

Оценка кинетики сушки молочных заквасок с применением корреляционно-регрессионного анализа

✉ Попов В.М., Афонькина В.А., Левинский В.Н., Уразов С.И.

Южно-Уральский государственный аграрный университет

Челябинская область, г. Троицк, Россия

✉ e-mail: ntc-es@mail.ru

Достижение продовольственной безопасности Российской Федерации неотрывно связано с развитием наукоемких техники и технологий производства продуктов питания из отечественного сырья. Важнейшим пунктом является самообеспечение качественными продуктами животноводства (переработка мяса и переработка молока). К технологиям переработки молока предъявляются особые требования на всех этапах производства, где кисломолочные продукты, являясь функциональными продуктами питания, занимают обособленное место. В статье с помощью метода корреляционно-регрессионного анализа установлена связь между параметрами технологического процесса холодной инфракрасной сушки молочных заквасок, реализуемого с применением пленочных электронагревателей в установке камерно-лоткового типа (разработка Института агроинженерии Южно-Уральского государственного аграрного университета, г. Челябинск). Получив график динамического изменения температуры нагрева продукта с помощью программного обеспечения Owen Process Manager и контроллера 2TRM1 ООО «Производственное Объединение ОВЕН», авторы смогли оценить динамику постоянной времени переходного процесса, которая составила 4,683 ч, что подтверждает величину времени окончания процесса сушки с точностью 5%, которая составила 27 ч. В качестве объекта исследования выбрана молочная закваска «Первый Вкус Detox Menu» классическая 1%-й жирности производства АО «Группа Компаний "Русское Молоко"» в г. Челябинск. Объект исследования – пастообразная живая среда в виде концентрата бифидобактерий *B. adolescentis*, количество молочнокислых микроорганизмов в котором не менее $1 \cdot 10^8$ КОЕ/г, а количество бифидобактерий – не менее $1 \cdot 10^6$ КОЕ/г.

Ключевые слова: кинетика сушки, молочные закваски, инфракрасное излучение, корреляционно-регрессионный анализ, факторы, технология

Evaluation of drying kinetics of dairy starters using correlation and regression analysis

✉ Popov V.M., Afonkina V.A., Levinsky V.N., Urazov S.I.

South Ural State Agrarian University

Troitsk, Chelyabinsk region, Russia

✉ e-mail: ntc-es@mail.ru

The issues of achieving food security in the Russian Federation today are inextricably linked with the development of high-tech equipment and technologies for the production of food from domestic raw materials. The most important point is self-sufficiency in high-quality livestock products (meat processing and milk processing). Special requirements are imposed on milk processing technologies at all stages of production, where fermented milk products, being functional food products, occupy a separate place. In the article, using the method of correlation and regression analysis, a connection was established between the parameters of the technological process of cold infrared drying of dairy starter cultures, implemented using film electric heaters in a chamber-tray type installation (developed by the Institute of Agricultural Engineering of the South Ural State Agrarian University of Chelyabinsk). Having obtained a graph of the dynamic change in the heating temperature of the product, using the Owen Process Manager software and the 2TRM1 controller of the ARIES Production Association LLC, the authors were able to estimate the dynamics of the transient time constant, which amounted to 4,683 hours, which confirms the value of the drying process end time with an accuracy of 5%, which amounted to 27 hours. The object of the study was selected, the milk starter The First Taste of Detox Menu classic 1% fat content produced by JSC "Group of Companies "Russian Milk" in Chelyabinsk.

The object of the study is a pasty living medium in the form of a concentrate of bifidobacteria *B. Ad-olescentis*, the amount of lactic acid microorganisms in which is not less than $1 \cdot 10^8$ CFU/g, and the amount of bifidobacteria is not less than $1 \cdot 10^6$ CFU/g.

Keywords: drying kinetics, dairy ferments, infrared radiation, correlation and regression analysis, factors, technology

Для цитирования: Попов В.М., Афонкина В.А., Левинский В.Н., Уразов С.И. Оценка кинетики сушки молочных заквасок с применением корреляционно-регрессионного анализа // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2025. Т. 55. № 1. С. 107–118. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2025-1-12>

For citation: Popov V.M., Afonkina V.A., Levinsky V.N., Urazov S.I. Evaluation of drying kinetics of dairy starters using correlation and regression analysis. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* = *Siberian Herald of Agricultural Science*, 2025, vol. 55, no. 1, pp. 107–118. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2025-1-12>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-20060, <https://rscf.ru/project/24-26-20060/>.

Acknowledgments

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-26-20060, <https://rscf.ru/project/24-26-20060/>.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение продовольственной безопасности страны является одним из важнейших вопросов. Ввиду сильной импортозависимости предприятий молочной отрасли в настоящее время существуют проблемы с поставками нового зарубежного оборудования, в связи с закрытием каналов сбыта продукции, отсутствием сырья в нужных объемах, все это ведет к росту цен молочной продукции на прилавках магазинов¹.

Одним из пунктов технологического суверенитета нашей страны в области АПК является самообеспечение продуктами животноводства (переработка мяса и молока). Для достижения суверенитета существуют три барьера, которые необходимо преодолеть для снижения импортозависимости.

Первый – отраслевой, в него входит развитие племенного скота и кормовой базы; изготовление ветпрепаратов, ферментов, оборудование; производство заквасок.

Второй – смежный, в него входит производство сельхозтехники, удобрений, селекции семенного фонда и т.д.

Третий – косвенный, без чего первые два барьера труднореализуемы (кадры, жилье, дороги, транспорт, энергия, связь и т.д.).

Молочная закваска (налаживание ее производства относится к первому барьеру) представляет собой отобранные специальным способом жизнеспособные клетки молочнокислых, пропионовокислых, уксуснокислых и бифидобактерий. Такие закваски нашли свое применение практически во всех процессах изготовления кисломолочных продуктов.

С учетом биологической активности срок хранения заквасок ограничен, производители не могут закупать их впрок в жидком виде, велика вероятность потери жизнеспособных клеток ввиду нарушения условий транспортировки или хранения. Одним из способов их консервации является сушка, которая позволяет значительно снизить затраты на хранение и транспортировку заквасок, при этом у сухого продукта повышается срок годности с полным сохранением жизнеспособности клеток [1].

В мировой практике наибольшую популярность для сушки заквасок получили

¹Popov V.M., Afonkina V.A., Levinsky V.N., Medvedev A.V. Study of the process of infrared drying of lactic starter cultures // E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Ensuring the Technological Sovereignty of the Agro-Industrial Complex: Approaches, Problems, Solutions” (ETSAIC2023), Yekaterinburg City, Russian Federation, 16–17.02.2023 г. Yekaterinburg City, Russian Federation: EDP Sciences, 2023. Vol. 395. P. 01004. DOI: 10.1051/e3sconf/202339501004.

распылительные установки, однако существенным их недостатком является течение процесса в условиях высоких температур (до 200 °С), что подразумевает высокие риски выпуска некачественной продукции при несоблюдении или отклонении заданных технологически параметров [2]. Вторыми по популярности сушилками заквасок являются сублимационные установки, в которых выход продукции всегда высокого качества за счет того, что процесс сушки проходит при отрицательных температурах [3]. Недостатком сублимационной сушки является высокая стоимость оборудования и высокие затраты энергии в процессе сушки.

Одним из перспективных направлений в обезвоживании сырья является холодная инфракрасная сушка, которая проходит при температурах не выше 40 °С, обеспечивающая сохранение большого количества полезных веществ в конечном продукте, при этом сушильные установки обладают простотой конструкции и низкой себестоимостью (см. сноску 1) [1, 4].

В опубликованных ранее исследованиях нами доказана эффективность сушки молочных заквасок с применением инфракрасных пленочных электронагревателей.

Цель исследования – выявление связей между технологическими параметрами холодной инфракрасной сушки молочных заквасок и определение меры влияния факторов на результативный признак.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для реализации поставленной цели применялась камерно-лоточная сушильная установка (см. рис. 1, табл. 1), представляющая корпус 1, внутри которого расположены жесткозакрепленные пленочные электронагреватели 2. Между пленочными электронагревателями по специальным салазкам 3, закрепленных к корпусу, размещаются поддоны с антипригарным покрытием 4. Установка оборудована пультом управления 5, по которому можно контролировать температуру поверхностей пленочного электронагревателя и поверхности поддона [1].

В качестве продукта для эксперимента была выбрана закваска «Первый Вкус Detox Menu» 1%-я классическая (производитель АО «Группа Компаний "Российское Молоко"»), в состав которой входят: молоко нормализованное, закваска молочных культур, концентрат бифидобактерий *B. adolescentis*, витаминный комплекс (А, Е, D3, B6).

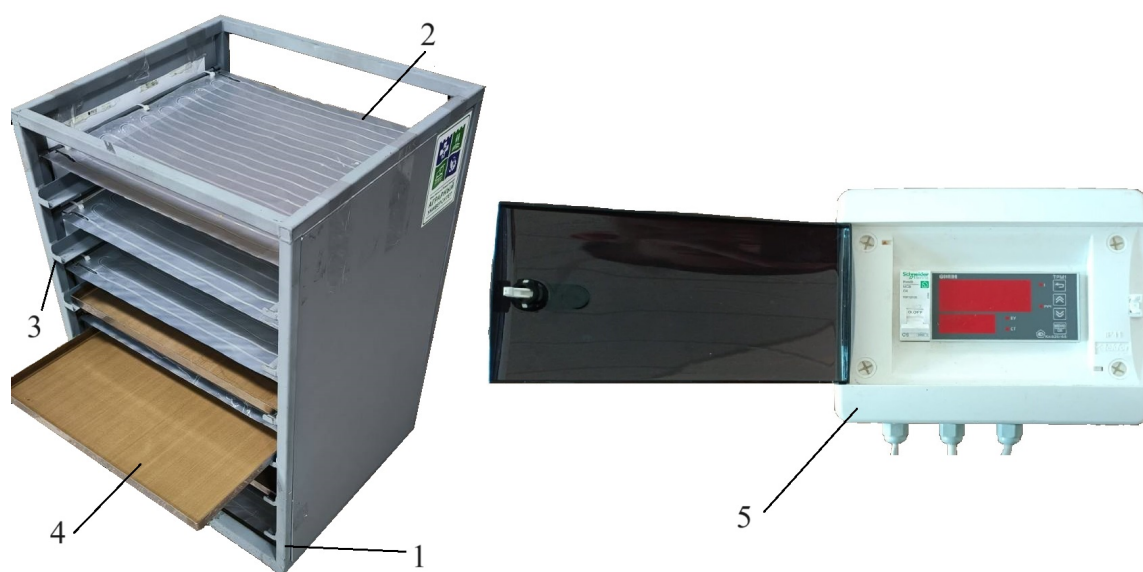


Рис. 1. Внешний вид камерно-лоточной сушильной установки
Fig. 1. Appearance of the chamber-tray drying unit

Табл. 1. Технические характеристики опытного образца инфракрасной лоточной сушильной установки
Table 1. Technical characteristics of a prototype infrared tray drying unit

Наименование параметров	Значение
Габаритные размеры установки, мм	470 × 510 × 730
Размер пленочного электронагревателя, мм	460 × 460
Количество пленочных электронагревателей, шт.	7
Удельная мощность пленочного электронагревателя, Вт/м ²	360
Размер поддона, мм	460 × 460
Количество поддонов, шт.	6
Напряжение питающей сети, В	220
Установленная мощность установки, Вт	460
Расстояние между пленочными электронагревателями, мм	100
Расстояние от верхнего пленочного электронагревателя до поддона, мм	70
Объем загрузки поддонов, л	До 3
Диапазон изменения температуры процесса сушки, °С	30–80

Закваска разливалась на поддоны с анти-пригарным покрытием (позиция 4 на рис. 1) сушильной установки (1000 г на каждый). Управление процессом сушки осуществлялось по температуре пленочного электронагревателя, устанавливаемой на встроенном блоке управления с контроллером 2TRM1 ООО «Производственное Объединение ОВЕН» (55 °С, гистерезис 1 °С).

Для третьего яруса на всем протяжении процесса сушки предполагалась запись температуры с датчиков, установленных в

точках, как показано на рис. 2. Возможности контроллера 2TRM1 ограничены, поэтому для осуществления предлагаемой схемы, позволяющей получить кривые сушки процесса сушки, дополнительно применяли универсальный измеритель-регулятор TRM-138, датчики температуры ДТПЛ011-0,3/2, преобразователь интерфейсов AC-4 RS-485<->USB, программное обеспечение Owen Process Manager (OPM) [5, 6].

Влажность продукта в начале и в конце сушки определялась с применением влагоанализатора «Элвиз-2С».

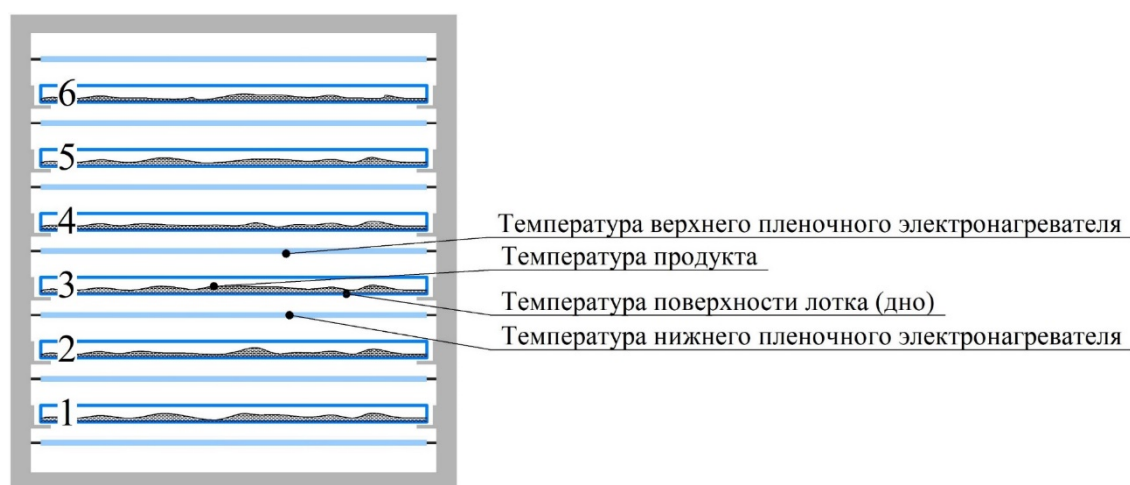


Рис. 2. Размещение датчиков температуры для третьего яруса лоточной сушильной установки
Fig. 2. Placement of temperature sensors for the third tier of the tray drying unit

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Продолжительность сушки молочной закваски составила 26 ч 28 мин. Объем экспериментальных данных составляет 315 композиций: время снятия показания, температура нижнего (ЯЗ-НЭН) и верхнего (ЯЗ-ВЭН) электронагревателей, температура дна поддона (ЯЗ-Дно) и температура продукта (ЯЗ-Пр). Общая картина изменения температуры с течением времени показана на рис. 3.

Корреляционный анализ

В связи с тем, что эксперимент проводился в открытой камере, необходима оценка

возможного влияния конвективных потоков, обусловленных иными факторами, кроме основного возмущающего. Для этого проведен корреляционный анализ, результаты приведены в табл. 2² [7].

По результатам корреляционного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Общая картина динамики нагрева показывает умеренную и слабую корреляции температуры нагревателей в парах со временем, что объясняется относительно слабым изменением их температуры в течение сушки (более 30% набора данных после 16-го часа показывает практически стабильную температуру).

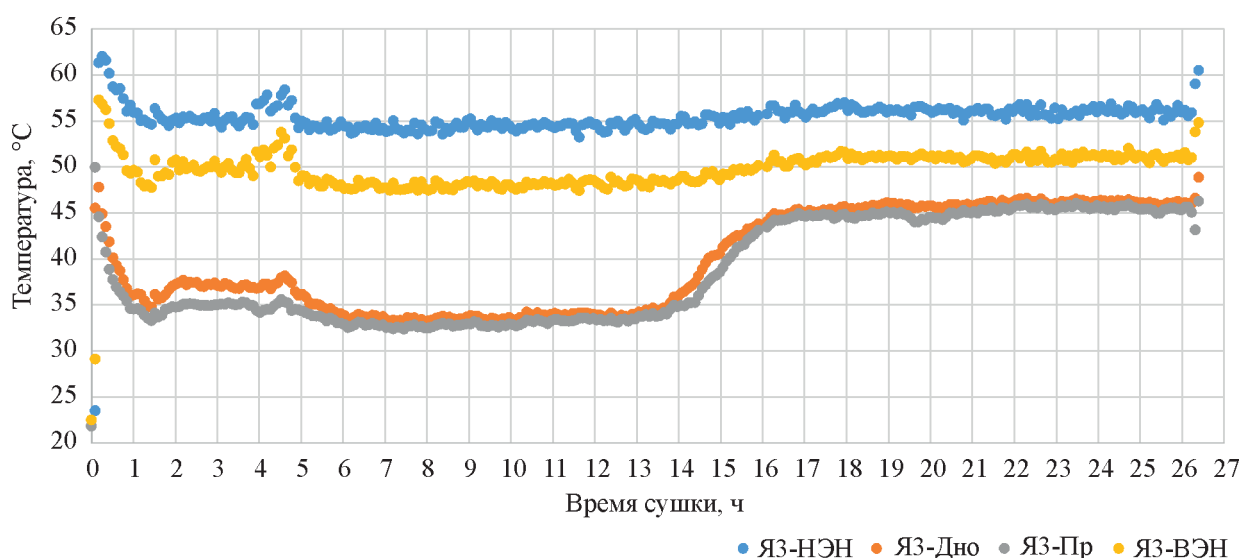


Рис. 3. Динамика изменения температуры датчиков во время сушки

Fig. 3. Dynamics of temperature changes of the sensors during drying

Табл. 2. Корреляционная матрица

Table 2. The correlation matrix

$n = 313$	Время, ч	ЯЗ-НЭН	ЯЗ-Дно	ЯЗ-Пр	ЯЗ-ВЭН
Время, ч	X	$r = 0,2186$ (слабая)	$r = 0,7677$ (сильная)	$r = 0,8076$ (сильная)	$r = 0,3402$ (умеренная)
ЯЗ-НЭН	$t_p = 3,96$	X	$r = 0,3512$ (умеренная)	$r = 0,2811$ (слабая)	$r = 0,9411$ (очень сильная)
ЯЗ-Дно	$t_p = 21,20$	$t_p = 6,64$	X	$r = 0,9919$ (практически функциональная)	$r = 0,5860$ (заметная)
ЯЗ-Пр	$t_p = 24,23$	$t_p = 5,18$	$t_p = 132,73$	X	$r = 0,5163$ (заметная)
ЯЗ-ВЭН	$t_p = 6,40$	$t_p = 49,26$	$t_p = 23,40$	$t_p = 10,67$	X

Примечание. Все парные корреляции существенны на уровне значимости 5%.

²Подгорный С.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Оценка параметров кинетики процесса сушки зерна риса через потенциал массопереноса // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2015. № 4 (346). С. 97–100.

2. Взаимная корреляция температур верхнего и нижнего нагревателя является очень сильной, что объясняется одновременным их включением и работой.

3. Верхний нагреватель оказывает заметно более сильное влияние на изменение температуры продукта, чем нижний, что можно объяснить сильным влиянием ИК-излучения.

4. Взаимная корреляция температуры продукта и температуры дна лотка практически функциональная, что позволяет оставить для последующего регрессионного анализа только одну зависимость.

Регрессионный анализ.

Целевая функция температуры

По графикам температуры (см. рис. 3) видны всплески температуры продукта, поддона и нагревательных элементов, что может быть объяснено механизмами формирования и растрескивания пленки на поверхности продукта, влиянием прерывистого режима работы нагревателей.

Эти процессы делают математическое моделирование сушки в целом затруднительным. Вместе с тем методы математического анализа позволяют ввести допущение о возможности разбиения полученных графиков температур на такие меньшие диапазоны, описание функции на которых можно свести к более простым зависимостям [8–12].

Наиболее простой вид функции, получаемый для кривых нагрева, достигается на основе задачи для нагрева монолитного твердого тела с бесконечно большой теплопроводностью, конечной теплоемкостью C , с постоянными значениями теплоотдачи A и потока теплоты P . В этом случае функция превышения температуры тела τ над температурой окружающей среды с течением времени t может быть получена из решения дифференциального уравнения

$$Pdt = C \cdot d\tau + A\tau \cdot dt. \quad (1)$$

Решение данного дифференциального уравнения при задании граничного условия $\tau(0) = \tau_H$ можно свести к функции вида

$$\tau(t) = \tau_y (1 - e^{-t/T_H}) + \tau_H e^{-t/T_H}, \quad (2)$$

где $\tau_y = P/A$ – установившееся превышение температуры объекта над температурой окружающей среды; $T_H = C/A$ – постоянная времени переходного процесса.

Для функции (2) также возможно производить расчет не в превышениях температуры, а в самих температурах.

Для функции вида (2) невозможно определение методом наименьших квадратов всех параметров одновременно. По этой причине установление их опытным путем производилось путем подбора τ_y и τ_H для определения методом наименьших квадратов такого значения T_H в вычислительных средах.

При таких условиях оценка для постоянной нагрева T_H :

$$T_H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{\ln(\tau_y - \tau_H) / (\tau_y - \tau_i)}. \quad (3)$$

Для устранения неопределенности при делении на ноль в рамках настоящего анализа принято допущение, что начальные и установившиеся значения в расчетах смещены на $0,01^\circ\text{C}$ относительно измеренных начальной и конечной температур в сторону удаления от средней температуры по диапазону. Это смещение меньше $0,1\%$ измеренных значений, что не вносит сильных искажений в расчеты.

Выделение расчетных диапазонов производилось вручную, на участки монотонного изменения температур. В общем итоге 315 точек опытного набора данных распределились по 87 диапазонам объемом от 2 до 21 точки в каждом.

Учитывая объем данных, необходима интервальная оценка³, для чего проводился расчет доверительной и предсказательной областей на уровне значимости $\alpha = 5\%$ вокруг полиномиальной функции $y(x)$ восьмого порядка

$$y(x) = \sum_{i=0}^8 x^i \cdot b_i. \quad (4)$$

Результаты расчетов приведены в табл. 3.

³Ферстер Э., Пенц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. М.: Финансы и статистика, 1983. 302 с.

Результаты регрессионного анализа по фазам приведены на рис. 4. На набор опытных данных наложены дополнительные графики: $y(x)$ – как линия выборочных средних; $T(t)$ – график целевой функции, ПО – границы предсказательной области на уровне значи-

мости 5% (в пределах границ данной области расположится 95% всех возможных значений температуры).

По данным рис. 4 можно сделать вывод, что целевая функция $T(t)$ показывает высокую степень сходимости с опытными точка-

Табл. 3. Статистическая оценка для параметров b_i функции $y(x)$
Table 3. Statistical estimation for the parameters of the b_i function $y(x)$

i	b_i	S_{b_i}	Доверительный интервал ($\alpha = 5\%$)	Оценка существенности
0	38,990	0,360	$\pm 0,707$	Существенно
1	-3,851	1,125	$\pm 2,214$	»
2	1,025	0,365	$\pm 0,718$	»
3	-0,053	0,024	$\pm 4,76 \cdot 10^{-2}$	»
4	-0,019	$4,478 \cdot 10^{-4}$	$\pm 8,81 \cdot 10^{-4}$	»
5	$3,246 \cdot 10^{-3}$	$2,645 \cdot 10^{-6}$	$\pm 5,20 \cdot 10^{-6}$	»
6	$-2,058 \cdot 10^{-4}$	$5,026 \cdot 10^{-9}$	$\pm 9,89 \cdot 10^{-9}$	»
7	$5,893 \cdot 10^{-6}$	$2,667 \cdot 10^{-12}$	$\pm 5,25 \cdot 10^{-12}$	»
8	$-6,387 \cdot 10^{-8}$	$2,382 \cdot 10^{-16}$	$\pm 4,69 \cdot 10^{-16}$	»

Динамика сушки жидкого продукта на ярусе 3

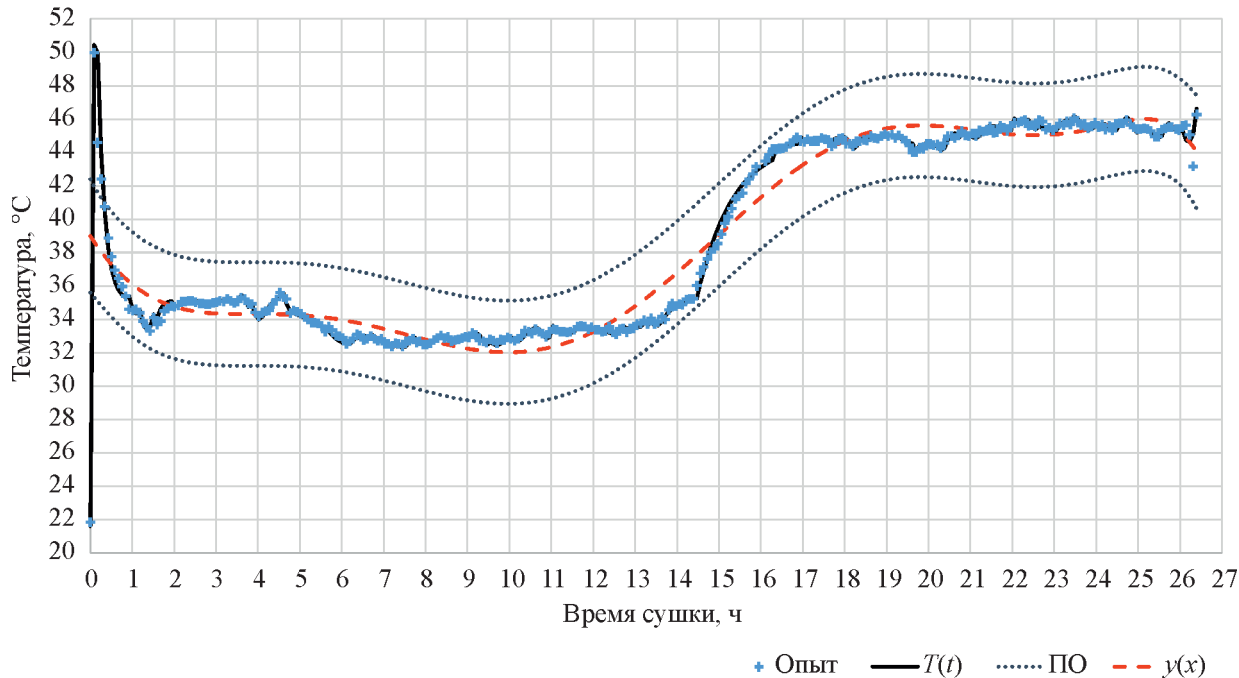


Рис. 4. Регрессионный анализ для кривой температуры нагрева продукта ($R^2 = 0,9226$ и $S_y = 1,557$ для функции $y(x)$; $R^2 = 0,9945$ и $S_y = 1,172$ для функции $T(t)$; за границами ПО находятся четыре точки, что менее 2% выборки)
Fig. 4. Regression analysis for the product heating temperature curve ($R^2 = 0,9226$ and $S_y = 1,557$ for the function $y(x)$; $R^2 = 0,9945$ and $S_y = 1,172$ for the function $T(t)$; four points are located outside the boundaries of the software, which is less than 2% of the sample)

ми, что делает возможной оценку теплоемкости и теплоотдачи по выделенным диапазонам.

Регрессионный анализ.

Целевая функция сушки

На основании модели изменения температуры сушеного продукта, возможна оценка факторов, вызывающих изменение температуры. На рис. 5 показаны значения T_H , рассчитанные по формуле (3).

С учетом допущений, принятых для формулы (1), возможно разделить величину постоянной времени на два фактора: обобщен-

ной теплоемкости и обобщенной теплоотдачи по формулам [11, 13].

$$A = P / (\tau_y - \tau_{oc}), C = T_H \cdot A. \quad (5)$$

Результаты расчетов по диапазонам показаны на рис. 6 и 7.

По данным рис. 5–7 можно сделать следующие выводы.

1. Оценка усредненной теплоотдачи показывает типичную для сушки жидкостей динамику сушки, что подтверждает известную картину тепломассообмена с испарением [7, 14].

2. Скачкам теплоотдачи соответствуют провалы на графике теплоемкости, что объ-

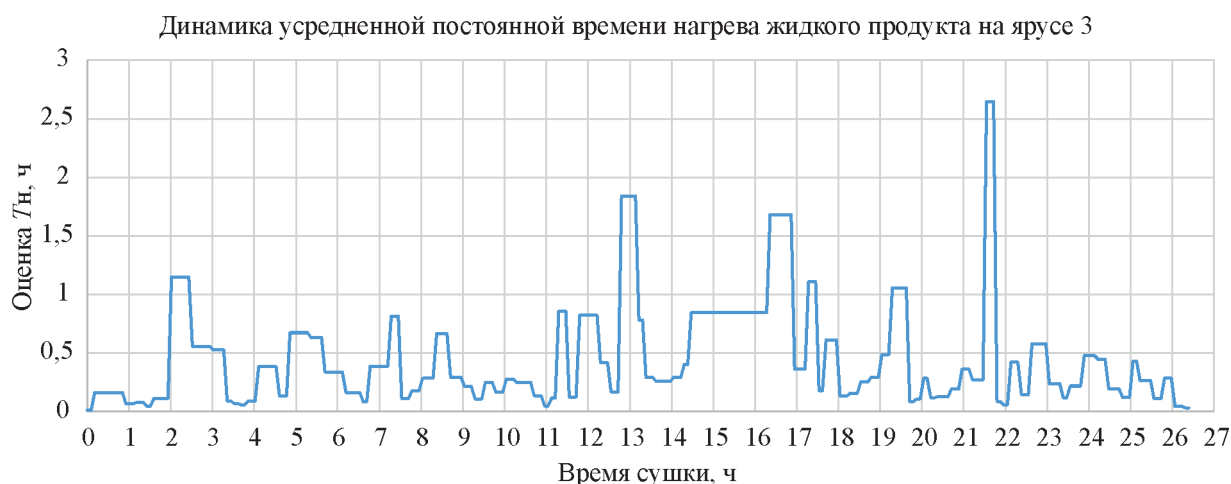


Рис. 5. Динамика усредненной постоянной времени переходного процесса T_H за время сушки

Fig. 5. Dynamics of the average time constant of the transient process T_H during drying



Рис. 6. Динамика усредненной оценки обобщенной теплоотдачи

Fig. 6. Dynamics of the average estimate of generalized heat transfer

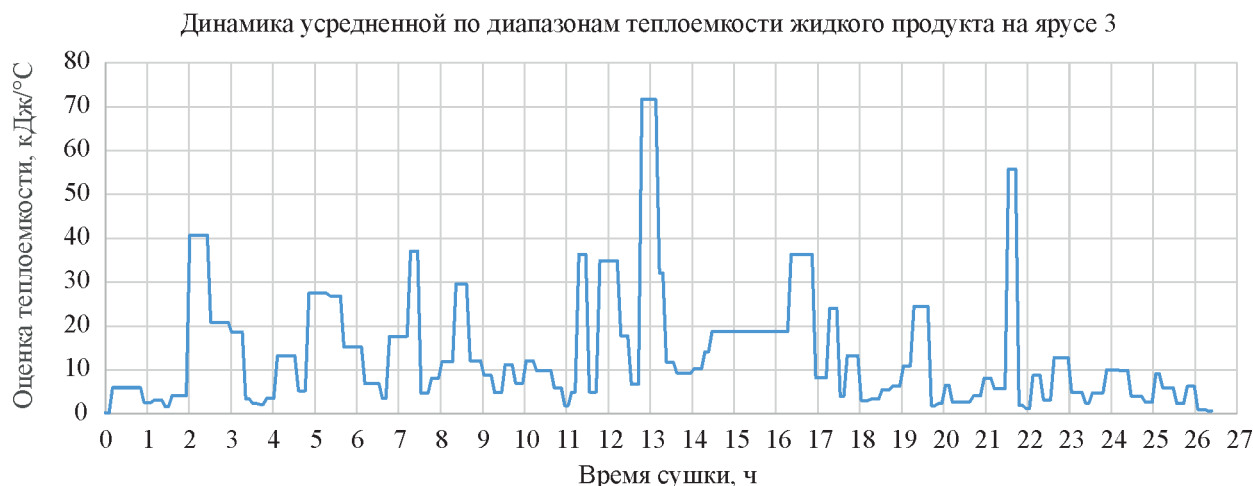


Рис. 7. Динамика усредненной оценки обобщенной теплоемкости

Fig. 7. Dynamics of the average estimate of the generalized heat capacity

ясняется расходом накопленной теплоты на парообразование в подпленочных очагах.

3. После 16 ч сушки оценочное значение теплоотдачи приближается к постоянному значению, что говорит о прекращении интенсивного испарения влаги в целом.

4. После 13 ч сушки оценочное значение теплоемкости начинает изменяться более регулярно, чем в предшествующее время: становится заметна однородная тенденция раздельно для диапазонов с провалами и пиковыми значениями.

Для анализа выявленной тенденции из 87 диапазонов выделены 11 таких, на которых

предполагались выбросы водяного пара из трещин в пленки. Проведен регрессионный анализ с целью проверки гипотезы об истощении запаса влаги, высвобождаемой в виде выбросов при растрескивании пленки. В качестве целевой принималась функция вида (2).

Оценка доверительной (ДО) и предсказательной (ПО) областей проводилась относительно полинома третьей степени на уровне значимости 5%. Результаты расчетов приведены на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что 10 точек из 11 показывают очень высокую сходимость с теоре-

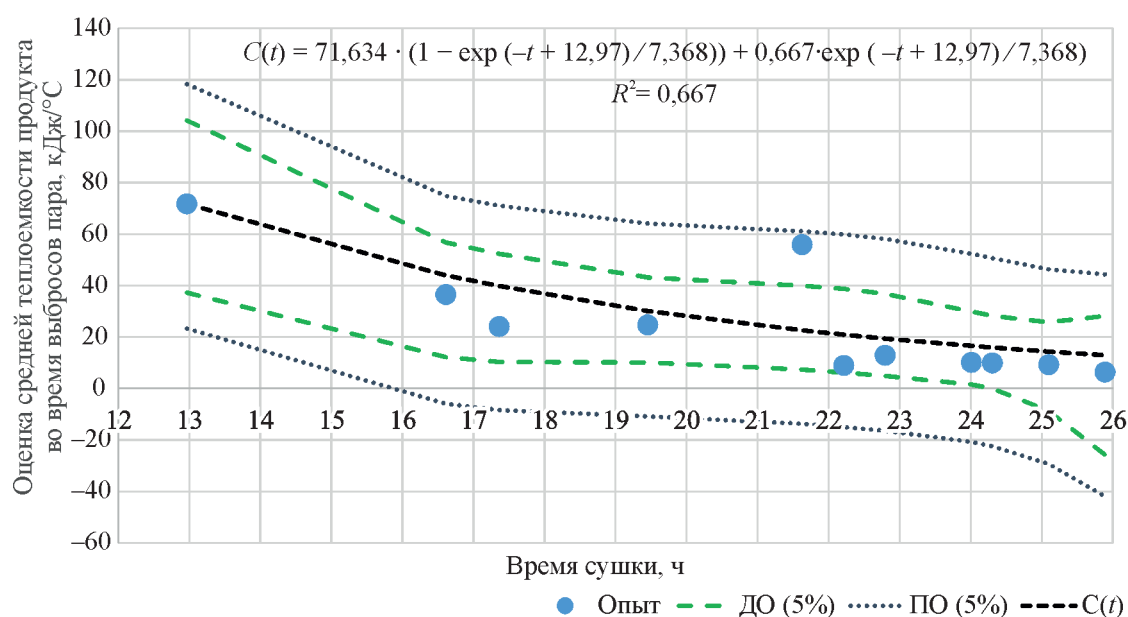


Рис. 8. Оценка интенсивности максимальных выбросов из подпленочного слоя

Fig. 8. Estimation of the intensity of maximum emissions from the sub-film layer

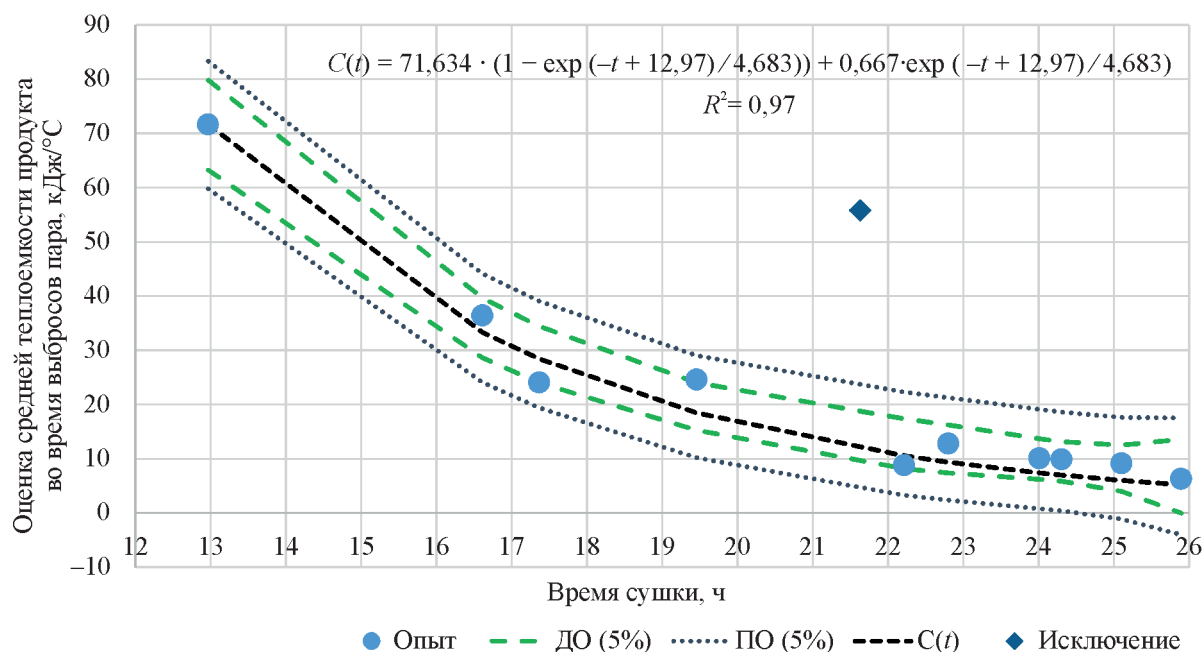


Рис. 9. Оценка интенсивности выбросов из подпленочного слоя (без учета выброса на диапазоне 69)
Fig. 9. Estimation of the intensity of emissions from the sub-film layer (excluding emissions at the range 69)

тической функцией. Одна точка (расчетный диапазон 69) отражает значительный выброс водяного пара, обусловленный сворачиванием подсушенной пленки, что привело к ее подъему над поверхностью поддона.

Подобное явление в ряду прочих выбросов является аномальным событием, поэтому необходимо оценить аналогичным образом зависимость, которая образуется при исключении данного выброса. Результаты расчетов приведены на рис. 9.

ВЫВОДЫ

1. График целевой функции в обоих случаях проходит полностью в пределах границ доверительных областей, что подтверждает возможность применения целевой функции истощения свободной влаги в подпленочном слое.

2. Более точной является оценка постоянной времени переходного процесса по рис. 9 – 4,683 ч.

3. На основании известного значения постоянной времени переходного процесса возможно оценить время окончания сушки с точностью 5%: $(-4,683 \ln 0,05 + 12,97) = 27$ ч.

4. Данные по расчету времени окончания сушки подтверждаются измерениями влаж-

ности сухимого продукта: начальная влажность составляла 95,67%, конечная влажность – 6%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афонькина В.А., Попов В.М., Левинский В.Н., Медведев А.В.* Техничко-экономическая оценка внедрения установки лоткового типа для сушки молочных заквасок // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 3 (51). С. 92–97. DOI: 10.22314/27132064-2023-3-92.
2. *El-Sayed H.S., Salama H.H., Edris A.E.* Survival of *Lactobacillus helveticus* CNRZ32 in spray dried functional yogurt powder during processing and storage // Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. 2020. Vol. 19. N 7. P. 461–467. DOI: 10.1016/j.jssas.2020.08.003.
3. *Abdizhapparova B., Potapov V., Khanzharov N.* Determination of heat transfer mechanisms during vacuum drying of solid-moist and liquid-viscous materials // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 6. N 11 (120). P. 6–15. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.268241.
4. *Buyanova I., Altukhov I., Tsuglenok N., Krieger O., Kashirskih E.* Pulsed infrared radiation for drying raw materials of plant and animal origin // Foods and Raw Materials. 2019. Vol. 7. N 1. P. 151–160. DOI: 10.21603/2308-4057-

2019-1-151-160.

5. Захахатнов В.Г., Кашин П.В., Коковин Г.Д. Планирование эксперимента по исследованию времени сушки зерна в шахтной сушилке // АПК России. 2018. Т. 25. № 3. С. 400–404.
6. Тухватуллин М.И., Аипов Р.С., Ахметшин А.Т. Энергоэффективная установка сушки пиломатериалов с движением их в дискретном электромагнитном СВЧ-поле // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2021. № 1 (57). С. 124–132. DOI: 10.31563/1684-7628-2021-57-1-124-132.
7. Артемов И.Н. Использование уравнений регрессии для входящего и выходящего потока сушильного агента для экспериментальной сушильной камеры конденсационного типа // Инновации и инвестиции. 2022. № 2. С. 152–154.
8. Колобаева А.А., Котик О.А., Панина Е.В., Чернышова К.Д. Исследование кинетики сушки растительного сырья // Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции. 2021. № 2 (17). С. 154–160.
9. Рудобашта С.П., Дорняк О.Р., Дмитриев В.М. Расчет кинетики сушки пластины с учетом ее усадки // Теоретические основы химической технологии. 2021. Т. 55. № 5. С. 612–617. DOI: 10.31857/S004035712104014X.
10. Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zaytsev V.A. Modeling of the deep drying process of granulated polyamide at convective-infrared energy sub-supply // ChemChemTech. 2019. Т. 62. № 12. С. 94–100.
11. Захахатнов В.Г., Кашин П.В. Определение начальной влажности зерна при сушке по времени его нагрева // Вестник ВИЭСХ. 2018. № 1 (30). С. 33–37.
12. Богданов С.И., Дарманиян А.П., Маркин М.А. Исследование и математическое моделирование кинетики сушки зерна озимой пшеницы // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2022. № 2 (66). С. 439–448. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-02-54.
13. Мизонов В.Е., Митрофанов А.В., Басова Е.В., Шуина Е.А. Теоретическое исследование нелинейной теплопроводности в многослойной среде с фазовыми переходами в слоях // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2020. № 1. С. 53–59.
14. Протасов С.К., Матвейко Н.П., Боровик А.А. Исследование кинетики сушки слоя капиллярно-пористого дисперсного материала // Химическая промышленность. 2019. Т. 96.

№ 2. С. 87–94.

REFERENCES

1. Afonkina V.A., Popov V.M., Levinsky V.N., Medvedev A.V. Technical and economic assessment of the tray-type installation implementation for dairy starter cultures' drying. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve = Machinery and Technologies in Livestock*, 2023, no. 3 (51), pp. 92–97. (In Russian). DOI: 10.22314/27132064-2023-3-92.
2. El-Sayed H.S., Salama H.H., Edris A.E. Survival of *Lactobacillus helveticus* CNRZ32 in spray dried functional yogurt powder during processing and storage. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2020, vol. 19, no. 7, pp. 461–467. DOI: 10.1016/J.jssas.2020.08.003.
3. Abdizhapparova B., Potapov V., Khanzharov N. Determination of heat transfer mechanisms during vacuum drying of solid-moist and liquid-viscous materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022, vol. 6, no. 11 (120), pp. 6–15. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.268241.
4. Buyanova I., Altukhov I., Tsuglenok N., Krieger O., Kashirskih E. Pulsed infrared radiation for drying raw materials of plant and animal origin. *Foods and Raw Materials*, 2019. vol. 7, no. 1. pp. 151–160. DOI: 10.21603/2308-4057-2019-1-151-160.
5. Zakhakhatnov V.G., Kashin P.V., Kokovin G.D. Planning an experiment on the time of grain drying in a shaft dryer. *APK Rossii = Agro-industrial Complex of Russia*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 400–404. (In Russian).
6. Tukhvatullin M.I., Aipov R.S., Akhmetshin A.T. Energy-efficient lump drying plant with their motion in a discrete electromagnetic SHF-field. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Bashkir State Agrarian University*, 2021, no. 1 (57), pp. 124–132. (In Russian). DOI: 10.31563/1684-7628-2021-57-1-124-132.
7. Artyomov I.N. The use of regression equations for the inlet and outlet flow of the drying agent for an experimental condensation-type drying chamber. *Innovatsii i investitsii = Innovations and Investments*, 2022, no. 2, pp. 152–154. (In Russian).
8. Kolobaeva A.A., Kotik O.A., Panina E.V., Chernyshova K.D. Investigation of the kinetics of drying vegetable raw materials. *Tekhnologii i tovarovedenie sel'skokhozyaistvennoi produktsii =*

- Technology and commodity science of agricultural products*, 2021, no. 2 (17), pp. 154–160. (In Russian).
9. Rudobashta S.P., Dorniyak O.R., Dmitriev V.M. Calculating the kinetics of drying a plate taking into account its shrinkage. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii = Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2021, vol. 55, no. 5, pp. 612–617. (In Russian). DOI: 10.31857/S004035712104014X.
 10. Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zaytsev V.A. Modeling of the deep drying process of granulated polyamide at convective-infrared energy sub-supply. *ChemChemTech*, 2019, vol. 62, no. 12, pp. 94–100.
 11. Zakhakhatnov V.G., Kashin P.V. Determination of the initial humidity of grain by drying at the time of its heating. *Vestnik VIESKh = Bulletin of RESCH*, 2018, no. 1 (30), pp. 33–37. (In Russian).
 12. Bogdanov S.I., Darmanyany A.P., Markin M.A. Research and mathematical modeling of the kinetics of drying winter wheat grain. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa = Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*, 2022, no. 2 (66), pp. 439–448. (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2022-02-54.
 13. Mizonov V.E., Mitrofanov A.V., Basova E.V., Shuina E.A. Theoretical study of non-linear heat conduction in a multi-layer medium with phase transformations in the layers. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2020, no. 1, pp. 53–59. (In Russian).
 14. Protasov S.K., Matveiko N.P., Borovik A.A. Investigation of the kinetics of drying a layer of capillary – porous dispersed material. *Khimicheskaya promyshlennost' = Russian Chemical Industry*, 2019, vol. 96, no. 2, pp. 87–94. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

✉ **Попов В.М.**, заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор; ORCID 0000-0002-6352-5651; **адрес для переписки:** Россия. 457103, Челябинская область, г. Троицк, ул. им. Ю.А. Гагарина, 13; e-mail: ntc-es@mail.ru

Афонькина В.А., доцент кафедры, кандидат технических наук, доцент; ORCID 0000-0001-9743-5278

Левинский В.Н., доцент кафедры, кандидат технических наук; ORCID 0000-0001-9778-3168

Уразов С.И., доцент кафедры, кандидат технических наук; ORCID 0000-0003-1981-7099

AUTHOR INFORMATION

✉ **Vitaly M. Popov**, Department Head, Doctor of Science in Engineering, Professor; ORCID 0000-0002-6352-5651; **address:** 13, Gagarin St., Troitsk, Chelyabinsk Region, 457103; e-mail: ntc-es@mail.ru

Valentina A. Afonkina, Assistant Professor, Candidate of Science in Engineering, Associate Professor; ORCID 0000-0001-9743-5278

Vasily N. Levinsky, Assistant Professor, Candidate of Science in Engineering; ORCID 0000-0001-9778-3168

Sergey I. Urazov, Assistant Professor, Candidate of Science in Engineering; ORCID 0000-0003-1981-7099

Дата поступления статьи / Received by the editors 12.11.2024
Дата принятия к публикации / Accepted for publication 17.12.2024
Дата публикации / Published 14.02.2025