n = 3$ $N_c = 600 \text{ Вт.}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	80,3	8,13	0,613
МВ-конвективный, циклический $\tau_{\Sigma} = 130 c, \tau_{MB} = \tau_k = 10 c, \tau_{\Sigma k} = 60 c,$ $\tau_{\Sigma MB} = 70 c, n = 6,5, t_g = 20^{\circ}C,$ $w_g = 1 \text{ м/с}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	80,5	9,07	0,56
МВ-конвективный, одновременный $\tau_{\Sigma} = 60 c, t_g = 19^{\circ}C, w_g = 0,9 \text{ м/с}$	$12,7 \cdot 10^{-4}$	71	5,65	0,73

Анализ таблицы позволяет сделать следующие выводы относительно целесообразности выбора способа сушки:

- оптимальным является одновременный МВ-конвективный способ подвода энергии, при котором достигаются максимальная скорость сушки, минимальные удельные затраты энергии и температура материала не превышает допустимую.

- непрерывный МВ подвод обеспечивает такую же скорость сушки, как и пульсирующий, но при более высоких удельных затратах.

- наиболее полно энергия используется при микроволновом и одновременном микроволново-конвективном подводе энергии.

Продувка через слой сушильного агента одновременно с объемным МВ нагревом интенсифицирует межкомпонентный тепло- и массообмен, ускоряет испарение влаги, перемещающейся в результате термодиффузии из объема зерен к их поверхности. В результате существенно (почти втрое) возрастает скорость сушки, снижается продолжительность процесса и удельные энергозатраты (примерно на 40 %). В таком случае услож-

нение установки за счет системы транспорта и подогрева воздуха вполне оправдано.

### Выводы

1. Увеличение времени подвода МВ энергии приводит к практически равному увеличению скорости сушки и снижению затрат энергии в 1,4 раза. Температуры слоя при этом были на одинаковом уровне.

2. С увеличением длительности паузы температура материала, скорость сушки и удельные затраты энергии уменьшаются.

3. При циклической МВ-конвективной сушке средняя скорость сушки при продувке выше, чем при МВ нагреве. При этом увеличение длительности продувки приводит к уменьшению скорости сушки. Удельные затраты примерно равны.

4. Удельные затраты энергии при продувке нагретым воздухом температурой 50 °С увеличиваются (по сравнению с продувкой ненагретым воздухом) на 49 % и на 89 % – при температуре 70 °С. В сравнении с МВ сушкой без продувки, за 30 с влаги удалилось примерно в два раза больше, при этом температура воздуха практически не влияет.

5. Температура зерна ниже в циклических режимах, чем в пульсирующих, а затраты энергии на кг испаренной влаги меньше: так, МВ подводе эта величина составляла 16,07 МДж/кг, а при соответствующем циклическом режиме – 9,68 МДж/кг.

### Литература

1. Руциц, А. А. Применение СВЧ-нагрева в пищевой промышленности и общественном питании / А.А. Руциц, Е.И. Щербакова // Вестн. ЮУрГУ. Серия "Пищевые и биотехнологии". – 2014. – Т. 2. – № 1. – С. 9-15.

2. Regier M., Mikrowellen- und Mikrowellen-Vakuumtrocknung von Lebensmitteln / M. Regier, K. Knörzer, U. Erle // Chemie Ingenieur Technik. – 2004. – Vol. 75. – P. 424-432.

3. Демьянчук, Б. А. Принципы и применения микроволнового нагрева / Б.А. Демьянчук. – О.: Черноморье, 2004. – 520 с.

4. Regier M., Mikrowellen- und Mikrowellen-Vakuumtrocknung von Lebensmitteln / M. Regier, K. Knörzer, U. Erle // Chemie Ingenieur Technik. – 2004. – Vol. 75. – P. 424-432.

5. Thostenson, E.T. Microwave processing: fundamentals and applications / E.T. Thostenson, T.W. Chou // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1999. – Vol. 30, № 9. – P. 1055-1071.

6. Feng, H. J. Combined microwave and spouted bed drying of diced apples: effect of drying conditions on drying kinetics and product temperature / H.J. Feng, P.R Tang // *Drying Tech.* – 1999. – №. 17(10). – P. 1981-1998.
7. Altan A. Microwave Assisted Drying of Short-Cut (Ditalini) Macaroni: Cooking Process and Textural Properties / A. Altan, M. Maskan // *Food Science and Technology International.* – 2004. – Vol. 10, № 3. – P. 187-196.
8. Chandrasekaran S. Microwave Material Processing. A Review / S. Chandrasekaran., S. Ramanathan., T. Basak // *AIChE Journal*, 2012. – Vol. 58 [2]. – P. 330–363.
9. Mandal, V. Microwave assisted extraction promising – an innovative and extraction tool for medicinal plant research / V. Mandal, Y. Mohan, S. Hemalatha // *Pharmacognosy Revies*, 2007. – Vol 1, Issue 1. – P. 7-18.
10. Календерьян, В. А. Тепломассоперенос в аппаратах с плотным дисперсным слоем / В.А. Календерьян, И.Л. Бошкова // *Монография.* – К., 2011. – 184 с.
11. Рущиц, А. А. Применение СВЧ-нагрева в пищевой промышленности и общественном питании / А.А. Рущиц, Е.И. Щербакова // *Вестн. ЮУрГУ. Серия "Пищевые и биотехнологии"*. – 2014. – Т. 2. – № 1. – С. 9-15.
12. Rattanadecho, P. Microwave-Assisted Drying / P. Rattanadecho, N. Makul // *A Review of the State-of-the-Art.* – 2016. – V. 34, №1. – P. 1–38.
13. Mohammadi, B. Investigation of microwave application in agricultural production drying / B. Mohammadi, S. Busaleyki, R. Modarres, E. Yariorsorudi, M. Fojlaley, S. Andik // *International Journal of Technical Research and Applications.* – 2014. – V. 2, №1. – P. 69–72.
14. Dadali, G. Microwave heat treatment of spinach: drying kinetics and effective moisture diffusivity / G. Dadali, E. Demirhan, B. Özbek, O. Belma // *Dry Technology.* – 2007. – V. 25. – P. 1703–1712.
15. Brodie, G. Microwave and Radio-Frequency Technologies in Agriculture. An Introduction for Agriculturalists and Engineers / G. Brodie, M. V. Jacob, P. Farrell; edited by M. Golachowska. Warsaw-Berlin: Published by De Gruyter, 2015. – 396 p.
16. Feng, H. Microwave Drying of Food and Agricultural Materials: Basics and Heat and Mass Transfer Modeling / H. Feng, Y. Y. J. Tang // *Food Engineering Reviews.* – 2012. – V. 4, №2. P. 89–106.
17. *Advances in Agricultural Science and Technology. Volume 1. Advances in Bioprocessing Engineering* / Editors H. Yang, J. Tang. London: World Scientific, 2002. – 172 p.

DEVELOPMENT OF A GRAPHICAL USER INTERFACE FOR EGG QUALITY ASSESSMENT BASED ON A COMPUTER VISION SYSTEM Author – Zhelezarova P., Paskova N., Supervisor – Georgieva T.....	567
DYNAMIC PROPERTIES OF PROVIDING CYBERSECURITY PROCESSES AT THE EXAMPLE OF CYBERSECURITY'S AUDIT Author – Kozlova O., Supervisor – Kononovych V. ....	573
<b>5. RENEWABLE ENERGY SOURCES AND ENVIRONMENTAL PROTECTION.....</b>	<b>598</b>
MODELLING OF PHOTOVOLTAIC SOLAR CELLS BY MODIFYING FINS CONFIGURATION OF THE AIR-COOLED HEAT SINKS FOR POWER GENERATION Author – Siarova A., Supervisor – Shixue Wang .....	598
THE PROSPECTS OF APPLICATION THE GENERATORS WITH PERMANENT MAGNETS FOR SMALL WIND POWER PLANTS Author – Sergienko I., Supervisor – Shevchenko V. ....	614
COMPARISON OF VARIOUS METHODS FOR REDUCING GASOLINE LOSSES DURING STORAGE USING ECOLOGICAL AND ENERGY CRITERIA Author – Oleksenko O., Supervisor – Volhusheva N. ....	636
DEVICE FOR CLEANING OF FLUE GASES FROM SULFUR OXIDES AND CARCINOGENIC RESIN Author – Mukminov I., Supervisor –Kogut V., Boshkova I.....	654
THE IDENTIFICATION OF PLANTS-INDICATORS OF POLLUTION OF TERRITORIES BY HEAVY METALS IN THE ZONE OF EFFECTS OF HEAT-ELECTRICAL POWER STATIONS Author – Konopelko O., Supervisor – Pozniak A.....	663
INTENSIFICATION OF THE MATERIAL DRYING PROCESS WITH USE OF THE MICROWAVE FIELD ENERGY Author – Mykhailova O., Supervisor – Boshkova I.....	676
ECOLOGICAL SAFETY OF FOOD PRODUCTS GROWN WITHIN THE URBOHEOSYSTEM Author – Medvedeva Yu., Supervisor – Nekos A. ....	690
OBTAINING OF $Cu_2ZnSnS_4$ THIN FILMS AS AN ACTIVE LAYER OF SOLAR CELL Author – Musharovskiy O., Supervisor – Hilchuk A.....	710
ELECTRIC PASSENGER TRANSPORT VEHICLES: TECHNICAL CHARACTERISTICS AND ENERGY EFFICIENCY Author – Ivanov R., Supervisor – Koev K.....	725

*Наукове видання*

**Міжнародний конкурс студентських наукових робіт**

**BLACK SEA SCIENCE 2018**

Матеріали

Верстка – Н.М. Ковальчук

Формат 60x84/16. Гарнітура Times New Roman.  
Умовно-друк. арк. 48,07. Тираж 300. Замовлення № 0518-105.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»  
73034, м. Херсон, вул. Паровозна, 46-а, офіс 105  
Телефон +38 (0552) 39 95 80  
E-mail: [mailbox@helvetica.com.ua](mailto:mailbox@helvetica.com.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 4392 від 20.08.2012 р.