

Научная статья

УДК 621.3.036

DOI: [10.55170/1997-3225-2025-10-1-22-27](https://doi.org/10.55170/1997-3225-2025-10-1-22-27)

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА С САМОРЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОНАГРЕВОМ ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СУШКИ ПЛОДОВООВОЩНОГО СЫРЬЯ

Александр Викторович Щегольков^{1✉}, Юрий Викторович Родионов², Алексей Викторович Щегольков³

^{1,2} Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

³ Московский политехнический университет, Москва, Россия

¹ energynano@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4317-0689>

² rodionow.u.w@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9601-9555>

³ alexxx5000@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1838-3842>

Резюме. Цель исследований – повышение энергетической эффективности автоматизированных сушильных установок за счет применения электронагревателей с эффектом саморегулирования температуры и автоматизированной системой управления. Процесс сушки растительного сырья является энергозатратным и требует для своей реализации мощных энергетических источников. Анализ тепловых потерь при повышенных энергетических затратах в процессе сушки – определяет необходимость использования более эффективной и управляемой системы электронагрева. В статье исследована возможность применения электронагревателей с эффектом саморегулирования температуры для сушки плодовоовощной продукции. Конструктивно электронагреватели состояли из следующих составных частей: электрода (алюминиевая фольга толщиной 100 мкм), дисперсного наполнителя – многослойные нанотрубки (МУНТ) и полимерной матрицы (эластомер). МУНТ были получены методом электромагнитного СВЧ-синтеза. Для электропитания полимерного композита использовался программируемый источник тока Актаком АНТ-1351 с выходным регулируемым напряжением от 0 до 30 В. С помощью тепловизора были получены данные о тепловом потоке инфракрасного спектра, который соответствовал равномерному излучению с поверхности электронагревателя. Активизация нагрева происходила в результате поляризации переменным напряжением полимерного композита с использованием алгоритмов нейронной сети. Показана схема сушильной установки с адаптивным электронагревом в зависимости от условий сушки, в частности от температуры в сушильной камере и температуры плодовоовощного сырья. Интеллектуальное управление процессом сушки в данном случае обеспечивалось адаптивным изменением напряжения электронагревателя, тем самым изменяя мощность теплового потока в зависимости от степени готовности (влагосодержания) исходного сырья. Представленный способ сушки позволяет сохранять полезные и питательные свойства обрабатываемого сырья.

Ключевые слова: сушка, эффект саморегулирования температуры, эластомер, углеродные нанотрубки, нейронные сети

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00855, <https://rscf.ru/project/24-29-00855/>

Для цитирования: Щегольков А. В., Родионов Ю. В., Щегольков А. В. Автоматизированная система с саморегулируемым электронагревом для энергоэффективной сушки плодовоовощного сырья // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. Т. 10, № 1. С. 22-27. DOI: [10.55170/1997-3225-2025-10-1-22-27](https://doi.org/10.55170/1997-3225-2025-10-1-22-27)

Original article

AUTOMATED SYSTEM WITH SELF-REGULATING ELECTRIC HEATING FOR ENERGY-EFFICIENT DRYING OF FRUIT AND VEGETABLE RAW MATERIALS

Alexander V. Shchegolkov^{1✉}, Yury V. Rodionov², Aleksei V. Shchegolkov³

^{1,2} Tambov State Technical University, Tambov, Russia

³ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

¹ energynano@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4317-0689>

² rodionow.u.w@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9601-9555>

³ alexxx5000@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1838-3842>

Abstract. The aim of the research is to increase the energy efficiency of automated drying units by using electric heaters with the effect of self-regulating temperature and an automated control system. The process of drying plant materials is energy-intensive and requires powerful energy sources for its implementation. Analysis of heat losses at increased energy costs in the drying process – determines the need to use a more efficient and controllable electric heating system. The article investigates the possibility of using electric heaters with the effect of self-regulating temperature for drying fruit and vegetable products. Structurally, the electric heaters consisted of the following components: an electrode (aluminum foil 100 µm thick), a dispersed filler - multilayer nanotubes (MWCNTs)

and a polymer matrix (elastomer). MWCNTs were obtained by electromagnetic microwave synthesis. The polymer composite was powered by a programmable current source Aktakom ANT-1351 with an output adjustable voltage from 0 to 30 V. Using a thermal imager, data on the heat flow of the infrared spectrum were obtained, which corresponded to uniform radiation from the surface of the electric heater. Heating was activated as a result of polarization of the polymer composite by alternating voltage using neural network algorithms. The diagram of the drying unit with adaptive electric heating depending on the drying conditions, in particular, on the temperature in the drying chamber and the temperature of the fruit and vegetable raw materials is shown. Intelligent control of the drying process in this case was ensured by adaptive change in the voltage of the electric heater, thereby changing the power of the heat flow depending on the degree of readiness (moisture content) of the original raw materials. The presented drying method allows preserving the useful and nutritional properties of the processed raw materials.

Keywords: drying, temperature self-regulation effect, elastomer, carbon nanotubes, neural networks

Acknowledgements: The research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant No. 24-29-00855, <https://rscf.ru/project/24-29-00855/>

For citation: Shchegolkov, A. V., Rodionov, Yu. V. & Shchegolkov, A. V. (2025). Automated system with self-regulating electric heating for energy-efficient drying of fruit and vegetable raw materials. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii* (Bulletin Samara State Agricultural Academy), 10, 1, 22-27 (in Russ.). DOI: [10.55170/1997-3225-2025-10-1-22-27](https://doi.org/10.55170/1997-3225-2025-10-1-22-27)

Одним из инновационных направлений развития агропромышленного комплекса (АПК) является разработка новых материалов, которая позволяет осуществить переход на новую элементную базу с возможностью интеграции в автоматизированные системы, необходимых для оснащения технических средств переработки плодоовощной продукции с высоким уровнем оптимизации. Необходимо отметить активное использование новых технологий в сфере переработки растительного сырья [1-5]. Это обусловлено необходимостью сохранения питательных веществ, и соответственно, повышением экономической рентабельности технологий переработки растительного и плодоовощного сырья [6-7]. Применение традиционных средств электронагрева приводит к получению продукции при больших затратах энергии и длительности процесса, а также потере ценных свойств плодоовощной продукции. При этом автоматизация является важным направлением развития технологий переработки растительного сырья и может быть улучшена за счет применения новых типов элементов электронагрева, обладающих эффектом саморегулирования температуры.

Разработка нового технического оснащения для термической обработки плодоовощной продукции, обусловлена получением материалов нового поколения для термической обработки растительного сырья, что в свою очередь создает основу новым техническим возможностям для полной автоматизации процесса сушки. Данный подход может быть реализован на стыке таких научных дисциплин как материаловедение и информатика, т.е. интеллектуальные информационные технологии, которые могут быть использованы для управления новых функциональных и конструктивных материалов [8-11]. Интеллектуальные технологии, интегрированные в функциональные материалы, позволят обеспечить обратную связь с процессом сушки и получить объективную информацию о термической обработке растительных материалов, [10].

Разработка новых средств электронагрева, обладающих эффектом саморегулирования температуры для сушки растительного сырья, обеспечивающих оптимизацию процесса является актуальной задачей.

Цель исследований – улучшить энергетическую эффективность сушильной установки за счет применения электронагревателей с эффектом саморегулирования температуры и автоматизированной системой управления.

Задачи исследований: обосновать структурную схему автоматического регулирования для электронагревателей с эффектом саморегулирования температуры; исследовать тепловыделения с поверхности электронагревателя при различном питающем напряжении.

Материал и методы исследований. В соответствии с методикой изложенной в работах [8, 9] был получен нагреватель площадью 25 см² и толщиной 0,2 см. В качестве элементов подвода электрического тока использовались электроды – алюминиевая фольга (А5, РусАл, Россия) толщиной 100 мкм. В таблице 1 представлен состав нагревателя (Полимерная матрица – кремнийорганический компаунд «Силагерм»-8040 (ООО «ЭЛЕМЕНТ 14», Москва, Россия). В качестве дисперсного наполнителя использовались многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), полученных методом СВЧ-синтеза. Нагревательные элементы подключались к программируемому источнику тока (Актаком АНТ-1351, Россия) (выходное напряжение 0-30 В (регулируемое).

Регистрация потребляемого тока производилась с помощью мультиметра UNI-T UT71E+ (UNI-T, Китай), синхронизированного с персональным компьютером (на основе процессора Ryzen 7 1700) по USB-интерфейсу. Исследование распределения температурного поля на поверхности нагревателя в режиме тепловыделений проводилось бесконтактным методом с помощью тепловизора Testo-875-1 (Германия, Testo).

Энергосберегающая конвективно-вакуумная сушилка (рис. 1) содержит цилиндроконическую камеру 1, штуцер герметичного питания 2, барабан 3, воздухопроводы 4, электрический саморегулирующийся нагреватель 5 и шаровые затворы 6. Цилиндроконическая камера 1, представляет собой первую ступень сушилки, которая через вставку цилиндрического профиля и устройство перекрытия 7 соединена с камерой второй ступени 8, герметичную крышку 9, устройство соединения с вакуумной системой 10.

Энергосберегающая конвективно-вакуумная сушилка для растительного сырья работает следующим образом: воздух подается в цилиндроконическую камеру 1, где подогревается электрическим теплоаккумулирующим нагревателем 5. Растительный материал в виде соломки, подается через штуцер питателя 2, захватывается потоком теплоносителя и попадает во внутреннюю полость сушилки, где образует взвешенный закрученный слой, в этот момент времени горячий воздух уносит влагу и проходит через электрический саморегулирующийся нагреватель, в котором отдает часть теплоты. Растительный материал теряет поверхностную влагу, и скапливается в нижней части сушилки (барабане) 3. Вторая камера 8 в этот момент прогревается с помощью электрического теплоаккумулирующего нагревателя. После того, как наберется требуемый объем, открывается герметичный затвор 7, при этом закрываются шаровые затворы 6 и растительный материал пересыпается во вторую ступень камеры 8, где начинается вторая стадия сушки, а именно продувка и вакуумирование через устройство соединения с вакуумной системой 10. Высушенный продукт ссыпают через крышку 9 и отправляют на дальнейшую обработку.

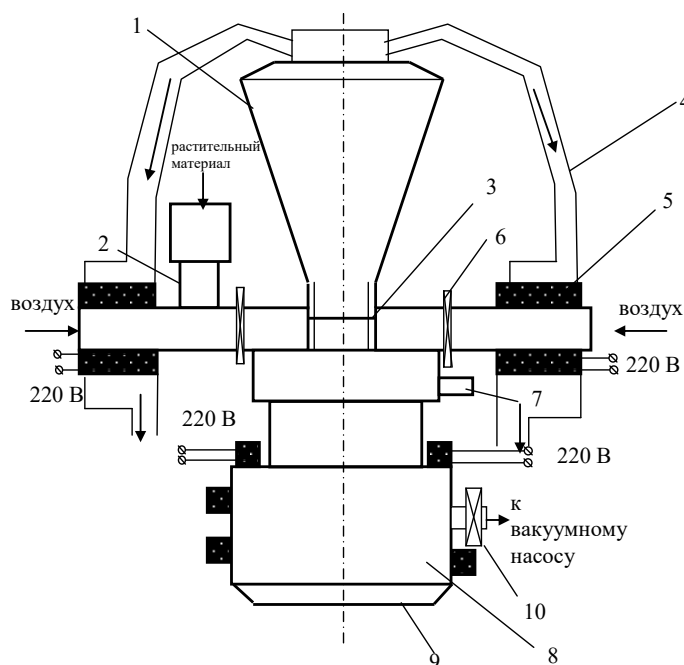


Рис. 1. Сушильная установка с электронагревателями:

- 1 – цилиндроконическая камера (режим конвективной сушки); 2 – штуцер герметичного питания; 3 – барабан; 4 – воздухопроводы;
5 – электрический саморегулирующийся нагреватель; 6 – шаровые затворы; 7 – устройство перекрытия;
8 – камера второй ступени (режим вакуумной сушки); 9 – крышка; 10 – вакуумная система.

На рисунке 2 приведена структурная схема автоматизированного управления системой электронагрева с эффектом саморегулирования температуры для сушильной установки. Для входного воздействия (x) используется напряжение питания нагревателя, которое изменяется по алгоритму - формируемому нейронной сетью.

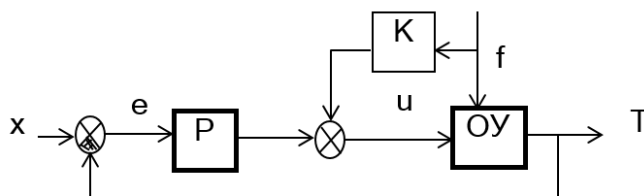


Рис. 2. Структурная схема автоматического регулирования процесса сушки

Структурная схема автоматического регулирования (комбинированная) процесса сушки плодоовощной продукции: К – усилитель с коэффициентом усиления K ; возмущающее воздействие f ; Р – регулятор; x – входное воздействие (напряжение питания нагревателя, которое изменяется по алгоритму формируемому нейронной сетью); e – сигнал рассогласования (ошибка управления); u – управляющее воздействие; ОУ – объект управления (сушильная установка); Т – выходной сигнал.

Принцип функционирования схемы автоматического регулирования (рис. 2) основан на контроле температурного режима в сушильной камере с управляющим воздействием на основе сигнала от регулятора с учетом усиленного сигнала от возмущающего воздействия. Преимуществом такой схемы управления является возможность задание мощности теплового потока, который не будет перегревать высушиваемый материал, так верхний диапазон температур ограничен – температурой саморегулирования. Структурная схема автоматического регулирования процесса сушки должна дорабатываться под конкретный тип системы сушки с учетом размещения измерительных преобразователей температуры, а также особенностей теплообмена, связанных с конструкцией сушильной установки.

Результаты исследований. Исследование температурного поля для нагревателя при изменении уровня питающего напряжения (от 12 до 18 В с шагом 2 В) представлено на рисунке 3.

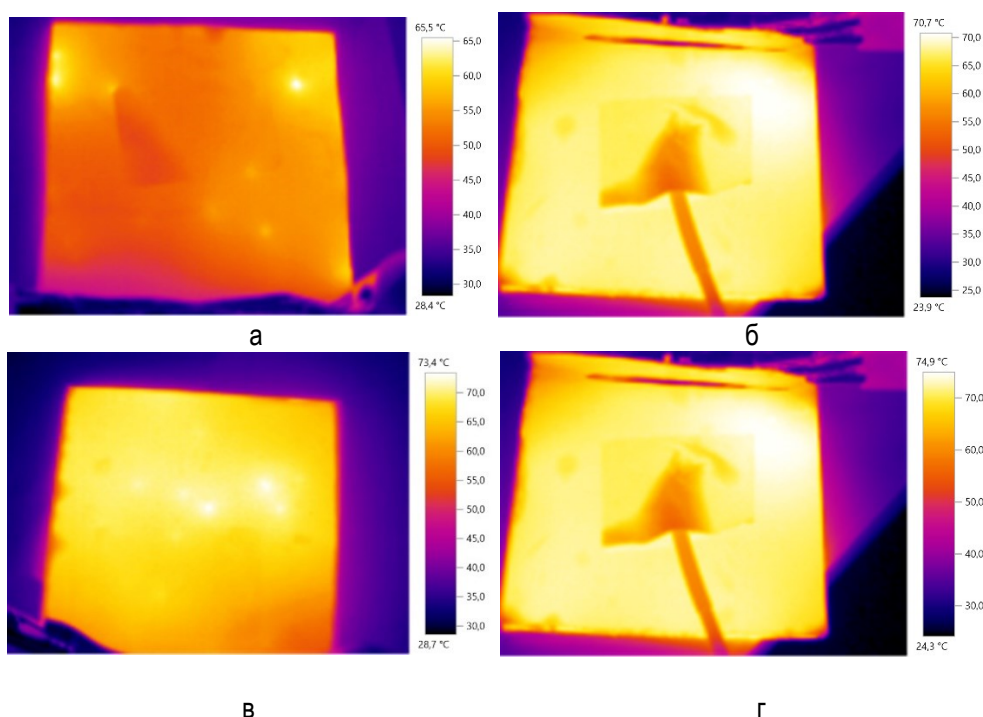


Рис. 3. Тепловизионные снимки нагревателя при смене питающего напряжения

Из анализа тепловизионных снимков следует, что температурное поле – формируемое на поверхности нагревателей является практически равномерным с незначительными температурными искажениями (в виде точек или краевых эффектов) для разных значений питающего напряжения в диапазоне от 12 до 18 В. Максимальные значения температур для тепловизионных снимков поверхности нагревателя - приведены в таблице 1.

В таблице 1 показаны режимы саморегулирования температуры в зависимости от питающего напряжения.

Таблица 1

Режим работы электронагревателя с эффектом саморегулирования температуры

№	Напряжение, В	Температура саморегулирования, °C	Время саморегулирования, с
1	12	65,5	220
2	14	70,7	205
3	16	73,4	192
4	18	74,9	170

Повышение питающего напряжения нагревателей приводит к снижению времени саморегулирования и повышению температуры (таблица 1), что может быть использовано при выборе параметров настройки автоматической системы регулирования сушки (входного воздействия (x)), а также обучении нейронной сети, которая

учитывает особенности режимов работы нагревателей. Изменение питающего напряжения на 6 В приводит к росту температуры нагревателя на 9,4 °С и снижению времени саморегулирования на 50 с. Это может быть использовано для реализации сушки с несколькими периодами или стадиями, когда влагосодержание и структурно-морфологические свойства растительного сырья меняются в процессе сушки и необходимо подбирать эффективный динамический режим сушки с управляемыми циклами (по времени и температурному воздействию).

Заключение. Проведенные исследования показали возможность получения нагревателей с эффектом саморегулирования температуры, которые могут обладать управляемыми динамическими параметрами нагрева, связанными с изменением мощности и динамики роста температуры, а также различным значением установившейся температуры на поверхности, что позволяет адаптировать технологию ИК нагрева в вакуумных сушильных установках для сушки растительного сырья с учетом различных видов плодовоовощной продукции.

Из основных выводов можно выделить следующие:

1. Представленная схема автоматического регулирования при которой для входного воздействия используется напряжение питания нагревателя, которое изменяется по алгоритму формируемому нейронной сетью. Саморегулирование температуры позволяет не перегревать растительное сырье, так как существует ограничение по верхнему порогу температуры.

2. Анализ тепловизионных снимков показывает, что температурное поле – формируемое на поверхности нагревателей является практически равномерным с незначительными температурными искажениями (в виде точек или краевых эффектов) для разных значений питающего напряжения в диапазоне от 12 до 18 В.

Список источников

1. Сапожников А. Н., Копылова А. В., Обриков Д. А. Перспективы использования порошков из мякоти тыквы и плодов шиповника в хлебопечении // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2024. Т. 27, № 2. С. 242-255. DOI: 10.21443/1560-9278-2024-27-2-242-255 EDN: KWDAEW
2. Типсина Н. Н., Демиденко Г. А. Использование продукта переработки растительного сырья при изготовлении новых видов мучных кондитерских изделий // Вестник КрасГАУ. 2023. № 9(198). С. 230-237. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-9-230-237 EDN: AJOLWT
3. Васюкова А. Т., Кусова И. У., Дышекова М. М. [и др.] Разработка продуктов с пролонгированным сроком хранения // Новые технологии. 2024. Т. 20, № 1. С. 42-49. DOI: 10.47370/2072-0920-2024-20-1-42-49 EDN: RICZRR
4. Сергеева И. Ю., Аншуков А. В., Рябоконева Л. А. Фитохимический потенциал *Betula pendula* и *Atriplex hortensis* для технологии функциональных продуктов питания // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2024. № 1(69). С. 128-134. DOI: 10.31563/1684-7628-2024-69-1-128-134 EDN: NKEXTQ
5. Бурак Л. Ч., Сапач А. Н., Завалей А. П. Влияние обработки холодной плазмой на качество и пищевую ценность растительного сырья. Обзор предметного поля // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14, № 2(49). С. 173-183. DOI: 10.21285/achb.914 EDN: RETQNK
6. Посокина Н. Е., Захарова А. И. Современные биологические способы обработки растительного сырья, применяемые для увеличения его хранимостности // Пищевые системы. 2024. Т. 7, № 2. С. 298-304. DOI: 10.21323/2618-9771-2024-7-2-298-304 EDN: GZDFNA
7. Курочкин А. А., Новикова О. А., Юрьев В. Ю. Термовакuumная экструзия как представитель нового технологического уклада в пищевых системах // Инновационная техника и технология. 2024. Т. 11, № 1. С. 38-45. EDN: RFXLAI
8. Щегольков, А. В. Автоматизированная система сушки и очистки растительного сырья с применением тепловых аккумуляторов и электронагревателей с эффектом саморегулирования температуры // Наука в центральной России. 2023. № 6(66). С. 17-26. DOI: 10.35887/2305-2538-2023-6-17-26 EDN: ABNWQV
9. Щегольков А. В., Щегольков А. В., Чумак М. А. [и др.] Синтез углеродных нанотрубок с помощью СВЧ излучения для модификации эластомера с улучшенной электро- и теплопроводностью // Перспективные материалы. 2024. № 4. С. 54-65. DOI: 10.30791/1028-978X-2024-4-54-65 EDN: BESMQQ
10. Щегольков А. В., Щегольков А. В., Комаров Ф. Ф. [и др.] Электро- и теплофизические свойства кремнийорганических эластомеров, модифицированных углеродными нанотрубками и микроразмерными металлическими структурами // Российский химический журнал. 2023. Т. 67, № 4. С. 48-53. DOI: 10.6060/rcj.2023674.9 EDN: AWBIXD
11. Васильев С. И., Машков С. В., Гриднева, Т. С., Кудряков Е. В. Обоснование характеристик электрического поля для повышения энергосбережения при выращивании овощных культур // Самара АгроВектор. 2022. Т. 2, № 2. С. 17-27. DOI 10.55170/29493536_2022_2_2_17. EDN PDUAGX.

References

1. Sapozhnikov, A. N., Kopylova, A.V., & Obrikov, D. A. (2024). Prospects for the use of pumpkin pulp and rosehip fruit powders in baking. *Bulletin of the Murmansk State Technical University*, 27(2), 242-255. (in Russ).
2. Tipsina, N. N., & Demidenko, G. A. (2023). Use of the product of processing of vegetable raw materials in the manufacture of new types of flour confectionery products. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University*, (9 (198)), 230-237. (in Russ).
3. Vasyukova, A. T., Kusova, I. U., Moshkin, A.V., Dysheкова, M. M., & Glukhova, E. V. (2024). Development of products with extended shelf life. *New Technologies*, 20(1), 42-49. (in Russ).

4. Sergeeva I. Yu., Anshukov A. V. & Ryabokoneva L. A. (2024). Phytochemical potential of *Betula pendula* and *Atriplex hortensis* for the technology of functional foods. *Bulletin of Bashkir State Agrarian University*. 2024. 1(69). 128-134. (in Russ).
5. Burak, L. Ch., Sapach, A. N., & Zavaley, A. P. (2024). Effect of cold plasma treatment on the quality and nutritional value of plant raw materials. Overview of the subject field. *Izvestiya vuzov. Applied Chemistry and Biotechnology*, 14(2 (49)), 173-183. (in Russ).
6. Posokina, N. E., & Zakharova, A. I. (2024). Modern biological methods of processing plant raw materials used to increase its storage capacity. *Food systems*, 7(2), 298-304. (in Russ).
7. Kurochkin, A. A., Novikova, O. A., & Yuryev, V. Yu. (2024). Thermal vacuum extrusion as a representative of a new technological order in food systems. *Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya*, 11(1), 38-45. (in Russ).
8. Shchegolkov, A. V. (2024). An automated system for drying and cleaning vegetable raw materials using thermal accumulators and electric heaters with the effect of temperature self-regulation. *Science in Central Russia*. 2023. 6(66). 17-26. (in Russ).
9. Shchegolkov, A.V., Shchegolkov, A.V., & Chumak, M. A. (2024). Synthesis of carbon nanotubes using microwave radiation to modify an elastomer with improved electrical and thermal conductivity. *Perspektivnye materialy*, 4, 54-65. (in Russ).
10. Shchegolkov, A.V., Komarov, F. F., Parfimovich, I. D., & Zemtsova, N. V. (2023). Electro - and thermophysical properties of organosilicon elastomers modified with carbon nanotubes and micro-sized metal structures. *Russian Chemical Journal*, 67(4), 48-53. (in Russ).
11. Vasiliev, S. I., Mashkov, S. V., Gridneva, T. S. & Kudryakov, E. (2022). In substantiation of the characteristics of the electric field to increase energy saving in the cultivation of vegetable crops // *Samara AgroVector*. 2, 2. 17-27. (in Russ).

Информация об авторах:

А. В. Щегольников – кандидат технических наук, доцент;
Ю. В. Родионов – доктор технических наук, профессор;
А. В. Щегольников – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors:

A. V. Shchegolkov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
Yu. V. Rodionov – Doctor of Technical Sciences, Professor;
A. V. Shchegolkov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.01.2025; одобрена после рецензирования 25.02.2025; принята к публикации 5.03.2025.
The article was submitted 30.01.2025; approved after reviewing 25.02.2025; accepted for publication 5.03.2025.