

Возможности совершенствования распылительной сушки пищевых суспензий

Г. В. Алексеев*, О. А. Егорова, Д. Молдованов, А. Н. Егоров

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики»,
197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49

Дата поступления в редакцию: 21.11.2018

Дата принятия в печать: 21.03.2019

*e-mail: gva2003@mail.ru



© Г. В. Алексеев, О. А. Егорова, Д. Молдованов, А. Н. Егоров, 2019

Аннотация. В настоящее время при получении порошкообразных продуктов из суспензий применяется распылительная сушка, как наиболее эффективный вид сушки таких сред. Сложность процесса сушки связана с проблемами термической деструкции составляющих. Это значительно ухудшает свойства продукта и накладывает значительные ограничения на температурные режимы. Целью работы является моделирование переходных режимов работы соленоидов для создания управляемого эффекта кавитации при наложении на струю акустических колебаний при использовании магнитострикционных генераторов ультразвука. В работе приведена предполагаемая конструкция распылительной форсунки для сушки суспензий со встречно включенными соленоидами, которые при разряде тока вызывают деформирование главной магистрали подачи суспензии. От динамики срабатывания соленоидов зависит интенсивность срабатывания кавитационных процессов. При моделировании процесса работы соленоидов предполагается, что основным критерием изменения интенсивности кавитации является средняя скорость изменения объема кавитационной полости в стадии ее захлопывания, отнесенная к одному циклу колебаний для сферической полости, и что повышение статического давления жидкости приводит к сдвигу фазы захлопывания кавитационной полости. В рамках выбранной математической модели был проведен численный эксперимент с моделированием в программе MathCAD, который выявил зависимости изменения $U(t)$, $L(t)$, $R(t)$. Полученные исследования позволяют прогнозировать балластные индукционную и активную нагрузку (R , L) для управления переходными процессами в соленоиде ультразвукового генератора. Данные зависимости дают возможность подобрать более эффективные параметры для сушки суспензий, что особенно важно для термочувствительных компонентов.

Ключевые слова. Распылительная сушка, форсунка, ультразвук, кавитация, пищевая суспензия, MathCAD

Для цитирования: Возможности совершенствования распылительной сушки пищевых суспензий / Г. В. Алексеев, О. А. Егорова, Д. Молдованов [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2019. – Т. 49, № 1. – С. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-70-76>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/>

Spray Drying of Food Suspensions: Upgrading Capabilities

G.V. Alekseev*, O.A. Egorova, D. Moldovanov, A.N. Egorov

Saint Petersburg National Research University of
Information Technologies, Mechanics and Optics,
49, Kronverksky Ave., St. Petersburg, 197101, Russia

Received: November 21, 2018

Accepted: March 21, 2019

*e-mail: gva2003@mail.ru



© G.V. Alekseev, O.A. Egorova, D. Moldovanov, A.N. Egorov, 2019

Abstract. Spray drying is currently used to obtain powder products from suspensions. It is considered the most effective type of drying for such media. The complexity of the drying process is associated with thermal destruction of components, which degrades the properties of the product and imposes significant restrictions on temperature condition. The present research features the simulation of transient modes of operation of the solenoids to generate a controlled cavitation effect when applied to a stream of acoustic vibrations using a magnetostrictive generator of ultrasound. The authors propose a new design of spray nozzle for drying suspensions with counter-connected solenoids. Such solenoids can cause deformation of the main suspension supply line. The intensity of the cavitation processes depends on the dynamics of the solenoid actuation. The paper introduces a mathematical modeling of transient modes of operation for ultrasonic frequency generator solenoids that create a controlled cavitation effect when applied to the jet of acoustic oscillations of this frequency. When modeling the process of operation of solenoids, the main criterion for changing the intensity of cavitation is the average rate of change in the volume of the cavity at the stage of its collapse,

related to one cycle of oscillations for a spherical cavity. An increase in the static pressure of the liquid led to a shift in the phase of the collapse of the cavity. As a result of the chosen mathematical model, a numerical experiment with modeling in the MathCAD program was carried out. It revealed some graphical dependences of the change in $U(t)$, $L(t)$, and $R(t)$. The obtained data allow one to predict the ballast induction and active load (R , L) for the control of transients in the solenoid of the ultrasonic generator. These dependences make it possible to choose more effective parameters for drying suspensions, which is especially important for heat-sensitive components.

Keywords. Spray drying, nozzle, ultrasound, cavitation, pectin, MathCAD

For citation: Alekseev GV, Egorova OA, Moldovanov D, Egorov AN. Spray Drying of Food Suspensions: Upgrading Capabilities. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(1):70–76. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-70-76>.

Введение

Работу предприятий пищевой промышленности в настоящее время трудно представить без использования различных пищевых добавок, чаще всего используемых в виде порошков [1]. Само производство таких порошков, как правило получаемых из вторичных пищевых продуктов, сопряжено с процессами экстракции и последующей сушки получаемых суспензий [2].

При увеличении относительной скорости движения фаз теплообмен улучшается. Вследствие этого, с одной стороны, отношение поверхности к объему и время контакта фаз для крупных капель малы. С другой стороны, с уменьшением размера капель уменьшается и скорость охлаждения и конденсации пара по причине их быстрого прогрева и наличия в теплоносителе неконденсирующихся газов. Очевидно, что должен существовать некоторый промежуточный размер капель, для которого условия теплоотдачи будут оптимальны [3–5].

Тепло- и массоперенос при распыление осуществляется на поверхности фаз. Движение капли происходит в среде, которая представляет собой смесь воздуха и насыщенного водяного пара. Компоненты смеси имеют одинаковую температуру [6].

На подогрев воды в капле затрачивается тепло. После прогрева всего объема воды капля приобретает тепловую инертность [7].

Исходя из способа подвода энергии, процесс распыления делят на гидравлическое, механическое, пневматическое, электростатическое, ультразвуковое, пульсационное, распыление с предварительным газонасыщением, электрогидравлическое и комбинированное распыление.

При распылении происходит распад жидкости. Это обусловлено капиллярными силами, турбулентной пульсацией, кавитацией и внешними инерционными силами.

Разрушение струи происходит вследствие развития в ней колебательных процессов, которые образуются под воздействием аэродинамической силы и внутренних возмущений.

При ультразвуковом распылении увеличение поверхностной энергии струи достигается путем наложения на нее акустических колебаний ультразвуковой частоты [8–11].

Как правило, применяются два способа подвода к жидкостной струе высокочастотного колебания: с помощью пьезоэлектрических и магнитоэлектрических генераторов [12]. Можно предположить, что в таких форсунках основную роль при распаде жид-

кости играет кавитация. Критерием интенсивности кавитации является средняя скорость изменения объема кавитационной полости в стадии ее захлопывания, отнесенная к одному циклу колебаний для сферической полости. Этот критерий определяется зависимостью:

$$\chi = \left(\frac{R_{max}}{R_{min}} \right)^3 \Delta t \times f. \quad (1)$$

Повышение статического давления жидкости приводит к сдвигу фазы захлопывания кавитационной полости. В результате возрастает интенсивность ударной волны, возникающей в конечной стадии сжатия, что дает возможность управлять кавитацией. Некоторые авторы считают, что кавитация может являться основным процессом, определяющим дробление жидкости даже при обычном гидравлическом распыливании [13].

В предлагаемой конструкции распылительной форсунки для сушки (рис. 1) (например, молока, пектина, инулина или других пищевых добавок или основного сырья), жестко соединенные с ферромагнитной подающей суспензию магистралью (2),

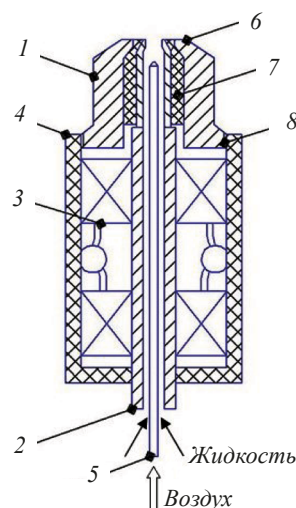


Рисунок 1 – Форсунка для распыления суспензии для сушки пищевых порошков: 1 – неметаллическая трубка для подачи горячего воздуха; 2 – ферромагнитная трубка для подачи суспензии; 3 – встречно включенные соленоиды; 4 – немагнитный корпус; 5 – сопло; 6 – форсунка; 7 – демпфирующий элемент; 8 – резьбовое соединение

Figure 1 – Nozzle for suspension spray for food powders drying: 1 – non-metallic tube for hot air supply; 2 – ferromagnetic tube for suspension feeding; 3 – counter-on solenoids; 4 – non-magnetic frame; 5 – nozzle; 6 – injector; 7 – damping element; 8 – threaded connection

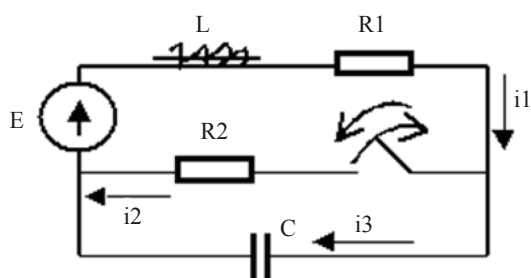


Рисунок 2 – Расчетная схема для определения реакции цепи. E – источник тока, L – катушка индуктивности, R₁ и R₂ – сопротивление, C – конденсатор

Figure 2 – Scheme for determining the reaction chain. E – current source, L – inductor, R₁ and R₂ – resistance, C – capacitor

встречно включенные соленоиды (3) при разряде тока вызывают мгновенную деформацию магистрали (2), которая заключена в корпус (4), к которому крепится цилиндрическое сопло с форсункой (6). Это соединение через демпфирующий элемент (7) посредством резьбы (8) обеспечивает герметичность конструкции, по оси которой через неметаллическую трубу подается горячий воздух [14–17].

Результаты и их обсуждение

Интенсивность кавитационных процессов зависит от динамики срабатывания соленоидов. Оценим возможность влияния на этот процесс путем процесса замыкания и размыкания цепи соленоидов.

Известно, что электрические импульсы могут возникать при определенных обстоятельствах в переходных процессах, происходящих при включении или выключении сетей, содержащих емкостную и индуктивную нагрузки [21].

Для выявления таких условий смоделируем ее работу для простейшей схемы включения указанных нагрузок.

Будем определять реакцию цепи для схемы (рис. 2), параметры которой: R₁ = 10 Ом, R₂ = 20 Ом, L = 0,02 Гн, C = 50 × 10⁻⁶, E = 100 В, t₁ = 0,02 с.

Если воздействие, задаваемое электродвижущей силой источника напряжения или током, постоянно и равно, то определить реакцию электрической цепи можно таким образом:

$$e(t) = 100 \text{ В}, \quad (2)$$

$$I(t) = 1 \text{ А}. \quad (3)$$

Как правило, этот расчёт выполняют классическим методом [18–20].

Часто при компьютерных расчетах эту же реакцию при заданном воздействии определяют операторным методом.

Для реализации такого подхода строят зависимость искомой реакции от времени на промежутке времени

$$t = (4 - 5)\tau. \quad (4)$$

Если корни характеристического уравнения p₁ и p₂ действительные и различные, то

$$\tau = \frac{1}{|p_{\min}|}, \quad (5)$$

где p_{min} – наименьший из корней p₁ и p₂.

В случае комплексно-сопряжённых корней характеристического уравнения:

$$p_{1,2} = a + j\omega, \quad (6)$$

$$\tau = \frac{1}{|a|}. \quad (7)$$

Независимо от того какую реакцию требуется определить, рекомендуется определить ток в индуктивном элементе или напряжение на емкостном элементе (I_L или U_C). Искомую реакцию удобно выразить позже, используя законы Кирхгофа для мгновенных значений цепи после коммутации [21].

Для расчёта операторным методом предлагается следующий порядок расчёта:

– изображается операторная схема замещения заданной электрической цепи в режиме после коммутации. Значение I_L(0₊) и U_C(0₊) взяты из предыдущего расчёта;

– к операторной схеме применяется любой из известных методов расчёта сложной резистивной цепи (метод, основанный на законах Кирхгофа, метод контурных токов или метод узловых потенциалов) и определяется изображение по Лапласу искомой величины (I(p) или U(p));

– к полученному выражению применяем теорему разложения и записываем зависимость от времени реакции цепи I(t) или U(t).

Представим уравнения для цепи (рис. 2) в состоянии после коммутации.

В разомкнутом состоянии:

$$i_1 = i_3, \quad (8)$$

$$i_2 = 0, \quad (9)$$

$$E = L \times \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + U_c, \quad (10)$$

$$i_3 = C \frac{dU_c}{dt}. \quad (11)$$

Следовательно, в разомкнутом состоянии имеем:

$$L \times \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + U_c = E, \quad (12)$$

$$i_1 = C \frac{dU_c}{dt}. \quad (13)$$

В замкнутом состоянии:

$$i_1 = i_2 + i_3, \quad (14)$$

$$E = L \times \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + R_2 i_2, \quad (15)$$

$$R_2 i_2 = 0, \quad (16)$$

$$i_3 = C \frac{dU_c}{dt}. \quad (17)$$

Следовательно, в замкнутом состоянии имеем:

$$L \times \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + R_2 i_2 = E, \quad (18)$$

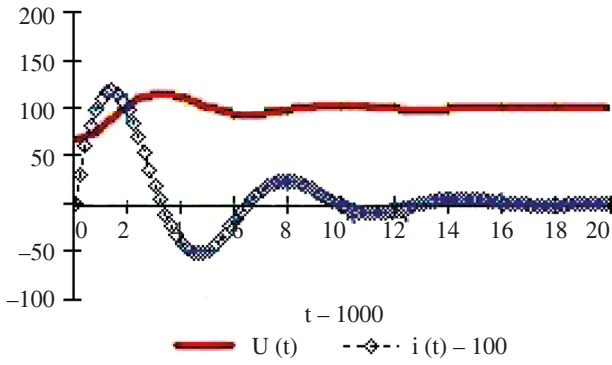


Рисунок 3 – Характер крутизны импульса в условиях размыкания цепи:

Figure 3 – The nature of the pulse tilt in the open circuit conditions

$$C \frac{dU_c}{dt} = i_1 - \frac{U_c}{R_2}. \quad (19)$$

Граничные условия при $t = 0$:

– перед коммутацией:

$$i_1(0) = 0, \quad (20)$$

$$U_c(0) = E; \quad (21)$$

– в условиях замкнутой цепи:

$$\frac{dU_c}{dt} = 0, \quad (22)$$

$$U_c(0) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E; \quad (23)$$

– в условиях разомкнутой цепи:

$$i_1(0) = \frac{E}{R_1 + R_2}, \quad (24)$$

$$\frac{dU_c}{dt} = 0. \quad (25)$$

Данные уравнения позволяют найти падение напряжения на конденсаторе U_c и точки i_1, i_2, i_3 во всех ветвях электрической цепи.

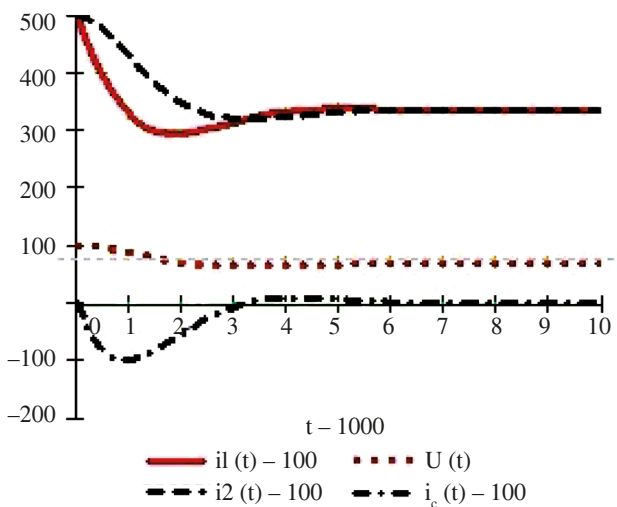


Рисунок 4 – Характер крутизны импульса в условиях замыкания цепи

Figure 4 – The nature of the pulse tilt in the close-in circuit conditions

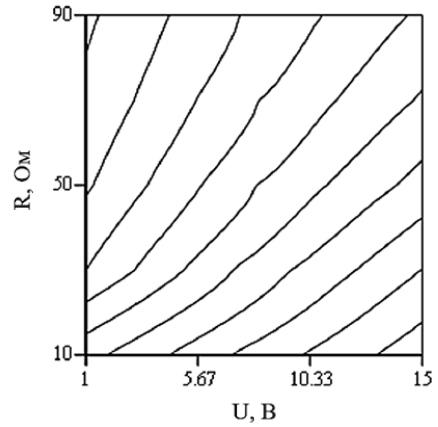


Рисунок 5 – Изменения напряжения от времени $U(t)$ (0–15) и балластного сопротивления $R(t)$ (10–90)

Figure 5 – Voltage changes according to time $U(t)$ (0–15) and ballast resistance $R(t)$ (10–90)

Учитывая сделанные замечания, проведем численный эксперимент с помощью программы Mathcad, реализующий описанный метод расчета, изменяя параметры сопротивлений и индуктивности:

Размыкание:

$$\text{Given } L \times C \times \frac{di_1^2}{dt^2} U(t) + R1 \times C \frac{di_1}{dt} U(t) + U(t) = E, \quad (26)$$

$$U'(0) = 0, U(0) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E, \quad (27)$$

$$U := \text{odesolve}(t, t_1, 100)$$

$$t := 0, \frac{t_1}{100} .. t_1 i(t) := C \times \frac{d}{dt} U(t). \quad (28)$$

Замыкание:

$$\text{Given } L \times C \times \frac{di_1^2}{dt^2} U(t) + \left(R1 \times C + \frac{L}{R2} \right) \frac{d}{dt} U(t) + \left(\frac{R1}{R2} + 1 \right) \times U(t) = E, \quad (29)$$

$$U' = 0 \quad U(0) = E, \quad (30)$$

$$U := \text{odesolve}(t, t_1, 1000) \quad t := 0, \frac{t_1}{100} .. t_1, \quad (31)$$

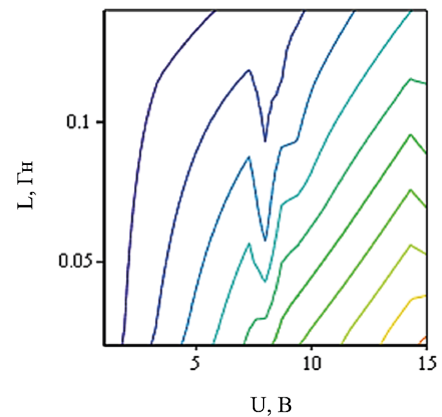


Рисунок 6 – Изменения напряжения от времени $U(t)$ (0–15) и балластной индуктивности $L(t)$ (0,02–0,14)

Figure 6 – Voltage changes according to time $U(t)$ (0–15) and ballast inductance $L(t)$ (0.02–0.14)

$$i_c(t) := C \times \frac{d}{dt} U(t) i_1(t) := i_c(t) + \frac{U(t)}{R2} i_2(t) := \frac{U(t)}{R2}. \quad (32)$$

Повторяя процедуры вычислений для других значений параметров можно получить следующие зависимости, графики которых представлены ниже [8].

Выводы

Полученные зависимости, отраженные на рис. 3, свидетельствуют о постепенном уменьшении напряжения в сети при ее размыкании, но говорят и о наличии некоторого критического значения сопротивления, при котором в начальный момент времени напряжение достигает максимального значения.

Другой важный вывод можно сделать об изменении напряжения при изменении индуктивности. Напряжения в цепи растут по мере увеличения времени и индуктивности (рис. 5), но существует критическое время резкого его скачка по величине.

Полученные результаты позволяют прогнозировать параметры сети содержащей балластные, индукционную и активную нагрузку (R, L) для управления переходными процессами в ней. Такие меры могут, например, обеспечить создание нужного электрического импульса в соленоидах распылительной форсунки и способствовать подбору более эффективных режимов сушки суспензий.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Амброзевич, Е. Г. Особенности европейского и азиатского подходов к ингредиентам для продуктов здорового питания / Е. Г. Амброзевич // Пищевая промышленность. – 2005. – № 4. – С. 12–13.
2. Особенности сушки порошковых пищевых продуктов в псевдооживленном режиме / Г. В. Алексеев, О. А. Егорова, А. Г. Леу [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2017. – Т. 5, № 4. – С. 34–40.
3. Кинетика распылительной сушки растительных материалов / Ю. А. Максименко, Ю. С. Феклунова, Э. Р. Теличина [и др.] // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2016. – Т. 11, № 3. – С. 77–82.
4. Муканов, Р. В. Разработка электростатического способа диспергирования жидких сред / Р. В. Муканов, В. Я. Свинцов // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, № 1 (112). – С. 44–52.
5. Голованов, А. Н. О влиянии периодических пульсаций газа-охлаждителя на характеристики теплообмена в системе пористого охлаждения / А. Н. Голованов, Е. В. Рулёва // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2011. – Т. 14, № 2. – С. 85–90.
6. Алексанян, И. Ю. Математическое моделирование тепломассопереноса при распылительной сушке растительных экстрактов / И. Ю. Алексанян, Ю. А. Максименко, Ю. С. Феклунова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2013. – № 1. – С. 9–13.
7. Хабибов, Ф. Ю. Интенсификация процесса сушки сельхозпродуктов комбинированным методом подвода энергии / Ф. Ю. Хабибов, Х. Ф. Джураев, О. Р. Абдурахмонов // Пищевая промышленность. – 2013. – № 7. – С. 24–25.
8. Исследование процесса сушки диспергированных материалов с применением акустических полей / Б. С. Сажин, О. С. Кочетов, В. Б. Сажин [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2009. – Т. 101, № 8. – С. 113–122.
9. Исследование процессов сушки диспергированных материалов с применением акустических форсунок / Б. С. Сажин, О. С. Кочетов, В. Б. Сажин [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2008. – Т. 84, № 4. – С. 118–123.
10. Интенсификация процессов сушки диспергированных материалов путем применения акустических полей в режимах работы распыливающих и улавливающих устройств / О. С. Кочетов, В. Б. Сажин, Л. Я. Живайкин [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т. 75, № 7. – С. 41–45.
11. Бородина, Е. С. Повышение эффективности процессов сушки путем применения физических полей / Е. С. Бородина, О. С. Кочетов // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. – 2014. – № 10. – С. 155–160.
12. Царахова, Э. Н. Интенсификация технологических процессов с помощью ультразвука / Э. Н. Царахова, Д. Г. Касьянов, Н. А. Одинец // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 2010. – Т. 314–315, № 2–3. – С. 122–123.
13. Кондратов, А. В. О модели развития кавитационной полости при измельчении пищевого сырья / А. В. Кондратов, Е. И. Верболюз, Г. В. Алексеев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2007. – № 11. – С. 27–29.
14. Сошенко, М. В. Применение физических полей, реализуемых акустическими форсунками, для процессов сушки распыливанием / М. В. Сошенко, М. В. Лебедева, О. С. Кочетов // Инновационная наука. – 2017. – № 5. – С. 63–65.
15. Шмырев, Д. В. Характеристики акустических систем, используемых в конструкциях форсунок аппаратов распылительной сушки / Д. В. Шмырев, Е. В. Коверкина, О. С. Кочетов // Символ науки. – 2017. – Т. 2, № 3. – С. 142–144.
16. Федорченко, И. А. Численное моделирование частотных характеристик струйных процессов в сушильной камере / И. А. Федорченко // Вестник ННГУ. – 2011. – № 4–3. – С. 1209–1211.
17. Распылительная сушилка / И. Ю. Алексанян, Ю. А. Максименко, О. Е. Губа [и др.] // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 55–59.

18. Гетия, И. Г. Исследования вихревой распылительной сушилки для дисперсных материалов / И. Г. Гетия // Инновационная наука. – 2015. – № 10–1. – С. 55–58.
19. Алексеев, Г. В. Использование математического моделирования для ресурсосберегающих пищевых производств / Г. В. Алексеев, О. И. Аксенова // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2014. – № 3. – С. 1–10.
20. Критериальное уравнение процесса акустического распыления жидких и пастообразных пищевых продуктов / О. А. Петровичев, Ю. А. Максименко, С. В. Сinyaк [и др.] // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2014. – Т. 58, № 2. – С. 102–105.
21. Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники / К. С. Демирчян. – СПб. : Питер, 2009. – 432 с.

References


1. Ambrozevich EG. Osobennosti evropeyskogo i aziatskogo podkhodov k ingredientam dlya produktov zdoro-vogo pitaniya [European and Asian approaches to healthy food ingredients]. Food processing industry. 2005;(4):12–13. (In Russ.).
2. Alekseev GV, Egorova OA, Leeuw AG, Derkanosova AA. Specifics of powdered food products' drying in a fluidized mode. Bulletin of South Ural State University. Series: Food and Biotechnology. 2017;5(4):34–40. (In Russ.).
3. Maksimenko YuA, Feklnova YuS, Telichkina ER, Pshenichnaya NE. Kinetics of spray drying plant materials. Technologies of food and processing industry of AIC – healthy food. 2016;11(3):77–81. (In Russ.).
4. Mukanov RV, Svintsov VYa. Developing electrostatic method of liquid medium dispersion. Vestnik MGSU. 2018;13(1)(112):44–52. (In Russ.).
5. Golovanov AN, Rulyova EV. On the influence of periodic pulsations of a gas-cooler on heat exchange characteristics in a system of porous cooling. Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. 2011;14(2):85–90. (In Russ.).
6. Aleksanyan IYu, Maksimenko YuA, Feklnova YuS. Mathematical modeling of heat and mass transfer from spray drying of plant extracts. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics. 2013;(1):9–13. (In Russ.).
7. Habibov FYu, Djuraev HF, Abdurahmonov OR. Intensification of of Agricultural Products of Drying by the Combined Method of Energy Supply. Food processing industry. 2013;(7):24–25. (In Russ.).
8. Sazhin BS, Kochetov OS, Sazhin VB, Dmitrieva LB, Sazhina MB, Kostyleva AV, et al. Issledovanie protsessov sushki dispergirovannykh materialov s primeneniem akusticheskikh poley [The drying process of dispersed materials using acoustic fields]. Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2009;101(8):113–122. (In Russ.).
9. Sazhin BS, Kochetov OS, Sazhin VB, Kostyleva AV, Aparushkina MA, Bobrova EO. Issledovanie protsessov sushki dispergirovannykh materialov s primeneniem akusticheskikh forsunok [Drying processes of dispersed materials using acoustic nozzles]. Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2008;84(4):118–123. (In Russ.).
10. Kochetov OS, Sazhin VB, Zhivaykin LYa, Soshenko MV, Kostylev AV, Aparushkina MA. Intensifikatsiya protsessov sushki dispergirovannykh materialov putem primeneniya aku-sticheskikh poley v rezhimakh raboty raspylivayushchikh i ulavlivayushchikh ustroystv [Intensification of the drying processes of dispersed materials by using acoustic fields in the operation modes of spraying and trapping devices]. Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2007;75(7):41–45. (In Russ.).
11. Borodina ES, Kochetov OS. Povyshenie ehffektivnosti protsessov sushki putem primeneniya fizicheskikh poley [Raising the drying process efficiency by using physical fields]. Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: problemy i rezul'taty [Basic and Applied Research: Problems and Results]. 2014;(10):155–160. (In Russ.).
12. Tsarakhova EhN, Kas'yanov DG, Odinets NA. Intensifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov s pomoshch'yu ul'trazvuka [Intensification of technological processes using ultrasound]. News institutes of higher Education. Food technology. 2010;314–315(2–3):122–123. (In Russ.).
13. Kondratov AV, Verboloz YeI, Alekseeva GV. About model of cavitationa cavity development at pounding food raw material. Storage and processing of farm products. 2007;(11):27–29. (In Russ.).
14. Soshenko MV, Lebedeva MV, Kochetov OS. Primenenie fizicheskikh poley, realizuemykh akusticheskimi forsunokami, dlya protsessov sushki raspylivaniem [Physical fields implemented by acoustic nozzles for spray drying processes]. Innovatsionnaya nauka [Innovative Science]. 2017;(5):63–65. (In Russ.).
15. Shmyrev DV, Koverkina EV, Kochetov OS. Kharakteristiki akusticheskikh sistem, ispol'zuemykh v konstruktsiyakh forsunok apparatov raspylitel'noy sushki [Characteristics of acoustic systems used in nozzles for spray-drying devices]. Symbol of Science. 2017;2(3):142–144. (In Russ.).
16. Fedorchenko IA. Numerical modeling of frequency characteristics of jet processes in a drying chamber. Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod. 2011;(4–3):1209–1211. (In Russ.).
17. Aleksanyan IYu, Maksimenko YuA, Guba OE, Feklnova YuS. Spray dryer. Technologies of food and processing industry of AIC – healthy food. 2015;6(2):55–59. (In Russ.).
18. Getiya IG. Issledovaniya vikhrevoy raspylitel'noy sushilki dlya dispersnykh materialov [Vortex spray dryer for dispersed materials]. Innovatsionnaya nauka [Innovative Science]. 2015;(10–1):55–58. (In Russ.).
19. Alexeev GV, Aksenova OI. Use of mathematical modeling for resursosberegayuschih food production. Scientific Journal NRU ITMO. Series: Processes and Food Production Equipment. 2014;(3)1–10. (In Russ.).
20. Petrovichev OA, Maksimenko YuA, Sinya SV, Saipova LH-A. Dimensionless equation of the process of acoustic dispersion of liquid and pasty food. Vestnik of Astrakhan State Technical University. 2014;58(2):102–105. (In Russ.).

21. Demirchyan KS. Teoreticheskie osnovy ehlektrotekhniki [Theoretical Basics of Electrical Engineering]. St. Petersburg: Peter, 2009. 432 p. (In Russ.).


Алексеев Геннадий Валентинович

д-р техн. наук, профессор, факультет пищевых биотехнологий и инженерии, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49, тел.: +7 (921) 335-07-96, e-mail: gva2003@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-2867-108X>


Егорова Ольга Алексеевна

аспирант факультета пищевых биотехнологий и инженерии, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49
 <https://orcid.org/0000-0002-2142-5345>


Молдованов Дмитрий

аспирант факультета пищевых биотехнологий и инженерии, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49
 <https://orcid.org/0000-0003-3450-9692>


Егоров Алексей Николаевич

магистрант факультета пищевых биотехнологий и инженерии, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49
 <https://orcid.org/0000-0002-0849-6966>


Gennadii V. Alekseev

Dr.Sci.(Eng.), Professor, Department of Food Biotechnology and Engineering, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverksky Ave., St. Petersburg, 197101, Russia, phone: +7 (921) 335-07-96, e-mail: gva2003@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-2867-108X>


Olga A. Egorova

Postgraduate Student of the Department of Food Biotechnology and Engineering, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverksky Ave., St. Petersburg, 197101, Russia
 <https://orcid.org/0000-0002-2142-5345>

Dmitrii Moldovanov

Postgraduate Student of the Department of Food Biotechnology and Engineering, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverksky Ave., St. Petersburg, 197101, Russia
 <https://orcid.org/0000-0003-3450-9692>

Aleksey N. Egorov

Undergraduate Student of the Department of Food Biotechnology and Engineering, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverksky Ave., St. Petersburg, 197101, Russia
 <https://orcid.org/0000-0003-3450-9692>