

Процессы и аппараты пищевых производств**Processes and devices for food production**DOI: <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-3-24-31>

Оригинальная статья/Research article

УДК 664.724

Open Access

Available online at vestnik-vsuet.ru**Изучение форм связи влаги в семенах кориандра на основе анализа кинетики сушки**

Сергей Т. Антипов	¹	ast@vsuet.ru	 0000-0003-4299-1538
Дмитрий А. Казарцев	²	kda_79@mail.ru	 0000-0001-6597-2327
Артем М. Давыдов	³	Davydov.AM@rea.ru	 0000-0001-5308-4752
Александр Б. Емельянов	¹	okipr-mip@mail.ru	 0000-0002-8428-4279

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия² Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ПКУ), ул. Земляной вал, 73, г. Москва, 109004, Россия³ Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Стремянный пер., 36, г. Москва, 117997, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы, касающиеся изучения форм связи влаги, удаляемой в процессе сушки семян кориандра. Выполнено исследование по определению количественного содержания влаги различных форм связи двумя методами и проведен сравнительный анализ. Показано, что существующие методы изучения форм связи влаги с материалом имеют существенные недостатки и в основном дают качественную оценку состояния влаги в материале или являются очень трудоемкими и требуют проведения длительных лабораторных исследований. Предложен подход к определению форм связи влаги в семенах кориандра на основе графо-аналитического анализа кинетики сушки, позволяющий качественно и количественно провести оценку состояния влаги в семенах. С помощью графического редактора проведена обработка кривых кинетики сушки семян кориандра и получены зависимости величины характеризующей быстроту изменения скорости сушки семян кориандра от влагосодержания продукта и предложено введение нового понятия в теорию сушки данной величины как «ускорение сушки». Проведен анализ полученных кривых, свидетельствующий о наличии экстремумов и точек перегиба соответствующим критическим влагосодержаниям, а так же наличие участков с замедлением или ускорением изменения скорости сушки, позволяющих установить интервалы удаления влаги с различной энергией связи. Рассматриваемый в статье подход к определению форм связи влаги в семенах кориандра позволит не только дать качественную и количественную оценку состояния влаги в продуктах, но и сократить время на проведения анализа и повысить точность результатов.

Ключевые слова: формы связи влаги, графическая обработка, сушка, кинетика сушки, семена кориандра**Study of the forms of moisture bond in coriander seeds based on analysis of drying kinetics**

Sergei T. Antipov	¹	ast@vsuet.ru	 0000-0003-4299-1538
Dmitry A. Kazartsev	²	kda_79@mail.ru	 0000-0001-6597-2327
Artem M. Davydov	³	Davydov.AM@rea.ru	 0000-0001-5308-4752
Alexander B. Emelyanov	¹	okipr-mip@mail.ru	 0000-0002-8428-4279

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia² K. G. Razumovsky Moscow State University of technologies and management, Zemlyanoy Val street 73, Moscow, 109004, Russia³ Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny Lane 36, Moscow, Russia

Abstract. The article deals with the issues related to the study of the forms of connection of moisture removed during the drying of coriander seeds. A study was carried out to determine the quantitative moisture content of various forms of communication by two methods and a comparative analysis was carried out. It is shown that the existing methods for studying the forms of moisture-material bond have significant drawbacks and generally give a qualitative assessment of the state of moisture in the material or are very laborious and require lengthy laboratory research. An approach is proposed to determine the forms of moisture bond in coriander seeds based on graph-analytical analysis of the drying kinetics, which makes it possible to qualitatively and quantitatively assess the state of moisture in the seeds. With the help of a graphical editor, the curves of the kinetics of drying of coriander seeds were processed and the dependences of the value characterizing the rate of change in the rate of drying of coriander seeds on the moisture content of the product were obtained, and the introduction of a new concept into the theory of drying of this value as "acceleration of drying" was proposed. The analysis of the obtained curves is carried out, indicating the presence of extrema and points of inflection to the corresponding critical moisture content, as well as the presence of areas with a slowdown or acceleration of the drying rate change, which make it possible to establish the intervals of moisture removal with different binding energies. The approach considered in the article to determine the forms of moisture bond in coriander seeds will allow not only to give a qualitative and quantitative assessment of the state of moisture in products, but also to reduce the time spent on analysis and increase the accuracy of the results.

Keywords: forms of moisture bond, graphic processing, drying, drying kinetics, coriander seeds

Для цитирования

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. С. 24–31. doi:10.20914/2310-1202-2020-3-24-31

For citation

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

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

При исследовании и оптимизации параметров процесса сушки семян кориандра изучение форм связи влаги имеет важное теоретическое и практическое значение. В процессе сушки семена кориандра под воздействие теплоты и влаги могут значительно изменять свои физические свойства. Эти изменения обусловлены молекулярным характером связи влаги с сухим скелетом вещества. Процесс удаления влаги из семян кориандра, представляющих собой коллоидно-капиллярнопористое тело, зависит от характера молекулярной связи жидкости, содержащейся в семенах и сопровождается нарушением связи ее с сухим скелетом вещества, на что затрачивается определенная энергия [1–3, 10–15].

Каждая форма связи влаги по П.А. Ребиндеру характеризуется определенной энергией связи. При сушке семян кориандра удаляется физико-механически и физико-химически связанная влага, которая по своей природе и энергии связи подразделяется на капиллярную, осмотически связанную, адсорбционно связанную влагу полимолекулярных и мономолекулярных слоев. Для того чтобы удалить из семян влагу той или иной формы нужно затратить определенное количество энергии, зависящее от энергии связи влаги и количества влаги данной формы в продукте.

Применение современных компьютерных технологий и средств автоматизации позволяет оптимизировать энергетические и материальные затраты на процесс сушки. Однако, для разработки надежного способа управления процессом сушки и оптимизации температурных режимов и энергетических затрат необходимо знать точное соотношение различных форм связи влаги в продукте и энергию ее связи. Сложность задачи заключается в том, что для семян кориандра в зависимости от сорта, климатических условий выращивания, влажности при уборке с полей и т. д. соотношения влаги различных форм связи будет не одинаково. При переработке сырья на соотношения влаги различных форм связи также могут оказывать влияние многие случайные факторы на предшествующих сушке производственных стадиях.

Поэтому изучение форм связи влаги в семенах кориандра и разработка точных и ускоренных методов определения физического состояния и свойств воды в продуктах имеет важное теоретическое и практическое значение и является актуальной.

Цель работы – определение качественной и количественной оценки форм связи влаги в семенах кориандра на основе графической обработки кинетики сушки.

Материалы и методы

Исследования кинетики СВЧ-сушки семян кориандра проводились в стационарном режиме на установке, описанной в [1]. Установка представляла собой цилиндрическую сушильную камеру с установленными магнетронами и систему подвода воздуха с элетрокалорифером. По высоте сушильной камеры были установлены пробоотборники.

Для исследования кинетики сушки семена кориандра предварительно увлажнялись до необходимой начальной влажности.

Параметры процесса поддерживались постоянными в интервале значений: температура сушильного агента от 303 до 363 К; СВЧ-мощность от 60 до 300 Вт/кг_{с.вещ.}. Отбор проб осуществлялся одновременно в пяти точках по высоте слоя с интервалом в 1 минуту. Влажности семян кориандра определялась методом высушивания до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 378 К в течение 3 часов.

Для обработки массива экспериментальных данных по кинетике сушки, аппроксимации функции $f(U)$ и проведения графо-аналитического метода применялись современные компьютерные технологии и программа Mathcad.

Результаты и обсуждение

С использованием метода планирования эксперимента проведены исследования кинетики СВЧ-сушки семян кориандра экспериментальной сушильной установке.

Кинетика сушки семян кориандра при различных значениях температуры сушильного агента представлена на рисунке 1. Кинетика сушки семян кориандра при различных значениях СВЧ-мощности представлена на рисунке 2.

Как известно [2, 3, 10–12] изменение влаго-содержания и температуры материала в процессе сушки делится на два периода: постоянной скорости и падающей скорости.

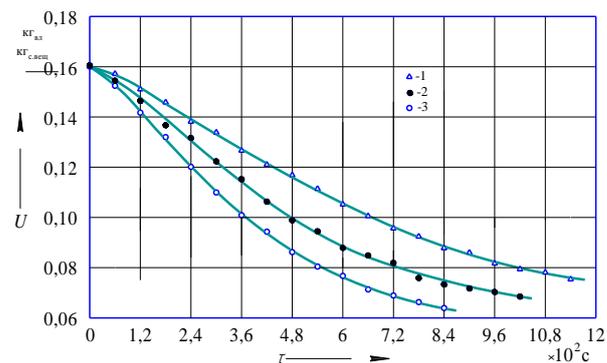


Рисунок 1. Кривые сушки семян кориандра: 1 – $T_{с.а} = 303$ К, $Q_{с.а} = 141,3$ м³/ч, $P_{уд} = 180$ Вт/кг; 2 – $T_{с.а} = 333$ К, $Q_{с.а} = 141,3$ м³/ч, $P_{уд} = 180$ Вт/кг; 3 – $T_{с.а} = 363$ К, $Q_{с.а} = 141,3$ м³/ч, $P_{уд} = 180$ Вт/кг

Figure 1. Coriander seed drying curves: 1 – $T_{с.а} = 303$ K, $Q_{с.а} = 141,3$ м³/h, $P_{уд} = 180$ W/kg; 2 – $T_{с.а} = 333$ K, $Q_{с.а} = 141,3$ м³/h, $P_{уд} = 180$ W/kg; 3 – $T_{с.а} = 363$ K, $Q_{с.а} = 141,3$ м³/h, $P_{уд} = 180$ W/kg

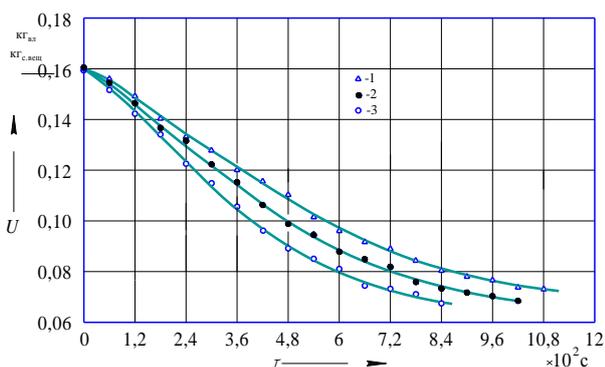


Рисунок 2. Кривые сушки семян кориандра: 1 – $T_{c.a} = 333\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 60\text{ Вт/кг}$; 2 – $T_{c.a} = 333\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180\text{ Вт/кг}$; 3 – $T_{c.a} = 333\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 300\text{ Вт/кг}$

Figure 2. Coriander seed drying curves: 1 – $T_{c.a} = 333\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 60\text{ W/kg}$; 2 – $T_{c.a} = 333\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180\text{ W/kg}$; 3 – $T_{c.a} = 333\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 300\text{ W/kg}$

Под скоростью сушки понимают изменение влагосодержания в единицу времени $dU/d\tau$. Графически продифференцировав кривую сушки семян кориандра, были получены кривые скорости сушки семян кориандра (рисунки 4, 5), которые демонстрирует значения скорости удаления влаги при изменяющемся влагосодержании продукта. Скорость сушки численно равна тангенсу угла наклона касательной к кривой сушки $U = f(\tau)$. Затем построены графики

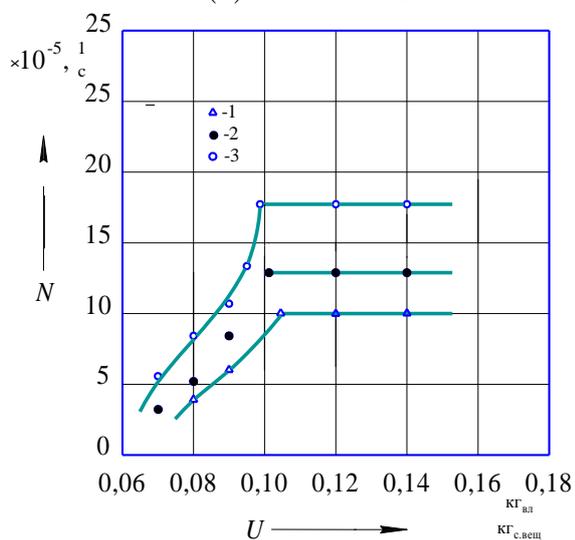


Рисунок 3. Кривые скорости сушки семян кориандра: 1 – $T_{c.a} = 303\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180\text{ Вт/кг}$; 2 – $T_{c.a} = 333\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180\text{ Вт/кг}$; 3 – $T_{c.a} = 363\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180\text{ Вт/кг}$

Figure 3. Coriander seed drying rate curves: 1 – $T_{c.a} = 303\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180\text{ W/kg}$; 2 – $T_{c.a} = 333\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180\text{ W/kg}$; 3 – $T_{c.a} = 363\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180\text{ W/kg}$

$dU/d\tau = f(U)$. Такой метод анализа был впервые предложен Т.К. Шервудом [2]. При анализе графиков сушки необходимо читать их в обратном порядке, так как влагосодержание материала в процессе сушки уменьшается. До настоящего времени данный метод анализа не считался точным и имел большие погрешности, так как операция проведения касательной выполнялась на глаз или для повышения точности с помощью специального прибора – зеркального дериватора. Поэтому данный метод служил только для качественного анализа кинетики процесса.

Кривые скорости сушки позволяют определить вторую критическую точку в виде точки перегиба или перехода прямой в кривую, что соответствует второму критическому влагосодержанию, которое на кривых изменения влагосодержания от времени практически не просматривается. Отметим, что данные кривые дают качественную картину протекания процесса сушки.

Известно [1, 5–8], что скорость второго периода $N_2(U)$ можно представить в виде произведения

$$N_2(U) = N_1 \times f(U)$$

где $N_1 = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – скорость первого периода сушки, c^{-1} ; x_1, x_2, \dots, x_n – фактор процесса; $f(U)$ – некоторая передаточная функция от влагосодержания продукта.

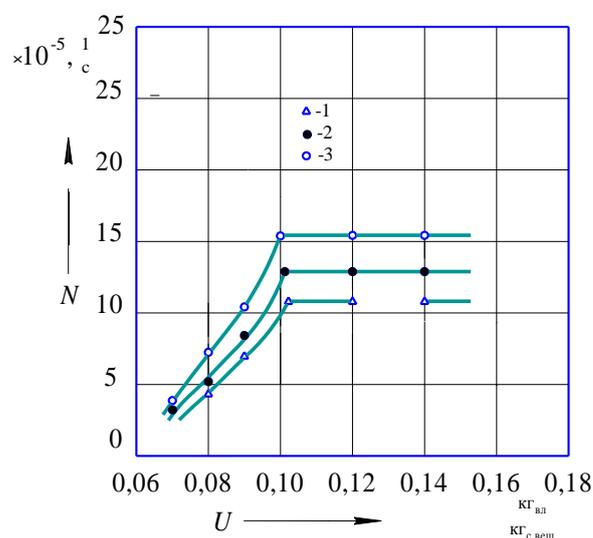


Рисунок 4. Кривые скорости сушки семян кориандра: 1 – $T_{c.a} = 333\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 60\text{ Вт/кг}$; 2 – $T_{c.a} = 333\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180\text{ Вт/кг}$; 3 – $T_{c.a} = 333\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 300\text{ Вт/кг}$

Figure 4. Coriander seed drying rate curves: 1 – $T_{c.a} = 333\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 60\text{ W/kg}$; 2 – $T_{c.a} = 333\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180\text{ W/kg}$; 3 – $T_{c.a} = 333\text{ K}$, $Q_{c.a} = 141,3\text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 300\text{ W/kg}$

Если принять, что для установившегося режима сушки при постоянных параметрах скорость первого периода есть величина постоянная $N_1 = \text{const}$, как представлено на графиках (рисунки 3, 4), то скорость второго периода сушки зависит только от влагосодержания продукта. Тогда для дальнейшего и более глубокого анализа кинетики процесса сушки семян кориандра применим величину, определяющую быстроту изменения скорости сушки, то есть первую производную от скорости сушки по влагосодержанию dN/dU или вторую производную от влажности. К этой величине применим термин «ускорение сушки» [4].

Вторая производная от влагосодержания или dN/dU представляет собой скорость изменения наклона $f(U)$ кривой $N_2(U) = N_1 \times f(U)$, и дает указание на то, как изогнута кривая. Положительный или отрицательный знак скорости изменения $f(U)$ указывает на то, что эта функция возрастает или убывает с изменением влагосодержания материала. Так как удаление из продукта каждой из водных фракций с различными энергиями связи происходит со скоростью, изменяющейся по различным законам, то каждая фракция, будет характеризоваться своей быстротой изменения скорости сушки.

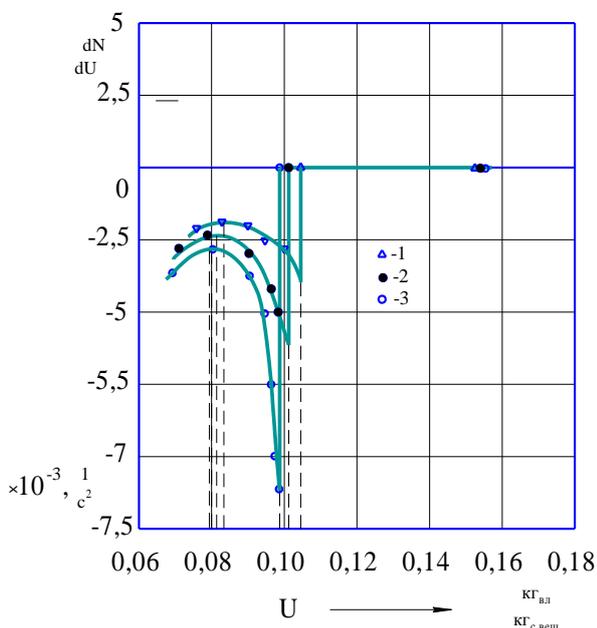


Рисунок 5. Кривые «ускорения сушки» семян кориандра: 1 – $T_{с.а} = 303 \text{ K}$, $Q_{с.а} = 141,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180 \text{ Вт/кг}$; 2 – $T_{с.а} = 333 \text{ K}$, $Q_{с.а} = 141,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180 \text{ Вт/кг}$; 3 – $T_{с.а} = 363 \text{ K}$, $Q_{с.а} = 141,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180 \text{ Вт/кг}$
 Figure 5. Curves of «accelerating drying» of coriander seeds: 1 – $T_{с.а} = 303 \text{ K}$, $Q_{с.а} = 141,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180 \text{ W/kg}$; 2 – $T_{с.а} = 333 \text{ K}$, $Q_{с.а} = 141,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180 \text{ W/kg}$; 3 – $T_{с.а} = 363 \text{ K}$, $Q_{с.а} = 141,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180 \text{ W/kg}$

Построение графика зависимости dN/dU от влагосодержания U позволило определить точки перегиба, интервалы выпуклости и вогнутости функции $f(U)$, которые дают более полное и точное представление о критических влагосодержаниях и интервалах удаления влаги той или иной формы связи, а так же позволяют произвести количественную оценку влаги различных фракций. Получить графическую зависимость dN/dU от влагосодержания U можно продифференцировав график кривой скорости сушки. Величина dN/dU численно равна тангенсу угла наклона касательной к кривой скорости сушки.

Погрешность измерения и нанесения точек на графике при графическом дифференцировании составляла не более 0,1 мм, а погрешность определения угла наклона касательной в точке на кривой не более 1'. Это дает основание, что полученные результаты обработки экспериментальных данных кинетики сушки семян кориандра являются высокоточными. По результатам графического дифференцирования кривых сушки построены графики «ускорений сушки» (рисунки 5, 6) при различных значениях температуры сушильного агента и СВЧ-мощности.

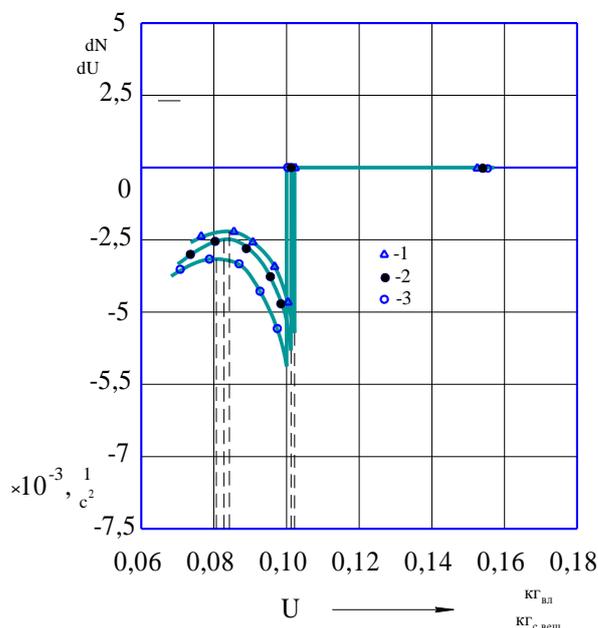


Рисунок 6. Кривые «ускорения сушки» семян кориандра: 1 – $T_{с.а} = 333 \text{ K}$, $Q_{с.а} = 141,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 60 \text{ Вт/кг}$; 2 – $T_{с.а} = 333 \text{ K}$, $Q_{с.а} = 141,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180 \text{ Вт/кг}$; 3 – $T_{с.а} = 333 \text{ K}$, $Q_{с.а} = 141,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 300 \text{ Вт/кг}$
 Figure 6. Curves of «accelerating drying» of coriander seeds: 1 – $T_{с.а} = 333 \text{ K}$, $Q_{с.а} = 141,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 60 \text{ W/kg}$; 2 – $T_{с.а} = 333 \text{ K}$, $Q_{с.а} = 141,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 180 \text{ W/kg}$; 3 – $T_{с.а} = 333 \text{ K}$, $Q_{с.а} = 141,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{уд} = 300 \text{ W/kg}$

На полученных графиках хорошо видны периоды возрастающего и убывающего «ускорения сушки». Данные графики также как и графики скорости сушки следует читать справа налево.

В первом периоде сушки, когда скорость процесса постоянна $N_1 = \text{const}$ на полученных графиках, участки имеют горизонтальный прямолинейный характер, а значение функции принимает нулевое значение, то есть быстрота изменения скорости сушки («ускорение сушки») равна нулю.

Отрицательное значение «ускорения сушки» семян кориандра указывает на то, что эта функция убывает с изменением влагосодержания материала, а значит, быстрота изменения скорости сушки уменьшается. Это объясняется увеличением значения энергии связи влаги с сухим скелетом вещества с уменьшением влагосодержания в семенах.

Анализ полученных кривых свидетельствует о наличии участков, не определенных на кривых скорости сушки, с замедлением или ускорением изменения скорости сушки. Так как каждая водная фракция удаляется со скоростью, изменяющейся по разным законам, то по данным участкам, возможно, установить интервалы удаления влаги с различной энергией связи. Зная точные границы этих интервалов можно количественно определить фракционный состав влаги в продукте, удаляемой при сушке.

На всех графиках (рисунки 5, 6) хорошо видны экстремумы функции $f(U)$ и точки перегиба, соответствующие первому $U_{кр1}$ и второму $U_{кр2}$ критическому влагосодержанию, в то время как на кривых скорости сушки значения критических влагосодержаний определены приблизительно.

Вторая критическая точка влагосодержаний находится в диапазоне от 0,078 до 0,084 кг_{вл}/кг_{с.вещ.}. В зависимости от режимов сушки второе критическое влагосодержание имеет различное значение. Это объясняется тем, что температура и СВЧ-мощность интенсифицируют внутреннюю диффузию влаги, а также увеличением доли мономолекулярно-адсорбционной влаги, испарение которой происходит вместе с полимолекулярно-адсорбционной влагой.

Для проведения сравнительного анализа полученных нами результатов по количественному

и качественному содержанию влаги в семенах кориандра воспользуемся данными [1] по исследованию форм связи влаги, полученными на основе дериватографического анализа. Данный метод позволяет провести количественный и качественный анализ форм связи влаги в материале. Однако, определение значения мономолекулярно-адсорбционной влаги данным методом затруднительно, так как энергия связи молекул воды с продуктом полимолекулярно-адсорбционным слое непрерывно возрастает при переходе от верхнего слоя к монослою. Для определения форм связи влаги в продукте дериватографическим методом требуется длительный качественный анализ всех кривых полученных в результате опыта. В результате дериватографического анализа [1] определена точка B на кривой DTG (рисунок 7) соответствующая границе интервала полимолекулярно-адсорбционной влаги в материале. Численные значения влагосодержания в точке B при начальных влагосодержаниях $U_{н1} - 0,116; 0,155; 0,176$ кг_{вл}/кг_{с.вещ.} составляют $- 0,06; 0,074; 0,078$ кг_{вл}/кг_{с.вещ.}. Т.е. с увеличением начального влагосодержания соотношение влаги различных форм в семенах изменяется.

Из сравнительного анализа дериватограмм семян кориандра и кривых «ускорения сушки», следует, что значения соответствующие первому $U_{кр1}$ и второму $U_{кр2}$ критическому влагосодержанию, полученные двумя разными способами очень близки. Отклонение значений может объясняться существенным различием скорости сушки и параметров проведения процесса в дериватографе и сушильной установке. Применение СВЧ-энергии, существенно интенсифицирует процесс сушки и доля полимолекулярно-адсорбционной влаги удаляется со скоростью свободной влаги, а доля мономолекулярно-адсорбционной влаги удаляется со скоростью полимолекулярно-адсорбционной влаги. В связи с этим значения первого и второго критического влагосодержания при сушке в сушильной установке имеют немного более высокое значение, чем при сушке в печи дериватографа. Однако, для практического применения полученных результатов и разработки способов управления процессом сушки наиболее правильно будет использовать критические влагосодержания, полученные в результате сушки продукта в реальной установке.

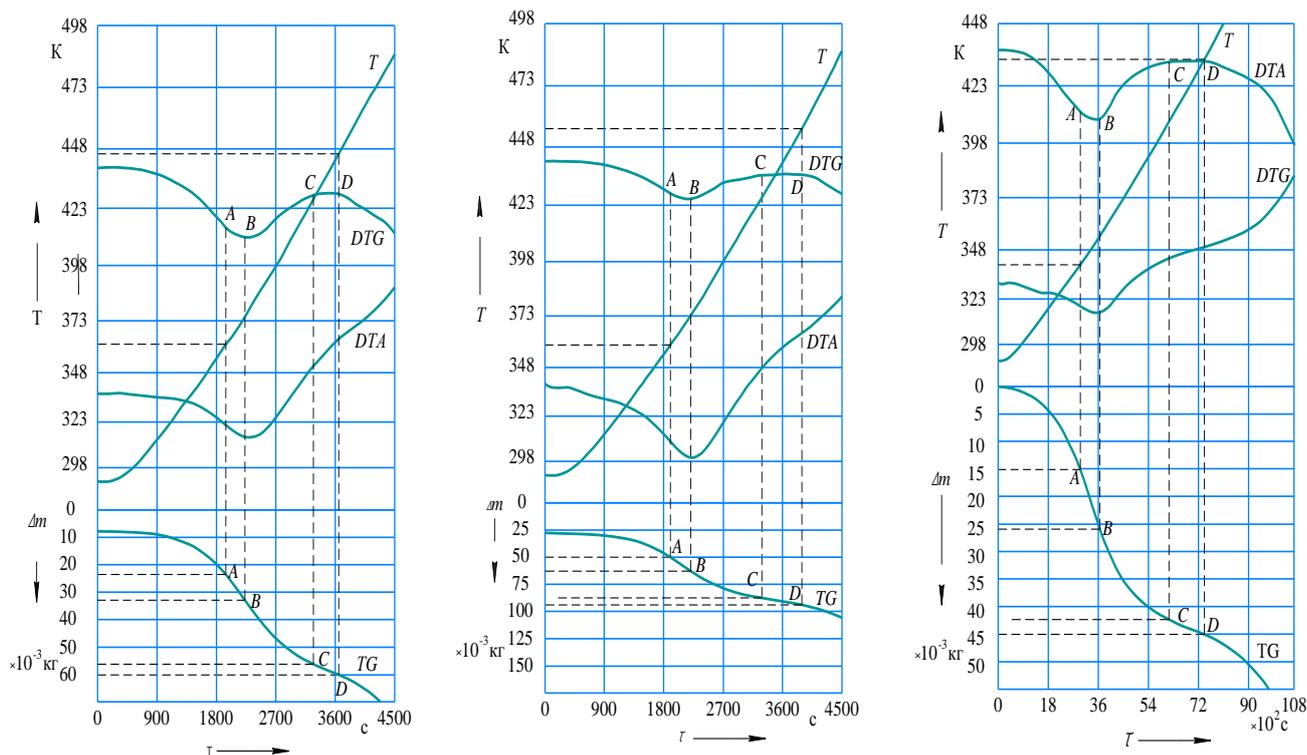


Рисунок 7. Дериватограмма семян кориандра $U_{н}=0,116$ кг/кг; $DTA=1/5$; $DTG=1/5$; $U_{н}=0,155$ кг/кг; $DTA=1/5$; $DTG=1/5$; $U_{н}=0,176$ кг/кг; $DTA=1/5$; $DTG=1/5$; $TG=200$ мг; $dT/d\tau=2,75$ К/мин; $TG=500$ мг; $dT/d\tau=2,75$ К/мин; $TG=50$ мг $dT/d\tau=1,25$ К/мин $m=500$ мг $m=500$ мг $m=300$ мг

Figure 7. Derivatogram of coriander seeds $U_{н}=0,116$ kg/kg; $DTA=1/5$; $DTG=1/5$; $U_{н}=0,155$ kg/kg; $DTA=1/5$; $DTG=1/5$; $U_{н}=0,176$ kg/kg; $DTA=1/5$; $DTG=1/5$; $TG=200$ mg; $dT/d\tau=2,75$ K/min; $TG=500$ mg; $dT/d\tau=2,75$ K/min; $TG=50$ mg $dT/d\tau=1,25$ K/min $m=500$ mg $m=500$ mg $m=300$ mg

Заклучение

На примере графо-аналитического анализа кривых скорости сушки семян кориандра предложен подход к определению форм связи влаги с материалом, позволяющий не только качественно, но и количественно провести оценку состояния влаги в продукте.

Проведен сравнительный анализ данных, полученных в результате графо-аналитического анализа кинетики сушки семян кориандра и данных дериватографического исследования, показывающий достоверность предложенного подхода.

Предложенный подход позволит исключить время на проведение лабораторных исследований по изучению форм связи влаги с материалом и может быть положен в основу способа управления и автоматизации процесса сушки на пищевых предприятиях и в смежных отраслях промышленности.

Введение в теорию сушки такой величины как «ускорение сушки» позволит более полно охарактеризовать период падающей скорости сушки и открывает дополнительные возможности к оценке подходов его интенсификации, оптимизации энергетических затрат и температурных режимов сушки.

Литература

- 1 Антипов С.Т., Казарцев Д.А. Тепло- и массообмен при сушке семян кориандра в аппарате с СВЧ-энергоподводом Воронеж: Воронежская государственная технологическая академия, 2007.
- 2 Раупов К.С. Исследование стратегии по формированию конкурентных преимуществ пищевой промышленности развитых стран // Вестник НГУЭУ. 2017. № 4. С. 252-258.
- 3 Антамошкина Е.Н. Методические основы и модель оценки продовольственной обеспеченности региона // Вестник НГУЭУ. 2019. № 2. С. 109-117.
- 4 Емельянов А.Б., Кононов Н.Р., Юсупов С., Мягков А.А. К вопросу развития исследований ресурсо- и энергосберегающих процессов в химической и смежных отраслях промышленности // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 3. С. 148-153.
- 5 Kumar C., Karim M. A. Microwave-convective drying of food materials: A critical review // Critical reviews in food science and nutrition. 2019. V. 59. № 3. P. 379-394.
- 6 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.

- 7 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.
- 8 Ермоченков М.Г. Кинетические параметры процесса сушки древесины // Лесной журнал. 2017. № 6. С. 114–125.
- 9 Junqueira J.R.J., Corrêa J.L.G., Ernesto D.B. Microwave, convective, and intermittent microwave–convective drying of pulsed vacuum osmodehydrated pumpkin slices // Journal of Food Processing and Preservation. 2017. V. 41. № 6. P. e13250.
- 10 Василенко В.Н., Фролова Л.Н., Драган И.В., Михайлова Н.А. и др. Эксергетический анализ технологии осциллирующей сушки семян масличных культур // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 1. С. 81–89.
- 11 Дранников А.В., Шахов С.В., Ерофеевская М.О., Суханов П.М. и др. Определение и использование рациональных параметров процесса сушки свекловичного жома при создании барабанной сушилки с комбинированным энергоподводом // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 2. С. 63–69.
- 12 Остриков А.Н., Шевцов А.А., Дранников А.В., Квасов А.В. Распределение полей температур и влажностерождений в частице свекловичного жома прямоугольной формы при конвективной сушке // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 1. С. 11–19.
- 13 Xie K., Li W., Zhao W. Coal chemical industry and its sustainable development in China // Energy. 2010. V. 35. № 11. P. 4349–4355.
- 14 Dufflou J.R. et al. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach // CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2012. V. 61. № 2. P. 587–609.
- 15 Li H. et al. Energy conservation and circular economy in China's process industries // Energy. 2010. V. 35. № 11. P. 4273–4281.

References

- 1 Antipov S.T., Kazartsev D.A. Heat and mass transfer during drying of coriander seeds in an apparatus with a microwave energy supply Voronezh: Voronezh State Technological Academy, 2007. (in Russian).
- 2 Raupov K.S. Research of the strategy for the formation of competitive advantages of the food industry in developed countries. Vestnik NSUEM. 2017. no. 4. pp. 252–258. (in Russian).
- 3 Antamoshkina E.N. Methodological foundations and a model for assessing food security in the region. Vestnik NSUEM. 2019. no. 2. pp. 109–117. (in Russian).
- 4 Emelyanov A.B., Kononov N.R., Yusupov S., Myagkov A.A. On the development of research on resource and energy saving processes in chemical and related industries. Proceedings of VSUET. 2017. vol. 79. no. 3. pp. 148–153. (in Russian).
- 5 Kumar C., Karim M. A. Microwave-convective drying of food materials: A critical review. Critical reviews in food science and nutrition. 2019. vol. 59. no. 3. pp. 379–394.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 Ermochenkov M.G. Kinetic parameters of the wood drying process. Forest Journal. 2017. no. 6. pp. 114–125. (in Russian).
- 9 Junqueira J.R.J., Corrêa J.L.G., Ernesto D.B. Microwave, convective, and intermittent microwave–convective drying of pulsed vacuum osmodehydrated pumpkin slices. Journal of Food Processing and Preservation. 2017. vol. 41. no. 6. pp. e13250.
- 10 Vasilenko V.N., Frolova L.N., Dragan I.V., Mikhailova N.A. and others. Exergetic analysis of the technology of oscillating drying of oilseeds. Proceedings of VSUET. 2018. vol. 80. no. 1. pp. 81–89. (in Russian).
- 11 Drannikov A.V., Shakhov S.V., Erofeevskaya M.O., Sukhanov P.M. Determination and use of rational parameters of the drying process of sugar beet pulp when creating a drum dryer with a combined power supply. Proceedings of VSUET. 2019. vol. 81. no. 2. pp. 63–69. (in Russian).
- 12 Ostrikov A.N., Shevtsov A.A., Drannikov A.V., Kvasov A.V. Distribution of temperature and moisture content fields in a rectangular beet pulp particle during convective drying. Proceedings of VSUET. 2018. vol. 80. no. 1. pp. 11–19. (in Russian).
- 13 Xie K., Li W., Zhao W. Coal chemical industry and its sustainable development in China. Energy. 2010. vol. 35. no. 11. pp. 4349–4355.
- 14 Dufflou J.R. et al. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2012. vol. 61. no. 2. pp. 587–609.
- 15 Li H. et al. Energy conservation and circular economy in China's process industries. Energy. 2010. vol. 35. no. 11. pp. 4273–4281.

Сведения об авторах

Сергей Т. Антипов д.т.н., профессор, заведующий кафедрой машины и аппараты пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ast@vsuet.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4299-1538>

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>

Information about authors

Sergei T. Antipov Dr. Sci. (Engin.), professor, head of the department of machines and apparatus for food production, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ast@vsuet.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4299-1538>

Dmitry A. Kazartsev Cand. Sci. (Engin.), associate professor, technology of fermentation and winemaking them. G.G. Agabalyants 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>

Артем М. Давыдов к.т.н., доцент, кафедра ресторанного бизнеса, Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Стремянный пер., 36, г. Москва, 117997, Россия, Davydov.AM@rea.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5308-4752>

Александр Б. Емельянов к.т.н., доцент, кафедра технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, okipr-mip@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8428-4279>

Artem M. Davydov Cand. Sci. (Engin), restaurant business department, Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny Lane 36, Moscow, Russia, Davydov.AM@rea.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5308-4752>

Alexander B. Emelyanov Cand. Sci. (Engin.), associate professor, technologies of organic compounds, polymer processing and technosphere safety department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, okipr-mip@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8428-4279>

Вклад авторов

Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

Authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 24/07/2020	После редакции 03/08/2020	Принята в печать 11/08/2020
Received 24/07/2020	Accepted in revised 03/08/2020	Accepted 11/08/2020