ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. АГРОИНЖЕНЕРИЯ

DOI: 10.32786/2071-9485-2020-01-33

THE PROCESS OF DRYING CRUSHED PLANT MATERIAL IN A DRUM DRYER

V. A. Yunin¹, A. M. Zakharov¹, N. N. Kuznetsov², A. V. Zykov¹

¹*Institute for engineering and environmental problems in agricultural production –
branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, St. Petersburg*

²*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Vereshchagin
State Dairy Farming Academy of Vologda»*

Received 22.01.2020

Submitted 05.03.2020

The work was carried out on the topic of State assignment No. 0581-2019-0024 «Develop digital intelligent technologies, robotic systems and complexes of machines for feed production»

Summary

The paper presents theoretical and practical research on the use of thermal infrared radiation with the drying of crushed agricultural raw materials in a drum dryer. Preliminary data have been obtained which will subsequently serve as the basis for a full-factor experiment.

Abstract

Introduction. High energy intensity of the drying process requires improvement of technologies that ensure energy saving with high quality of products and environmental cleanliness of production. In the practice of drying plant materials the most common type is a convective dryer, characterized by a relatively simple construction and able to operate with various heat sources, however, these dryers have some drawbacks including considerable heat loss in the exhaust stream of air or gas, the dependence of drying efficiency on air humidity, the negative impact of the heated coolant on the dried product. During drying in a drum dryer, the concentration of bulk material and the frequency of precipitation are essential. These indices depend on the amount of material that is located in the dryer, the number and size of the blades, and the diameter of the drum. **Object.** The object of research is the drying process of crushed plant mass in a drum dryer with infrared radiation. **Materials and methods.** The research was carried out using an experimental drying plant, the drum of which was made according to the type of existing drum dryers. The key feature of the experimental dryer is that a reverse conveyor belt is provided under the drum, along which the material that has not dried up and accumulated at the end of the drum returns to its beginning. This design feature allowed providing a uniform distribution of the material along the entire length of the drying drum. **Results and conclusions.** In the experiments, the mixture of vetch and oat and various herbs were used (in the phases of forming the stem - the beginning of earing - budding). The initial moisture content of the crushed grass varied from 65 to 85 %, the average moisture content of the grasses was 75 %. According to the results of the experiment, the optimal parameters were determined for some types of herbal mixtures with the moisture content of 75-85 % at the entrance to the dryer; the air speed $V=3-5$ m/s in the dryer; the temperature of the plant mass is not more than 58°C at the exit of the dryer and the specific load of the drying chamber is up to 3 kg/min.

Key words: plant material, drum dryer, moisture exchange, drying, uneven heating.

Citation. Yunin V. A., Zakharov A. M., Kuznetsov N. N., Zykov A. V. The drying process of crushed plant material in a drum dryer. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2020. 1(57). 335-349 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2020-01-33.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

УДК 66.047.57:636.085.532

ПРОЦЕСС СУШКИ ИЗМЕЛЬЧЕННОГО РАСТИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

В БАРАБАННОЙ СУШИЛКЕ

В. А. Юнин¹, кандидат технических наук
А. М. Захаров¹, кандидат технических наук
Н. Н. Кузнецов², кандидат технических наук
А. В. Зыков¹

¹Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФНАЦ ВИМ, г. Санкт-Петербург

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н. В. Верещагина»

Дата поступления в редакцию 22.01.2020

Дата принятия к печати 05.03.2020

**Работа выполнена по теме Государственного задания № 0581-2019-0024
«Разработать цифровые интеллектуальные технологии, роботизированные системы
и комплексы машин для кормопроизводства»**

Актуальность. Высокая энергоемкость процесса сушки требует совершенствования технологий, обеспечивающих энергосбережение при высоком качестве выпускаемой продукции и экологической чистоте производства. В практике сушки растительного сырья наиболее распространены конвективные сушилки, отличающиеся относительно простой конструкцией, а также возможностью работы с различными источниками тепла, однако данные сушилки имеют ряд недостатков, в числе которых существенные потери тепла с отходящим потоком воздуха или газа, зависимость эффективности сушки от влажности воздуха, негативное влияние нагретого теплоносителя на высушиваемый продукт. При сушке в барабанной сушилке существенными являются концентрация ссыпавшегося материала и периодичность ссыпания, эти показатели зависят от количества материала, находящегося одновременно в сушилке, количества и размеров лопастей, диаметра барабана. **Объект.** Объектом исследований является процесс сушки измельченной растительной массы в барабанной сушилке с инфракрасным излучением. **Материалы и методы.** Исследования проводились на экспериментальной сушильной установке, барабан которой был изготовлен по типу существующих барабанных сушилок. Принципиальная особенность работы экспериментальной сушилки состоит в том, что под барабаном предусмотрена обратная транспортерная лента, по которой невысохший и скопившийся в конце барабана материал возвращается в его начало, такая конструктивная особенность позволила обеспечить равномерное распределение материала по всей длине сушильного барабана. **Результаты и выводы.** В опытах были использованы вико-овсяная смесь и разнотравье (в фазах выхода в трубку – начала колошения – бутонизации). Исходная влажность измельченной травы варьировалась от 65 % до 85 %, средняя влажность трав была 75 %. По результатам эксперимента определены оптимальные параметры для некоторых видов травяных смесей влажностью 75 – 85 % на входе в сушилку; скорость воздуха $V=3-5$ м/с в сушилке; температура растительной массы не более 58 °С на выходе из сушилки и удельная загрузка сушильной камеры до 3 кг/мин.

Ключевые слова: растительный материал, барабанные сушилки, сушка растительного сырья, сушильные барабаны.

Цитирование. Юнин В. А., Захаров А. М., Кузнецов Н. Н., Зыков А. В. Процесс сушки измельченного растительного материала в барабанной сушилке. *Известия НВ АУК*. 2020. 1(57). 335-349. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-01-33.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Выбор методов сушки влажных материалов основывается на изуче-

нии кинетики процесса переноса и удаления влаги, на опрвлении энергетической освещённости, спектральных характеристик материалов, заданной скорости сушки и спектральном распределении излучения [2].

Основополагающие теоретические исследования и закономерности распределения связи влаги в высушиваемых растительных капиллярно-пористых материалах, к которым относятся сельскохозяйственные культуры, разработаны Лыковым А. В., Буляндра А.Ф. и в дальнейшем развиты в работах их учеников и других исследователей [16, 22].

Тепловые способы, использующие конвекцию, кондукцию или электромагнитные излучения и реализуемые в различных конструктивных исполнениях сушильных установок, позволяют существенно интенсифицировать процессы сушки, но являются достаточно энергоёмкими. Высокая энергоёмкость процесса сушки требует совершенствования технологий, обеспечивающих энергосбережение при высоком качестве выпускаемой продукции и экологической чистоте производства.

К основным задачам процесса сушки в отрасли агропромышленного комплекса (АПК) относятся: интенсификация сушки, поддержание максимально допустимой и стабильной температуры на заданном уровне, создание энергосберегающего сушильного оборудования и др.

Назначение оптимальных температурных режимов может быть обосновано на основе теоретических исследований и моделирования теплового воздействия на материал, что может быть обеспечено, как отмечается в исследованиях [17], на основе законов кинетики.

В качестве критерия термостойкости обрабатываемого материала многие исследователи выбирают максимально допустимую температуру нагрева. Следует отметить, что величина максимально допустимой температуры неоднозначна и даже для одного и того же вида материала может иметь нечеткие границы, поскольку определяется опытным путем. Так, например, при сушке материалов в ленточных, камерных или барабанных сушилках слои материала нагреваются неодинаково и в отдельных частицах возникает разный температурный градиент. Поэтому в инженерных расчетах температуру материала оценивают по температуре среднего слоя или по температуре поверхности частиц, чем, собственно, и можно объяснить расхождения в оценках, или по температуре теплоносителя, которая, несмотря на то что легко контролируется, также имеет нечеткие границы допустимых значений. Можно считать, что при сушке различных видов материалов, имеют значение не только разность температур теплоносителя на входе и выходе, но и количественные характеристики процесса, такие как количество затраченного теплоносителя, количество испаренной влаги и др.

По мнению ряда исследователей [6, 8, 11, 13, 14, 18, 21], использование сушки с инфракрасными лучами (ИК) обладает рядом преимуществ по сравнению с другими способами, поскольку позволяет сократить продолжительность обработки. Однако нагрев материала ИК-излучением происходит более интенсивно по сравнению с конвекцией и теплопроводностью, поэтому при длительном использовании облучения влага из высушиваемых изделий будет удаляться очень быстро, что может привести при отсутствии регулирования температуры к нарушению целостности материала. Общие сведения об ИК-излучении и возможностях теплообмена с его участием изложены в работах [3, 20, 23].

Важнейшим фактором при сушке является не только установленная мощность самого источника ИК-излучения, но и потребляемый расход электроэнергии. Волновой характер ИК-излучения и явления электромагнитного резонанса при взаимодействии излучения с материалом могут многократно увеличивать воздействие излучения на расстояниях, кратных длине волны.

Для сушки растительного сырья в отрасли АПК используются различные кон-

струкции сушильных устройств [5], отличающиеся друг от друга рядом классификационных признаков. В конвективных сушилках высушиваемый материал омывается потоком нагретого теплоносителя, в кондуктивных высушиваемый материал имеет непосредственный контакт с нагреваемой поверхностью, в сублимационных имеет место фазовый переход влаги из твердого ее состояния в газообразное, минуя жидкую фазу, в диэлектрических осуществляется подвод тепла с помощью токов высокой частоты, а в радиационных обеспечивается передача теплоты с помощью инфракрасного излучения.

В практике сушки растительного сырья наиболее распространены конвективные сушиллки, отличающиеся относительно простой конструкцией, а также возможностью работы с различными источниками тепла [7, 19]. Однако данные сушиллки имеют ряд недостатков, в числе которых существенные потери тепла с отходящим потоком воздуха или газа, зависимость эффективности сушки от влажности воздуха, негативное влияние нагретого теплоносителя на высушиваемый продукт. Если на первом этапе сушки взаимодействие теплоносителя с продуктом протекает с высокой интенсивностью и энергоемкость процесса при достаточно высокой скорости сушки невысока, то по мере высыхания продукта его характеристики тепломассопереноса снижаются, и все большая доля тепловой энергии расходуется неэффективно, вследствие чего возрастает энергоемкость процесса, время сушки увеличивается, возникают локальные перегревы продукта, что негативно отражается на качестве и приводит к потерям пищевой ценности высушенного продукта и ухудшению его органолептических характеристик.

Отсюда следует, что процесс сушки в целях энергосбережения должен базироваться на более эффективных механизмах обезвоживания.

Известно, что питательная ценность и качество высушенных продуктов во многом зависят не только от конструктивно-технологических параметров сушильной установки, но и от выбора и настройки ее рабочих режимов. Проведенные исследования [12, 15] показывают, что технология сушки в барабанной сушиллке обеспечивает более высокую теплопроводность и теплоотдачу, интенсивное движение и перемешивание частиц, равномерный прогрев материала в сушильной установке.

Материалы и методы. На сушку различных продуктов (не только в отрасли АПК) в барабанных сушилках оказывают влияние конструктивные параметры и режимы работы барабана. Наиболее существенные из них – это диаметр барабана, его частота вращения, количество, размер и форма лопастей, участвующих в перемещении материала. Чтобы в экспериментах уменьшить число факторов, вместо указанных целесообразно ввести один режимный критерий, характеризующий относительную подвижность материала внутри барабана.

При сушке в сушилках барабанного типа часть времени измельченное растительное сырье движется вместе с лопастями и стенкой барабана, а затем падает с лопастей в низ барабана. Тогда критерий подвижности можно представить как отношение продолжительности движения частиц вне лопастей $\tau_{\text{пад}}$ к продолжительности движения их вместе с лопастями $\tau_{\text{пок}}$.

$$Y = \tau_{\text{пад}} / \tau_{\text{пок}} \quad (1)$$

Как $\tau_{\text{пад}}$, так и $\tau_{\text{пок}}$ зависит от размеров, формы лопастей и угла их установки. $\tau_{\text{пад}}$ зависит также от диаметра барабана, а $\tau_{\text{пок}}$ – от частоты вращения барабана.

Критерий подвижности частиц с термодинамической точки зрения характеризует долю конвективного теплообмена по отношению к кондуктивно-конвективному. В фазе движения частиц совместно с барабаном тепло передается как путем непосредственного контакта высушиваемого материала с нагретыми стенками и лопастями сушиллки, так и путем теплопередачи от проходящего через слой материала инфракрасного излучения. В фазе падения частиц материала с лопасти тепло передается не только

от источника инфракрасного излучения, но и от нагретого омывающего их потока воздуха. Следует отметить, что фазу падения измельченной растительной массы можно рассматривать и как чисто конвективный теплообмен, поскольку кондуктивная составляющая в этом случае мала из-за относительно малой массы, лежащей на лопастях материала и малого количества воздуха, продуваемого через него.

Время относительного покоя можно выразить как отношение длины дуги L (м), которую проходит измельченная растительная масса частично вместе с барабаном, к окружной скорости частицы V_δ (рад/с), как представлено на рисунке 1.

Рисунок 1 – Схема барабанной сушилки для определения критерия подвижности

Figure 1 – Schematic of a drum dryer for determining mobility criteria

$$\tau_{\text{пок}} = L / V_\delta, \quad (2)$$

где L – длина дуги материала при вращении барабана, м; V_δ – окружная скорость частицы, рад/с.

$$L = (2\pi R\beta) / 360, \quad (3)$$

$$V_\delta = (2\pi Rn) / 60. \quad (4)$$

Тогда получим:

$$\tau_{\text{пок}} = \beta - 6n, \quad (5)$$

где β – угол ссыпания материала, зависящий от формы и угла установки лопастей, угла трения высушиваемого материала по лопасти, рад; n – частота вращения барабана, мин⁻¹.

Время свободного падения частицы без учета сопротивления воздуха будет равно:

$$\tau_{\text{пад}} = \sqrt{\frac{2(H-l)}{g}} = \sqrt{\frac{2}{g}(2R\sin\beta/2 - l_1)}, \quad (6)$$

где H – высота расположения лопасти над нижележащей образующей барабана в момент ссыпания материала, м; l – проекция ширины лопасти на вертикальную ось.

После постановки значений (5) и (6) в соответствующее выражение (1) критерий подвижности равен:

$$Y = \frac{6n}{\beta} \sqrt{\frac{2}{g}(2R\sin\frac{\beta}{2} - l_1)}. \quad (7)$$

Если угол между соседними лопастями не вписывается в угол β в целое число

раз, действительный критерий подвижности будет меньше, чем вычисленный по формуле, указанной выше, так как после ссыпания материал задерживается в нижней части барабана на время, равное продолжительности подхода очередной лопасти к ссыпающемуся материалу. При 100 % загрузке лопастей материалом ссыпание происходит не из одной точки, а продолжается на некоторой длине дуги окружности. В этом случае критерий подвижности будет характеризоваться средней величиной.

При сушке в барабанной сушилке существенными являются концентрация ссыпающегося материала и периодичность ссыпания. Естественно, что концентрация должна иметь свой оптимум, при котором каждая частица будет свободно обдуваться воздухом и свободно отдавать испарившуюся влагу. Эти показатели зависят от количества материала, находящегося одновременно в сушилке, количества и размеров лопастей, диаметра барабана.

Критерием, который характеризовал бы процесс сушки с учётом перечисленных показателей, является загрузка сушилки – это количество материала, ссыпающегося в единицу времени с погонного метра одной лопасти, отнесенное к площади живого сечения барабана. Загрузку сушилки можно представить следующим выражением:

$$Q = \frac{G \cdot \beta}{36CA l_{\text{пр}}} \cdot \frac{k}{k'}, \quad (8)$$

где G – производительность сушилки, кг/час; A – площадь сечения барабана, м^2 ; k – число лопастей в барабане, шт; k' – число лопастей, охватываемых углом β , шт; $l_{\text{пр}}$ – перемещение материала вдоль сушилки за одно падение с лопасти, м.

$$L_{\text{пр}} = k_l V \tau_{\text{пад}}, \quad (9)$$

где k_l – коэффициент лобового сопротивления частицы потоку воздуха зависит от размеров, формы частицы и вида материала; V – скорость воздуха, м/с.

$$Q = \frac{m}{L F} \cdot \frac{k}{k'} \cdot n, \quad (10)$$

где m – масса материала в барабане, кг; L – длина барабана, м;

Таким образом, выбрано четыре фактора, наиболее значимо влияющих на процесс сушки.

В качестве параметра исследования приняли скорость сушки, основываясь на литературных источниках и гипотезе В.В. Красникова. Для измельченного растительного материала с примерно одинаковым начальным влагосодержанием можно построить обобщенную кривую сушки, если с известным приближением считать критическое влагосодержание независимым от режимов сушки. В этом случае для практического использования обобщенной кривой необходимо знать только одну величину – скорость сушки N , которая зависит от режимов сушки:

$$N = f(t_c; V; Y; Q). \quad (11)$$

Такая постановка вопроса сокращает продолжительность каждого опыта, который не требуется вести до полного высыхания образца. Использование результатов также упрощается, так как вместо кривых сушки, построенных для каждого режима, имеется обобщенная кривая.

Как видно из последнего уравнения, задача исследования сводится к тому, чтобы выявить степень влияния четырех факторов на процесс (скорость) сушки.

План эксперимента построен на основании изложенной в литературе методики [9, 10]. Построенный таким образом план эксперимента обеспечивает сочетание каждого уровня фактора с другими по одному разу.

Диапазон изменения каждого фактора был принят на основании анализа работ существующих сушилок и исследований по данному вопросу. Уровни варьирования всех факторов (приведены в таблице) приняты по «арифметической прогрессии», поскольку заранее не было известно, при каком значении фактора наиболее резко изменятся исследуемые параметры.

Таблица – Уровни варьирования все факторов / Table – Levels of variation all factors

Фактор / Factor	Уровень факторов / Factor level				
	1	2	3	4	5
Температура t , $^{\circ}\text{C}$ (K) / Temperature t , $^{\circ}\text{C}$ (K)	30;(303.15)	50;(323.15)	70;(343.15)	90;(363.15)	110;(383.15)
Скорость V , м/с / Speed V , m/s	1	2	3	4	5
Критерий подвижности Y , с/с / Mobility criterion Y , c/c	0.05	0.08	0.13	0.18	0.20
Загрузка Q , кг/мин / Loading Q , kg/min	1	2	3	4	5

Исследования проводились на экспериментальной сушильной установке, барабан которой был изготовлен по типу существующих барабанных сушилок [1, 4]. Принципиальная особенность работы экспериментальной сушилки состоит в том, что под барабаном предусмотрена обратная транспортерная лента, по которой не высохший и скопившийся в конце барабана материал возвращается в его начало. Это связано с тем, что длина экспериментального барабана ограничена, а предотвратить продвижение материала вдоль него нельзя, особенно при увеличении скорости воздуха и мелко измельченном материале. Такая конструктивная особенность позволила обеспечить равномерное распределение материала по всей длине сушильного барабана.

В опытах были использованы вико-овсяная смесь и разнотравье (в фазах выхода в трубку – начала колошения – бутонизации). Исходная влажность измельченной травы варьировалась от 65 % до 85 %, средняя влажность трав была 75 %.

Результаты и обсуждение. Результаты экспериментов группировались по отдельным факторам в таблицы, откуда определялось среднее геометрическое искомое параметра при средних значениях остальных факторов.

Нанесенные на график средние геометрические точки удовлетворительно описываются кривыми на рисунке 2. При этом наиболее значимым фактором является критерий подвижности и далее по степени убывания значимости – скорость сушильного агента, температура – критерий подвижности и загрузка.

Обработка кривых методом средних величин позволила получить следующие однофакторные зависимости скорости сушки от:

- температуры сушильного агента $N_t = 5 \cdot 10^{-3} t_B^2 - 0.044$;
- скорости сушильного агента $N_V = 0,11 + 0,015V$;
- критерия подвижности $N_Y = Y^{0.84}$;
- загрузки $N_Q = 0.32 \exp(-0.071Q)$.

Поскольку однофакторные зависимости получены по средним геометрическим значениям, общее уравнение регрессии представляет собой произведение этих зависимостей.

Рисунок 2 – Зависимость скорости сушки измельченного разнотравья от температуры t и скорости V сушильного агента, критерия подвижности Y и загрузки сушиллки Q

Figure 2 – Dependence of the drying rate of the crushed herbs on temperature t and the drying agent speed V , mobility criterion Y and dryer load Q

При этом поправочный коэффициент к общему уравнению определяется путем сопоставления расчетных и экспериментальных значений искомого параметра. Тогда зависимость скорости сушки при исследовании четырех факторов будет иметь вид:

$$N = 4.15 \cdot 10^{-2} (t_c^{0.49} \cdot 10^{-5} + 8.8)(1 + 1.36V)Y^{0.84} \exp(-0.071Q). \quad (12)$$

Здесь температура воздуха выражена в К (Кельвинах), скорость – в м/с, критерий подвижности – в с/с, загрузка в г/м²с, при этом скорость сушки получается в процентах убыли влагосодержания за одну секунду.

Средняя погрешность при расчетах по формуле, указанной выше, составляет около 2 %, среднее квадратичное отклонение – 15 %, а корреляционное отношение получилось равным 0,95.

Поскольку для опытов, проводившихся в течение одного дня, необходимо было каждый раз заготавливать исходный материал, начальная влажность в разных опытах не была одинаковой. Среднее влагосодержание измельченной травосмеси составляло 65-85 % при колебании ± 10 %. При построении обобщенной кривой сушки обязательным является условие одинакового начального влагосодержания высушенного материала. Поэтому каждая кривая сушки приводилась к среднему начальному влагосодержанию путем сдвига ее вдоль оси абсцисс на величину, равную продолжительности сушки материала от среднего до действительного начального со знаком плюс или минус.

Использование уравнения регрессии совместно с обобщенной кривой сушки показывает удовлетворительное совпадение расчетной производительности сушки до конечного влагосодержания 17 % с экспериментальной.

Рисунок 3 – Экспериментальный образец барабанной сушилки с инфракрасным источником тепла

Figure 3 – Experimental sample drum dryer with infrared heat source

В Научно-исследовательской лаборатории технологий и технических средств производства кормов из трав Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства филиала федерального научного агроинженерного центра ВИМ был разработан экспериментальный образец инфракрасной сушильной установки барабанного типа с инфракрасным источником тепла (рисунок 3) как одного из элементов комплекса по приготовлению полнорационных сбалансированных кормов.

В данной установке барабан является одновременно ворошителем и транспортером массы. Время пребывания массы травы в сушилке регулируется за счет скорости транспортировки массы с помощью продольного наклона барабана, скорости вращения барабана и скорости вращения вентилятора (для дополнительного отвода влаги от травяной массы и рециркуляции теплоты выделенной стенками барабана).

На данном этапе реализован поисковый эксперимент определения влияния основных факторов на ход процесса сушки, характеризуемый величиной загрузки (q , кг/м²ч) и удельного расхода тепла на испарение влаги (Q , кДж/кг). В результате исследований установлены значения сушки травы влажностью 75-85 %: температура теплоносителя не более 110 °С, температура измельченной растительной массы на выходе из барабана не более 50 °С, скорость воздуха $V=3-5$ м/с и удельная загрузка сушильной камеры не более 3 кг/мин.

За конструктивные параметры сушилки приняты: количество источников излучения – 30 штук; зазор между источником излучения и внутренней стенкой барабана – 400 мм.

В качестве источника излучения для использования в барабанной сушилке выбраны лампы типа ИКЗ мощностью 250 Вт. Установлено, что изменение температуры в зависимости от потребляемой мощности излучателей носит линейный характер, при этом потребляемая мощность в диапазоне температур сушки в 2-2,5 может быть уменьшена.

Установлено, что при номинальной суммарной мощности нагревателя 7,5 кВт·ч максимальная температура растительной массы на выходе 58 °С.

На данном этапе проведены исследования определения влияния основных факторов на процесс сушки, характеризуемый величиной удельной производительности (q , кг/м²ч) и удельного расхода тепла на испарение влаги (Q , кДж/кг).

Рисунок 4 – Графики изменения влагосодержания в растительном сырье и температуры в сушильной камере барабанной сушилки

Figure 4 – Graphs of changes in moisture content in plant materials and temperature in the drying chamber of a drum dryer

На рисунке 4 представлены зависимости влажности травы и температуры воздуха внутри сушилки от времени сушки. После 27 минут сушки скорость влагоотдачи повышается в связи с потерей жизнеспособности клеток растений (происходит испарение внутриклеточной влаги).

В результате исследований получили обоснованные (для рассматриваемых значений факторов) параметры и режимы сушки травы влажностью 75-85 % на входе в сушилку: температура растительной массы не более 58 °С на выходе из сушилки; скорость воздуха $V=3-5$ м/с и удельная загрузка сушильной камеры до 3 кг/мин.

Обсуждение. В настоящее время недостаточно внимания уделяется проектированию новых конструктивно-технологических схем сушильных аппаратов с вращающимся барабаном, и разнообразие конструкций известных сушилок, даже для одного и того же вида материала, свидетельствует о том, что, с одной стороны, можно осуществить выбор того или иного типа сушилки в зависимости от объемов производства высушенного материала, а с другой – что многие технические решения еще далеки от совершенства с позиций гибкости по видам обрабатываемого материала, энергосбережения и материалоемкости, удобства обслуживания и рациональности конструкции.

В дальнейшем работа предусматривает проведение полнофакторного эксперимента с автоматизацией процесса подачи растительной массы в камеру сушилки и автоматизацией процесса сушилки в целом, ее дальнейшее внедрение как элемента комплекса по приготовлению полнорационных сбалансированных кормов из трав.

Выводы. По результатам эксперимента определены оптимальные параметры для некоторых видов травяных смесей влажностью 75-85 % на входе в сушилку: скорость воздуха $V=3-5$ м/с в сушилке, температура растительной массы не более 58 °С на выходе из сушилки и удельная загрузка сушильной камеры до 3 кг/мин.

В дальнейшем необходимо продолжить исследования для других видов растительного сырья с построением математических моделей процессов сушки для бобовых и злаковых трав, определить оптимальные параметры сушилки и показатели инфракрасной сушки трав, обеспечивающие высокое содержание усваиваемой животными энергии корма с сохранением витаминов, разработать системы автоматического управления процессом сушки в барабанной сушилке с инфракрасными источниками тепла.

Таким образом, инфракрасная сушка является эффективным приемом сушки травы для получения витаминных кормовых добавок, которые обеспечивают снижение стоимости сбалансированных кормовых рационов для высокопродуктивных животных за счет снижения энергетических затрат на удаление влаги из травы и сохранение биологически активных ингредиентов в высушенной траве.

Библиографический список

1. Авроров В. А., Смольянова А. П. Модульная барабанная сушилка с ИК нагревом продукта // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2017. № 02 (36)/03 (37). С. 8-14.
2. Алтухов И. В., Федотов В. А., Очиров В. Д. Технология обработки сельскохозяйственного сырья растительного происхождения тепловым излучением: монография. Молодежный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2019. 144 с.
3. Алтухов И. В., Цугленок Н. В. Импульсные излучатели для сушки растительного сырья // Актуальные вопросы аграрной науки. 2018. № 27. С. 5-12. DOI: 10.36718/1819-4036-2019-11-158-164.
4. Барабанная сушилка СБ-3. Доступно по адресу: <http://pcstart.ru/barabannaya-sushilka-sb-3> (по состоянию на 20.01.2020)
5. Зыков А. В., Юнин В. А., Захаров А. М. Использование робототехнических средств в АПК // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. №3 (81). С. 8-11.

6. Adak N., Heybeli N., Ertekin C. Infrared drying of strawberry // *Food Chemistry*. 2017. V. 219. P. 109–116. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.09.103.
7. Distribution of temperature and moisture content fields in a rectangular beet pulp particle during convection drying / A. Ostrikov, A. Shevtsov, A. Drannikov, A. Kvasov // *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2018. Vol. 80. P. 11-19. 10.20914/2310-1202-2018-1-11-19.
8. Doymaz I. Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices // *Journal of Food Science and Technology*. 2012. Vol. 49(6). P. 760–766. doi: 10.1007/s13197-010-0217-8.
9. Effect of drying methods on the antioxidant properties of *pandanus amaryllifolius* / N. Atiqah, A. Mamat, M. Aslam, M. S. Ahmad // *Indian Research Journal of Pharmacy and Science*. 2016. Vol. 3. P. 706-715.
10. Ermakov S., Semenchikov D. On optimization methods in the problems of experiment design // *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2019. Vol. 85. P. 72-77. 10.26896/1028-6861-2019-85-1-I-72-77.
11. Evaluation of different drying systems as an alternative to sun drying for figs (*Ficus carica* L.) / M. C. Villalobos, M. J. Serradilla, A. Martín, C. Pereira, M. López-Corrales, M. G. Córdoba // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2016. Vol. 36. P. 156–165. doi: 10.1016/j.ifset.2016.06.006.
12. Hamacher S. Types of conveyor belts. 2020. 10.1007/978-3-662-59298-4_2.
13. Infrared Drying as a Quick Preparation Method for Dried Tangerine Peel / M. Xu, G. Tian, C. Zhao, A. Ahmad, H. Zhang, J. Bi, H. Xiao, J. Zheng // *Int J Anal Chem*. 2017;2017:6254793. doi: 10.1155/2017/6254793. Epub 2017 Nov 19. PMID: 29348752; PMCID: PMC5734003.
14. Infrared Heating in Food Drying: An Overview / H. R. Muhmmmed, A. B. A. Siti, H. M. Mohd, C. S. Azura // *Drying Technology*. 2015. 33:3, P. 322-335, DOI: 10.1080/07373937.2014.951124.
15. Luthra K., Sadaka S., Atungulu G. Experimental Study of Drying Rough Rice in a Fluidized Bed Exposed to Heating and Hold-up Duration. 2018.
16. Mass Conductivity of Capillary-Porous Colloidal Materials Subjected to Convective Drying / S. Rudobashta, G. Zueva, E. Muravleva, V. Dmitriev // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2018. 91. P. 1-9. 10.1007/s10891-018-1808-x.
17. Muga F., Workneh T. Microwave-assisted forced hot air circulation drying of thin-layer teff (*Eragrostis tef*) // *Journal of Food Agriculture and Environment*. 2018. 16. 10.1234/4.2018.5494.
18. Oliveira S. M., Brandão T. R. S., Silva C. L. M. Influence of Drying Processes and Pre-treatments on Nutritional and Bioactive Characteristics of Dried Vegetables: A Review // *FoodEngineeringReviews*. 2016. Vol. 8(2). P. 134–163. doi: 10.1007/s12393-015-9124-0.
19. Optimization of the Conditions of Convective Drying of Thermosensitive Materials / M. K. Alyzhanov, M. R. Sikhimbayev, S. B. Kuzembayev, K. T. Sherov, D. R. Sikhimbayeva, N. A. Khanov, T. B. Kurmangaliyev, D. E. Elemes, B. S. Donenbayev, M. M. Musaev, T. Buzauova // *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2016. Vol. 46. P. 10-15. 15/jtam-2016-0021.
20. Pulsed infrared radiation for drying raw materials of plant and animal origin / I. V. Buyanova, I. V. Altukhov, N. V. Tsuglenok, O. V. Krieger, E. V. Kashirskih // *Foods and Raw Materials*. 2019. Vol. 7. No. 1. P. 151–160. DOI: <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-1-151-160>.
21. *Stevia rebaudiana* Leaves: Effect of Drying Process Temperature on Bioactive Components, Antioxidant Capacity and Natural Sweeteners / R. Lemus-Mondaca, K. Ah-Hen, A. Vega-Gálvez, C. Honores, N. O. Moraga // *Plant Foods for Human Nutrition*. 2016. Vol. 71(1). P. 49–56. doi: 10.1007/s11130-015-0524-3.
22. Sychevskii V. A. Drying of colloidal capillary-porous materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. 85. P. 740-749. 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.025.
23. Zhang Y., Li Q., Zhou H. Radiation Heat Exchange between Isothermal Surfaces. 2016. 10.1016/B978-0-12-800966-6.00003-X.

Conclusions. According to the results of the experiment, the optimal parameters were determined for some types of herbal mixtures with a humidity of 75 % - 85 % at the inlet of the dryer: air speed $V = 3-5$ m/s in the dryer, the temperature of the plant mass is not more than 58°C at the outlet of the dryer and the specific load of the dryer chambers up to 3 kg/min.

In the future, it is necessary to continue research for other types of plant materials with the construction of mathematical models of drying processes for legumes and cereal grasses, to determine the optimal parameters of the dryer and indicators of infrared drying of grasses, providing a high content of feed energy absorbed by animals with preservation of vitamins, to develop automatic systems control the drying process in a drum dryer with infrared heat sources.

Thus, infrared drying is an effective method of drying grass to obtain vitamin feed additives that reduce the cost of balanced feed rations for highly productive animals by reducing the energy costs of removing moisture from the grass and preserving the biologically active ingredients in the dried grass.

References

1. Avrorov V. A., Smol'yanova A. P. Modul'naya barabannaya sushilka s IK nagrevom produkta // HHI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyaschego plyus. 2017. № 02 (36)/03 (37). P. 8-14.
2. Altuhov I. V., Fedotov V. A., Ochirov V. D. Tehnologiya obrabotki sel'skohozyajstvennogo syr'ya rastitel'nogo proisxozhdeniya teplovym izlucheniem: monografiya. Molodezhnyj: Irkutskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. A. A. Ezhevskogo, 2019. 144 p.
3. Altuhov I. V., Cuglenok N. V. Impul'snye izluchateli dlya sushki rastitel'nogo syr'ya // Aktual'nye voprosy agrarnoj nauki. 2018. № 27. S. 5-12. DOI: 10.36718/1819-4036-2019-11-158-164.
4. Barabannaya sushilka SB-3. Dostupno po adresu: <http://pcstart.ru/barabannaya-sushilka-sb-3> (po sostoyaniyu na 20.01.2020)
5. Zykov A. V., Yunin V. A., Zaharov A. M. Ispol'zovanie robototekhnicheskikh sredstv v APK // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2019. №3 (81). P. 8-11.
6. Adak N., Heybeli N., Ertekin C. Infrared drying of strawberry // Food Chemistry. 2017. V. 219. P. 109–116. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.09.103.
7. Distribution of temperature and moisture content fields in a rectangular beet pulp particle during convection drying / A. Ostrikov, A. Shevtsov, A. Drannikov, A. Kvasov // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2018. Vol. 80. P. 11-19. 10.20914/2310-1202-2018-1-11-19.
8. Doymaz I. Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices // Journal of Food Science and Technology. 2012. Vol. 49(6). P. 760–766. doi: 10.1007/s13197-010-0217-8.
9. Effect of drying methods on the antioxidant properties of pandanus amaryllifolius / N. Atiqah, A. Mamat, M. Aslam, M. S. Ahmad // Indian Research Journal of Pharmacy and Science. 2016. Vol. 3. P. 706-715.
10. Ermakov S., Semenchikov D. On optimization methods in the problems of experiment design // Industrial laboratory. Diagnostics of materials. 2019. Vol. 85. P. 72-77. 10.26896/1028-6861-2019-85-1-I-72-77.
11. Evaluation of different drying systems as an alternative to sun drying for figs (*Ficus carica* L.) / M. C. Villalobos, M. J. Serradilla, A. Martín, C. Pereira, M. López-Corrales, M. G. Córdoba // Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2016. Vol. 36. P. 156–165. doi: 10.1016/j.ifset.2016.06.006.
12. Hamacher S. Types of conveyor belts. 2020. 10.1007/978-3-662-59298-4_2.
13. Infrared Drying as a Quick Preparation Method for Dried Tangerine Peel / M. Xu, G. Tian, C. Zhao, A. Ahmad, H. Zhang, J. Bi, H. Xiao, J. Zheng // Int J Anal Chem. 2017;2017:6254793. doi: 10.1155/2017/6254793. Epub 2017 Nov 19. PMID: 29348752; PMCID: PMC5734003.
14. Infrared Heating in Food Drying: An Overview / H. R. Muhmmmed, A. B. A. Siti, H. M. Mohd, C. S. Azura // Drying Technology. 2015. 33:3, P. 322-335, DOI: 10.1080/07373937.2014.951124.

15. Luthra K., Sadaka S., Atungulu G. Experimental Study of Drying Rough Rice in a Fluidized Bed Exposed to Heating and Hold-up Duration. 2018.
16. Mass Conductivity of Capillary-Porous Colloidal Materials Subjected to Convective Drying / S. Rudobashta, G. Zueva, E. Muravleva, V. Dmitriev // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018. 91. P. 1-9. 10.1007/s10891-018-1808-x.
17. Muga F., Workneh T. Microwave-assisted forced hot air circulation drying of thin-layer teff (*Eragrostis tef*) // Journal of Food Agriculture and Environment. 2018. 16. 10.1234/4.2018.5494.
18. Oliveira S. M., Brandão T. R. S., Silva C. L. M. Influence of Drying Processes and Pre-treatments on Nutritional and Bioactive Characteristics of Dried Vegetables: A Review // FoodEngineeringReviews. 2016. Vol. 8(2). P. 134–163. doi: 10.1007/s12393-015-9124-0.
19. Optimization of the Conditions of Convective Drying of Thermosensitive Materials / M. K. Alyzhanov, M. R. Sikhimbayev, S. B. Kuzembayev, K. T. Sherov, D. R. Sikhimbayeva, N. A. Khanov, T. B. Kurmangaliyev, D. E. Elemes, B. S. Donenbayev, M. M. Musaev, T. Buzauova // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2016. Vol. 46. P. 10-15. 15/jtam-2016-0021.
20. Pulsed infrared radiation for drying raw materials of plant and animal origin / I. V. Buyanova, I. V. Altukhov, N. V. Tsuglenok, O. V. Krieger, E. V. Kashirskih // Foods and Raw Materials. 2019. Vol. 7. No. 1. P. 151–160. DOI: <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-1-151-160>.
21. *Stevia rebaudiana* Leaves: Effect of Drying Process Temperature on Bioactive Components, Antioxidant Capacity and Natural Sweeteners / R. Lemus-Mondaca, K. Ah-Hen, A. Vega-Gálvez, C. Honores, N. O. Moraga // Plant Foods for Human Nutrition. 2016. Vol. 71(1). P. 49–56. doi: 10.1007/s11130-015-0524-3.
22. Sychevskii V. A. Drying of colloidal capillary-porous materials. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. 85. P. 740-749. 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.025.
23. Zhang Y., Li Q., Zhou H. Radiation Heat Exchange between Isothermal Surfaces. 2016. 10.1016/B978-0-12-800966-6.00003-X.

Authors Information

Vyacheslav A. Yunin, Senior Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, p. o. Tiarlevo, Saint Petersburg 196625, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: AAB-7686-2019, ORCID: 0000-0002-8111-1727 **E-mail:** vim_iaep@mail.ru

Anton M. Zakharov, Senior Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, p. o. Tiarlevo, Saint Petersburg 196625, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: S-4113-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3501-0543>, bauermw@mail.ru

Nikolay N. Kuznetsov, Dean of the Faculty of Engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vologda State Dairy Farming Academy by N.V. Vereshchagin” (2 Smidta St, Molochnoe, Vologda, 160555, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6329-9754> **E-mail:** 027781@mail.ru

Andrey V. Zykov, Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, p. o. Tiarlevo, Saint Petersburg 196625, Russia), ResearcherID: A-7155-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3435-7468>, zav35@list.ru

Информация об авторах

Юнин Вячеслав Александрович, старший научный сотрудник, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), кандидат технических наук, ResearcherID: AAB-7686-2019, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8111-1727>. **E-mail:** vim_iaep@mail.ru

Захаров Антон Михайлович, старший научный сотрудник, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), кандидат технических наук, ResearcherID: S-4113-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3501-0543>, bauermw@mail.ru

Кузнецов Николай Николаевич, декан инженерного факультета Вологодской государственной молочнохозяйственной академии имени Н. В. Верещагина (160555, Вологодская область, г. Вологда, с. Молочное, ул. Емельянова, д. 1, каб. 14), кандидат технических наук, доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6329-9754> **E-mail:** 027781@mail.ru

Зыков Андрей Владимирович, научный сотрудник, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), ResearcherID: A-7155-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3435-7468>, zav35@list.ru