

## Повышение эффективности процесса сушки зерна за счет модернизации сушильных камер

Ю. В. Ильюшин<sup>1</sup>, А. М. Еремеева<sup>1</sup>, И. М. Новожилов<sup>2✉</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ [novozhilovim@list.ru](mailto:novozhilovim@list.ru)

**Аннотация.** В рамках данного исследования авторы рассматривают один из начальных этапов технологического процесса получения биодизельного топлива (сушка зерна). Процесс сушки имеет ряд недостатков, влияющих на качество и стоимость этого топлива, главный из которых – невозможность равномерного прогрева и поддержания заданной температуры с минимальными энергетическими затратами. На основе мирового опыта технологических решений проблемы в данной статье предлагается способ изменения системы нагрева и прогрева сырья. Были проведены математические расчеты, представлено изменение температурного поля с течением времени, а также выполнены натурные эксперименты, в которых было определено оптимальное количество источников нагревания сырья с учетом габаритов сушильной камеры. Предлагаемое техническое решение позволяет сформировать однородное температурное поле, тем самым добиваясь равномерности прогрева зерна, и предотвратить большие эксплуатационные затраты, связанные с вытеканием масла из зерен.

**Ключевые слова:** биотопливо, хранение зерна, автоматизация, функция Грина, температурное поле

**Для цитирования:** Ильюшин Ю. В., Еремеева А. М., Новожилов И. М. Повышение эффективности процесса сушки зерна за счет модернизации сушильных камер // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 3. С. 25–36. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-3-25-36.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

## Increasing the Efficiency of Grain Drying Using Modernized Drying Chambers

Yu. V. Ilyushin<sup>1</sup>, A. M. Eremeeva<sup>1</sup>, I. M. Novozhilov<sup>2✉</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ [novozhilovim@list.ru](mailto:novozhilovim@list.ru)

**Abstract.** The authors consider the stage of grain drying as part of a technological process for obtaining biodiesel fuel. The drying process is associated with a number of disadvantages that affect the quality and cost of biodiesel fuel. One of them consists in the difficulty of uniform heating and maintaining the desired temperature under minimal energy costs. Following a review of international experience in this field, the authors propose a method for modernizing the existing systems of grain heating. Mathematical calculations were carried out to determine variations in the temperature field versus time; full-scale experiments were performed to identify the optimal number of heating sources, taking the drying chamber dimensions into account. The proposed engineering solution makes it possible to form a uniform temperature field, thereby providing for uniform grain heating and preventing high operational costs associated with oil leakage from the grains.

**Keywords:** biofuel, grain storage, automation, Green's function, temperature field

**For citation:** Ilyushin Yu. V., Ereemeeva A. M., Novozhilov I. M. Increasing the Efficiency of Grain Drying Using Modernized Drying Chambers // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 3. P. 25–36. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-3-25-36.

---

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** В условиях роста промышленно-сти остро встает вопрос увеличения сырьевой базы, так как извлекаемые ресурсы имеют исчерпаемый запас. По прогнозам экспертов, легкодобываемая нефть как основной источник сырья для производства большого разнообразия продуктов имеет перспективу закончиться в ближайшие 100 лет [1], что приведет к катастрофическому падению производства. Для предотвращения экономического кризиса и уменьшения последствий сокращения запасов нефти необходим планомерный переход (полный или частичный) на возобновляемые источники энергии. Одно из перспективных направлений данного перехода – замена дизельного топлива (либо доли дизельного топлива) на биодизельное, получаемое в большинстве случаев из растительного сырья. Такой переход позволит сократить количество нефти, перерабатываемой в топливо, и перенаправить ее на нужды химической промышленности.

Технологический процесс получения биодизеля условно можно разделить на три этапа: подготовка сырья, получение биодизельного топлива и его очистка от примесей и побочных продуктов. Рассмотрим первый этап более подробно. На первом этапе технологической цепочки большое значение имеет доставка, хранение и последующий отжим масла из семян растений. Важнейшей задачей данного этапа является сохранение имеющихся в зернах масел и предотвращение их испарения под действием нагревания зерен. Для решения этой задачи на всех этапах транспортировки, хранения и последующей сушки зерна необходимо осуществлять контроль температурно-влажностных характеристик. На каждом этапе это реализуется различными способами: при рассмотрении этапа транспортировки контроль обеспечивается за счет использования закрытых рефрижераторов с постоянным охлаждением, во время хранения и сушки – системой климатического контроля хранилищ, на этапе отжима процесс происходит при заданных технологических параметрах режима. Максимальное количество потерь масла происходит на этапе хранения и сушки. Из-за непрерывного технологического процесса, постоянного пополнения и извлечения из хранилищ зерновых запасов, слеживания зерна

чрезвычайно трудно обеспечивать температурно-влажностный баланс в камерах хранения и сушильных камерах. Также стоит отметить достаточно большие энергетические затраты на функционирование системы нагрева и охлаждения хранилища, которые связаны с применением сплошных нагревательных элементов – ТЭНов. Использование камер предварительного набора температуры частично решает эту проблему, но существенно увеличивает площадь зернохранилища. При достаточно небольших производствах и технологических ограничениях данный способ становится достаточно затратным процессом. Альтернативным способом является поточная система загрузки. При таком подходе рефрижераторы отгружают зерно непосредственно в систему отжима, вследствие чего существенно увеличивается отжим (в процентах), но вместе с тем повышаются и логистические риски, что в сложных погодноклиматических условиях может привести к полной остановке производства.

Таким образом, поиск оптимальных технических решений, позволяющих обеспечить экономически выгодное хранение и сушку зерна, является важной научно-технической задачей для повышения эффективности технологического процесса производства биодизельного топлива.

**Существующие технологические решения.** История возникновения биодизеля начинается с 1900 г., когда Рудольф Дизель продемонстрировал на Всемирной выставке в Париже двигатель, запустив его на арахисовом масле. С тех пор было проведено множество научных исследований, направленных на совершенствование как технологии производства, так и качества топлива. В частности, S. Islam, B. Basumatary, S. L. Rokhum, P. K. Mochahari, S. Basumatary [2], [3] и др. рассматривают применение гетерогенных нанокатализаторов для увеличения выхода продукта, но отмечают необходимость строгого соблюдения технологических режимов работы. A. Zambre проводит анализ технологических процессов и совместно с группой исследователей A. Upendran, R. Shukla, N. Chanda, K. K. Katti, C. Cutler, R. Kannan, K. V. Katti и др. [4], [5] проводит исследования по совершенствованию технологии получения биодизельных топлив. Вместе с тем, авторы

отмечают постоянный рост производства биодизельных топлив и высказывают предположение о необходимости дробления крупных производств на мелкие из-за логистических сложностей доставки сырья и продуктов. М. Athar, S. Zaidi, S. Heidari, D. Wood [6] проводят анализ видов сырья и технологий его подготовки для получения биодизеля. Подобные исследования проводит и группа бразильских ученых L. P. Ramos; F. R. Silva; A. S. Mangrich; C. S. Cordeiro [7]. Процесс вторичной переработки с получением глицерина рассматривали P. D. Patil, A. Madavi, P. S. Bhussari, Y. Zhang, M. A. Dube, D. D. McLean, M. Kates [8]. Также стоит отметить [9]–[14], показавшие важность температурных режимов и их влияние на качество получаемых продуктов. Вопросами теплообменных процессов при хранении и сушке зерновых культур начали заниматься достаточно давно. Данные процессы базируются на классической задаче изотермических процессов. Из последних работ по данному направлению стоит отметить работы авторов S. A. Pavlov, T. F. Frolova [15], A. L. Ronzhin, A. I. Savel'ev [16], S. Sanford, A. Go [17], В. Ф. Безъязычного [18]. Также важно отметить исследования тепловых процессов в закрытых помещениях. К таковым можно отнести публикации В. Р. Алабьева, Т. П. Бажиной, И. М. Першина, А. Б. Чернышева и др. [19]–[23]. В области пространственного учета теплообменных процессов важно отметить статьи J. C. Schäfer, W. L. Martin, P. S. Sarathi, G. McNab, H. Lo [24], C. A. Desoer, J. Wing [25], A. В. Мартиросяна [26], Т. В. Кухаровой [27] и др.

Таким образом, можно отметить наличие широкого круга исследований, связанных с контролем работы сушильных аппаратов. Однако, как отмечается в большинстве приведенных материалов, достаточно сложно обеспечить сплошное, однородное тепловое поле ввиду множества динамических параметров системы. Используя термины теории автоматического управления, необходимо отмечать сложность моделирования термодинамической системы из-за множества хаотичных динамических воздействий.

**Постановка задачи.** Необходимо разработать экономически эффективную систему управления температурным полем камеры предварительного хранения зерна.

Поставленная задача достигается учетом в математической модели габаритных параметров камеры, заменой сплошных нагревательных элементов на точечные, работающие в импульсном режиме.

**Методология исследования.** Математическая модель камеры представляет собой тепловую дифференциальную модель следующего вида:

$$\frac{\partial Q(x, y, z, t)}{\partial t} - a^2 \left[ \frac{\partial^2 Q(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Q(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] = f(x, y, z, t);$$

$$Q(x, y, z, 0) = Q_0(x, y, z); Q(0, y, z, t) = q_1(y, z, t);$$

$$Q(l_1, y, z, t) = q_2(y, z, t); Q(x, 0, z, t) = q_3(y, z, t);$$

$$Q(x, l_2, z, t) = q_4(x, z, t); Q(x, y, 0, t) = q_5(x, y, t);$$

$$Q(x, y, l_3, t) = q_6(x, y, t);$$

$$0 \leq x \leq l_1, 0 \leq y \leq l_2, 0 \leq z \leq l_3, t \geq 0; a > 0,$$

где  $Q$  – обобщенная функция температурного поля;  $q$  – граничные условия;  $f$  – функция выхода.

Представим входное воздействие в виде точечного источника, описываемого следующим уравнением:

$$G(x, y, z, \rho, \nu, \vartheta, t) = \frac{8}{l_1 l_2 l_3} \times \sum_{k, m, n=1}^{\infty} \exp \left[ -a^2 \pi^2 t \left( \frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} + \frac{n^2}{l_3^2} \right) \right] \times \sin \left( \frac{k \pi x}{l_1} \right) \sin \left( \frac{m \pi y}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi z}{l_3} \right) \times \sin \left( \frac{k \pi \rho}{l_1} \right) \sin \left( \frac{m \pi \nu}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi \vartheta}{l_3} \right).$$

Уравнение функции Грина  $G$  определяет температуру в точке с координатами  $x, y, z$  в момент времени  $t$ . Сам объект характеризуется коэффициентом температуропроводности  $a$  и геометрическими параметрами  $l_1, l_2, l_3$ . Точка приложения воздействия единичной мощности описывается координатами  $\rho, \nu, \vartheta$ , где  $k, m, n$  – заданные коэффициенты. Указанные нагревательные элементы, удаленные на равное расстояние друг от друга, влияют не только на самих себя, но и на соседние нагревательные элементы. Так, один нагревательный элемент окажет максимальное влияние на ближний соседний нагревательный элемент:

$$G(x_0, y_0, z_0, \rho, \nu, \vartheta, t) = \frac{8}{l_1 l_2 l_3} \times \exp \left[ -a^2 \pi^2 t \left( \frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} + \frac{n^2}{l_3^2} \right) \right] \sin \left( \frac{k \pi x}{l_1} \right) \times \sin \left( \frac{m \pi y}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi z}{l_3} \right) \sin \left( \frac{k \pi \rho}{l_1} \right) \times \sin \left( \frac{m \pi \nu}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi \vartheta}{l_3} \right);$$

$$G(x_1, y_0, z_0, \rho, v, \vartheta, t) = \frac{8}{l_1 l_2 l_3} \times \\ \times \exp \left[ -a^2 \pi^2 t \left( \frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} + \frac{n^2}{l_3^2} \right) \right] \sin \left( \frac{k \pi x}{l_1} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{m \pi y}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi z}{l_3} \right) \sin \left( \frac{k \pi \rho}{l_1} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{m \pi v}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi \vartheta}{l_3} \right);$$

$$G(x_0, y_1, z_0, \rho, v, \vartheta, t) = \frac{8}{l_1 l_2 l_3} \times \\ \times \exp \left[ -a^2 \pi^2 t \left( \frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} + \frac{n^2}{l_3^2} \right) \right] \sin \left( \frac{k \pi x}{l_1} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{m \pi y}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi z}{l_3} \right) \sin \left( \frac{k \pi \rho}{l_1} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{m \pi v}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi \vartheta}{l_3} \right);$$

$$G(x_0, y_0, z_1, \rho, v, \vartheta, t) = \frac{8}{l_1 l_2 l_3} \times \\ \times \exp \left[ -a^2 \pi^2 t \left( \frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} + \frac{n^2}{l_3^2} \right) \right] \sin \left( \frac{k \pi x}{l_1} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{m \pi y}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi z}{l_3} \right) \sin \left( \frac{k \pi \rho}{l_1} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{m \pi v}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi \vartheta}{l_3} \right).$$

Исходя из изотропности исследуемой среды, необходимо учитывать влияние не только на нагревательные элементы, но и на датчики:

$$G(x_0, y_0, z_0, \rho, v, \vartheta, t) = \frac{8}{l_1 l_2 l_3} \times \\ \times \sum_{k,m,n=1}^{\infty} \exp \left[ -a^2 \pi^2 t \left( \frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} + \frac{n^2}{l_3^2} \right) \right] \sin \left( \frac{k \pi x}{l_1} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{m \pi y}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi z}{l_3} \right) \sin \left( \frac{k \pi \rho}{l_1} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{m \pi v}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi \vartheta}{l_3} \right);$$

$$G(x_1, y_0, z_0, \rho, v, \vartheta, t) = \frac{8}{l_1 l_2 l_3} \times \\ \times \sum_{k,m,n=1}^{\infty} \exp \left[ -a^2 \pi^2 t \left( \frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} + \frac{n^2}{l_3^2} \right) \right] \sin \left( \frac{k \pi x}{l_1} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{m \pi y}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi z}{l_3} \right) \sin \left( \frac{k \pi \rho}{l_1} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{m \pi v}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi \vartheta}{l_3} \right);$$

$$G(x_0, y_1, z_0, \rho, v, \vartheta, t) = \frac{8}{l_1 l_2 l_3} \times \\ \times \sum_{k,m,n=1}^{\infty} \exp \left[ -a^2 \pi^2 t \left( \frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} + \frac{n^2}{l_3^2} \right) \right] \sin \left( \frac{k \pi x}{l_1} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{m \pi y}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi z}{l_3} \right) \sin \left( \frac{k \pi \rho}{l_1} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{m \pi v}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi \vartheta}{l_3} \right);$$

$$G(x_0, y_0, z_1, \rho, v, \vartheta, t) = \frac{8}{l_1 l_2 l_3} \times \\ \times \sum_{k,m,n=1}^{\infty} \exp \left[ -a^2 \pi^2 t \left( \frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} + \frac{n^2}{l_3^2} \right) \right] \sin \left( \frac{k \pi x}{l_1} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{m \pi y}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi z}{l_3} \right) \sin \left( \frac{k \pi \rho}{l_1} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{m \pi v}{l_2} \right) \sin \left( \frac{n \pi \vartheta}{l_3} \right).$$

Таким образом, общее (суммарное) температурное поле, оказывающее воздействие на все нагревательные элементы и датчики, будет выражаться следующим уравнением:

$$G(x_j, y_j, z_j, \rho, v, \vartheta, t) = \sum_{i=1}^d \frac{8}{l_1 l_2 l_3} \sum_{k,m,n=1}^{\infty} \sin \left( \frac{k \pi x_j}{l_1} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{k \pi y_j}{l_2} \right) \sin \left( \frac{k \pi z_j}{l_3} \right) \sin \left( \frac{k \pi \rho_i}{l_1} \right) \sin \left( \frac{k \pi v_i}{l_2} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{k \pi \vartheta_i}{l_3} \right) \exp \left[ -a^2 \pi^2 t \left( \frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} + \frac{n^2}{l_3^2} \right) \right] \times \\ \times \sum_{p,k,m,n=1}^{\infty} \sin \left( \frac{k \pi x_j}{l_1} \right) \sin \left( \frac{k \pi y_j}{l_2} \right) \sin \left( \frac{k \pi z_j}{l_3} \right) \times \\ \times \sin \left( \frac{k \pi \rho_{z(p)}}{l_1} \right) \sin \left( \frac{k \pi v_{z(p)}}{l_2} \right) \sin \left( \frac{k \pi \vartheta_{z(p)}}{l_3} \right) \times \\ \times \exp \left[ -a^2 \pi^2 (t - \tau) \left( \frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} + \frac{n^2}{l_3^2} \right) \right],$$

где  $d$  – количество нагревательных элементов;  $\tau$  – приращение по времени;  $z(p)$  – порядковый номер исследуемой точки.

Графически распределение температурных потоков, возникающих из-за точечного воздействия нагревательного элемента, представлено на рис. 1, где  $\xi_1$  – координата нагревательного элемента;  $L_x, L_y, L_z$  – габаритные размеры объекта;  $\mathbf{Z}_1, \mathbf{Y}_1$  – векторы направления распространения температурного поля по осям  $z, y$ .

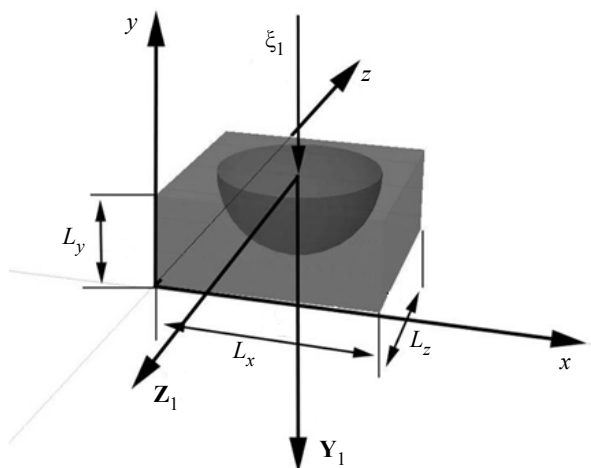


Рис. 1. Графическое изображение распространения первоначального импульса

Fig. 1. Graphical representation of the propagation of the initial impulse

На рис. 2 показан общий вид замкнутой пространственно-распределительной системы.

В структурной схеме указаны два параметра:  $T$  и  $T_{зад}$  – текущая и заданная температуры технологического режима.

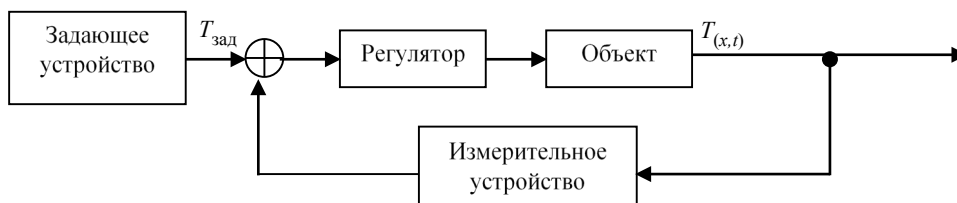


Рис. 2. Структурная схема замкнутой системы управления  
 Fig. 2. Structural diagram of a closed-loop control system

Табл. 1. Площадь сушильной камеры 5 м<sup>2</sup>  
 Tab. 1. Drying chamber area 5 м<sup>2</sup>

$d = 9$	$d = 8$	$d = 7$	$d = 6$	$d = 5$
SuTemp[1,12]=43.19	SuTemp[1,12]=43.19	SuTemp[1,12]=43.18	SuTemp[1,12]=43.18	SuTemp[1,12]=43.48
SuTemp[2,12]=43.37	SuTemp[2,12]=43.36	SuTemp[2,12]=43.31	SuTemp[2,12]=43.32	SuTemp[2,12]=43.39
SuTemp[3,12]=43.49	SuTemp[3,12]=43.47	SuTemp[3,12]=43.43	SuTemp[3,12]=43.37	SuTemp[3,12]=43.39
SuTemp[4,12]=43.56	SuTemp[4,12]=43.51	SuTemp[4,12]=43.43	SuTemp[4,12]=43.32	SuTemp[4,12]=43.38
SuTemp[5,12]=43.56	SuTemp[5,12]=43.47	SuTemp[5,12]=43.34	SuTemp[5,12]=43.18	SuTemp[5,12]=43.45
SuTemp[6,12]=43.49	SuTemp[6,12]=43.36	SuTemp[6,12]=43.19	SuTemp[6,12]=43.26	
SuTemp[7,12]=43.37	SuTemp[7,12]=43.19	SuTemp[7,12]=43.42		
SuTemp[8,12]=43.19	SuTemp[8,12]=43.78			
SuTemp[9,12]=43.14				
$d = 14$	$d = 13$	$d = 12$	$d = 11$	$d = 10$
SuTemp[1,12]=43.20	SuTemp[1,12]=43.20	SuTemp[1,12]=43.19	SuTemp[1,12]=43.19	SuTemp[1,12]=43.19
SuTemp[2,12]=43.39	SuTemp[2,12]=43.38	SuTemp[2,12]=43.38	SuTemp[2,12]=43.38	SuTemp[2,12]=43.37
SuTemp[3,12]=43.56	SuTemp[3,12]=43.55	SuTemp[3,12]=43.54	SuTemp[3,12]=43.53	SuTemp[3,12]=43.51
SuTemp[4,12]=43.70	SuTemp[4,12]=43.68	SuTemp[4,12]=43.66	SuTemp[4,12]=43.64	SuTemp[4,12]=43.60
SuTemp[5,12]=43.80	SuTemp[5,12]=43.77	SuTemp[5,12]=43.74	SuTemp[5,12]=43.69	SuTemp[5,12]=43.63
SuTemp[6,12]=43.87	SuTemp[6,12]=43.82	SuTemp[6,12]=43.76	SuTemp[6,12]=43.69	SuTemp[6,12]=43.60
SuTemp[7,12]=43.89	SuTemp[7,12]=43.82	SuTemp[7,12]=43.74	SuTemp[7,12]=43.64	SuTemp[7,12]=43.51
SuTemp[8,12]=43.87	SuTemp[8,12]=43.77	SuTemp[8,12]=43.66	SuTemp[8,12]=43.53	SuTemp[8,12]=43.37
SuTemp[9,12]=43.80	SuTemp[9,12]=43.68	SuTemp[9,12]=43.54	SuTemp[9,12]=43.38	SuTemp[9,12]=43.19
SuTemp[10,12]=43.70	SuTemp[10,12]=43.55	SuTemp[10,12]=43.38	SuTemp[10,12]=43.19	SuTemp[10,12]=43.50
SuTemp[11,12]=43.56	SuTemp[11,12]=43.38	SuTemp[11,12]=43.19	SuTemp[11,12]=43.85	
SuTemp[12,12]=43.39	SuTemp[12,12]=43.20	SuTemp[12,12]=43.21		
SuTemp[13,12]=43.20	SuTemp[13,12]=43.56			
SuTemp[14,12]=43.92				

Табл. 2. Площадь сушильной камеры 10 м<sup>2</sup>

Tab. 2. Drying chamber area 10 m<sup>2</sup>

$d = 9$	$d = 8$	$d = 7$	$d = 6$	$d = 5$
SuTemp[1,12]=52.03	SuTemp[1,12]=52.01	SuTemp[1,12]=51.99	SuTemp[1,12]=51.95	SuTemp[1,12]=51.89
SuTemp[2,12]=53.82	SuTemp[2,12]=53.73	SuTemp[2,12]=53.59	SuTemp[2,12]=53.39	SuTemp[2,12]=53.07
SuTemp[3,12]=55.15	SuTemp[3,12]=54.87	SuTemp[3,12]=54.48	SuTemp[3,12]=53.91	SuTemp[3,12]=53.07
SuTemp[4,12]=55.86	SuTemp[4,12]=55.27	SuTemp[4,12]=54.48	SuTemp[4,12]=53.39	SuTemp[4,12]=51.89
SuTemp[5,12]=55.86	SuTemp[5,12]=54.87	SuTemp[5,12]=53.59	SuTemp[5,12]=51.95	SuTemp[5,12]=51.75
SuTemp[6,12]=55.15	SuTemp[6,12]=53.73	SuTemp[6,12]=51.99	SuTemp[6,12]=52.12	
SuTemp[7,12]=53.82	SuTemp[7,12]=52.01	SuTemp[7,12]=52.49		
SuTemp[8,12]=52.03	SuTemp[8,12]=52.86			
SuTemp[9,12]=53.22				
$d = 14$	$d = 13$	$d = 12$	$d = 11$	$d = 10$
SuTemp[1,12]=52.07	SuTemp[1,12]=52.06	SuTemp[1,12]=52.06	SuTemp[1,12]=52.05	SuTemp[1,12]=52.04
SuTemp[2,12]=54.04	SuTemp[2,12]=54.01	SuTemp[2,12]=53.98	SuTemp[2,12]=53.94	SuTemp[2,12]=53.89
SuTemp[3,12]=55.80	SuTemp[3,12]=55.73	SuTemp[3,12]=55.63	SuTemp[3,12]=55.51	SuTemp[3,12]=55.36
SuTemp[4,12]=57.28	SuTemp[4,12]=57.11	SuTemp[4,12]=56.90	SuTemp[4,12]=56.64	SuTemp[4,12]=56.30
SuTemp[5,12]=58.39	SuTemp[5,12]=58.08	SuTemp[5,12]=57.70	SuTemp[5,12]=57.22	SuTemp[5,12]=56.62
SuTemp[6,12]=59.08	SuTemp[6,12]=58.58	SuTemp[6,12]=57.97	SuTemp[6,12]=57.22	SuTemp[6,12]=56.30
SuTemp[7,12]=59.31	SuTemp[7,12]=58.58	SuTemp[7,12]=57.70	SuTemp[7,12]=56.64	SuTemp[7,12]=55.36
SuTemp[8,12]=59.08	SuTemp[8,12]=58.08	SuTemp[8,12]=56.90	SuTemp[8,12]=55.51	SuTemp[8,12]=53.89
SuTemp[9,12]=58.39	SuTemp[9,12]=57.11	SuTemp[9,12]=55.63	SuTemp[9,12]=53.94	SuTemp[9,12]=52.04
SuTemp[10,12]=57.28	SuTemp[10,12]=55.73	SuTemp[10,12]=53.98	SuTemp[10,12]=52.05	SuTemp[10,12]=53.59
SuTemp[11,12]=55.80	SuTemp[11,12]=54.01	SuTemp[11,12]=52.06	SuTemp[11,12]=53.95	
SuTemp[12,12]=54.04	SuTemp[12,12]=52.06	SuTemp[12,12]=54.32		
SuTemp[13,12]=52.07	SuTemp[13,12]=54.68			
SuTemp[14,12]=52.07				

Табл. 3. Площадь сушильной камеры 20 м<sup>2</sup>

Tab. 3. Drying chamber area 20 m<sup>2</sup>

$d = 9$	$d = 8$	$d = 7$	$d = 6$	$d = 5$
SuTemp[1,12]=43.11	SuTemp[1,12]=43.37	SuTemp[1,12]=43.33	SuTemp[1,12]=43.23	SuTemp[1,12]=43.24
SuTemp[2,12]=43.21	SuTemp[2,12]=43.57	SuTemp[2,12]=43.60	SuTemp[2,12]=43.38	SuTemp[2,12]=43.39
SuTemp[3,12]=43.29	SuTemp[3,12]=43.59	SuTemp[3,12]=43.73	SuTemp[3,12]=43.43	SuTemp[3,12]=43.39
SuTemp[4,12]=43.33	SuTemp[4,12]=43.58	SuTemp[4,12]=43.73	SuTemp[4,12]=43.38	SuTemp[4,12]=43.24
SuTemp[5,12]=43.33	SuTemp[5,12]=43.59	SuTemp[5,12]=43.60	SuTemp[5,12]=43.23	SuTemp[5,12]=43.24
SuTemp[6,12]=43.29	SuTemp[6,12]=43.57	SuTemp[6,12]=43.33	SuTemp[6,12]=43.84	
SuTemp[7,12]=43.21	SuTemp[7,12]=43.37	SuTemp[7,12]=43.41		
SuTemp[8,12]=43.11	SuTemp[8,12]=43.02			
SuTemp[9,12]=43.84				
$d = 14$	$d = 13$	$d = 12$	$d = 11$	$d = 10$
SuTemp[1,12]=43.19	SuTemp[1,12]=43.17	SuTemp[1,12]=43.24	SuTemp[1,12]=43.09	SuTemp[1,12]=43.10
SuTemp[2,12]=43.38	SuTemp[2,12]=43.33	SuTemp[2,12]=43.45	SuTemp[2,12]=43.19	SuTemp[2,12]=43.19
SuTemp[3,12]=43.52	SuTemp[3,12]=43.46	SuTemp[3,12]=43.62	SuTemp[3,12]=43.26	SuTemp[3,12]=43.26
SuTemp[4,12]=43.64	SuTemp[4,12]=43.55	SuTemp[4,12]=43.74	SuTemp[4,12]=43.32	SuTemp[4,12]=43.31
SuTemp[5,12]=43.71	SuTemp[5,12]=43.61	SuTemp[5,12]=43.80	SuTemp[5,12]=43.34	SuTemp[5,12]=43.33
SuTemp[6,12]=43.75	SuTemp[6,12]=43.63	SuTemp[6,12]=43.82	SuTemp[6,12]=43.34	SuTemp[6,12]=43.31
SuTemp[7,12]=43.76	SuTemp[7,12]=43.63	SuTemp[7,12]=43.80	SuTemp[7,12]=43.32	SuTemp[7,12]=43.26
SuTemp[8,12]=43.75	SuTemp[8,12]=43.61	SuTemp[8,12]=43.74	SuTemp[8,12]=43.26	SuTemp[8,12]=43.19
SuTemp[9,12]=43.71	SuTemp[9,12]=43.55	SuTemp[9,12]=43.62	SuTemp[9,12]=43.19	SuTemp[9,12]=43.10
SuTemp[10,12]=43.64	SuTemp[10,12]=43.46	SuTemp[10,12]=43.45	SuTemp[10,12]=43.09	SuTemp[10,12]=43.82
SuTemp[11,12]=43.52	SuTemp[11,12]=43.33	SuTemp[11,12]=43.24	SuTemp[11,12]=43.93	
SuTemp[12,12]=43.38	SuTemp[12,12]=43.17	SuTemp[12,12]=43.69		
SuTemp[13,12]=43.19	SuTemp[13,12]=43.70			
SuTemp[14,12]=43.61				

SuTemp – функция разработки программного модуля вида SuTemp[x,y] = z, возвращающая точку расположения нагревательного элемента x в опре-

деленный промежуток времени y и значение температуры в этой точке z; измеряется в градусах Цельсия.

Проанализировав данные таблицы, можно сделать вывод о неоправданном использовании максимально возможного числа нагревательных элементов. Если необходимо стабилизировать температуру с интервалом 13.6 °С, то достаточно установить 10 нагревательных элементов, тогда как большее число будет избыточным (рис. 3).

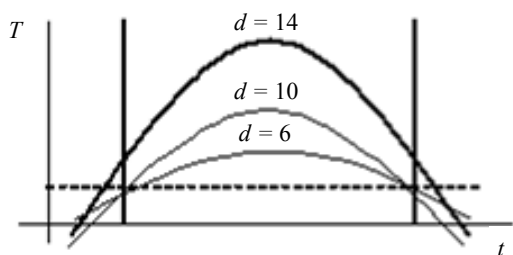


Рис. 3. Значения температурного поля в зависимости от времени

Fig. 3. Dependence of the temperature field versus time

Логично предположить, что при увеличении объема сушильной камеры будет задействоваться большее количество нагревательных элементов. Но остается невыясненным, будет ли удерживаться заданная температура. Проведем исследования

при большей площади нагрева, но с фиксированным количеством нагревательных элементов (табл. 2, 3, 4).

Результаты экспериментов с площадями сушильной камеры 20 и 30 м<sup>2</sup> представлены в табл. 3, 4 соответственно.

Продемонстрированные результаты компьютерного моделирования показывают, что при увеличении площади растут и мощность нагревательных элементов. Однако температура остается в заданном интервале. Важно отметить, что, в отличие от используемых в данный момент сплошных нагревательных элементов, применение импульсных элементов создает экономию электроэнергии на 35 % в среднем. Для подтверждения результатов компьютерного моделирования и сделанных выводов проведем экспериментальные исследования в хранилищах зерна, расположенных в г. Кисловодск Ставропольского края.

**Экспериментальные исследования.** В качестве объекта исследования возьмем зернохранилище принадлежащего частному предпринимателю в Ставропольском Крае. Площадь зернохранилища составляет 29.98 м<sup>2</sup>. Дата эксперимента –

Табл. 4. Площадь сушильной камеры 30 м<sup>2</sup>

Tab. 4. Drying chamber area 30 m<sup>2</sup>

<i>d</i> = 9	<i>d</i> = 8	<i>d</i> = 7	<i>d</i> = 6	<i>d</i> = 5
SuTemp[1,12]=43.89	SuTemp[1,12]=43.81	SuTemp[1,12]=43.77	SuTemp[1,12]=43.82	SuTemp[1,12]=43.99
SuTemp[2,12]=43.90	SuTemp[2,12]=43.77	SuTemp[2,12]=43.60	SuTemp[2,12]=43.55	SuTemp[2,12]=43.99
SuTemp[3,12]=43.89	SuTemp[3,12]=43.83	SuTemp[3,12]=43.74	SuTemp[3,12]=43.45	SuTemp[3,12]=43.99
SuTemp[4,12]=43.90	SuTemp[4,12]=43.76	SuTemp[4,12]=43.74	SuTemp[4,12]=43.55	SuTemp[4,12]=43.99
SuTemp[5,12]=43.90	SuTemp[5,12]=43.83	SuTemp[5,12]=43.60	SuTemp[5,12]=43.82	SuTemp[5,12]=43.64
SuTemp[6,12]=43.89	SuTemp[6,12]=43.77	SuTemp[6,12]=43.77	SuTemp[6,12]=43.40	
SuTemp[7,12]=43.90	SuTemp[7,12]=43.81	SuTemp[7,12]=43.28		
SuTemp[8,12]=43.89	SuTemp[8,12]=43.02			
SuTemp[9,12]=43.82				
<i>d</i> = 14	<i>d</i> = 13	<i>d</i> = 12	<i>d</i> = 11	<i>d</i> = 10
SuTemp[1,12]=47.35	SuTemp[1,12]=16.27	SuTemp[1,890]=43.19	SuTemp[1,12]=56.09	SuTemp[1,12]=43.99
SuTemp[2,12]=47.47	SuTemp[2,12]=16.34	SuTemp[2,890]=43.21	SuTemp[2,12]=56.10	SuTemp[2,12]=46.00
SuTemp[3,12]=47.32	SuTemp[3,12]=16.25	SuTemp[3,890]=18,18	SuTemp[3,12]=56.09	SuTemp[3,12]=43.99
SuTemp[4,12]=43.44	SuTemp[4,12]=43.34	SuTemp[4,890]=18,22	SuTemp[4,12]=56.10	SuTemp[4,12]=56.00
SuTemp[5,12]=43.39	SuTemp[5,12]=43.26	SuTemp[5,890]=46.17	SuTemp[5,12]=56.09	SuTemp[5,12]=53,99
SuTemp[6,12]=43.36	SuTemp[6,12]=43.31	SuTemp[6,890]=43.22	SuTemp[6,12]=56.09	SuTemp[6,12]=54,00
SuTemp[7,12]=43.44	SuTemp[7,12]=43.31	SuTemp[7,890]=43.17	SuTemp[7,12]=56.10	SuTemp[7,12]=53,99
SuTemp[8,12]=43.36	SuTemp[8,12]=43.26	SuTemp[8,890]=43.22	SuTemp[8,12]=56.09	SuTemp[8,12]=45,00
SuTemp[9,12]=43.39	SuTemp[9,12]=46.34	SuTemp[9,890]=43.18	SuTemp[9,12]=56.10	SuTemp[9,12]=43.99
SuTemp[10,12]=43.44	SuTemp[10,12]=46.25	SuTemp[10,890]=46.2	SuTemp[10,12]=46.09	SuTemp[10,12]=43.91
SuTemp[11,12]=43.32	SuTemp[11,12]=46.34	SuTemp[11,890]=43.19	SuTemp[11,12]=43.87	
SuTemp[12,12]=43.47	SuTemp[12,12]=46.27	SuTemp[12,890]=43.76		
SuTemp[13,12]=43.35	SuTemp[13,12]=43.58			
SuTemp[14,12]=43.37				

Табл. 5. Площадь сушильной камеры 30 м<sup>2</sup> (эксперимент)  
Tab. 5. Drying chamber area 30 m<sup>2</sup> (experiment)

$d = 9$	$d = 8$	$d = 7$	$d = 6$	$d = 5$
SuTemp[1,12]=35.8	SuTemp[1,12]=35.8	SuTemp[1,12]=35.7	SuTemp[1,12]=35.7	SuTemp[1,12]=43.0
SuTemp[2,12]=36.0	SuTemp[2,12]=37.7	SuTemp[2,12]=37.6	SuTemp[2,12]=39.4	SuTemp[2,12]=43.0
SuTemp[3,12]=38.9	SuTemp[3,12]=39.3	SuTemp[3,12]=43.7	SuTemp[3,12]=43.2	SuTemp[3,12]=43.7
SuTemp[4,12]=40.9	SuTemp[4,12]=43.6	SuTemp[4,12]=43.7	SuTemp[4,12]=43.4	SuTemp[4,12]=43.1
SuTemp[5,12]=43.0	SuTemp[5,12]=43.3	SuTemp[5,12]=43.6	SuTemp[5,12]=34.3	SuTemp[5,12]=43.1
SuTemp[6,12]=43.8	SuTemp[6,12]=43.7	SuTemp[6,12]=43.7	SuTemp[6,12]=31.1	
SuTemp[7,12]=43.0	SuTemp[7,12]=43.8	SuTemp[7,12]=43.2		
SuTemp[8,12]=43.8	SuTemp[8,12]=43.2			
SuTemp[9,12]=43.8				
$d = 14$	$d = 13$	$d = 12$	$d = 11$	$d = 10$
SuTemp[1,12]=37.5	SuTemp[1,12]=16.2	SuTemp[1,890]=28.1	SuTemp[1,12]=56.0	SuTemp[1,12]=43.9
SuTemp[2,12]=37.4	SuTemp[2,12]=26.4	SuTemp[2,890]=32.2	SuTemp[2,12]=56.1	SuTemp[2,12]=46.0
SuTemp[3,12]=37.2	SuTemp[3,12]=46.2	SuTemp[3,890]=38.1	SuTemp[3,12]=56.0	SuTemp[3,12]=43.9
SuTemp[4,12]=33.4	SuTemp[4,12]=43.2	SuTemp[4,890]=38.2	SuTemp[4,12]=56.1	SuTemp[4,12]=56.0
SuTemp[5,12]=43.3	SuTemp[5,12]=43.8	SuTemp[5,890]=46.1	SuTemp[5,12]=56.0	SuTemp[5,12]=53.9
SuTemp[6,12]=43.3	SuTemp[6,12]=43.4	SuTemp[6,890]=43.2	SuTemp[6,12]=56.0	SuTemp[6,12]=54.0
SuTemp[7,12]=43.7	SuTemp[7,12]=43.3	SuTemp[7,890]=43.1	SuTemp[7,12]=56.1	SuTemp[7,12]=53.9
SuTemp[8,12]=43.6	SuTemp[8,12]=43.4	SuTemp[8,890]=43.2	SuTemp[8,12]=56.0	SuTemp[8,12]=45.0
SuTemp[9,12]=43.3	SuTemp[9,12]=46.4	SuTemp[9,890]=43.1	SuTemp[9,12]=56.1	SuTemp[9,12]=43.9
SuTemp[10,12]=43.4	SuTemp[10,12]=46.5	SuTemp[10,890]=44.2	SuTemp[10,12]=46.0	SuTemp[10,12]=43.9
SuTemp[11,12]=43.2	SuTemp[11,12]=44.4	SuTemp[11,890]=43.1	SuTemp[11,12]=43.8	
SuTemp[12,12]=45.7	SuTemp[12,12]=44.7	SuTemp[12,890]=44.7		
SuTemp[13,12]=43.5	SuTemp[13,12]=43.5			
SuTemp[14,12]=43.3				

01.07.2022 г. Температура вне помещения составляет 17 °С; мелкий дождь. Заданный температурный режим сушки – 35...45 °С. Результаты эксперимента представлены в табл. 5.

**Обсуждение.** Результаты эксперимента подтверждают возможность замены сплошных нагревательных элементов на импульсные с секционным расположением на равноудаленном расстоянии друг от друга. Также важно отметить, что в северной части хранилища наблюдается падение температуры (в данном месте располагается въезд для автотранспорта), с которым разработанная система справляется с затруднениями. В эксперименте с 11 и 10 нагревательными элементами это вызвало повышение до температуры 56 °С, что не критично, так как сушка зерна обычно осуществляется при температуре до 110 °С.

Проведя компьютерное моделирование и сопоставив его результаты с результатами экспериментальных исследований, авторы делают вывод о снижении себестоимости подготовки сырья на 10–15 %. Вместе с тем отмечается наличие более однородного теплового поля, что способствует

сохранению большего количества масел, готовых для переработки.

**Заключение.** В условиях сокращения добычи полезных ископаемых остро встает вопрос об использовании возобновляемых источников энергии, к которым относят и биодизельное топливо. В рамках данного исследования рассмотрен начальный этап его получения – этап хранения сырья. Авторами выявлены существующие производственные проблемы и на основе мирового опыта предложен ряд следующих технических решений:

1. Замена существующих нагревательных элементов – ТЭНов на секционные с релейным принципом управления. Особенность данных нагревательных элементов заключается в кратковременные подачи электрической энергии для вывода нагревателя в температурный режим. В дальнейшем подача энергии прекращается, включаясь на короткие промежутки, когда нагревательный элемент остывает ниже заданного значения. За счет сокращения времени происходит экономия электрической энергии и, как следствие, – снижения себестоимости.



2. Внедрение системы контроля температуры в помещении. Предложенная система управления на основе функции Грина позволяет сформировать однородное температурное поле по всей площади сушки, предотвратив образование зон перегрева или недогрева, что служит главной причиной потери масел, комкования зерен, появления плесени и т. д.

Также в работе решен ряд научных задач, важных для анализа температурных полей в области пространственно-распределенных систем

управления, главной из которых является модернизация классической функции Грина для трехмерным систем управления. Полученное уравнение позволяет с большей точностью описывать температурные поля, для которых существует решение задачи теплопроводности при нулевых граничных условиях.

Таким образом, авторами решен широкий круг задач, связанных с повышением экономической эффективности процесса сушки сырья, предназначенного для получения биотоплива.

### Список литературы

1. Вероятностно-статистическая оценка запасов и ресурсов по международной классификации SPE-PRMS Ч. 1. / Р. С. Хисамов, А. Ф. Сафаров, А. М. Калимуллин, А. А. Дрягалкина // Георесурсы. 2018. Т. 20, № 3. С. 158–164. doi: 10.18599/grs.2018.3.158-164.
2. Advancement in utilization of nanomaterials as efficient and recyclable solid catalyst for biodiesel synthesis / S. Islam, B. Basumatary, S. L. Rokhum, P. K. Mochahari, S. Basumatary // Cleaner Chem. Engin. 2022. No. 3. P. 100043. doi: 10.1016/j.clce.2022.100043.
3. Synthesis of bifunctional nanocatalyst from waste palm kernel shell and its application for biodiesel production / R. F. Abdullah, U. Rashid, Y. H. Taufiq-Yap, M. L. Ibrahim, C. Ngamcharussrivichai, M. Azam // RSC Adv. 2020. Vol. 10 (45). P. 27183–27193.
4. Sustainable preparation of metal nano particles: Methods and applications. Chapter 6 / A. Zambre, A. Upendran, R. Shukla, N. Chanda, K. K. Katti, C. Cutler, R. Kannan, K. V. Katti // Royal Society of Chemistry. 2012. Vol. 19. P. 144–156.
5. Zabeti M., Daud W. M., Aroua M. K. Activity of solid catalysts for biodiesel production: a review // Fuel Process. Technol. 2009. Vol. 90 (6). P. 770–777.
6. Heidari S., Wood D. A. Biodiesel technology and applications. Beverly: Scrivener Publishing LLC, 2021. 508 p. doi: 10.1002/9781119724957.
7. Tecnologias de produção de biodiesel / L. P. Ramos, F. R. Silva, A. S. Mangrich, C. S. Cordeiro // Rev. Virtual Quim. 2011. Vol. 3 (5). P. 385–405. doi: 10.5935/1984-6835.20110043.
8. Review on extraction of biodiesel from waste cooking oil using ultra-sonication / P. Patil, A. B. Madavi, P. S. Bhusari, A. M. Buradkar, N. R. Dhore // Intern. J. of Emerging Technol. and Advanced Engin. 2018. Vol. 8, no. 3. P. 132–135.
9. Production of biodiesel from high free fatty acid Karanja (*Pongamia pinnata*) oil / M. Naik, L. C. Meher, S. N. Naik, L. M. Das // Biomass and Bioenergy. 2008. Vol. 32. P. 354–357. doi: 10.1016/j.biombioe.2007.10.006.
10. Biodiesel from waste cooking oil: optimization of production and monitoring of exhaust emission levels from its combustion in a diesel engine / M. W. Mumtaz, A. Adnan, Z. Mahmood, H. Mukhtar // Intern. J. of Green

Energy. 2012. Vol. 9 (7). P. 685–701. doi: 10.1080/15435075.2011.625583.

11. Enzymatic biodiesel production kinetics using co-solvent and an anhydrous medium: A strategy to improve lipase performance in a semi-continuous reactor / L. Azócar, R. Navia, L. Beroiz, D. Jeison, G. Ciudad // N. Biotechnol. 2014. No. 31. P. 422–429. doi: 10.1016/j.nbt.2014.04.006.

12. Biodiesel production from jatropha oil by catalytic and non-catalytic approaches: An overview / J. C. Juan, D. A. Kartika, T. Y. Wu, T. Y. Y. Hin // Bioresour. Technol. 2011. No. 102. P. 452–4613. doi: 10.1016/j.biortech.2010.09.093.

13. Sustainability of biodiesel production as vehicular fuel in Indian perspective / S. K. Lohan, T. Ram, S. Mukesh, M. Ali, S. Arya // Renew. Sustain. Energy Rev. 2013. Vol. 25. P. 251–259.

14. Thapa S., Indrawan N., Bhoi P. R. An overview on fuel properties and prospects of Jatropha biodiesel as fuel for engines // Environ. Technol. Innov. 2018. Vol. 9. P. 210–219.

15. Pavlov S. A., Frolova T. F. Study of grain drying in the automated grain drying unit // Agricult. Machin. and Technol. 2018. Vol. 12 (4). P. 29–34. doi: 10.22314/2073-7599-2018-12-4-29-34.

16. Ronzhin A. L., Savell'ev A. I. Artificial intelligence systems for solving problems of agro-industrial complex digitalization and robotization // Agricult. Machin. and Technol. 2022. Vol. 16 (2). P. 22–29. doi: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-22-29.

17. Sanford S., Go A. Grain Drying Energy // In: Regional Perspectives on Farm Energy / eds. D. Ciolkosz. Cham: Springer, 2022. P. 63–69. doi: 10.1007/978-3-030-90831-7\_8.

18. Безъязычный В. Ф., Счерек М. Развитие исследований тепловых процессов в технологии машиностроения // Зап. Горного института. 2018. Т. 232. С. 395–400. doi: 10.31897/PMI.2018.4.395.

19. Нормализация теплового режима протяженных тупиковых выработок при высоких температурах пород на основе шахтных передвижных кондиционеров / В. Р. Алабьев, В. В. Новиков, Л. А. Пашинян, Т. П. Бажина // Зап. Горного института. 2019. Т. 237. С. 251–258. doi: 10.31897/pmi.2019.3.251.

20. Коршунов Г. И., Еремеева А. М., Дребенштетт К. Обоснование использования растительных добавок в дизельном топливе как способ защиты подземного персонала угольных шахт от влияния вредных выбросов дизель-гидравлических локомотивов // Зап. Горного института. 2021. Т. 247. С. 39–47. doi: 10.31897/PMI.2021.1.5.

21. О возможности уменьшения техногенной нагрузки на придонные биоценозы при добыче твердых полезных ископаемых с использованием технических средств различной модификации / С. М. Сударииков, Д. А. Юнгмейстер, Р. И. Королев, В. А. Петров // Зап. Горного института. 2022. Т. 253, № 1. С. 82–96. doi: 10.31897/PMI.2022.14.

22. Бажин В. Ю., Исса Б. Влияние термической обработки на микроструктуру стальных змеевиков нагревательной трубчатой печи // Зап. Горного института. 2021. Т. 249, № 3. С. 393–400. doi: 10.31897/PMI.2021.3.8.

23. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020666633 РФ. Программа контроля теплового баланса отражательной печи с учетом условий сжи-

гания и состава природного газа / К. В. Э. Кирос, В. Ю. Бажин; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». Заявл. 03.12.2020; опубл. 11.12.2020.

24. Butler R., McNab G., Lo H. Theoretical Studies on the Gravity Drainage of Heavy Oil During In-Situ Steam Heating // The Canadian Jo. of Chem. Engin. 1981. Vol. 59, no 4. P. 455-460. doi: 10.1002/cjce.5450590407.

25. Desoer C. A., Wang Y. T. On the generalized Nyquist stability criterion. // IEEE Trans. AC. 1980. Vol. AC-25. P. 187–196.

26. Calculation of the temperature maximum value access time at the observation point / A. V. Martirosyan, K. V. Martirosyan, E. K. Grudyaeva, A. B. Chernyshev // Proc. of the 2021 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. IEEE, 2021. P. 1014–1018. 9396287.

27. Pershin I. M., Kukharova T. V., Tsapleva V. V. Designing of distributed systems of hydrolithosphere processes parameters control for the efficient extraction of hydromineral raw materials // J. of Phys.: Conf. Series. 2021. № 1728. P. 1–6.

---

#### Информация об авторе

**Ильюшин Юрий Валерьевич** – д-р техн. наук, доцент, декан экономического факультета Горного университета.

E-mail: [ilyushin\\_y@bk.ru](mailto:ilyushin_y@bk.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-9175-8751>

**Еремеева Анжелика Михайловна** – канд. техн. наук, ассистент, Горный университет.

E-mail: [eremeevaanzhelika@yandex.ru](mailto:eremeevaanzhelika@yandex.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-9212-5534>

**Новожилов Игорь Михайлович** – канд. техн. наук, доцент СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: [novozhilovim@list.ru](mailto:novozhilovim@list.ru)

#### References

1. Veroyatnostno-statisticheskaya ocenka zapasov i resursov po mezhdunarodnoj klassifikacii SRE-RRMS CH. 1. / R. S. Hisamov, A. F. Safarov, A. M. Kalimullin, A. A. Dryagalkina // Georesursy. 2018. Vol. 20. № 3. P. 158–164.

2. Advancement in utilization of nanomaterials as efficient and recyclable solid catalyst for biodiesel synthesis / S. Islam, B. Basumatary, S. L. Rokhum, P. K. Mochahari, S. Basumatary // Cleaner Chem. Engin. 2022. No. 3. P. 100043. doi: 10.1016/j.clce.2022.100043.

3. Synthesis of bifunctional nanocatalyst from waste palm kernel shell and its application for biodiesel production / R. F. Abdullah, U. Rashid, Y. H. Taufiq-Yap, M. L. Ibrahim, C. Ngamcharussrivichai, M. Azam // RSC Adv. 2020. Vol. 10 (45). P. 27183–27193.

4. Sustainable preparation of metal nano particles: Methods and applications. Chapter 6 / A. Zambre, A. Upendran, R. Shukla, N. Chanda, K. K. Katti, C. Cutler, R. Kannan, K. V. Katti // Royal Society of Chemistry. 2012. Vol. 19. P. 144–156.

5. Zabeti M., Daud W. M., Aroua M. K. Activity of solid catalysts for biodiesel production: a review // Fuel Process. Technol. 2009. Vol. 90 (6). P. 770–777.

6. Heidari S., Wood D. A. Biodiesel technology and applications. Beverly: Scrivener Publishing LLC, 2021. P. 508. doi: 10.1002/9781119724957.

7. Tecnologias de produção de biodiesel / L. P. Ramos, F. R. Silva, A. S. Mangrich, C. S. Cordeiro // Rev. Virtual Quim. 2011. Vol. 3 (5). P. 385–405. doi: 10.5935/1984-6835.20110043.

8. Review on extraction of biodiesel from waste cooking oil using ultra-sonication / P. Patil, A. B. Madavi, P. S. Bhusari, A. M. Buradkar, N. R. Dhore // Intern. J. of Emerging Technol. and Advanced Engin. 2018. Vol. 8, no. 3. P. 132–135.

9. Production of biodiesel from high free fatty acid Karanja (*Pongamia pinnata*) oil / M. Naik, L. C. Meher, S. N. Naik, L. M. Das // Biomass and Bioenergy. 2008. Vol. 32. P. 354–357. doi: 10.1016/j.biombioe.2007.10.006.

10. Biodiesel from waste cooking oil: optimization of production and monitoring of exhaust emission levels from its combustion in a diesel engine / M. W. Mumtaz, A. Adnan, Z. Mahmood, H. Mukhtar // Intern. J. of Green Energy. 2012. Vol. 9 (7). P. 685–701. doi: 10.1080/15435075.2011.625583.
11. Enzymatic biodiesel production kinetics using co-solvent and an anhydrous medium: A strategy to improve lipase performance in a semi-continuous reactor / L. Azócar, R. Navia, L. Beroiz, D. Jeison, G. Ciudad // N. Biotechnol. 2014. No. 31. P. 422–429. doi: 10.1016/j.nbt.2014.04.006.
12. Biodiesel production from jatropha oil by catalytic and non-catalytic approaches: An overview / J. C. Juan, D. A. Kartika, T. Y. Wu, T. Y. Y. Hin // Bioresour. Technol. 2011. No. 102. P. 452–4613. doi: 10.1016/j.biortech.2010.09.093.
13. Sustainability of biodiesel production as vehicular fuel in Indian perspective / S. K. Lohan, T. Ram, S. Mukesh, M. Ali, S. Arya // Renew. Sustain. Energy Rev. 2013. Vol. 25. P. 251–259.
14. Thapa S., Indrawan N., Bhoi P. R. An overview on fuel properties and prospects of Jatropha biodiesel as fuel for engines // Environ. Technol. Innov. 2018. Vol. 9. P. 210–219.
15. Pavlov S. A., Frolova T. F. Study of grain drying in the automated grain drying unit // Agricult. Machin. and Technol. 2018. Vol. 12 (4). P. 29–34. doi: 10.22314/2073-7599-2018-12-4-29-34.
16. Ronzhin A. L., Savel'ev A. I. Artificial intelligence systems for solving problems of agro-industrial complex digitalization and robotization // Agricult. Machinery and Technol. 2022. Vol. 16 (2). P. 22–29. doi: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-22-29.
17. Sanford S., Go A. Grain Drying Energy // In: Regional Perspectives on Farm Energy / Ciolkosz, D. (eds) Springer, Cham. 2022. doi: 10.1007/978-3-030-90831-7\_8.
18. Bez'yazychnyj V. F., Scherek M. Razvitie issledovaniy teplovykh processov v tekhnologii mashinostroeniya // Zap. Gornogo instituta. 2018. Vol. 232. P. 395–400. doi: 10.31897/PMI.2018.4.395. (In Russ.).
19. Normalizatsiya teplovogo rezhima protyazhennykh tupikovykh vyrabotok pri vysokikh temperaturah porod na osnove shahtnykh peredvizhnykh kondicionerov / V. R. Alab'ev, V. V. Novikov, L. A. Pashinyan, T. P. Bazhina // Zap. Gornogo instituta. 2019. Vol. 237. P. 251–258. doi: 10.31897/pmi.2019.3.251. (In Russ.).
20. Korshunov G. I., Ereemeeva A. M., Dreben-shtedt K. Obosnovanie ispol'zovaniya rastitel'nykh do-bavok v dizel'nom toplive kak sposob zashchity podzem-nogo personala ugol'nykh shaht ot vliyaniya vrednykh vybrosov dizel'-gidravlicheskih lokomotivov // Zap. Gor-nogo instituta. 2021. Vol. 247. P. 39–47. doi: 10.31897/PMI.2021.1.5. (In Russ.).
21. O vozmozhnosti umen'sheniya tekhnogennoj nagruzki na pridonnye biocenozy pri dobyche tverdykh poleznykh iskopaemykh s ispol'zovaniem tekhnicheskikh sredstv razlichnoj modifikatsii / S. M. Sudarikov, D. A. YUngmeister, R. I. Korolev, V. A. Petrov // Zap. Gor-nogo instituta. 2022. Vol. 253, No. 1. P. 82–96. doi: 10.31897/PMI.2022.14. (In Russ.).
22. Bazhin V. YU., Issa B. Vliyanie termicheskoy obrabotki na mikrostrukturu stal'nykh zmeevikov nagrevatel'noj trubchatoj pechi // Zap. Gornogo instituta. 2021. Vol. 249, No. 3. P. 393–400. doi: 10.31897/PMI.2021.3.8. (In Russ.).
23. Svid. o gos. registratsii programmy dlya EVM № 2020666633 RF. Programma kontrolya teplovogo bal-ansa otrazhatel'noj pechi s uchetom usloviy szhiganiya i sostava prirodnogo gaza / K. V. E. Kirov, V. YU. Bazhin; zayavitel' FGBOU VO «Sankt-Peterburgskiy gornyj universi-тет». Zayavl. 03.12.2020; opubl. 11.12.2020. (In Russ.).
24. Butler R., McNab G., Lo H. Theoretical studies on the gravity drainage of heavy oil during in-situ steam heating // The Canadian J. of Chem. Engin. 1981. Vol. 59, no 4. P. 455–460. doi: 10.1002/cjce.5450590407.
25. Desoer C. A., Wang Y. T. On the generalized Nyquist stability criterion // IEEE Trans. AC. 1980. Vol. AC-25. P. 187–196.
26. Calculation of the temperature maximum value access time at the observation point / A. V. Martirosyan, K. V. Martirosyan, E. K. Grudyaeva, A. B. Chernyshev // Proc. of the 2021 IEEE Conf. of Russian Young Research-ers in Electrical and Electronic Engineering. IEEE, 2021. P. 1014–1018. 9396287.
27. Pershin I. M., Kukharova T. V., Tsapleva V. V. De-signing of distributed systems of hydrolithosphere pro-cesses parameters control for the efficient extraction of hydromineral raw materials // J. of Phys.: Conf. Series. 2021. No. 1728. P. 1–6.

#### Information about the authors

**Yury V. Il'yushin** – Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Dean of the Faculty of Economics of Saint Petersburg Mining University.

E-mail: ilyushin\_y@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9175-8751>

**Anzhelika M. Ereemeeva** – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor of Saint Petersburg Mining University.

E-mail: eremeevaanzhelika@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9212-5534>

**Igor M. Novozhilov** – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University.  
E-mail: novozhilovim@list.ru

Статья поступила в редакцию 17.12.2022; принята к публикации после рецензирования 13.01.2023; опубликована онлайн 25.03.2023.

Submitted 17.12.2022; accepted 13.01.2023; published online 25.03.2023.

---