

Разработка общих видов математических моделей сушки пищевых продуктов с СВЧ-энергоподводом на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов

Дмитрий А. Казарцев¹ kda_79@mail.ru  0000-0001-6597-2327

¹ Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ПКУ), ул. Земляной вал, д. 73, г. Москва, 109004, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы, касающиеся моделирования сушки семян кориандра, расторопши, яблок и плодов смородины черной с СВЧ-энергоподводом на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов. Предложено рассматривать сушку с СВЧ-энергоподводом с позиции физической химии как квазитопохимическую гетерогенную реакцию и выполнять математическое моделирование данного процесса на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов. Показана практическая реализация методологии моделирования сушки на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов при моделировании СВЧ-сушки семян кориандра, расторопши, яблок и плодов смородины черной. Рекомендовано при разработке таких моделей установить аналогию между рассматриваемым процессом сушки и видом гетерогенного химического процесса, т. е. из существующей классификации химических реакций и процессов определить адекватно-аналогичную процессу сушки химическую реакцию или процесс. Установлено, что наиболее значимыми параметрами, влияющими на скорость реакции, как и на скорость сушки являются: температура, концентрация и давление. Показано как при моделировании сушки с СВЧ-энергоподводом на основе законов химической кинетики конкретных пищевых продуктов учитывать форму продукта, скорость и температуру сушильного агента, СВЧ-мощность, относительную влажность воздуха. Разработаны общие виды математических моделей на основе законов кинетики гетерогенных химических процессов сушки с СВЧ-энергоподводом для семян кориандра, семян расторопши, яблок и плодов смородины черной. Рассматриваемый в статье методологический подход и его практическое применение к моделированию сушки с СВЧ-энергоподводом для конкретных пищевых продуктов позволит в дальнейшем разрабатывать надежные математические модели кинетики сушки для различных продуктов и избежать ошибок, которые авторы отмечают в ранее опубликованных работах.

Ключевые слова: моделирование, СВЧ-сушка, комбинированный энергоподвод, химическая кинетика, кориандр, расторопша, яблоки, смородина черная

Development of general types of mathematical models for drying food products with microwave energy supply based on the laws of chemical kinetics of heterogeneous processes

Dmitry A. Kazartsev¹ kda_79@mail.ru  0000-0001-6597-2327

¹ K. G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (The First Cossack University) 73 Zemlyanoy Val street, Moscow, 109004, Russia

Abstract. The article discusses issues related to the modeling of drying seeds of coriander, milk thistle, apples and black currant fruits with microwave energy supply based on the laws of chemical kinetics of heterogeneous processes. It is proposed to consider drying with a microwave energy supply from the standpoint of physical chemistry as a quasi-chemical heterogeneous reaction and to perform mathematical modeling of this process based on the laws of chemical kinetics of heterogeneous processes. The practical implementation of the drying modeling methodology based on the laws of chemical kinetics of heterogeneous processes for modeling microwave drying of coriander, milk thistle, apples and black currant seeds is shown. When developing such models, it was recommended to establish an analogy between the considered drying process and the type of a heterogeneous chemical process, i.e. from the existing classification of chemical reactions and processes, determine a chemical reaction or process that is adequately analogous to the drying process. It is shown how, when modeling drying with a microwave energy supply, based on the laws of chemical kinetics of specific food products, take into account the shape of the product, the speed and temperature of the drying agent, the microwave power, and the relative humidity of the air. General types of mathematical models have been developed based on the laws of kinetics of heterogeneous chemical drying processes with microwave energy supply for coriander seeds, milk thistle seeds, apples and black currant fruits. The methodological approach considered in the article and its practical application to modeling drying with a microwave energy supply for specific food products will allow in the future to develop reliable mathematical models of the drying kinetics for various products and to avoid mistakes that the authors note in previously published works.)

Keywords: modeling, microwave drying, combined energy supply, chemical kinetics, coriander, milk thistle, apples, black currant

Для цитирования

Казарцев Д.А. Разработка общих видов математических моделей сушки пищевых продуктов с СВЧ-энергоподводом на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 3. С. 17–22. doi:10.20914/2310-1202-2021-3-17-22

For citation

Kazartsev D.A. Development of general types of mathematical models for drying food products with microwave energy supply based on the laws of chemical kinetics of heterogeneous processes. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2021. vol. 83. no. 3. pp. 17–22. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2021-3-17-22

Введение

Анализ существующих подходов к математическому описанию СВЧ-сушки пищевых продуктов показывает, что на основе только одного из подходов к моделированию сложных взаимосвязанных явлений, протекающих при сушке, не удастся удовлетворительно описать в целом одной моделью все периоды сушки – постоянной и падающей скорости. В процессе сушки продукты могут уменьшаться в объеме, существенно изменяются физические характеристики (некоторые – на несколько порядков). Многие известные модели процесса сушки используют приближения постоянства геометрических параметров объекта сушки и постоянства его физических свойств [1–4]. Однако при описании СВЧ-сушки, таких продуктов как, ягоды и фрукты, такие модели имели бы низкую адекватность. Кроме того, при математическом описании конвективной сушки с дополнительным СВЧ-энергоподводом возникают дополнительные трудности. Эти трудности обусловлены сложностью математического описания количества энергии, которое поглощается поликомпонентным по составу веществом.

Для практической реализации и развития идеи применения законов химической кинетики к математическому моделированию процессов СВЧ-сушки, сушку необходимо рассматривать в широком плане как некоторую гетерогенную реакцию, обусловленную целым комплексом химических, физико-химических, биохимических и реологических процессов, кинетика которых наряду с кинетикой переноса энергии и вещества определяет механизм и скорость протекания процессов сушки. По-нашему все эти процессы при сушке можно описать уравнениями химической кинетики [5–8].

В связи с этим целью данной работы является разработка общего вида математических моделей СВЧ-сушки дисперсных пищевых продуктов на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась кинетика комбинированной сушки с СВЧ-энергоподводом семян кориандра, расторопши, яблок и плодов смородины черной.

Предметом исследования – методология разработки общих видов математических моделей сушки с СВЧ-энергоподводом на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов.

В качестве пищевых продуктов были приняты семена кориандра, расторопши, яблоки,

нарезанные в виде ломтей и плоды смородины черной. Сушка продуктов осуществлялась в специально разработанных экспериментальных установках: семена кориандра – в установке шахтного типа с конвективным и СВЧ-энергоподводом [5, 9]; семена расторопши – в вихревой камере с СВЧ-энергоподводом [10]; ломти яблок – в ленточной сушилке с конвективным и СВЧ-энергоподводом [11]; плоды смородины черной – в вакуумной установке с СВЧ-энергоподводом [12, 13].

Для разработки общего вида математических моделей семян кориандра, расторопши, яблок и плодов смородины черной использовался физико-химический подход, основанный на представлении сушки как квазитопохимической гетерогенной реакции, в которой в результате физико-химических и фазовых превращений из исходного продукта образуется сухой остаток и парообразная фаза, перешедшая в сушильный агент. Такое представление сушки позволяет применить к математическому моделированию законы кинетики топахимических реакций гетерогенных процессов, прежде всего, два фундаментальных положения формальной химической кинетики: закон действующих масс и кинетическое уравнение Аррениуса [2].

В основе закона действующих масс лежит предположение, что скорость реакции зависит от числа столкновений реагирующих молекул, которое пропорционально произведению концентраций реагирующих веществ в степенях, показатели которых соответствуют стехиометрическим коэффициентам уравнения химической реакции.

Уравнение Аррениуса позволяет определить величину константы скорости реакции k и в практическом применении обычно имеет вид:

$$k = A \times \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (1)$$

где A – предэкспоненциальный множитель, зависящий от физико-химических свойств реакционной системы, E – энергия активации, T – абсолютная температура реакции, R – универсальная газовая постоянная.

Результаты и обсуждение

Математическая модель сушки на основе законов химической кинетики представляет собой аналоговую реальную модель, которая основана на сходстве математического описания процессов различной физической природы и воспроизводит аналогию между законами, которые выражают сходные явления в оригинале и в модели. Поэтому при разработке такой модели необходимо установить аналогию между рассматриваемым процессом сушки и видом гетерогенного химического процесса.

Кинетическое уравнение химической реакции – это уравнение, которое связывает скорость реакции (изменение в единицу времени концентрации реагирующего компонента) с параметрами от которых она зависит. В общем случае на скорость реакции, как и на скорость сушки влияют:

1. Концентрация реагентов. Если одним из реагентов является газ, то необходимо учитывать влияние давления на кинетику процесса. Применительно к сушке – это величина влагосодержания продукта и давление газа над продуктом.
2. Величина температуры.
3. Параметры перемешивания или скорость потока газа. Применительно к сушке – скорость сушильного агента.
4. Размер частиц.

Наиболее значимым из указанных параметров являются температура, концентрация и давление.

По характеру скорости гетерогенные реакции между твердым веществом и жидкостью или газом могут протекать с постоянной скоростью, если концентрация реагента постоянна и поверхность твердого вещества не изменяется. Применительно к сушке – скорость сушки постоянна при удалении избыточного количества свободной влаги. Скорость процесса уменьшается из-за снижения концентрации реагента, уменьшения поверхности испарения, образования защитной пленки из продуктов реакции на поверхности, увеличения затрат энергии на акт химического превращения. Применительно к сушке – это течение процесса в периоде убывающей скорости за счет изменения аналогичных факторов.

Определение общего вида математической модели кинетики сушки семян кориандра. При выборе общего вида математической модели кинетики сушки семян кориандра исходили из следующих условий. Начальное влагосодержание семян кориандра сравнительно невысоко и не превышает $0,2 \text{ кг}_{\text{вл}}/\text{кг}_{\text{с.вещ.}}$. Поэтому на семенах не содержится избыток свободной поверхностной влаги. Анализ сорбционных свойств, фракционного состава и видов влаги в семенах кориандра, [5] позволяет полагать, что очередность удаления водных фракций из продукта будет определяться в соответствии с ростом энергии связи, определяемой по уравнению

$$\varphi(U, T) = \exp \left[-\frac{A_{\varphi}}{RT} \exp(-B_{\varphi} U) \right], \quad (2)$$

где A_{φ} , B_{φ} – эмпирические коэффициенты; R – универсальная газовая постоянная, Дж / (моль×К); T – температура окружающего воздуха, К; U – влагосодержание материала, $\text{кг}_{\text{вл}}/\text{кг}_{\text{с.вещ.}}$ [5]

При определении поверхности сушки будем полагать, что семена кориандра приближенно можно принять за частицы шаровой формы.

Рассматривая аналогию между химическими реакциями и сушкой кориандра, можно сделать следующее заключение. Сушка кориандра подобна гетерогенной химической реакции с твердой фазой с образованием газообразной фазы продуктов реакции, в которой можно выделить две стадии (два периода) – постоянной и убывающей скорости. В периоде убывающей скорости изменение поверхности зоны фазового превращения воды описывается уравнением:

$$F(U) = 4\pi R_n^2 \left(\frac{U}{U_{кр}} \right)^{\frac{2}{3}} N_q, \quad (3)$$

где N_q – количество частиц в слое.

Окружающая твердую фазу среда – влажный воздух с температурой $T_{\text{с.а.}} < 373\text{K}$ и относительной влажностью φ . Тепловой поток подводится к семенам СВЧ-полем и конвекцией от воздушного потока с заданным расходом и температурой.

Согласно методологии [14] и с учетом свойств кориандра, видов связи влаги в нем [5] кинетика сушки семян кориандра может быть описана уравнениями:

1. Период постоянной скорости:

$$N_1 = -\frac{dU}{d\tau} = U_n (1 - \varphi)^{n_{\varphi}} A \times \exp \left(-\frac{E}{RT_1} \right). \quad (4)$$

где N_1 – постоянная (максимальная) скорость первого периода; τ – продолжительность сушки; U_n – начальное влагосодержание продукта; T_1 – температура материала, в первом периоде сушки.

2. Период убывающей скорости:

$$N_2(U) = -\frac{dU}{d\tau} = N_1 \left(\frac{U}{U_{кр}} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{U}{U_{кр}} \right)^n \times \exp \left[-\frac{A_{\varphi}}{RT} \exp(-B_{\varphi} U) \right]. \quad (5)$$

где $N_2(U)$ – скорость сушки во втором периоде; $U_{кр}$ – критическое влагосодержание продукта.

Температура продукта в 1-м периоде будет определяться по уравнению:

$$T_1 = T_m + a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n, \quad (6)$$

где a_0 , a , $a_2 \dots a_n$ – эмпирические коэффициенты; $x_1, x_2, \dots x_n$ – факторы процесса.

Во втором – по уравнению:

$$T = T_{кр} + (T_k - T_{кр}) \times \frac{\frac{1}{m} \{ \exp[m(U_{кр} - U)] - 1 \} - (U_{кр} - U)}{\frac{1}{m} \{ \exp[m(U_{кр} - U_p)] - 1 \} - (U_{кр} - U_p)}, \quad (7)$$

где $T_{кр}$ – температура материала при достижении критического влагосодержания; T_k – температура материала при достижении равновесного влагосодержания; U_p – равновесное влагосодержание; m – эмпирический коэффициент, независимый от режима сушки.

Определение общего вида математической модели кинетики сушки семян расторопши. Выбор общего вида математической модели для семян расторопши проводим аналогично, как и для семян кориандра, согласно вышеописанной методологии. Начальное влагосодержание семян расторопши не превышает $0,23 \text{ кг}_{\text{вл}}/\text{кг}_{\text{с.вещ}}$, поэтому на семенах расторопши, как и на семенах кориандра, не содержится избыток свободной поверхностной влаги. Анализ сорбционных свойств, фракционного состава и видов влаги в семенах расторопши [10], характеристика связанной влаги позволяет полагать, что очередность удаления водных фракций, так же как и для кориандра, для семян расторопши будет определяться в соответствии с ростом энергии связи, определяемой по уравнению (2). При определении поверхности сушки будем полагать, что семена расторопши приближенно можно принять за частицы цилиндрической формы. Тепловой поток подводится к семенам расторопши СВЧ-полем и конвекцией от воздушного потока с заданной температурой.

Тогда с учетом свойств расторопши, видов связи влаги в семенах [10] кинетика сушки семян расторопши в первом периоде может быть описана уравнением (4), аналогично уравнениям семян кориандра, а во втором периоде убывающей скорости уравнением:

$$N_2(U) = -\frac{dU}{d\tau} = N_1 \left(\frac{U}{U_{кр}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{U}{U_{кр}} \right)^n \times \exp \left[-\frac{A_\varphi}{RT} \exp(-B_\varphi U) \right]. \quad (8)$$

Температура семян расторопши в 1-м периоде будет определяться аналогично как и для семян кориандра по уравнению (6), а во втором – по уравнению (7).

Определение общего вида математической модели кинетики сушки яблок. Согласно вышеописанной методологии проводим выбор общего вида математической модели для яблок.

В яблоках содержится 80–90% воды, основная часть которой находится в свободной форме. Поэтому на поверхности ломтей яблок содержится избыток свободной поверхностной влаги. На основании многочисленных исследований [15, 16–20] целесообразно кинетическое уравнение первого периода сушки, дополнить множителем $\nu^{0,5}$, учитывающим влияние скорости сушильного агента на скорость испарения свободной поверхностной влаги.

Анализ сорбционных свойств, фракционного состава и видов влаги в яблоках [11], характеристика связанной влаги позволяет полагать, что очередность удаления водных фракций, так же, как и для кориандра, и семян расторопши, для яблок будет определяться в соответствии с ростом энергии связи, определяемой по уравнению (2). Яблоки, подготовленные к сушке, очищены и разрезаны на кружки толщиной не более 5–6 мм. Так как диаметр разрезанного кружка яблока значительно больше его толщины $D_y \gg \delta_y$, то изменение поверхности испарения не существенно. Разрезанные ломти яблок имеют форму пластины. Тепловой поток подводится к яблокам СВЧ-полем и конвекцией от воздушного потока с заданной температурой.

Тогда с учетом свойств яблок, видов связи влаги в них [11] кинетика сушки яблок в первом периоде может быть описана уравнением (4), аналогично уравнениям семян кориандра, а во втором периоде убывающей скорости уравнением:

$$N_2(U) = -\frac{dU}{d\tau} = N_1 \nu^{0,5} \left(\frac{U}{U_{кр}} \right)^n \times \exp \left[-\frac{A_\varphi}{RT} \exp(-B_\varphi U) \right]. \quad (9)$$

Температура яблок в 1-м периоде будет определяться аналогично по уравнению (6), а во втором – по уравнению (7).

Определение общего вида математической модели кинетики сушки плодов смородины черной. Согласно вышеописанной методологии проводим выбор общего вида математической модели для плодов смородины. В плодах смородины также, как и в яблоках, содержится 80–90% воды, основная часть которой находится в свободной форме. При этом сушка плодов смородины осуществляется в вакуумной камере. Из этого следует, что уравнение скорости первого периода не должно содержать коэффициент $\nu^{0,5}$, учитывающий влияние скорости сушильного агента на скорость испарения свободной поверхностной влаги. Анализ сорбционных

свойств, фракционного состава и видов влаги в плодах смородины [12], характеристика связанной влаги позволяет полагать, что очередность удаления водных фракций, так же, как и в предыдущих случаях, для плодов смородины будет определяться в соответствии с ростом энергии связи, определяемой по уравнению (2). При определении поверхности сушки будем полагать, что плоды смородины приближенно можно принять за частицы шаровой формы. Тепловой поток подводится к продукту СВЧ-полем. В сушильной камере создается разрежение.

Тогда с учетом свойств плодов смородины, видов связи влаги в них [12] кинетика сушки в первом периоде может быть описана уравнением:

$$N_1 = -\frac{dU}{d\tau} = U_n \times A \times \exp\left(-\frac{E}{RT_1}\right), \quad (10)$$

а во втором периоде убывающей скорости аналогично семенам кориандра скорость сушки смородины будет определяться по уравнению (5).

Температура плодов смородины в 1-м периоде будет определяться по уравнению (6), а во втором – по уравнению (7).

Заключение

Сушка может быть рассмотрена с позиции физической химии как квазитопохимическая гетерогенная реакция. Ее математическое моделирование может быть основано на применении законов химической кинетики.

Тип такой квазитопохимической гетерогенной реакции (последовательное или параллельное удаление водных фракций) определяется на основе изучения форм и энергии связи воды с сухой частью продукта. Границы водных фракций, отличающихся энергией связи влаги, могут быть надежно определены методами термического анализа.

Показано практическое применения методологии моделирования сушки на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов к моделированию СВЧ-сушки конкретных пищевых продуктов.

Разработаны математические модели на основе законов кинетики гетерогенных химических процессов сушки с СВЧ-энергоподводом для семян кориандра, семян рапса, яблок и плодов смородины черной, учитывающие форму продукта, скорость и температуру сушильного агента, СВЧ-мощность, относительную влажность воздуха.

Литература

- 1 Цугленок Н.В., Манасян С.К., Демский Н.В. Техника и технология сушки зерна // Международный журнал экспериментального образования. 2012. №. 11. С. 46-47.
- 2 Потапов В.А., Якушенко Е.Н., Жеребкин М.В. Анализ способов сушки и оценка качества сушеной виноградной выжимки // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. №. 6 (11). С. 38-41.
- 3 Калашников Г.В., Литвинов Е.В. Кинетика СВЧ-сушки яблок // Вестник ВГУИТ. 2015. №. 2. С. 40-42.
- 4 Иночкина Е.В. Совершенствование технологии конвективной СВЧ-сушки плодов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2014. №. 5-6. С. 62-65.
- 5 Антипов С.Т., Казарцев Д.А., Давыдов А.М., Емельянов А.Б. Изучение форм связи влаги в семенах кориандра на основе анализа кинетики сушки // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. №. 3 (85). doi: 10.20914/2310-1202-2020-3-24-31
- 6 Кухарев О.Н., Сёмов И.Н., Тимергазин Н.К., Оськин В.С. Результаты исследований устройства для сушки сельскохозяйственных культур // Нива Поволжья. 2020. №. 2 (55). doi: 10.36461/НП.2020.2.55.016
- 7 Ермоченков М.Г. Кинетические параметры процесса сушки древесины // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2017. №. 6 (360). С. 114-125. doi: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.114
- 8 Wray D., Ramaswamy H.S. Novel concepts in microwave drying of foods // Drying Technology. 2015. V. 33. №. 7. P. 769-783. doi: 10.1080/07373937.2014.985793
- 9 Antipov S., Klyuchnikov A., Kazartsev D. Mathematical description of super-high frequencies drying process of free-running food media in device with combined energy input // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2020. V. 175. P. 05021. doi: 10.1051/e3sconf/202017505021
- 10 Юрова И.С., Кретов И.Т., Журавлев А.В., Казарцев Д.А. Тепло- и массообмен при сушке семян рапса в вихревой камере с СВЧ-энергоподводом. Воронеж: ВГУИТ, 2012. 192 с.
- 11 Антипов С.Т., Казарцев Д.А., Журавлев А.В. Тепло- и массообмен при сушке яблок в аппарате с комбинированным энергоподводом. Воронеж: ВГТА, 2009. 154 с.
- 12 Антипов С.Т., Виниченко С.А., Казарцев Д.А. Тепло- и массообмен при сушке плодов смородины черной в вакуум аппарате с СВЧ-энергоподводом. Воронеж: ВГУИТ, 2016. 168 с.
- 13 Antipov S.T., Arapov V.M., Kazartsev D.A. Kinetics laws as the base for mathematical simulation of microwave vacuum drying process // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020. V. 1560. №. 1. P. 012017.
- 14 Arapov V.M., Kazartsev D.A., Nikitin I.A., Babaeva M.V. et al. Drying process simulation methodology based on chemical kinetics laws // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2020. V. 11. №. 2. P. 17-22.
- 15 Орвос М., Сзыбо В., Пус Т. Скорость испарения со свободной поверхности жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 2016. Т. 57. №. 6. С. 168-179.
- 16 Pickles C.A., Gao F., Kelebek S. Microwave drying of a low-rank sub-bituminous coal // Minerals Engineering. 2014. V. 62. P. 31-42. doi: 10.1016/j.mineng.2013.10.011
- 17 Feng H., Yin Y., Tang J. Microwave drying of food and agricultural materials: basics and heat and mass transfer modeling // Food Engineering Reviews. 2012. V. 4. №. 2. P. 89-106. doi: 10.1007/s12393-012-9048-x

18 Demiray E., Seker A., Tulek Y. Drying kinetics of onion (*Allium cepa* L.) slices with convective and microwave drying // *Heat and Mass Transfer*. 2017. V. 53. №. 5. P. 1817-1827. doi: 10.1007/s00231-016-1943-x

19 Wojdyło A., Figiel A., Lech K., Nowicka P., Oszmiański J. Effect of convective and vacuum-microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries // *Food and Bioprocess Technology*. 2014. V. 7. №. 3. P. 829-841. doi: 10.1007/s11947-013-1130-8

20 Chahbani A., Fakhfakh N., Balti M.A., Mabrouk M. et al. Microwave drying effects on drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity of green peas (*Pisum sativum* L.) // *Food Bioscience*. 2018. V. 25. P. 32-38. doi: 10.1016/j.fbio.2018.07.004

References

1 Tsuglenok N.V., Manasyan S.K., Demskiy N.V. Grain drying technique and technology. *International Journal of Experimental Education*. 2012. no. 11. pp. 46-47. (in Russian).

2 Potapov V.A., Yakushenko E.N., Zharebkin M.V. Analysis of drying methods and assessment of the quality of dried grape pomace. *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. 2013. no. 6 (11). pp. 38-41. (in Russian).

3 Kalashnikov G.V., Litvinov E.V. Kinetics of microwave drying of apples. *Proceedings of VSUET*. 2015. no. 2. pp. 40-42. (in Russian).

4 Inochkina E.V. Improvement of the technology of convective microwave drying of fruits. *News of higher educational institutions. Food technology*. 2014. no. 5-6. pp. 62-65. (in Russian).

5 Antipov S.T., Kazartsev D.A., Davydov A.M., Emelyanov A.B. Study of the forms of moisture bond in coriander seeds based on the analysis of the kinetics of drying. *Proceedings of VSUET*. 2020. vol. 82. no. 3 (85). doi: 10.20914/2310-1202-2020-3-24-31 (in Russian).

6 Kukharev O.N., Syomov I.N., Timergazin N.K., Oskin V.S. Research results of a device for drying agricultural crops. *Niva Povolzhya*. 2020. no. 2 (55). doi: 10.3646SHR.2020.2.55.016 (in Russian).

7 Ermochkov M.G. Kinetic parameters of the wood drying process. *News of higher educational institutions. Forest Journal*. 2017. no. 6 (360). pp. 114-125. doi: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.114 (in Russian).

8 Wray D., Ramaswamy H.S. Novel concepts in microwave drying of foods. *Drying Technology*. 2015. vol. 33. no. 7. pp. 769-783. doi: 10.1080/07373937.2014.985793

9 Antipov S., Klyuchnikov A., Kazartsev D. Mathematical description of super-high frequencies drying process of free-running food media in device with combined energy input. *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2020. vol. 175. pp. 05021. doi: 10.1051/e3sconf/202017505021

10 Yurova I.S., Kretov I.T., Zhuravlev A.V., Kazartsev D.A. Heat and mass transfer during drying of milk thistle seeds in a vortex chamber with a microwave energy supply. *Voronezh, VSUET, 2012*. 192 p. (in Russian).

11 Antipov S.T., Kazartsev D.A., Zhuravlev A.V. Heat and mass transfer when drying apples in an apparatus with a combined power supply. *Voronezh, VGTA, 2009*. 154 p. (in Russian).

12 Antipov S.T., Vinichenko S.A., Kazartsev D.A. Heat and mass transfer when drying black currant fruits in a vacuum apparatus with a microwave energy supply. *Voronezh, VSUET, 2016*. 168 p. (in Russian).

13 Antipov S.T., Arapov V.M., Kazartsev D.A. Kinetics laws as the base for mathematical simulation of microwave vacuum drying process. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020. vol. 1560. no. 1. pp. 012017.

14 Arapov V.M., Kazartsev D.A., Nikitin I.A., Babaeva M.V. et al. Drying process simulation methodology based on chemical kinetics laws. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2020. vol. 11. no. 2. pp. 17-22.

15 Orvos M., Szybo V., Pus T. Evaporation rate from the free surface of a liquid. *Applied Mechanics and Technical Physics*. 2016. vol. 57. no. 6. pp. 168-179. (in Russian).

16 Pickles C.A., Gao F., Kelebek S. Microwave drying of a low-rank sub-bituminous coal. *Minerals Engineering*. 2014. vol. 62. pp. 31-42. doi: 10.1016/j.mineng.2013.10.011

17 Feng H., Yin Y., Tang J. Microwave drying of food and agricultural materials: basics and heat and mass transfer modeling. *Food Engineering Reviews*. 2012. vol. 4. no. 2. pp. 89-106. doi: 10.1007/s12393-012-9048-x

18 Demiray E., Seker A., Tulek Y. Drying kinetics of onion (*Allium cepa* L.) slices with convective and microwave drying. *Heat and Mass Transfer*. 2017. vol. 53. no. 5. pp. 1817-1827. doi: 10.1007/s00231-016-1943-x

19 Wojdyło A., Figiel A., Lech K., Nowicka P., Oszmiański J. Effect of convective and vacuum-microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries. *Food and Bioprocess Technology*. 2014. vol. 7. no. 3. pp. 829-841. doi: 10.1007/s11947-013-1130-8

20 Chahbani A., Fakhfakh N., Balti M.A., Mabrouk M. et al. Microwave drying effects on drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity of green peas (*Pisum sativum* L.). *Food Bioscience*. 2018. vol. 25. pp. 32-38. doi: 10.1016/j.fbio.2018.07.004

Сведения об авторах

Дмитрий А. Казарцев к.т.н., доцент, кафедра технологии бродильных производств и виноделия им. Г.Г. Агабальянца, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (ПКУ), ул. Земляной вал, 73, г. Москва, 109004, Россия, kda_79@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-6597-2327>

Вклад авторов

Дмитрий А. Казарцев обзор литературных источников по исследуемой проблеме, разработка общего вида математических моделей сушки пищевых продуктов с СВЧ-энергоподводом на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Dmitry A. Kazartsev Cand. Sci. (Engin.), associate professor, technology of fermentation and winemaking named after G.G. Agabalian department, K. G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, Zemlyanoy Val street 73, Moscow, 109004, Russia, kda_79@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-6597-2327>

Contribution

Дмитрий А. Казарцев обзор литературных источников по исследуемой проблеме, разработка общего вида математических моделей сушки пищевых продуктов с СВЧ-энергоподводом на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 20/07/2021	После редакции 12/08/2021	Принята в печать 03/09/2021
Received 20/07/2021	Accepted in revised 12/08/2021	Accepted 03/09/2021