

УДК 631.369.258 / 638.178

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

### ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРГОВЫХ СОТОВ

Каширин Дмитрий Евгеньевич  
д.т.н., доцент, заведующий кафедрой электроснабжения, энергетики и автоматизации в агропромышленном комплексе  
РИНЦ SPIN-код: 6888-2937  
[kadm76@mail.ru](mailto:kadm76@mail.ru)  
ФГБОУ ВОРГАТУ  
390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, дом 1

Павлов Виктор Вячеславович  
к.т.н., доцент кафедры  
РИНЦ SPIN-код: 7023-6206  
[pavlov.rgatu@mail.ru](mailto:pavlov.rgatu@mail.ru)  
ФГБОУ ВО РГАТУ  
390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, дом 1

Нагаев Николай Борисович  
к.т.н., доцент кафедры  
РИНЦ SPIN-код: 9009-3580  
[nikolas\\_burdisso@mail.ru](mailto:nikolas_burdisso@mail.ru)  
ФГБОУ ВО РГАТУ  
390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, дом 1

Борычев Владислав Сергеевич  
Соискатель  
РИНЦ SPIN-код: 1137-7740  
[kadm76@mail.ru](mailto:kadm76@mail.ru)  
ФГБОУ ВО РГАТУ  
390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, дом 1

В работе представлены результаты экспериментального исследования спектральных характеристик перговых сотов в инфракрасном диапазоне длин волн с применением метода ИК-Фурье-спектроскопии. Актуальность исследования обусловлена необходимостью научного обоснования параметров вакуумной инфракрасной сушки перги как энергоэффективной альтернативы традиционной конвективной технологии. Целью работы являлось определение коэффициентов отражения и эмиссии перговых сотов различной влажности и оценка их влияния на процессы тепломассопереноса при ИК-нагреве. Экспериментальные исследования выполнены с использованием ИК-Фурье-спектрометра PerkinElmer Frontier на основе интерферометра Майкельсона. Объектом исследования служили образцы перговых сотов размером 50×50 мм нативной влажности и после конвективной сушки (50 ч). В ходе эксперимента получены

UDC 631.369.258 / 638.178

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

### EXPERIMENTAL STUDY OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF BEE BREAD HONEYCOMBS

Kashirin Dmitry Evgenievich  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Power Supply, Energy and Automation in the Agro-Industrial Complex  
RSCI SPIN-code: 6888-2937  
[kadm76@mail.ru](mailto:kadm76@mail.ru)  
FSBEI HE RGATU  
390044, Russia, Ryazan, Kostycheva, 1

Pavlov Viktor Vyacheslavovich  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
RSCI SPIN-code: 7023-6206  
[pavlov.rgatu@mail.ru](mailto:pavlov.rgatu@mail.ru)  
FSBEI HE RGATU  
390044, Russia, Ryazan, Kostycheva, 1

Nagaev Nikolay Borisovich  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
RSCI SPIN-code: 9009-3580  
[nikolas\\_burdisso@mail.ru](mailto:nikolas_burdisso@mail.ru)  
FSBEI HE RGATU  
390044, Russia, Ryazan, Kostycheva, 1

Borychev Vladislav Sergeevich  
postgraduate  
RSCI SPIN-code: 1137-7740  
[kadm76@mail.ru](mailto:kadm76@mail.ru)  
FGBOU VO RGATU  
390044, Russia, Ryazan, Kostycheva, 1

This article presents the results of an experimental study of the spectral characteristics of bee bread honeycombs in the infrared wavelength range using Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy. The relevance of the study is proved by the need for a scientific substantiation of the operating parameters of vacuum infrared drying as an energy-efficient alternative to conventional convective drying technology. The objective of the work was to determine the reflectance and emissivity coefficients of bee bread honeycombs with different moisture contents and to assess their influence on heat and mass transfer processes under infrared heating. The experimental investigations were carried out using a PerkinElmer Frontier FTIR spectrometer based on a Michelson interferometer. The objects of the study were 50 × 50 mm honeycomb samples at native moisture content and after convective drying (50 h). Spectral dependences of the reflectance coefficient over a wide wavelength range were obtained. Integral

спектральные зависимости коэффициента отражения в широком диапазоне длин волн, определены интегральные показатели нормального коэффициента отражения и коэффициента эмиссии. Установлено, что перговые соты характеризуются высокой степенью поглощения инфракрасного излучения: среднее значение коэффициента эмиссии составило 0,885–0,886 и практически не зависит от влажности образца. При снижении влажности нормальный коэффициент отражения уменьшается с 0,0581 до 0,0575. Выявлены участки спектра с минимальными значениями отражения («провалы»), представляющие практический интерес для выбора рациональных температурных режимов инфракрасных нагревателей. Показано, что с увеличением длины волны излучения отражательная способность перговых сотов возрастает. Полученные результаты формируют научную основу для оптимизации параметров вакуумной инфракрасной сушки перги и повышения энергетической эффективности технологического процесса

Ключевые слова: ПЧЕЛИНЫЕ СОТЫ, ПЕРГА, ИК-ИЗЛУЧЕНИЕ, ВАКУУМНАЯ СУШКА, ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

values of the normal reflectance coefficient and emissivity were determined. It was established that bee bread honeycombs exhibit a high absorption capacity for infrared radiation: the average emissivity ranged from 0.885 to 0.886 and showed negligible dependence on sample moisture content. A decrease in moisture content resulted in a slight reduction of the normal reflectance coefficient from 0.0581 to 0.0575. Specific spectral regions with minimal reflectance (“absorption minima”) were identified, which are of practical importance for selecting rational temperature regimes of infrared heaters. It was also shown that reflectance increases with increasing radiation wavelength. The obtained results provide a scientific basis for optimizing the parameters of vacuum infrared drying of bee bread and improving the energy efficiency of the technological process

Keywords: HONEYCOMB, BEE BREAD, IR RADIATION, VACUUM DRYING, OPTICAL CHARACTERISTICS

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-218-006>

**Введение.** Пчеловодство в мировом агропромышленном комплексе выполняет важную биологическую и экономическую функцию, обеспечивая опыление сельскохозяйственных культур, что способствует повышению урожайности, улучшению качества плодов и семенного материала. Наряду с производством мёда, являющегося основной товарной продукцией отрасли, существенное значение имеет переработка и реализация сопутствующих продуктов пчеловодства – воска, прополиса и перги. Диверсификация ассортимента продукции позволяет повысить рентабельность пчеловодческих хозяйств и обеспечить более устойчивую экономическую модель их функционирования.

Перга представляет собой ферментированную пыльцу растений, законсервированную пчёлами в ячейках сотов, и характеризуется высокой концентрацией биологически активных веществ – аминокислот, витаминов, ферментов и микроэлементов [1]. Благодаря выраженным

<http://ej.kubagro.ru/2026/04/pdf/06.pdf>

нутрицевтическим и фармакологическим свойствам она широко используется в пищевой промышленности, медицине и ветеринарии. В то же время рынок испытывает дефицит качественной перги, что обусловлено отсутствием научно обоснованных технологических решений по её извлечению и переработке, а также ограниченным внедрением специализированного оборудования. При этом спрос на данный продукт демонстрирует устойчивую тенденцию к росту [2].

Одним из наиболее энергоёмких этапов технологической подготовки перги является процесс сушки. На практике преимущественно применяется конвективная сушка горячим воздухом, отличающаяся конструктивной простотой оборудования и относительной технологической доступностью. Однако данный метод характеризуется значительной продолжительностью процесса (до 40-45 часов), повышенным удельным энергопотреблением и риском термического повреждения биологически активных компонентов продукта. В условиях необходимости повышения энергетической эффективности производства актуализируется поиск альтернативных способов влагоудаления.

В качестве перспективного направления рассматривается вакуумная инфракрасная сушка, обеспечивающая интенсификацию теплообмена за счёт снижения температуры кипения влаги в условиях пониженного давления. Сокращение продолжительности процесса до 1,5-2 часов позволяет существенно уменьшить суммарные энергозатраты и повысить технологическую эффективность подготовки перговых сотов к последующему механическому измельчению. Вместе с тем инфракрасный способ нагрева принципиально отличается от традиционного конвективного теплообмена. В данном случае интенсивность нагрева определяется преимущественно спектральными характеристиками материала, а именно его способностью поглощать и отражать электромагнитное излучение в инфракрасном диапазоне.

С физической точки зрения взаимодействие твёрдого тела с электромагнитным излучением сопровождается тремя параллельными процессами: поглощением, отражением и пропусканием энергии. Для количественного описания данных процессов вводятся коэффициенты поглощения, отражения и пропускания, совокупность которых определяет оптические свойства материала. Температурная динамика нагрева при инфракрасной сушке зависит как от интенсивности излучения, так и от его спектрального состава, а также от величины коэффициента поглощения обрабатываемого продукта.

В рамках теплового излучения реальные материалы условно рассматриваются как «серые тела». Степень их приближения к абсолютно чёрному телу характеризуется коэффициентом эмиссии (степенью черноты)  $\varepsilon$ , который, в соответствии с законом Кирхгофа, численно равен коэффициенту поглощения при термодинамическом равновесии. Чем выше значение  $\varepsilon$ , тем интенсивнее происходит поглощение энергии излучения и, соответственно, нагрев материала, что непосредственно отражается на эффективности процесса сушки и его энергетическом коэффициенте полезного действия.

Следует отметить, что существующие исследования оптических характеристик перговых сотов преимущественно ориентированы на определение химического состава и количественного содержания отдельных компонентов (сахаров, витаминов и других биологически активных веществ). В работах А. Wroblewska, Z. Warakomska, M. Kaminska, N. Hudz, O. Bobiș и ряда других авторов в качестве основного метода использовался спектрофотометрический анализ водных экстрактов перги, что позволило оценить её состав в ближнем инфракрасном диапазоне. Однако данные исследования не учитывают спектральные особенности нативного материала в более широком инфракрасном диапазоне длин волн и, следовательно, не могут быть напрямую

использованы для обоснования параметров вакуумной инфракрасной сушки.

**Целью исследований** является экспериментальное определение спектральных характеристик перговых сотов в инфракрасном диапазоне длин волн с применением метода ИК-Фурье-спектроскопии для последующего обоснования параметров инфракрасной сушки.

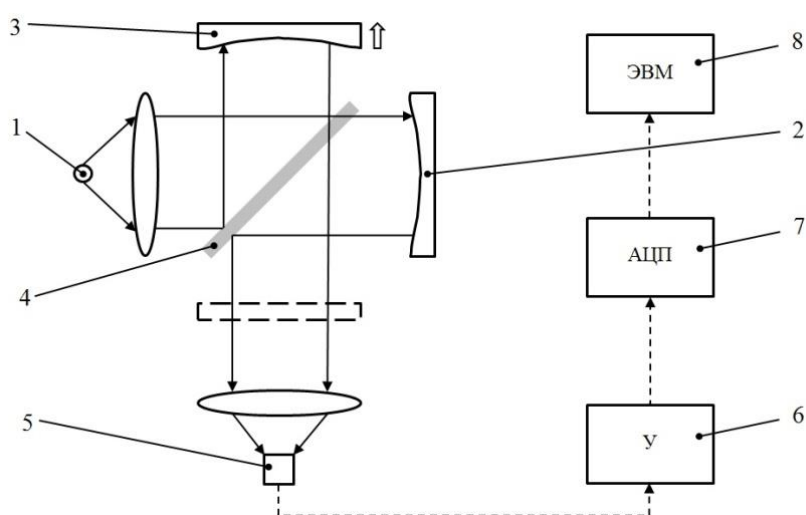
#### **Методика исследований.**

Для исследования спектральных характеристик перговых сотов в инфракрасном диапазоне длин волн применялся ИК-Фурье-спектрометр PerkinElmer Frontier, функционирующий на основе интерферометрической схемы Майкельсона. Использование метода Фурье-спектроскопии обусловлено его высокой спектральной разрешающей способностью, широким диапазоном регистрируемых длин волн и возможностью получения интегральной информации о взаимодействии излучения с исследуемым материалом.

Структурная схема прибора представлена на рис. 1. Конструктивно прибор включает источник инфракрасного излучения (поз. 1), интерферометр Майкельсона, состоящий из неподвижного зеркала (поз. 2), подвижного зеркала (поз. 3) и светоделителя (поз. 4), а также фотоприёмное устройство (поз. 5). Сигнал, формируемый на выходе фотоприёмника, последовательно проходит стадии усиления (поз. 6) и аналого-цифрового преобразования (поз. 7), после чего поступает в вычислительный модуль (поз. 8) для математической обработки. Обработка интерферограммы осуществляется методом быстрого преобразования Фурье с последующим построением спектральной зависимости коэффициента отражения (или пропускания) в заданном диапазоне длин волн.

Принцип действия интерферометра Майкельсона основан на разделении исходного пучка инфракрасного излучения светоделителем на

два когерентных пучка. Один из них отражается от неподвижного зеркала, второй – от подвижного. При перемещении подвижного зеркала изменяется оптическая разность хода лучей, что приводит к формированию интерференционной картины. После повторного прохождения через светоделитель объединённый пучок направляется на исследуемый образец перговых сотов. Взаимодействие излучения с материалом сопровождается частичным поглощением и отражением энергии в зависимости от спектральных характеристик вещества. Модулированный сигнал регистрируется фотоприёмником в виде интерферограммы, содержащей информацию о спектральном составе излучения после прохождения через образец или отражения от него.



1 – источника ИК излучения, 2 – неподвижное зеркало, 3 – подвижное зеркало, 4 – светоделитель, 5 – фотоприемник, 6 – усилитель, 7 – аналого-цифровой преобразователь, 8 – ЭВМ

Рисунок 1 – Структурная схема ИК-Фурье спектрометра

Таким образом, применение ИК-Фурье-спектроскопии позволяет количественно определить спектральные коэффициенты отражения и, косвенно, коэффициент поглощения (эмиссии) перговых сотов, что является необходимым условием для обоснования режимов инфракрасной сушки.

Общий вид установки для определения оптических свойств перговых сотов показан на рисунке 2.



1 – образец; 2 – кювета; 3 – ИК-Фурье спектрометр

Рисунок 2 – Общий вид установки для определения спектральных характеристик сотов с пергой

По завершении спектральных измерений образцы подвергались контрольному взвешиванию с целью определения изменения их массы. Влажность перговых сотов определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 31776-2012 с обеспечением нормативной повторяемости измерений. Полученные значения использовались для расчёта средней влажности образцов и последующего сопоставления с оптическими характеристиками материала.

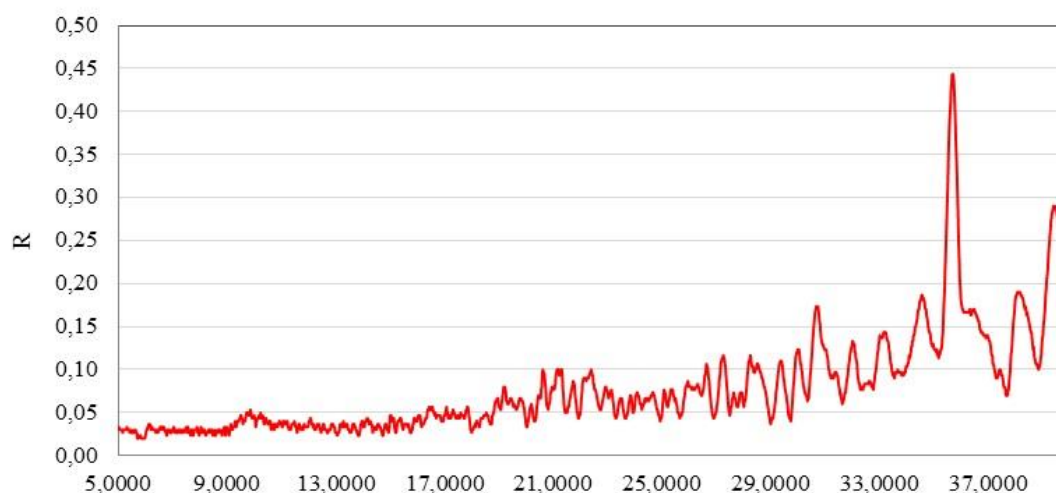
Сформированные программным обеспечением спектрометра массивы экспериментальных данных, содержащие спектральные коэффициенты отражения в заданном диапазоне длин волн, экспортировались в формат табличного представления (MS Excel). Дальнейшая обработка включала статистический анализ результатов

измерений, определение средних значений и вариационных показателей, а также построение спектральных зависимостей для интерпретации оптических свойств исследуемых образцов.

### **Результаты исследований.**

В результате экспериментального исследования оптических свойств перговых сотов получены спектральные зависимости коэффициента отражения в инфракрасном диапазоне длин волн. Построенные спектральные характеристики для образцов нативной влажности и после конвективной сушки представлены на рисунках 3 и 4 соответственно.

На рисунке 3 приведена спектральная характеристика перговых сотов при естественной (нативной) влажности, отражающая распределение коэффициента отражения по диапазону длин волн.



**Рисунок 3 – Спектральная характеристика перговых сотов нативной влажности сотов**

На рисунке 4 представлена аналогичная зависимость для предварительно высушенных образцов, что позволяет выполнить сравнительный анализ влияния влажности на их оптические параметры.

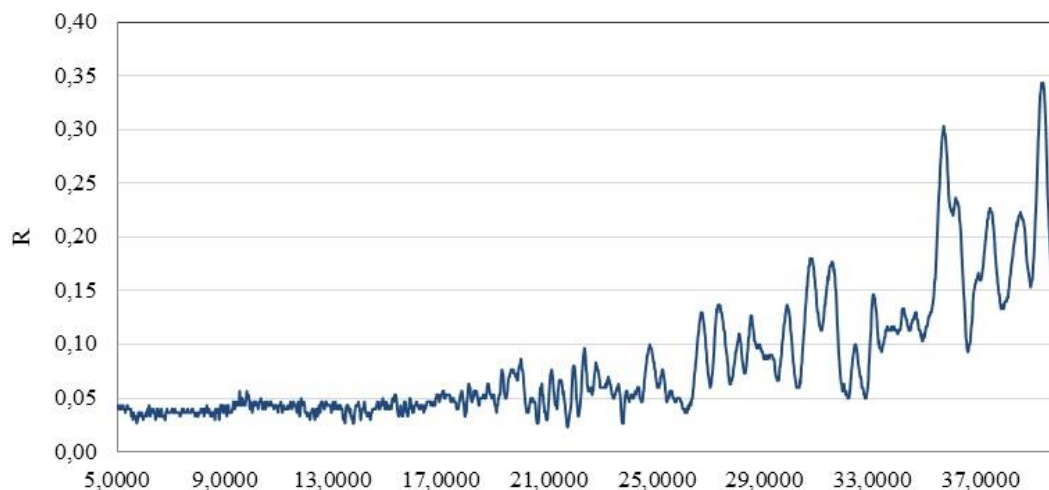


Рисунок 4 – Спектральная характеристика высушенных перговых сотов

Количественная обработка экспериментальных данных выполнена с использованием методов вариационной статистики. Рассчитанные интегральные и средние значения нормального коэффициента отражения, коэффициента эмиссии, а также показатели влажности исследуемых образцов приведены в таблице 1. Представленные статистические параметры позволяют оценить воспроизводимость результатов и выявить влияние влагосодержания на спектральные характеристики перговых сотов.

Анализ полученных спектральных зависимостей показал наличие устойчивой тенденции увеличения коэффициента отражения перговых сотов с ростом длины волны инфракрасного излучения. Данная закономерность свидетельствует о снижении доли поглощаемой энергии в длинноволновой области спектра и должна учитываться при выборе спектральных параметров инфракрасных нагревателей.

Таблица 1 – Спектральные характеристики перговых сотов

Образец			Нативные перговые соты	Высушенные перговые соты
Влажность $W$ , %	повторности	$W_1$	23,7	13,1
		$W_2$	22,1	14,6
		$W_3$	23,5	13,5
	$W_{cp}$		<b>23,1</b>	<b>13,7</b>
Нормальный коэффициент отражения $R_n$	повторности	$R_{n1}$	0,0693	0,0554
		$R_{n2}$	0,05	0,0618
		$R_{n3}$	0,055	0,0554
	$R_n$ $cp$		<b>0,0581</b>	<b>0,0575</b>
Коэффициент эмиссии $\varepsilon$	повторности	$\varepsilon_1$	0,875	0,888
		$\varepsilon_2$	0,893	0,882
		$\varepsilon_3$	0,888	0,888
	$\varepsilon_{cp}$		<b>0,885</b>	<b>0,886</b>

Спектральные характеристики, представленные на рисунках 3 и 4, демонстрируют выраженные локальные минимумы коэффициента отражения («провалы»), соответствующие диапазонам повышенного поглощения энергии материалом. Идентификация указанных участков спектра имеет практическое значение, поскольку позволяет обосновать рациональный выбор температурных режимов и спектрального состава излучения при инфракрасной сушке перговых сотов, обеспечивая интенсификацию процесса при минимальных энергетических затратах.

Обработка экспериментальных данных показала, что коэффициент эмиссии (степень черноты) перговых сотов практически не зависит от их влагосодержания и региона происхождения образцов. Среднее значение коэффициента эмиссии составило 0,885–0,886, что характеризует исследуемый материал как близкий по своим радиационным свойствам к «серому телу» с высокой поглощающей способностью в инфракрасном диапазоне. Высокое значение данного показателя свидетельствует о значительном потенциале эффективного преобразования энергии излучения в тепловую энергию при ИК-нагреве.

При снижении влажности образцов отмечено незначительное уменьшение среднего нормального коэффициента отражения – с 0,0581 до 0,0575, что подтверждает стабильность оптических характеристик материала в процессе сушки и позволяет рассматривать перговые соты как объект с относительно постоянными радиационными свойствами в исследованном диапазоне параметров.

### **Выводы.**

В ходе исследования выполнен анализ взаимодействия инфракрасного излучения с перговыми сотами в широком диапазоне длин волн. По результатам экспериментальных измерений получены спектральные зависимости коэффициента отражения, характеризующие оптические свойства исследуемого материала. Анализ спектральных характеристик позволил выявить локальные минимумы отражательной способности, соответствующие диапазонам повышенного поглощения энергии излучения. Указанные участки спектра представляют практический интерес при обосновании рациональных параметров инфракрасных нагревателей и выборе температурных режимов сушки.

Установлена закономерность увеличения коэффициента отражения перговых сотов при переходе к большей длине волны инфракрасного излучения, что свидетельствует о снижении эффективности поглощения в длинноволновой области спектра. Данная особенность должна учитываться при проектировании и настройке инфракрасных сушильных установок.

Полученные результаты подтверждают высокую поглощающую способность перговых сотов в инфракрасном диапазоне. Среднее значение коэффициента эмиссии (степени черноты) составляет 0,885–0,886 и практически не изменяется при варьировании влажности образцов, а также не зависит от их географического происхождения. Снижение влагосодержания сопровождается незначительным уменьшением среднего

нормального коэффициента отражения – с 0,0581 до 0,0575, что свидетельствует о стабильности радиационных свойств материала в процессе сушки.

Таким образом, перговые соты могут быть охарактеризованы как материал с высокой степенью поглощения инфракрасной энергии и относительно устойчивыми оптическими параметрами, что создаёт предпосылки для повышения энергетической эффективности вакуумной инфракрасной сушки.

### Библиографический список

1. Борычев, С. Н. Обоснование рациональных параметров осушителя воздушного потока энергосберегающей сушильной установки / С. Н. Борычев, А. А. Симдянкин, Д. Е. Каширин // Техника и оборудование для села. – 2022. – № 5(299). – С. 40-43. – DOI 10.33267/2072-9642-2022-5-40-43. – EDN WFQSHN.

2. Патент № 2758017 С1 Российская Федерация, МПК F26B 9/06, F26B 3/30, F26B 21/04. Установка для сушки перги : № 2020142599 : заявл. 22.12.2020 : опубл. 25.10.2021 / Д. Н. Бышов, Д. Е. Каширин, С. Н. Гобелев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева". – EDN AZXLYE.

### References

1. Bory`chev, S. N. Obosnovanie racional`ny`x parametrov osushitelya vozdušnogo potoka ènergosberegayushhej sushil`noj ustanovki / S. N. Bory`chev, A. A. Simdyankin, D. E. Kashirin // Tekhnika i oborudovanie dlya sela. – 2022. – № 5(299). – S. 40-43. – DOI 10.33267/2072-9642-2022-5-40-43. – EDN WFQSHN.

2. Patent № 2758017 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK F26B 9/06, F26B 3/30, F26B 21/04. Ustanovka dlya sushki pergi : № 2020142599 : zayavl. 22.12.2020 : opubl. 25.10.2021 / D. N. By`shov, D. E. Kashirin, S. N. Gobelev [i dr.] ; zayavitel` Federal`noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel`noe uchrezhdenie vy`sshego obrazovaniya Ryazanskij gosudarstvenny`j agrotexnologicheskij universitet imeni P.A. Kosty`cheva. – EDN AZXLYE.