

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА ПОДСУШКИ КЛЕЙКОВИННЫХ ШТРАНГОВ

E.V. Fomenko, A.Kh.-Kh. Nugmanov,
R.V. Mutsaev, O.A. Aleksanyan

KINETIC REGULARITIES OF THE PROCESS OF GLUTABLE STRANGES GLOW

Фоменко Е.В. – асп. каф. технологических машин и оборудования Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань.

E-mail: tetatet.78@mail.ru

Нугманов А.Х.-Х. – д-р техн. наук, проф. каф. технологических машин и оборудования Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань.

E-mail: albert909@yandex.ru

Муцаев Р.В. – канд. техн. наук, делопроизводитель каф. технологических машин и оборудования Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань.

E-mail: mr.shatoevskiy@mail.ru

Алексанян О.А. – асп. каф. технологических машин и оборудования Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань.

E-mail: albert909@yandex.ru

Fomenko E.V. – Post-Graduate Student, Chair of Technological Machines and Equipment, Astrakhan State Technical University, Astrakhan.

E-mail: tetatet.78@mail.ru

Nugmanov A.Kh.-Kh. – Dr. Techn. Sci., Prof., Chair of Technological Machines and Equipment, Astrakhan State Technical University, Astrakhan.

E-mail: albert909@yandex.ru

Mutsaev R.V. – Cand. Techn. Sci., Klerk, Chair of Technological Machines and Equipment, Astrakhan State Technical University, Astrakhan.

E-mail: mr.shatoevskiy@mail.ru

Aleksanyan O.A. – Post-Graduate Student, Chair of Technological Machines and Equipment, Astrakhan State Technical University, Astrakhan.

E-mail: albert909@yandex.ru

Уровень и высокие темпы развития вычислительной техники открыли новые возможности для фундаментальных исследований и их приложений в области математического моделирования физических процессов и управления техническими системами. Работа не с самим объектом (явлением, процессом) исследования (например, перемещение сырой клейковины внутри каналов фильеры), а с его моделью дает возможность относительно быстро, с достаточной полнотой и без существенных материальных затрат исследовать его свойства и поведение в различных ситуациях. Необходимость выявления закономерностей внутреннего тепломассопереноса, которое основывается на исследованиях кинетики процесса, очевидна для физико-математического моделирования тепломассообменных процессов гранулирования клейко-

вины пшеничной, в частности анализа механизма влагоудаления в процессе его подсушки при радиационном энергоподводе. Анализ механизма внутреннего массопереноса в процессе влагоудаления клейковинного штранга производится на основании функциональных зависимостей скорости обезвоживания от влажности продукта, получаемых путем математического описания кривой сушки. Кривую скорости подсушки замороженного клейковинного штранга лучше получать в зависимости от концентрации сухих веществ, которая при уменьшении влажности растет. Кинетика исследуемых процессов устанавливает связь между изменением влажности материала во времени и параметрами процесса: свойствами и структурой материала, его размерами, гидродинамическими условиями его протекания и другими факторами. В результате проведе-

ния экспериментальных исследований на данном этапе получены значения целевой функции и проведен анализ кинетики радиационной подсушки, который позволил определить время подсушки, а следовательно, габариты аппарата при рациональных режимных параметрах. Уравнения кинетики описывают процесс удаления влаги из материала во времени и используются для последующего моделирования при определении продолжительности и режимов вакуумной заморозки и подсушки клейковинного штранга.

Ключевые слова: клейковина пшеничная, сушка, тепломассообмен, влагосодержание, вакуумное замораживание.

The level and high rates of computer technology development have opened up new opportunities for fundamental research and their application in the field of mathematical modeling of physical processes and control of technical systems. Working not with the object itself (phenomenon, process) of the research, for example, moving raw gluten inside spinneret channels, but with its model, makes it possible to investigate its properties and behavior in various situations relatively quickly, with sufficient completeness and without significant material costs. The need to identify patterns of internal heat and mass transfer, which is based on studies of the kinetics of the process, is obvious for physical and mathematical modeling of heat and mass transfer processes of wheat gluten granulation, in particular, the analysis of the mechanism of moisture removal during its drying during radiation power supply. The analysis of the mechanism of internal mass transfer in the process of moisture removal of gluten extrusion is based on functional dependences of dehydration rate on moisture content of the product, obtained by mathematical description of the drying curve. Speed curve of drying frozen gluten extrusion is best obtained depending on the concentration of solids, which increases with decreasing humidity. The kinetics of studied processes establishes the relationship between the change in moisture content of the material over time and the process parameters: the properties and structure of the material, its size, hydrodynamic conditions of its flow, and other factors. As a result of experimental studies at this stage, the values of the objective function were obtained and the kinetics of radiation drying

has been analyzed, allowing determining drying time, and, consequently, the dimensions of the apparatus with rational regime parameters. Kinetics equations describe the process of removing moisture from the material over time and are used for subsequent modeling in determining the duration and modes of vacuum freezing and drying gluten extrusion.

Keywords: wheat gluten, drying, heat and mass transfer, moisture content, vacuum freezing.

Введение. Все основные способы описания кинетики процесса сушки [1–4] сформированы на основе дифференциальных уравнений тепломассообмена, решение которых для большинства методов упрощаются экспериментальными исследованиями ввиду их нелинейности. Полуэмпирические способы, в свою очередь, можно разбить на группы, в которых аппроксимируют распределение влагосодержания по толщине объекта сушки или кривую скорости сушки.

Учитывая, что при влагоудалении в тонком слое клейковинного штранга определить изменение влагосодержания по толщине экспериментально практически невозможно, для описания кинетики обезвоживания исследуемого материала целесообразно применить метод построения и математической аппроксимации эмпирических кривых сушки, т.е. зависимость среднего по слою влагосодержания от продолжительности процесса.

Экспериментальные данные для построения кривой сушки для объекта исследования, находящегося в подвешенном состоянии благодаря использованию проволочного крепежа из нержавеющей стали, при пониженном давлении и равномерном ИК-облучении всей поверхности материала, получены с помощью экспериментальной инфракрасной вакуум-сушильной установки.

Цель исследования. Исследование кинетических закономерностей процесса ИК-подсушивания клейковинных штрангов в рабочей вакуумной камере гранулятора.

Задачи: подготовить опытные образцы для экспериментальной сушки, т.е. привести их в соответствие с технологическими требованиями при получении готовых гранул; провести эксперименты по выявлению изменения влажности

от продолжительности процесса сушки на экспериментальной установке и построить кривую сушки, на основе которой получить кривую скорости сушки; используя полученные экспериментально-аналитические данные, рассчитать удельную массу сухого продукта с единицы объема в час.

При проведении лабораторных экспериментов в качестве объекта исследования был использован замороженный в цилиндрической форме из силикона до температуры $t = -3 \text{ }^\circ\text{C}$ клейковинный штранг. Начальная влажность продукта $W_{зам}$ была предварительно рассчитана и при $t = -2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ составляла 58 %, конечная влажность, равная 45 %, принята при визуальной оценке образования корочки на поверхности

продукта. Также в постановочном эксперименте было определено время подсушки для выявления диапазона влажностей, который был разбит на уровни, и в нем была построена кривая сушки.

Наиболее приемлемым для реализации подсушки исследуемого штранга в вакуумной камере является применение ламп КГТ-220-1000 при напряжении $U = 220\text{В}$ ($\lambda_{max} = 1,1\text{мкм}$) и плотности теплового потока $E_n = 4,48 \text{ кВт/м}^2$. В результате проведенных экспериментальных исследований построена кривая радиационной сушки замороженной сырой клейковины, графическая аппроксимация которой представлена на рисунке 1.

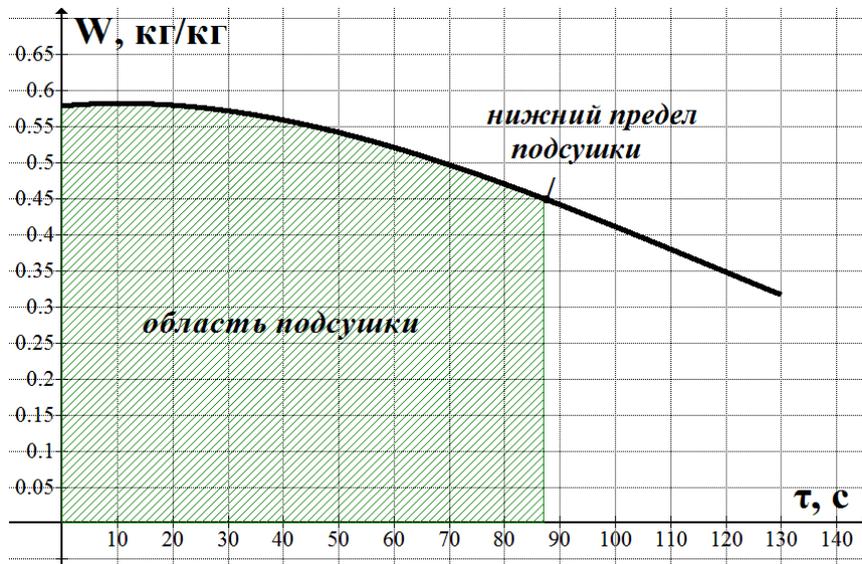


Рис. 1. Кинетика радиационной сушки пищевого материала при начальной температуре штранга, равной 270 К

Сопоставление полученной кривой с результатами аналогичных исследований других авторов, в частности [1, 2, 5, 6], показывает, что полученные опытные данные вполне адекватно коррелируются с ними и, следовательно, могут быть использованы в последующем моделировании исследуемого процесса в сушилке с радиационным подводом теплоты.

Методы и результаты исследования. Анализ механизма внутреннего массопереноса в процессе влагоудаления клейковинного штранга производится на основании функциональных зависимостей скорости обезвоживания от влаж-

ности продукта, получаемых путем математического описания кривой сушки (см. рис. 1). Для удобства математической аппроксимации кривой сушки и описания кривой скорости процесса обезвоживания $\frac{dW}{d\tau} = f(W)$ была получена обратная зависимость $\tau = f(W)$

обратная зависимость $\tau = f(W)$

$$\tau = -8418,5W^3 + 1,022 \cdot 10^4 W^2 - 4385,24W + 759,23, \quad (1)$$

которая представлена графически на рисунке 2.

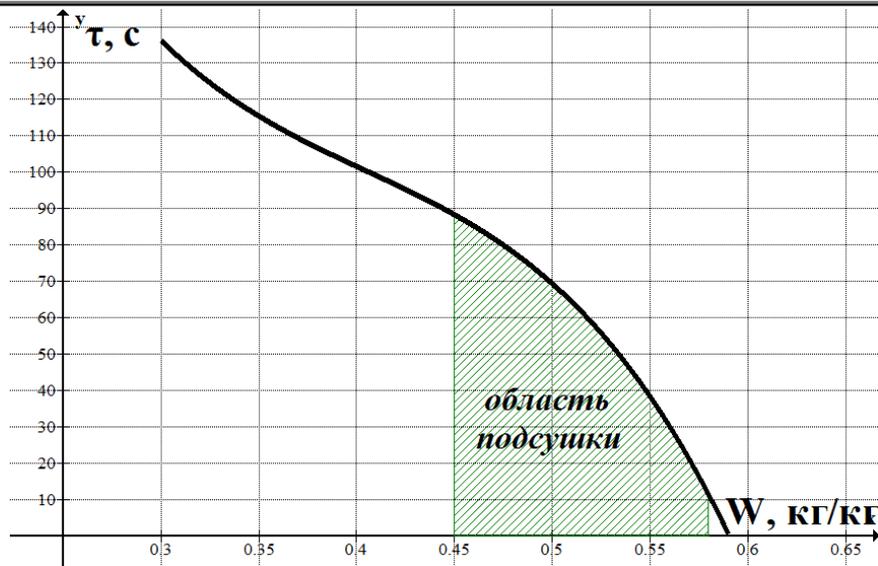


Рис. 2. Обратная зависимость кривой сушки (см. рис. 1)

После дифференцирования зависимости 1 получаем зависимость: $\frac{d\tau}{dW} = f(W)$, а затем, проведя математическое преобразование, получим искомое уравнение, описывающее кри-

вую скорости подсушки замороженного клейковинного штранга: $\frac{dW}{d\tau} = 1/(f(W))$, которое представлено графически (рис. 3).

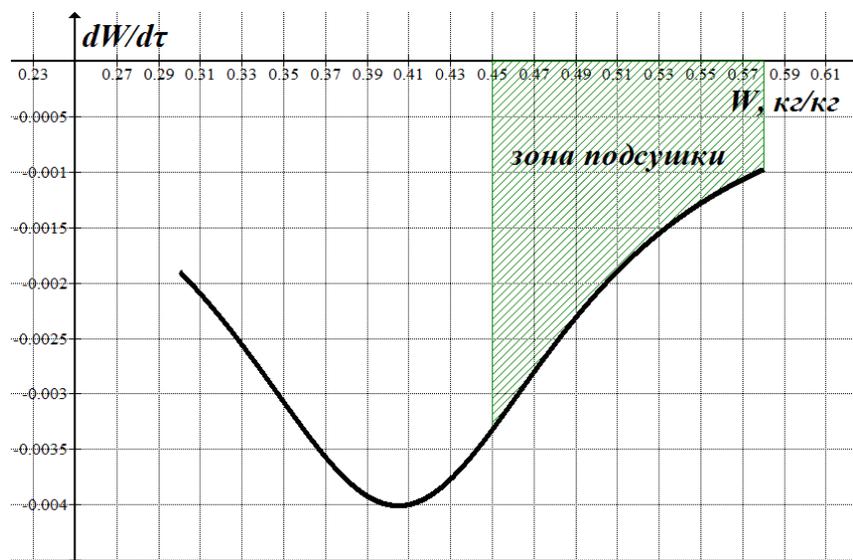


Рис. 3. Кривая скорости сушки $\frac{dW}{d\tau} = 1/(f(W))$

Как видно из рисунка 3, расчетная скорость из зависимости $\frac{dW}{d\tau} = 1/(f(W))$ отрицательна, что связано с уменьшением влажности в процессе подсушки, поэтому кривую скорости подсушки замороженного клейковинного штранга лучше получать в зависимости от concentra-

ции сухих веществ C , которая при уменьшении влажности растет, т.е.

$$\frac{dW}{d\tau} = \frac{d(1-C)}{d\tau} = -\frac{dC}{d\tau} \Rightarrow \frac{dC}{d\tau} = -\frac{1}{f(1-C)}$$

Таким образом, получаем зависимость

$$\frac{dC}{d\tau} = -\frac{1}{f(1-C)};$$

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{1}{25255(1-C)^2 - 20440(1-C) + 4385,24}. \quad (2)$$

На рисунке 4 представлена интегральная кривая скорости подсушки до образования корочки $\frac{dC}{d\tau} = -\frac{1}{f(1-C)}$, которая не постоянна,

так как в поверхностном слое при интенсивном ИК-облучении удаляется и свободная, и связанная влага, а по слою перемещается к поверхности испарения только свободная влага. Следует отметить, что диапазон средней по слою влажности находится за гигроскопической областью и соответствует удалению только свободной влаги, в результате этого, а также ввиду небольшого количества удаленной влаги в поверхностном слое энергией на преодоление связи можно пренебречь.

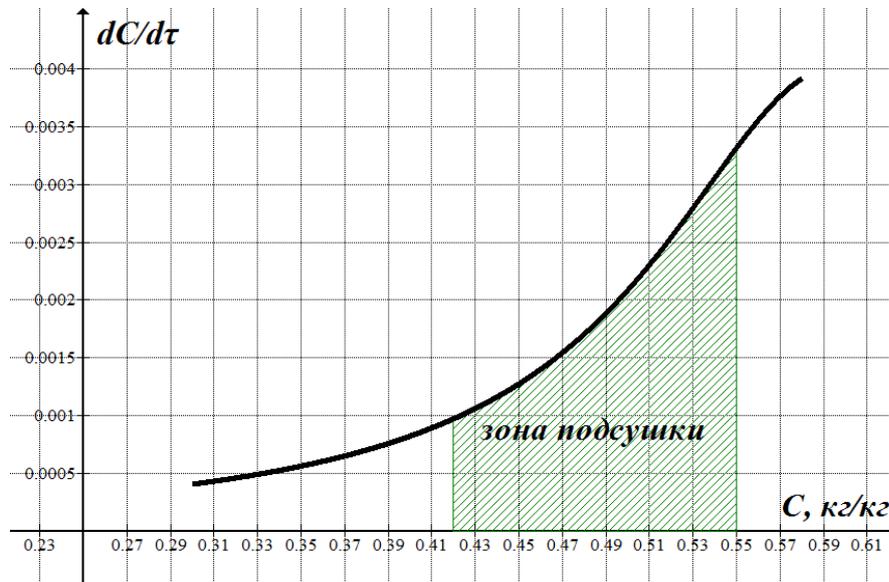


Рис. 4. Кривая скорости сушки $\frac{dC}{d\tau} = -\frac{1}{f(1-C)}$

Анализ результатов экспериментальных исследований кинетики радиационной сушки показал, что на кривой скорости наблюдается характерный первый период обезвоживания, который не противоречит основным положениям теории сушки [2, 7–9] и также подтверждается рядом работ [5, 6].

Первый период соответствует росту скорости обезвоживания в результате удаления преимущественно свободной влаги с поверхности объекта исследования при заданных режимных параметрах объемного радиационного энергоподвода. В результате интенсивного испарения в первом периоде исключается перегрев продукта, происходит уменьшение объема исходного материала и формируется твердая структура поверхности.

В этом периоде при радиационном обезвоживании оптически тонкого материала на характер протекания тепломассообменных процессов могут оказывать влияние процессы формирования капиллярно-пористого тела на поверхности, что объясняет непостоянство скорости и, как следствие, температуры материала.

Таким образом, удельная производительность гранулятора или съем готового к гранулированию штранга с единицы объема рабочей камеры в час Y , кг/(м³·ч), при выбранных и приведенных выше параметрах будет рассчитываться из соотношения

$$Y = \frac{m_{um} \cdot n}{V \cdot (\tau_{зам} + \tau_{суш})}, \quad (3)$$

где $m_{шт}$ – масса штранга, конечная влажность которой составляет 45 %, кг; V – объем вакуумной рабочей камеры, м³; τ – продолжительность технологического процесса, включающего время на заморозку и подсушку штранга, ч; n – количество одновременно формируемых штрангов, шт.

Продолжительность технологического процесса, включающего время на заморозку и подсушку штранга, согласно данным (рис. 1, 2, 5), составляет

$$\tau = \tau_{зам} + \tau_{суш} = \frac{0,011 + 88}{3600} = 0,024 \text{ ч.}$$

Масса штранга, конечная влажность которой составляет 45 %, рассчитывается

$$m_{шт} = \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \rho = \pi \cdot r^2 \cdot w_{ср} \cdot \tau \cdot \rho;$$

$$m_{шт} = 3,14 \cdot 0,004^2 \cdot 0,011 \cdot 88,011 \cdot 1055 = 0,0513 \text{ кг,}$$

где r – радиус фильеры, м; h – высота штранга, м; $w_{ср}$ – средняя скорость движения штранга в камере, м/с; ρ – плотность клейковинного штранга при температуре -2,5 °С, кг/м³.

Объем вакуумной рабочей камеры рассчитывается исходя из принятых конструктивных решений по установке ламп излучения и формовочного диска на 8 штрангов (рис. 5).

$$V = \pi(20d_{\phi})^2 w_{ср} \cdot \tau = 3,14 \cdot 400 \cdot 0,008^2 \cdot 0,011 \cdot 88,011 = 0,078 \text{ м}^3.$$

Тогда удельная производительность гранулятора, рассчитанная из соотношения (3), будет равна

$$Y = \frac{m_{шт} \cdot n}{V \cdot (\tau_{зам} + \tau_{суш})} = \frac{0,0513 \cdot 8 \cdot 3600}{0,078 \cdot 88,011} \approx 215 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{час}}.$$

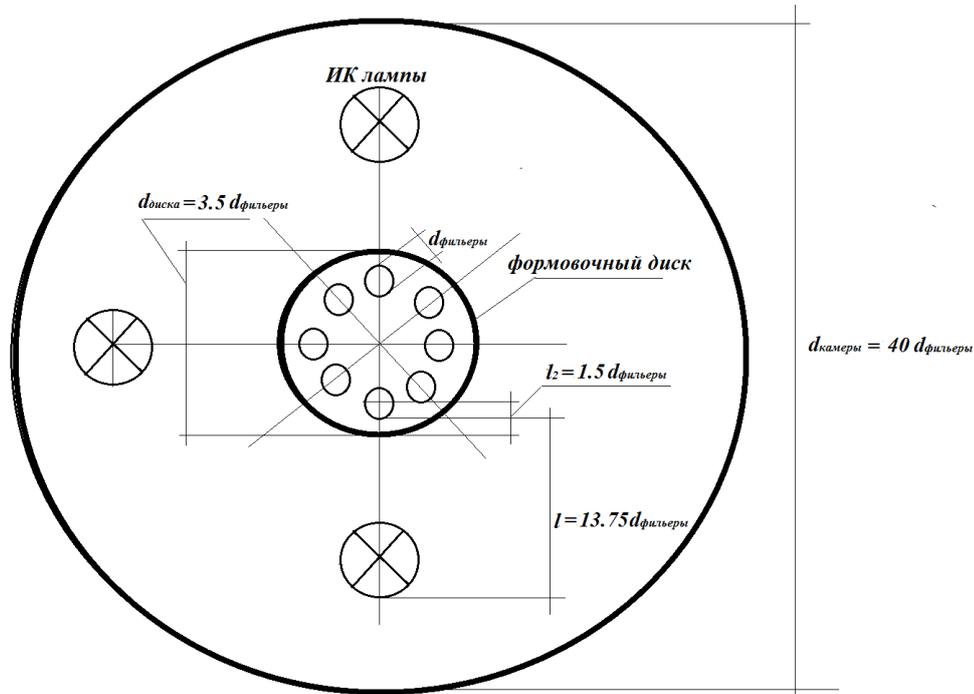


Рис. 5. Схема расположения ИК-излучателей

Выводы

1. Выбран рациональный способ подготовки опытных образцов для проведения экспериментальных исследований.

2. На основе экспериментально построенной кривой сушки была проведена её аппроксимация

и получена математическая зависимость

$$\frac{dW}{d\tau} = 1 / (f(W)).$$

3. В результате проведения экспериментальных исследований на данном этапе получены значения целевой функции Y и проведен анализ кинетики радиационной подсушки, кото-

рый позволил определить время подсушки, а следовательно, габариты аппарата при рациональных режимных параметрах.

9. *Льков А.В.* Тепло- и массообмен в процессах сушки. – М.: Гостоптехиздат, 1956. – 464 с.

Литература

1. *Алексамян И.Ю.* Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2001. – 52 с.
2. *Алексамян И.Ю., Буйнов А.А.* Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование. – Астрахань: АГТУ, 2004. – 380 с.
3. *Пахомов А.Н., Волостных С.Г., Ельцов А.Г.* [и др.]. Влияние температуры сушильного агента на кинетику сушки суспензий и кристаллообразующих растворов в кипящем слое бинарного инерта // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 4-1. – С. 90–93.
4. *Пахомов А.Н., Гапанова Н.Ц., Пахомова Ю.В.* Моделирование и расчет кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2016. – 160 с.
5. *Никулина М.А.* Совершенствование процесса инфракрасной сушки пищевой съедобной пленки: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2019. – 150 с.
6. *Максименко Ю.А.* Развитие научно-практических основ и совершенствование процессов сушки растительного сырья в диспергированном состоянии: дис. ... д-ра техн. наук. – Астрахань, 2016. – 502 с.
7. *Алексамян И.Ю., Максименко Ю.А.* Интенсификация процессов сушки продуктов микробиологического синтеза. Теория и практика сушки в диспергированном состоянии. – Germany, Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2011. – 273 с.
8. *Льков А.В.* Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 471 с.

Literatura

1. *Aleksanjan I.Ju.* Razvitie nauchnyh osnov processov vysokointensivnoj sushki produktov zhivotnogo i rastitel'nogo proishozhdenija: avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk. – М., 2001. – 52 s.
2. *Aleksanjan I.Ju., Bujnov A.A.* Vysokointensivnaja sushka pishhevyh produktov. Penosushka. Teorija. Praktika. Modelirovanie. – Astrahan': AGTU, 2004. – 380 s.
3. *Pahomov A.N., Volostnyh S.G., El'cov A.G.* [i dr.]. Vlijanie temperatury sushil'nogo agenta na kinetiku sushki suspenzij i kristalloobrazujushhih rastvorov v kipjashhem sloe binarnogo inerta // Aktual'nye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk. – 2015. – № 4-1. – S. 90–93.
4. *Pahomov A.N., Gatapova N.C., Pahomova Ju.V.* Modelirovanie i raschet kinetiki sushki zhidkih dispersnyh produktov na podlozhkah. – Tambov: Izd-vo TGTU, 2016. – 160 s.
5. *Nikulina M.A.* Sovershenstvovanie processa infrakrasnoj sushki pishhevoj s'edobnoj plenki: dis. ... kand. tehn. nauk. – SPb., 2019. – 150 s.
6. *Maksimenko Ju.A.* Razvitie nauchno-prakticheskikh osnov i sovershenstvovanie processov sushki rastitel'nogo syr'ja v dispergirovannom sostojanii: dis. ... d-ra tehn. nauk. – Astrahan', 2016. – 502 s.
7. *Aleksanjan I.Ju., Maksimenko Ju.A.* Intensifikacija processov sushki produktov mikrobiologicheskogo sinteza. Teorija i praktika sushki v dispergirovannom sostojanii. – Germany, Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2011. – 273 s.
8. *Lykov A.V.* Teorija sushki. – М.: Jenergija, 1968. – 471 s.
9. *Lykov A.V.* Teplo- i massoobmen v processah sushki. – М.: Gostoptehizdat, 1956. – 464 s.