

Научная статья

УДК 637.1.026

EDN MEUADP

DOI: 10.22450/1999-6837-2024-18-1-74-82

## Технология инфракрасной сушки жидких материалов

**Андрей Витальевич Медведев**

Южно-Уральский государственный аграрный университет

Челябинская область, Челябинск, Россия, [vestarvestar@mail.ru](mailto:vestarvestar@mail.ru)

**Аннотация.** Исследования проводились в области инфракрасной сушки жидких материалов. Изучены существующие проблемы и предложено решение в виде инфракрасной установки. В качестве нагревательного элемента выбран низкотемпературный пленочный электронагреватель, который обладает низкой рабочей температурой, что способствует сохранению полезных веществ в конечном продукте, а также снижению развития патогенной микрофлоры. Обнаружена проблема прилипания и пригорания при сушке жидких материалов. Исследованы несколько типов подложки из разного материала. Проведены исследования по определению потока излучения. Составлены зависимости плотности потока от времени для разного расположения нагревателя. Выявлен наиболее оптимальный материал для подложки. Разработана система автоматического управления сушильной установки. Разработана инфракрасная сушильная установка. Проведены исследования по сушке жидких материалов на предложенной установке. Выполнен анализ полученных результатов.

**Ключевые слова:** сушка, жидкие материалы, ИК-излучение, сушильная установка

**Для цитирования:** Медведев А. В. Технология инфракрасной сушки жидких материалов // Дальневосточный аграрный вестник. 2024. Том 18. № 1. С. 74–82. doi: 10.22450/1999-6837-2024-18-1-74-82.

Original article

## Technology of infrared drying of liquid materials

**Andrey V. Medvedev**

South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk region, Chelyabinsk, Russian Federation

[vestarvestar@mail.ru](mailto:vestarvestar@mail.ru)

**Abstract.** The research was carried out in the field of infrared drying of liquid materials. The problems in this area have been studied and a solution in the form of an infrared installation has been proposed. A low-temperature film electric heater has been selected as a heating element, which has a low operating temperature, which helps to preserve useful substances in the final product, as well as reduce the development of pathogenic microflora. The problem of adhesion and burning during drying of liquid materials has been discovered. Several types of substrate made of different materials have been studied. Studies have been conducted to determine the radiation flux. The dependences of the flow density on time for different heater locations are compiled. The most optimal material for the substrate has been identified. An automatic control system for the drying plant has been developed. An infrared drying unit has been developed. Studies have been conducted on the drying of liquid materials at the proposed installation. The analysis of the obtained results is carried out.

**Keywords:** drying, liquid materials, IR radiation, drying plant

**For citation:** Medvedev A. V. Technology of infrared drying of liquid materials. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik*. 2024;18;1:74–82. (in Russ.). doi: 10.22450/1999-6837-2024-18-1-74-82.

**Введение.** На сегодняшний день наша страна столкнулась с большим количеством санкций и различных ограничений. Конечно, это затронуло практически все сферы промышленности и экономики. И агропромышленный сектор не стал исключением. У многих производителей возникают проблемы с поставкой нового зарубежного оборудования, закрываются каналы сбыта продукции, сырье не поступает в нужных объемах, а его стоимость значительно выросла [1].

Снижение зависимости от европейского сырья и технологий является приоритетным направлением развития агропромышленной отрасли. Необходимость создания отечественных технологий, позволяющих получать продукт высокого качества и конкурировать с зарубежными компаниями, особенно актуальна в настоящее время.

Сушка является одним из важных этапов в производстве готовой продукции. В процессе сушки сырье подвергается воздействию высоких температур, что приводит к удалению влаги. Сушка позволяет значительно увеличить срок годности сырья, а также снизить затраты на транспортировку и хранение готовой продукции, что особенно актуально для жидкого сырья [2, 3].

Сушильные установки для жидких сред отличаются от установок для твердых материалов. При сушке жидкого сырья существует проблема прилипания продукта к поверхности нагревателя или рабочей поверхности сушильной установки. Также из-за высокой начальной влажности происходит пригорание сырья в процессе сушки, что негативно сказывается, во-первых, на качестве продукции; во-вторых, предприятия несут большие издержки, теряя до 20 % сырья [4].

На сегодня существует ряд технологий, применяемых при сушке жидких материалов, однако такие установки либо обладают высокой стоимостью, либо не позволяют получить продукт высокого качества.

Сушка, основанная на применении оптических электротехнологий, в том числе инфракрасным излучением, является перспективным направлением в области развития зеленых технологий, так как сочетает в себе снижение термонагрузки, со-

хранение готового продукта при возможности минимизации энергозатрат [5].

Однако данное направление недостаточно развито в молочной промышленности, так как долгое время не существовало специального сушильного оборудования для жидкого сырья с применением ИК-излучения.

**Целью исследования** явилось создание технологии, позволяющей проводить процесс сушки жидких веществ с применением инфракрасного излучения.

**Материалы и методы исследования.** При разработке технологии в качестве источника инфракрасного излучения был выбран низкотемпературный пленочный электронагреватель.

В отличие от других источников ИК-излучения он обладает рядом преимуществ. Температура воздействия не превышает 70 °С, что позволяет проводить процесс сушки с сохранением большого количества полезных веществ. Также энергозатраты такого типа нагревателя значительно меньше, что способствует снижению затрат всего процесса сушки. Технические характеристики нагревателя представлены в таблице 1 [6].

При разработке сушильных установок необходимо учесть, каким образом продукт размещается относительно генератора ИК-излучения. В предложенной установке предусмотрен вариант, при котором продукт разливается непосредственно на дно лотка. При данном варианте необходимо учесть проблему прилипания и пригорания продукта в процессе сушки. В работе проведены исследования по применению различных материалов подложки, противодействующих данным явлениям [7].

При выборе материала подложки следует принять во внимание, что он должен отвечать требованиям пищевой безопасности и не изменять своих свойств при термовоздействии, а также нужно определить влияние выбранного материала на величину плотности потока излучения от пленочного электронагревателя.

Анализ научных исследований в области пищевой промышленности показал, что прилипание в процессе термовоздействия отсутствует при использовании таких материалов, как фторопласт и сили-

**Таблица 1 – Технические характеристики низкотемпературного пленочного электронагревателя****Table 1 – Technical characteristics of low-temperature film electric heater**

Технические характеристики	Значения
Номинальное напряжение, В	12–220; 380
Удельная мощность, Вт/м <sup>2</sup>	до 500
Номинальный ток нагрузки, А/м <sup>2</sup>	от 0,5 до 2,3
Диапазон длины волны излучения, мкм	8,5–9,5
Диапазон температуры поверхности, °С	35–70
Долговечность, лет	50
Ширина полотна, м	0,35; 0,51
Размерный ряд по длине, м	от 0,5 до 7
Наличие передающего элемента	алюминиевая фольга

кон, основные характеристики которых представлены в таблице 2 [8].

Предварительный эксперимент сушки кисломолочного продукта «Наринэ» на пленочном электронагревателе, с использованием исследуемых материалов в качестве подложки, показал отсутствие прилипания после обезвоживания.

Измерения параметров плотности потока излучения, исходящего от генератора инфракрасного излучения (низкотемпературного пленочного электронагревателя) через подложки (силикон, фторопласт) производились с использованием датчика абсолютно черного тела.

Принцип действия данного датчика основан на оценке вольтовой интегральной чувствительности материала ( $S_v$ ), определяемой как соотношение напряжения ( $U$ ) к полному потоку излучения ( $\Phi$ ).

Промодулированный поток падает на чувствительную площадку

ИК-приемника, вызывая на нагрузочном сопротивлении переменное напряжение с амплитудой  $U_c$ .

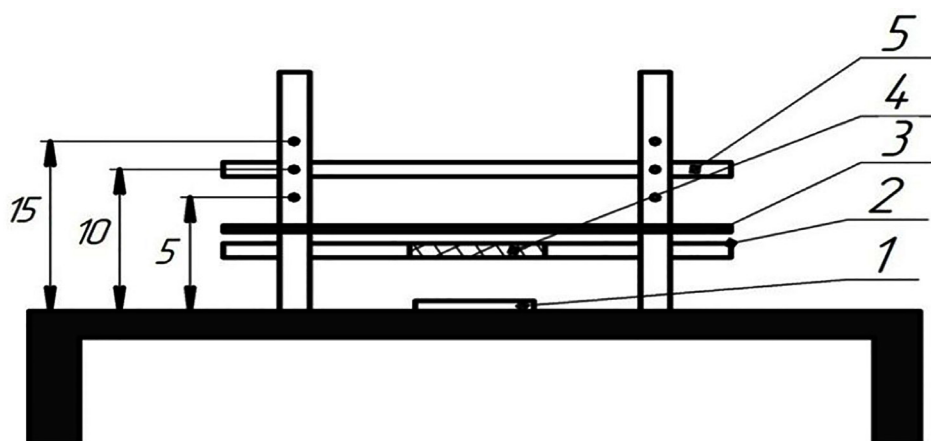
Переменный сигнал при необходимости или в случае низкотемпературных излучателей подают на узкополосный усилитель, который на выходе имеет амплитудный детектор. Амплитудное значение сигнала подается на милливольтметр и регистрируется с его помощью [9].

Для изучения материалов подложки была подготовлена лабораторная экспериментальная установка, представленная на рисунке 1.

На планке 5 экспериментальной установки был помещен низкотемпературный пленочный электронагреватель с удельной мощностью 360 Вт/м<sup>2</sup>. В процессе экспериментов высота подвеса планки 5 изменялась (0 и 50 мм). Данные значения были взяты, чтобы проанализировать изменения потока при условии отсутствия

**Таблица 2 – Характеристики материалов подложки****Table 2 – Characteristics of substrate materials**

Наименование характеристики	Материал подложки	
	силикон	фторопласт
Теплоемкость, Дж/кг·С	2,04–2,15	1,04
Теплопроводность, Вт/м·С	0,16	0,25
Интервал рабочих температур, °С	от минус 60 до 250	от минус 270 до 260
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,05–1,60	2,12–2,20
Размер, мм	10×500×500	10×500×500
Цена, руб./кг	1 500	900



1 – датчик АЧТ; 2 – изоляционный материал; 3 – исследуемый материал;  
4 – окно в изоляционном материале; 5 – планка для установки электронагревателя  
1 – absolutely black body sensor; 2 – insulating material; 3 – material under study;  
4 – window in insulating material; 5 – strip for installing an electric heater

**Рисунок 1 – Лабораторная экспериментальная установка**

**Figure 1 – Laboratory experimental installation**

расстояния между исследуемым материалом и поверхностью нагревателя, а также при условии, когда между ними есть расстояние. На каждой установленной высоте планки измерения плотности потока излучения проводились в три этапа:

1) без установки исследуемого материала 3 (то есть регистрировалась плотность потока излучения, проходящего через окно изоляционного материала 4, непосредственно от излучателя) (эталонный);

2) с установкой материала подложки – силикон;

3) с установкой материала подложки – фторопласт.

По результатам экспериментов построены сравнительные зависимости плотности потока излучения от времени:

1) с низкотемпературным пленочным электронагревателем, расположенным непосредственно на исследуемом материале подложки (высота подвеса планки равна нулю) (рис. 2);

2) с низкотемпературным пленочным электронагревателем, расположенным на расстоянии от исследуемого материала подложки (высота подвеса планки равна 50 мм) (рис. 3).

Исходя из проведенного анализа зависимостей (рис. 2 и 3), видно, что из двух исследуемых материалов подложки наи-

более эффективным является фторопласт. Подложка из фторопласта, размещенная непосредственно на излучателе с разлитым на него равномерным слоем жидкого биологически активного материала, будет способствовать: 1) интенсивному выходу влаги из материала, так как потери плотности потока излучения не превышают 5 %; 2) отсутствию прилипанию материала ко дну лотка в процессе его обезвоживания, что снизит трудоемкость процесса; 3) выходу конечного сухого продукта высокого качества, так как процесс сушки проходит в режиме щадящих температур.

Также в данной технологии используется принцип согласования спектральных характеристик исследуемого продукта и оптических свойств излучателя. Такое согласование позволяет подобрать температурный режим под каждый продукт, и тем самым обеспечить проведение процесса сушки при оптимальной температуре, что позволяет сохранять наибольшее количество полезных веществ в сухом продукте и не дает возможность развиваться патогенной микрофлоре.

**Результаты исследования и их обсуждение.** В результате полученных теоретических и практических знаний о сушке жидких материалов нами разработана сушильная установка лоточного типа с применением низкотемпературных пленочных электронагревателей, которая ос-

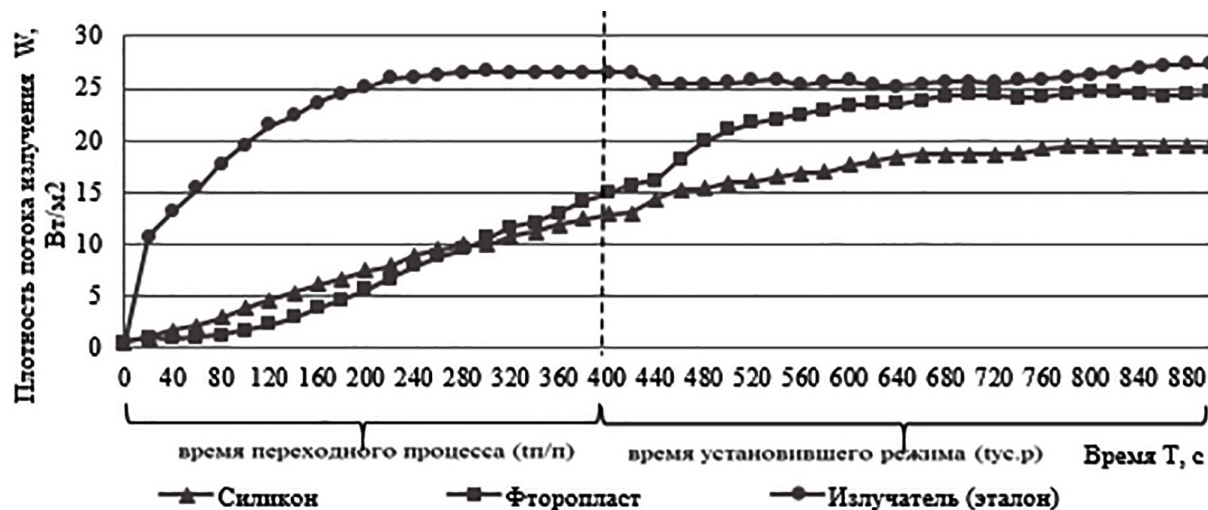


Рисунок 2 – Зависимость плотности потока излучения от времени (низкотемпературный пленочный электронагреватель расположен непосредственно на материале подложки (высота планки – 0 мм))

Figure 2 – Dependence of the radiation flux density on time (low-temperature film electric heater is located directly on the substrate material (bar height 0 mm))

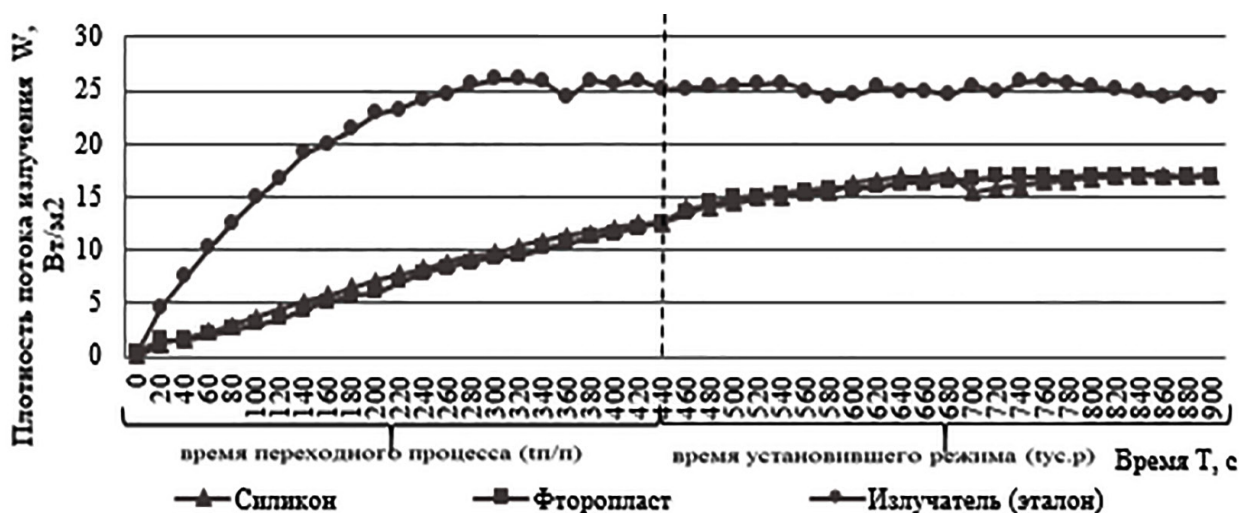


Рисунок 3 – Зависимость плотности потока излучения от времени (низкотемпературный пленочный электронагреватель расположен на расстоянии от материала подложки (высота планки – 50 мм))

Figure 3 – Dependence of the radiation flux density on time (low-temperature film electric heater is located at a distance from the substrate material (bar height 50 mm))

нащена системой автоматического управления температурой процесса [10]. Данная установка состоит из 11 ярусов, на каждом из которых располагаются по два рабочих лотка для продукта (рис. 4).

Лотки закреплены на направляющих, что позволяет снимать их для загрузки и выгрузки при сушке сырья. Пленоч-

ные электронагреватели располагаются сверху и снизу каждого яруса, что позволяет проводить процесс сушки равномерно и сократить энергозатраты.

Каждый лоток оснащен подложкой из фторопласта, что дало возможность избежать проблемы пригорания и прили-



**Рисунок 4 – Разработанная сушильная установка для сушки жидких материалов**  
**Figure 4 – Developed drying plant for drying liquid materials**

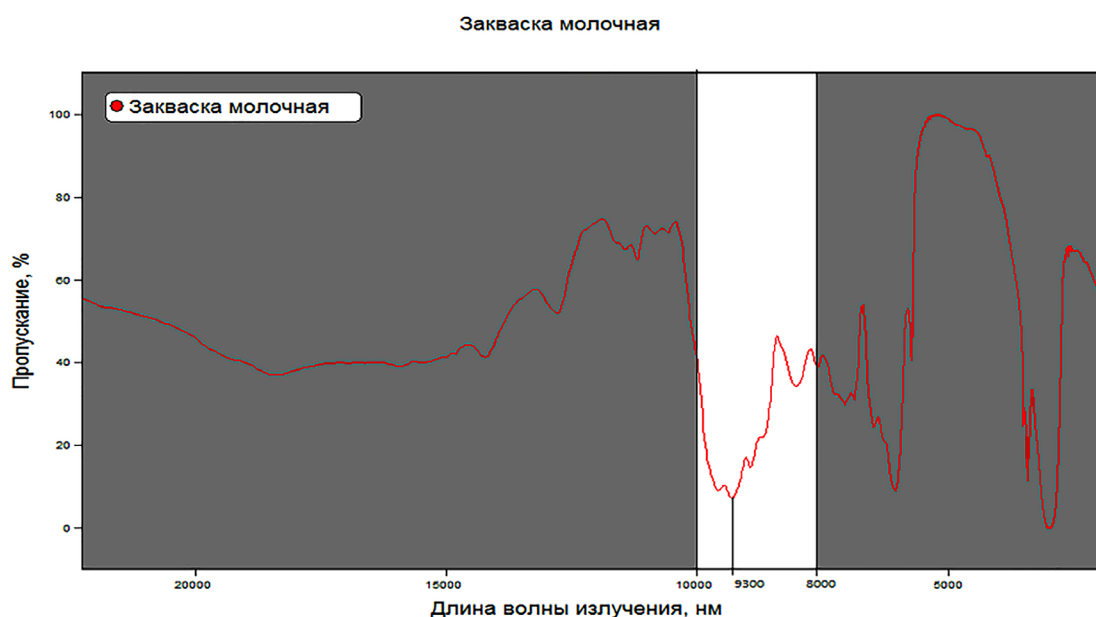
пания, а также повысить объем готового продукта практически на 20%.

Установка оборудована системой автоматического управления, состоящей из двух щитов управления и датчиков температуры (рис. 4).

В ходе проведения испытаний выполнен эксперимент по сушке молочной закваски. Получены значения начальной

и конечной влажности, которые составляют 97,45 и 6,12 % соответственно, а также установлено время сушки равное 2 024 минут. Также определено значение температуры, необходимой для сохранения наибольшего количества полезных веществ (рис. 5).

На рисунке 5 выделен рабочий диапазон нагревателя, который составля-



**Рисунок 5 – Спектральная характеристика исследуемого продукта**  
**Figure 5 – Spectral characteristics of product under study**

ет 8 000–10 000 нм. Исходя из графика спектральной характеристики молочной закваски, оптимальная температура оказалась равной 38,25 °С.

Полученный продукт в ходе эксперимента отправлен для анализа в центр гигиены и эпидемиологии Челябинской области. Были получены результаты лабораторных испытаний, которые представлены в таблице 3.

Из полученных данных следует, что в образце жидкой молочной закваски показатели содержания молочнокислых микроорганизмов соответствуют заявленным показателям на упаковке производителя (согласно техническим условиям), а содержание

бифидобактерий превышает данный показатель.

В образце сухой молочной закваски показатели содержания молочнокислых микроорганизмов и бифидобактерий идентичны в сравнении с показателями исходного материала жидкой молочной закваски.

**Заключение.** Таким образом, проведенные исследования позволили разработать технологию инфракрасной сушки для жидкого сырья, которая способна проводить процесс сушки при низких температурах, что положительно сказывается на качестве конечного продукта. При этом данная технология обладает низкими энергозатратами.

**Таблица 3 – Результаты исследований в лаборатории**

**Table 3 – Laboratory results**

Определяемые показатели	Результаты испытаний	Величина допустимого уровня	Нормативные документы на методы испытаний
<i>S. aureus</i>	не обнаружено в 1,0 см <sup>3</sup>	не допускается в 1,0 см <sup>3</sup>	ГОСТ 30347–2016
Бактерии группы кишечных палочек (колиформы)	не обнаружено в 1,0 см <sup>3</sup>	не допускается в 0,1 см <sup>3</sup>	ГОСТ 32901–2014 (пп. 1–4, 6, 7, 8.5, приложения А, Б)
Бифидумбактерии, КОЕ/см <sup>3</sup>	более 1,1×10 <sup>6</sup>	не менее 1×10 <sup>6</sup>	ГОСТ 33491–2015
Дрожжи, КОЕ/г	менее 1,0×10	не более 50	ГОСТ 33566–2015
Молочнокислые микроорганизмы, КОЕ/см <sup>3</sup>	более 1,1×10 <sup>8</sup>	не менее 1×10 <sup>8</sup>	ГОСТ 10444.11–2013
Патогенные микроорганизмы, включая сальмонеллы	не обнаружено в 25 см <sup>3</sup>	не допускается в 25 см <sup>3</sup>	ГОСТ 32010–2013; ГОСТ ISO 6785–2015
Плесени, КОЕ/г	менее 1,0×10	не более 50	ГОСТ 33566–2015

#### Список источников

1. Попов В. М., Афонькина В. А., Левинский В. Н., Медведев А. В. Краткий аналитический обзор проблем и перспектив развития отечественного рынка молочных заквасок // Актуальные вопросы агроинженерных наук в сфере технического сервиса машин и энергетики: теория и практика : материалы нац. (всерос.) науч. конф. Челябинск : Южно-Уральский государственный аграрный университет, 2022. С. 238–244. EDN CYKZVB.

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. P. 461–467. doi: 10.1016/j.jssas.2020.08.003. EDN MKTMNQ.

3. Popov V. M., Epishkov E. N., Afonkina V. A., Krivosheeva E. I., Levinsky V. N. Theoretical justification of film electric heater parameters as a source of infrared radiation in the technology of drying green crops // Mechanization, engineering, technology, innovation and digital technologies in agriculture : IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Smolensk : IOP Publishing Ltd., 2021. P. 032038. doi: 10.1088/1755-1315/723/3/032038. EDN KOXCIT.

4. Popov V., Afonkina V., Levinsky V., Zudin E., Krivosheeva E. Designing the infrared drying machines of cylindrical type with an active reflector // 12<sup>th</sup> International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry INTERAGROMASH 2019 : IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Rostov-on-Don : Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012008. doi: 10.1088/1755-1315/403/1/012008. EDN UWFNTR.

5. Попов В. М., Афонькина В. А., Попова А. В. Особенности использования гибких пленочных электронагревателей в технологии сушки молочных заквасок // Актуальные вопросы агроинженерных и сельскохозяйственных наук: теория и практика : материалы нац. науч. конф. Челябинск : Южно-Уральский государственный аграрный университет, 2019. С. 103–109. EDN SYGWZV.

6. Левинский В. Н. Обоснование технологии и параметров установки инфракрасной сушки высоковлажного биологического сырья на примере томата : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2021. 24 с. EDN RJVUWL.

7. Popov V. M., Afonkina V. A., Levinsky V. N., Medvedev A. V. Research of substrate materials for drying liquid materials // Digital Technologies in Agriculture of the Russian Federation and the World Community. Stavropol : AIP Publishing, 2022. P. 060008. doi: 10.1063/5.0107701. EDN FDSVLP.

8. 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). P. 6–15. doi: 10.15587/1729-4061.2022.268241. EDN TZJAOQ.

9. Popov V. M., Afonkina V. A., Levinsky V. N., Medvedev A. V. Study of the process of infrared drying of lactic starter cultures // Ensuring the technological sovereignty of the agro-industrial complex: approaches, problems, solutions (ETSAC2023) : E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference. Yekaterinburg : EDP Sciences, 2023. P. 01004. doi: 10.1051/e3sconf/202339501004. EDN QENXPC.

10. 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. EDN IULBIX.

## References

1. Popov V. M., Afonkina V. A., Levinsky V. N., Medvedev A. V. A brief analytical review of the problems and prospects of development of the domestic market of dairy starters. Proceedings from Actual issues of agro-engineering sciences in the sphere of technical service of machines and power engineering: theory and practice: *Natsional'naya (vserossiiskaya) nauchnaya konferentsiya – National (All-Russian) Scientific Conference*. (PP. 238–244), Chelyabinsk, Yuzhno-Ural'skiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2022. EDN CYKZVB (in Russ.).

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;19;7:461–467. doi: 10.1016/j.jssas.2020.08.003. EDN MKTMNQ.

3. Popov V. M., Epishkov E. N., Afonkina V. A., Krivosheeva E. I., Levinsky V. N. Theoretical justification of film electric heater parameters as a source of infrared radiation in the technology of drying green crops. Proceedings from Mechanization, engineering, technology, innovation and digital technologies in agriculture: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. (PP. 032038), Smolensk, IOP Publishing Ltd., 2021. doi: 10.1088/1755-1315/723/3/032038. EDN KOXCIT.



4. Popov V., Afonkina V., Levinsky V., Zudin E., Krivosheeva E. Designing the infrared drying machines of cylindrical type with an active reflector. Proceedings from 12<sup>th</sup> International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry INTERAGROMASH 2019: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. (PP. 012008), Rostov-on-Don, Institute of Physics Publishing, 2019. doi: 10.1088/1755-1315/403/1/012008. EDN UWFNTR.

5. Popov V. M., Afonkina V. A., Popova A. V. Peculiarities of using flexible film electric heaters in the technology of drying milk starter. Proceedings from Current issues of agroengineering and agricultural sciences: theory and practice: *Natsional'naya nauchnaya konferentsiya – National Scientific Conference*. (PP. 103–109), Chelyabinsk, Yuzhno-Ural'skiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2019. EDN SYGWZV (in Russ.).

6. Levinsky V. N. Justification of technology and parameters of infrared drying of high-moisture biological raw materials on the example of tomato. *Extended abstract of candidate's thesis*. Chelyabinsk, 2021, 24 p. EDN RJVUWL (in Russ.).

7. Popov V. M., Afonkina V. A., Levinsky V. N., Medvedev A. V. Research of substrate materials for drying liquid materials. Proceedings from Digital Technologies in Agriculture of the Russian Federation and the World Community. (PP. 060008), Stavropol, AIP Publishing, 2022. doi: 10.1063/5.0107701. EDN FDSVLP.

8. 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;6;11(120):6–15. doi: 10.15587/1729-4061.2022.268241. EDN TZJAOQ.

9. Popov V. M., Afonkina V. A., Levinsky V. N., Medvedev A. V. Study of the process of infrared drying of lactic starter cultures. Proceedings from Ensuring the technological sovereignty of the agro-industrial complex: approaches, problems, solutions (ETSAIC2023): E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference. (PP. 01004), Yekaterinburg, EDP Sciences, 2023. doi: 10.1051/e3sconf/202339501004. EDN QENXPC.

10. Afonkina V. A., Popov V. M., Levinsky V. N., Medvedev A. V. Technical and economical assessment of the tray type installation implementation for dairy starter cultures' drying. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve*, 2023;3(51):92–97. doi: 10.22314/27132064-2023-3-92. EDN IULBIX (in Russ.).

© Медведев А. В., 2024

Статья поступила в редакцию 19.02.2024; одобрена после рецензирования 11.03.2024; принята к публикации 12.03.2024.

The article was submitted 19.02.2024; approved after reviewing 11.03.2024; accepted for publication 12.03.2024.

### **Информация об авторе**

**Медведев Андрей Витальевич**, ассистент кафедры энергообеспечения и автоматизации технологических процессов, Южно-Уральский государственный аграрный университет, [vestarvestar@mail.ru](mailto:vestarvestar@mail.ru)

### **Information about the authors**

**Andrey V. Medvedev**, Assistant of the Department of Energy Supply and Automation of Technological Processes, South Ural State Agrarian University, [vestarvestar@mail.ru](mailto:vestarvestar@mail.ru)