

Научная статья

УДК 53.06:66.061.35:634.451

<https://doi.org/10.37493/2307-910X.2024.4.10>



Кинетические закономерности обезвоживания, экстрагированного рафината мякоти хурмы

Артём Евгеньевич Макаров¹, Альберт Хамед-Харисович Нугманов^{2*},
 Игорь Юрьевич Алексанян³, Павел Дмитриевич Осмоловский⁴,
 Семид Михайлович Арабов⁵

¹ ПАСТАПИЦА, г. Астрахань, Россия

² РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия

³ Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия

⁴ Липецкий НИИ рапса – филиал Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур имени В.С. Пустовойта», г. Липецк, Россия

⁵ Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Россия

¹ artem.makarov.2011@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-6787-7697>

² nugmanov@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4093-9982>

³ 16081960igor@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0001-5494-1226>

⁴ pavel.osmolovsku@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-1131-1552>

⁵ ms.arabov@mail.ru; <http://orcid.org/https://orcid.org/0009-0008-5051-4428>

* Автор, ответственный за переписку: Альберт Хамед-Харисович Нугманов, nugmanov@rgau-msha.ru

Аннотация. В результате проведенных исследований получены кинетические закономерности процесса сушки, необходимые для определения рациональной длительности обезвоживания и выявления его механизма на основе исследования гигроскопических характеристик рафината дробленой мякоти плодов хурмы. Для дробленой мякоти плодов хурмы обезвоживание рафината целесообразно осуществлять при конвективном подведении тепловой энергии нагретым воздушным потоком, который движется ортогонально траектории высушиваемого продукта. Приведенные результаты исследования не входят в конфликт с результатами других ученых, что обуславливает обоснованную возможность их использования в инженерной практике пищевой отрасли при проектировании установок для обезвоживания продуктов растительной природы. Отмечено, что сухой рафинат из блиншированной хурмы содержит большую долю пищевых волокон и набухающую способность. Проведенные исследования позволили выявить рациональные режимные параметры конвективной сушки фруктового рафината, а именно: скорость сушильного агента, равную 2,5 м/с, его температуру 75 °С и уровень заполнения рабочего пространства барабана – 1/2 при максимальной теоретической производительности $Y = 208$ (кг/(м³·час)). Температура теплоносителя разнится с итоговой температурой продукта на 15...20 °С, вследствие чего лимитирующую температуру сушильного агента принимаем около 75 °С, что обосновано опытными данными при большей температуре теплоносителя по отношению к рекомендуемой в статье.

Ключевые слова: мякоть плодов хурмы, экстрагирование, рафинат, гигроскопические характеристики, кинетика сушки, рациональные режимы, время процесса

Для цитирования: Макаров А. Е., Нугманов А. Х.-Х., Алексанян И. Ю., Осмоловский П. Д., Арабов С. М. Кинетические закономерности обезвоживания, экстрагированного рафината мякоти хурмы // Современная наука и инновации. 2024. № 4. С. 98-111. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2024.4.10>

Research article

Kinetic patterns of dehydration of extracted raffinate of persimmon pulp

Artem E. Makarov¹, Albert H.-Kh. Nugmanov^{2*}, Igor Yu. Aleksanyan³,
Pavel D. Osmolovskiy^{4*}, Semid M. Arabov⁵

¹ PASTAPITZA, Astrakhan, Russia

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU – MTAA), Moscow, Russia

³ Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

⁴ Lipetsk Rapeseed Research Institute – the Branch of V.S. Pustovoi All- Russian Research Institute of Oil Crops, Lipetsk, Russia

⁵ Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russia

¹ artem.makarov.2011@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-6787-7697>

² nugmanov@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4093-9982>

³ 16081960igor@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0001-5494-1226>

⁴ pavel.osmolovsku@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-1131-1552>

⁵ ms.arabov@mail.ru; <http://orcid.org/https://orcid.org/0009-0008-5051-4428>

* **Corresponding author:** Albert H.-Kh. Nugmanov, nugmanov@rgau-msha.ru

Abstract. As a result of the conducted research, kinetic patterns of the drying process were obtained, which are necessary to determine the rational duration of dehydration and identify its mechanism based on the study of hygroscopic characteristics of raffinate crushed pulp of persimmon fruits. For crushed pulp of persimmon fruits, dewatering of raffinate is advisable to be carried out with convective supply of thermal energy by a heated air stream that moves orthogonally along the trajectory of the dried product. The above research results do not conflict with the results of other scientists, which makes it possible to use them in the engineering practice of the food industry in the design of plants for dehydration of plant products. It is noted that the dry raffinate from blanched persimmon contains a large proportion of dietary fiber and swelling capacity. The conducted studies allowed us to identify rational operating parameters of convective drying of fruit raffinate, namely: the speed of the drying agent equal to 2.5 m/s, its temperature 75 °C and the filling level of the working space of the drum – 1/2 with a maximum theoretical productivity of $Y=208$ (kg / (m³ · hour)). The temperature of the coolant differs from the final temperature of the product by 15-20 °C, as a result of which the limiting temperature of the drying agent is assumed to be about 75 °C, which is justified by experimental data at a higher temperature of the coolant relative to the recommended one in the article.

Keywords: persimmon fruit pulp, extraction, raffinate, hygroscopic characteristics, drying kinetics, rational modes, process time

For citation: Makarov AE, Nugmanov AH-Kh, Aleksanyan IYu, Osmolovsky PD, Arapov SM. Kinetic patterns of dehydration, extracted raffinate of persimmon pulp. Modern Science and Innovations. 2024;(4):98-111. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2024.4.10>

Введение. Одним из основных направлений развития пищевой промышленности на современном этапе является разработка и совершенствование ассортимента продуктов питания функциональной направленности, так как вопросы сохранения здоровья населения напрямую связаны с соблюдением режима питания и качественным разнообразием пищевых продуктов, среди которых важное значение имеет употребление плодовоовощной и растениеводческой продукции [1, 2]. Здесь следует отметить плоды субтропических

культур, и в частности, хурмы, которые с учетом своего химического состава, богаты ценными для организма человека биологически активными веществами [3], хорошо известны потребителям, находят разнообразное применение и используются в пищу как в свежем, так и в переработанном, в основном, сушеном виде [4], что позволяет обеспечивать население ценной продукцией в течение всего года [5].

Хурма восточная, сорта которой в соответствии со вкусовыми особенностями плодов делятся на вяжущие и невяжущие [6], широко возделывается в пределах субтропического пояса, однако производители все чаще жалуются на малые возможности реализации ее свежих плодов ввиду того, что они очень быстро портятся и даже при оптимальных сроках сбора с учетом созревания срок их хранения составляет считанные месяцы при том, что сам процесс хранения трудоемок и требует больших затрат с учетом того, что быстрое созревание хурмы после сбора не только делает ее плоды недоступными в отдельные месяцы, но и может довести их потери до 20 % годового объема производства [7]. В тоже время перерабатывающие предприятия не спешат принимать плоды хурмы в производство, зная по опыту, что они являются весьма трудным объектом для переработки, хотя при наличии соответствующих технологий из них можно было бы получать консервы и другую пищевую продукцию, позволяющую обеспечивать потребителей вкусными и ценными продуктами круглогодично.

В условиях современного мира у потребителей все больше увеличивается интерес к потреблению не только свежих, но и освобожденных от большей части влаги плодов и овощей (как в целом виде, так и в виде кусочков), предлагаемых производителями на развес или в различного рода упаковках, что требует совершенствования технологий переработки плодов с целью создания ценных с биологической точки зрения продуктов питания из хурмы [8], с низким содержанием влаги и высокой энергетической ценностью, так как в сушеных плодах основное количество основных питательных веществ в три-четыре раза выше, чем в свежих [9].

В периоды, когда свежие плоды хурмы, оказывающие положительное воздействие на организм человека, недоступны для потребителя ввиду их низкой лежкоспособности. [10], сушеная продукция, изготовленная в виде целых плодов или ломтиков, может служить хорошей альтернативой, тем более, что для сушки все еще чаще используются традиционные методы, такие как сушка на солнце и сушка горячим воздухом [11].

Плоды, высушенные в естественных условиях на солнце, оцениваются по качеству выше [12], но следует учитывать тот факт, что для удовлетворения спроса на сушеную продукцию, процесс сушки хурмы должен проводиться с максимальной интенсивностью, экологичностью и высокой энергоэффективностью, обеспечивая не только безопасность готового продукта, но и получение сушеной хурмы с максимально одинаковыми показателями качества, что должно выполняться независимо от предприятия, на котором производится продукция, будь то крупный комбинат или же малое фермерское хозяйство, осуществляющее процесс в том числе и естественной сушки [13, 14], а производители при максимально возможном снижении затрат энергии должны обеспечивать сохранение высоких качественных показателей [15].

Для традиционной гелиосушки используют плоды хурмы твердой консистенции, собранные в короткий период времени [16], и достаточно часто для предотвращения порчи продукта требуется его обработка диоксидом серы [17]. К тому же при наличии явной экономической выгоды, условия естественной сушки не поддаются контролю, в сильной степени подвержены изменениям погоды, а нахождение продукции на открытом воздухе может привести к загрязнению продукции пылью и насекомыми [18]. В связи с этим в настоящее время большая часть обезвоженных фруктов и овощей производится методом конвективной сушки, который является наиболее простым [19], но наиболее актуальной является задача комплексного решения проблем обезвоживания [20], а при производстве сушеной продукции из плодов хурмы также и разработка альтернативных методов сушки,

позволяющих сушить плоды, ставшие в процессе созревания мягкими, и обеспечивающие большую чистоту продукта и более высокую производительность [21].

Качество высушенных фруктов в определенной степени обусловлено их гигроскопическими параметрами, которые обуславливают воздействие внутреннего тепловлагодиффузионного переноса на скорость влагоудаления сушильным агентом, а также структурообразование конечного материала [22, 23].

В процессе сушки происходит одновременный тепло- и массообмен. Конвекционная сушка – это процесс одновременного тепло- и массообмена, при котором вода за счет диффузии переносится изнутри пищевого материала на поверхность раздела воздух-пища, а с поверхности раздела – в воздушный поток за счет конвекции. Тепло передается конвекцией от воздуха к поверхности раздела воздух-пища и теплопроводностью внутри продукта. [24]

Кинетика сушки может быть определена с помощью эмпирических и теоретических моделей, которые учитывают нестационарные диффузионные явления, или более простых и точных моделей, которые учитывают поверхностные и внутренние сопротивления сушке. Сохранению термочувствительных питательных веществ в плодах и ускорению процесса сушки может способствовать скорость воздушного потока, оказывающая существенное влияние на охлаждение плодов [25].

Для рафината дробленой мякоти плодов хурмы обезвоживание целесообразно осуществлять при конвективном подведении тепловой энергии нагретым воздушным потоком, который движется ортогонально траектории высушиваемого продукта. Следует отметить, что конвективная сушка является одним из наиболее распространенных методов консервирования пищевых продуктов. Очевидно, что для нахождения рационального времени отвода влаги и его механизма необходимо выявить и оценить кинетические закономерности операции обезвоживания, опираясь на гигроскопические характеристики объекта сушки, что и послужило **целью исследования**.

Материалы и методы исследований. Объектом изучения данного исследования принят рафинат дробленой мякоти плодов хурмы сортов Хиакуме, Шарон и Королек, выращенных в Национальном научном центре РАН (Никитском ботаническом саду) в республике Крым.

Взаимосвязь между активностью воды A_w или относительной влажностью воздушной среды ϕ и влажностью материала W объясняется с помощью изотерм сорбции влаги, выражающими связь между этими параметрами при постоянной температуре (T), которые важны при проектировании оборудования для сушки, упаковки и хранения, для прогнозирования срока годности, а также для определения критической активности влаги для приемлемости продуктов, которые портятся в основном за счет увеличения W . Для определения гигроскопических характеристик мякоти плодов хурмы реализован тензометрический подход, когда навески мякоти плодов хурмы выдерживались в эксикаторной емкости с сернокислым раствором варьируемой концентрации, отвечающей определенной ϕ (A_w) до уравнивания системы, когда влажность W_p рассчитывалась, как:

$$W_p = \frac{G_2 - G_1(1 - W_{\text{образца}})}{G_2}, \quad (1)$$

где для навески $W_{\text{образца}}$ – исходная, кг/кг, G_1 – исходная масса; G_2 – масса в равновесных условиях, кг.

Одной из задач данного научного анализа является определение рациональной для хранения итоговой W . Для изотерм сорбции идентифицируем [13] A_w и ϕ , по причине того, что паровые давления (P) в приграничном слое над навеской и в объеме эксикаторной емкости идентичны.

Рекомендуется двухстадийная аппроксимация изотермы сорбции в интервалах от W_0 до W_m и за W_m (рис. 4, 5, 6). W_0 , где мономолекулярно адсорбционная влага меняется на полимолекулярную присутствует при пересечении нормали из точки при $A_w = 0,1$ к оси абсцисс. Предельное значение активности воды до уровня 0,1 выбрано не случайно, т.к. понижение $A_w = 0,1$ происходит прекращение химических и ферментативных воздействий на объект, кроме липидного окисления и преобразования Майяра. Влага адсорбированного монослоя не выводится при обезвоживании, поэтому стадия от 0 до W_0 не математически не описывается. При превышении W_m удаляется преимущественно капиллярная и структурная вода. W_m определяется пересечением нормали из точки, в которой A_w равноудалена от крайних величин 1-ой зоны, к оси абсцисс.

Кинетические закономерности удаления влаги выявляли, используя вероятностно-статистические подходы к планированию и обработке эмпирических результатов в заданных рамках варьирования.

Опытный стенд для исследования сушки мякоти плодов хурмы, показанный на рисунке 1, скомпонован из: 1 – калориферного цзла; 2 – весового устройства электронного исполнения; 3 – приспособления для подвешивания навески; 4 – термического датчика; 5 – отсека для сушки; 6 – анемометра; 7 – навески; 8 – термодатчика; 9 – нагревательного элемента; 10 – барабанного узла.

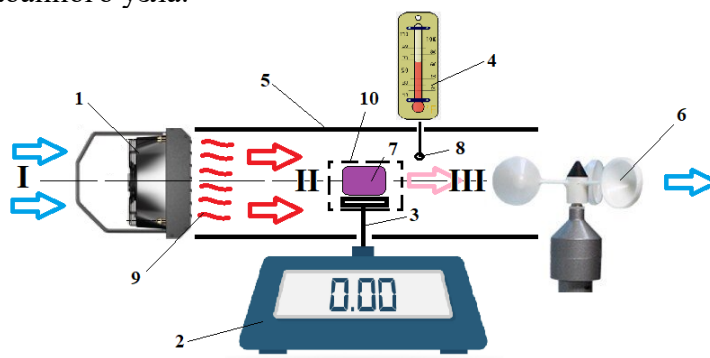


Рисунок 1 – Экспериментальный стенд для изучения конвективного влагоудаления из рафината мякоти плодов хурмы. Потoki: I – холодной воздушной среды; II – теплоносителя с определенными T и интенсивностью движения; III – отработанного теплоносителя / Figure 1 – An experimental stand for studying convective moisture removal from the raffinate pulp of persimmon fruits. Flows: I – cold air; II – coolant with certain T and intensity of movement; III – spent coolant

Предусмотрена регулировка доли загрузки барабана, T и скорости сушильного агента, (в опытах 4,5 м/с) T которого не больше 120 °С, что минимизирует вероятность превышения критической T материала

За влияющие на скорость сушки факторы взяты: степень загрузки барабанного узла, T теплоносителя, интенсивность его перемещения и направленность. При этом необходима информация об суммарной доле воды в рафинате, так как при завершении экстракции она может варьироваться в сравнении с уже ранее определенной влажностью в исходной дробленной мякоти хурмы исследуемых сортов. Определение содержания сухих веществ в рафинате мякоти плодов хурмы проводилось посредством термогравиметрического анализатора W MX-50.

Сушку рафината из плодов хурмы проводили в прямоточном агрегате барабанного типа. Интенсивность перемещения теплового агента обеспечивалась при минимизации уноса пыли. При этом критическая скорость составляла 2,5 м/с.

Опыты осуществляли при варьировании T и интенсивности прохождения теплового агента осуществляли на экспериментальном стенде, схема которого приведена на рисунке 2.

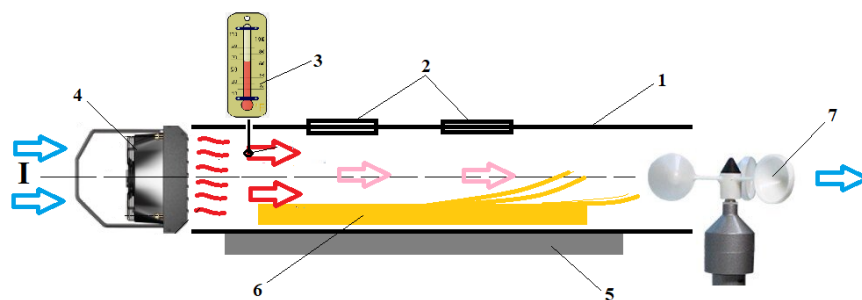


Рисунок 2 – Экспериментальный стенд для определения рациональных T и интенсивности перемещения теплоносителя: 1 – отсек для сушки; 2 – радиационный пирометр бесконтактного исполнения; 3 – термический датчик; 4 – калориферная установка; 5 – подставка; 6 – материал для влагоудаления; 7 – анемометр / Figure 2 – Experimental stand for determining the rational T and intensity of coolant movement: 1 – drying compartment; 2 – radiation pyrometer of non-contact design; 3 – thermal sensor; 4 – heater installation; 5 – stand; 6 – material for moisture removal; 7 – anemometer

В данном стенде T продукта находилась посредством высокотемпературного пирометра DT-9862, имеющего возможность, кроме T продукта, проводить замеры T и φ , а также T мокрого термометра и точки росы; причем интенсивность движения воздуха находилась посредством анемометра Мегеон 11030.

Итак, единственным варьируемым фактором служит степень загрузки барабанного узла. Так как диаметры барабанов обычно составляют от 1 до 2,8 м при соотношении их с длиной в рамках 3,5 – 7, в нашем варианте примем его равным 4-м.

Результаты исследований и их обсуждение. В результате проведения опытной серии получены изотермы сорбции высушенного рафината мякоти плодов хурмы сортов Хиакуме, Шарон и Королек, при T теплоносителя 298 К, показанные на рисунке 3.

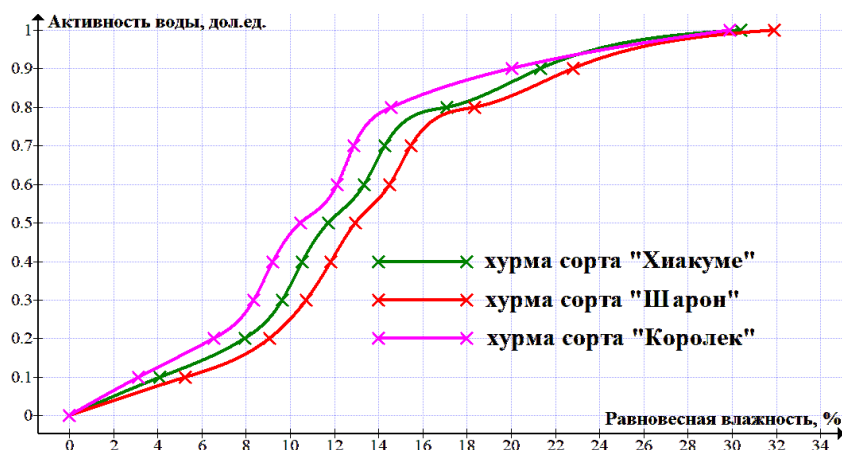


Рисунок 3 – Изотерма сорбции при T 298 К для рафината мякоти плодов хурмы / Figure 3 – Sorption isotherm at T 298 K for persimmon pulp raffinate

Учитывая [26], что в основном изотермы сорбции пищевых материалов обладают сигмовидную конфигурацию при трех характерных участках остановимся на двухзонной интерпретации, которая более явно проявляется в полулогарифмической координатной сетке (рисунок 4).

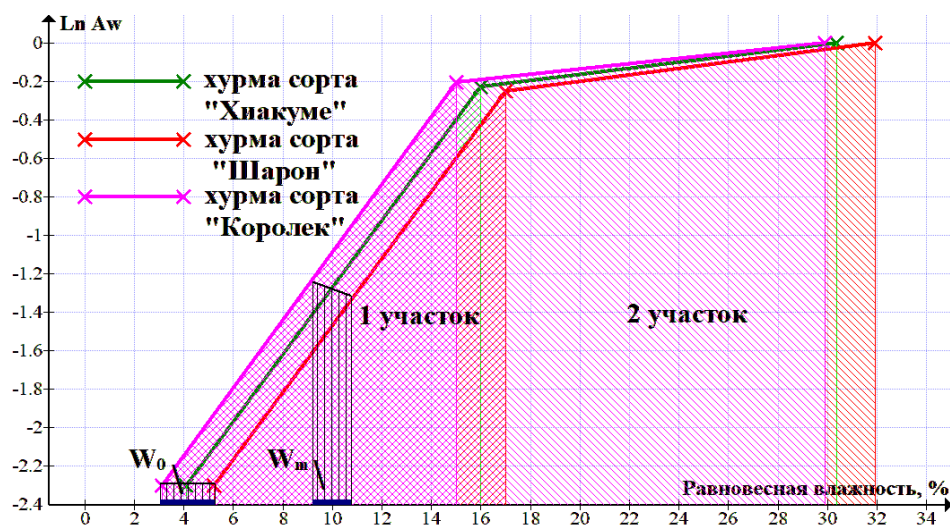


Рисунок 4 – Разделение на зоны с варьируемой связью влаги с сухим остатком /
Figure 4 – Division into zones with a variable moisture-dry residue relationship

На представленных изотермах сорбции наблюдаются 3 зоны, но, как уже отмечалось рассмотрено только две, причем основной является зона мономолекулярной адсорбции при сильной энергетической связи, которая обуславливает минимизацию или отсутствие микробной активности. По данной причине ее верхняя граничная W принята за итоговую при сушке (от 9 до 11 %). При этом ϕ в хранилище с учетом изотерм сорбции должна быть не выше 60 %.

В таблице 1 сведены опытные данные по W в рафинате из мякоти плодов хурмы «Хиакуме», «Шарон» и «Королек».

Таблица 1 – W в рафинате из мякоти плодов хурмы /
Table 1– W in raffinate from the pulp of persimmon fruits

Сорт хурмы	W рафината, %					Средняя величина
	1	2	3	4	5	
«Хиакуме»	61,42	62,11	61,75	62,07	61,77	61,84
«Шарон»	60,59	61,3	61,32	60,74	60,76	60,93
«Королек»	62,68	62,5	61,89	61,35	62,12	62,12
Рафинат	Средняя величина					61,63

Принимая во внимание незначительный разброс W рафинатов исследуемых видов плодов хурмы, можно с уверенностью заключить, что рациональные режимы влагоудаления для них также сходны, что позволяет за объект изучения принять один сорт, применяя средние величины их физико-химических параметров.

Рост T теплоносителя снижает время операции влагоудаления, но отрицательно отражается на набухающей способности высушенного материала, что обуславливает целесообразность выбора оптимальной величины T , минимизируя падение качества.

Мякоть плодов хурмы экстрагировали при больших T , при этом рафинат из мякоти плодов хурмы сохранил большую долю пищевых волокон. Для обеспечения приемлемой набухающей способности обезвоженного материала в процессе сушки его T не должна превышать 50 °С. Разность T между продуктом и сушильным агентом для поддержания движущей силы влагоудаления с учетом его интенсивности движения и траектории, обычно составляет в конце операции 15...20 °С, то есть его T равна примерно 75 °С. Установлено, что при повышении T агента T материала не превышала 50 °С.

В таблице 2 представлены переменный и зафиксированные параметры.

Таблица 2 – Параметры, обуславливающие скорость влагоудаления рафината при перемещении теплоносителя вдоль поверхности материала / Table 2 – Parameters determining the rate of moisture removal of raffinate when moving the coolant along the surface of the material

Исходная W , %	Степень загрузки барабанного узла	T теплоносителя, °C	Интенсивность движения теплоносителя, м/с	Итоговая W рафината, %
61,63	1/3; 1/2; 2/3	75	2,5	10

Важнейшим показателем обезвоживания служит масса сухого материала M , отнесенная к объему зоны V и времени τ влагоудаления Y , кг/(м³·ч), которую находим, как

$$Y = \frac{M}{\tau \cdot V}, \quad (2)$$

В итоге построены кривые конвективной сушки частичек рафината мякоти плодов хурмы (таблица 4, рисунок 5).

Таблица 3 – Результаты изучения операции обезвоживания / Table 3 – Results of the study of the dehydration operation

Table 5. Results of the study of the desugaring operation				
Степень загрузки барабана	T теплоносителя, °C	Интенсивность движения теплоносителя, м/с	продолжительность, мин	Удельный съем сухого материала, кг/(м³·час)
1/3	75°C	2,5 м/с	45	182
1/2			95	208
2/3			130	202
Протяженность барабанного узла – 10 см; его диаметр – 2,5 см; о – 49,087 см³; 1/3 объема – 16,36 см³; 1/2 объема – 24,54 см³; 2/3 объема – 32,72 см³; Средняя плотность рафината – 959 кг/м³				

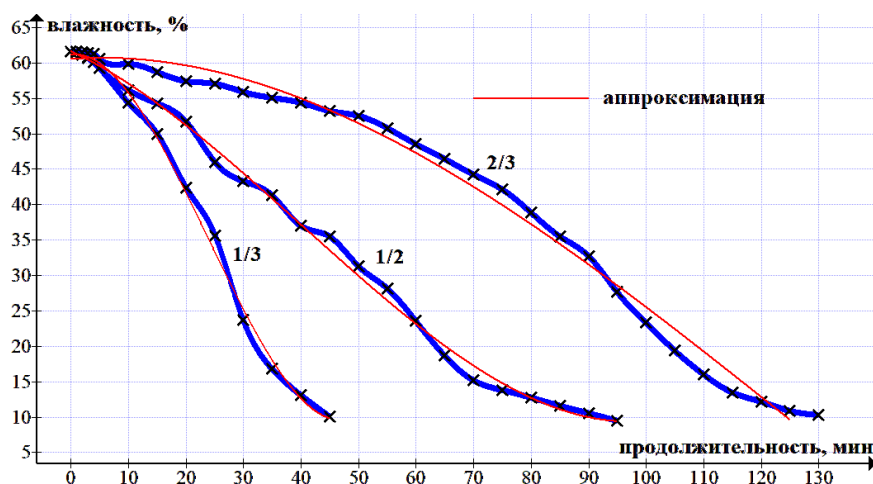


Рисунок 5 – Кривые обезвоживания рафината мякоти плодов хурмы при T сушильного агента 75 °C, его интенсивности движения 2,5 м/с при разной степени заполнения от 1/3 до 2/3 / Figure 5 – Curves of dehydration of raffinate of persimmon fruit pulp at T of drying agent 75 °C, its intensity of movement 2.5 m/s at different degrees of filling from 1/3 to 2/3

Данные кривые математически описаны, в частности, при степени загрузки на 1/3 (3), 1/2 (4) и на две трети (5):

$$W = 0,00105\tau^3 - 0,0753\tau^2 + 0,115\tau + 61,119, \quad (3)$$

$$W = 7,50503\tau^3 - 0,0090\tau^2 + 0,369\tau + 61,624, \quad (4)$$

$$W = 1,44847\tau^3 - 0,0055\tau^2 + 0,059\tau + 60,527, \quad (5)$$

где W – влажность рафината, %; τ – продолжительность сушки, мин.

Итак, рациональными величинами факторов можно считать: интенсивность движения теплоносителя – 2,5 м/с, его $T=75$ °С и степень загрузки барабанного узла – 1/2 при максимальной $Y = 208$ (кг/(м³·час)) (табл. 3). При этом время влагоудаления из рафината составило 95 минут до $W_k = 10$ %.

Для анализа механизма влагоудаления получены его кинетические закономерности путем преобразования кривых сушки (рисунок 6).

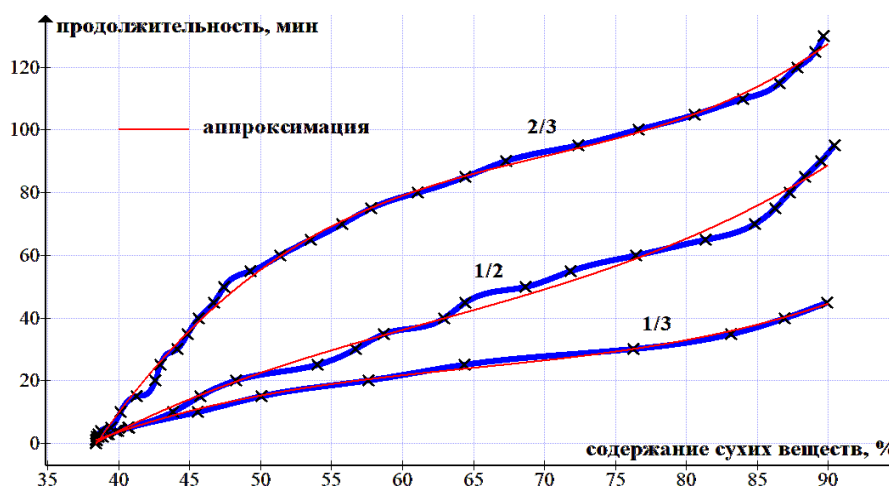


Рисунок 6 – Кривые обезвоживания рафината из мякоти плодов хурмы при различной степени заполнения / Figure 6 – Curves of dehydration of raffinate from the pulp of persimmon fruits with varying degrees of filling

Для получения математических зависимостей скорости сушки от W или доли сухого остатка (C) $\frac{d(1-W)}{d\tau} = f(1-W)$ получены функции $\tau = f(C)$ ($C = 1 - W$) (6, 7 и 8), которые приведены на рисунке 6.

$$\tau = 0,00057C^3 - 0,1116C^2 + 7,712C - 162,939, \quad (6)$$

$$\tau = 0,00067C^3 - 0,1251C^2 + 8,996C - 198,900, \quad (7)$$

$$\tau = 0,00183C^3 - 0,3839C^2 + 27,95C - 610,698, \quad (8)$$

А также в виде математических зависимостей (9, 10 и 11), которые графически приведены на рисунке 7:

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{1}{0,001725C^2 - 0,2233C + 7,7123}, \quad (9)$$

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{1}{0,002021C^2 - 0,2501C + 8,9959}, \quad (10)$$

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{1}{0,005485C^2 - 0,7679C + 27,950}, \quad (11)$$

где $\frac{dC}{d\tau}$ – интенсивность влагоудаления, %/мин.

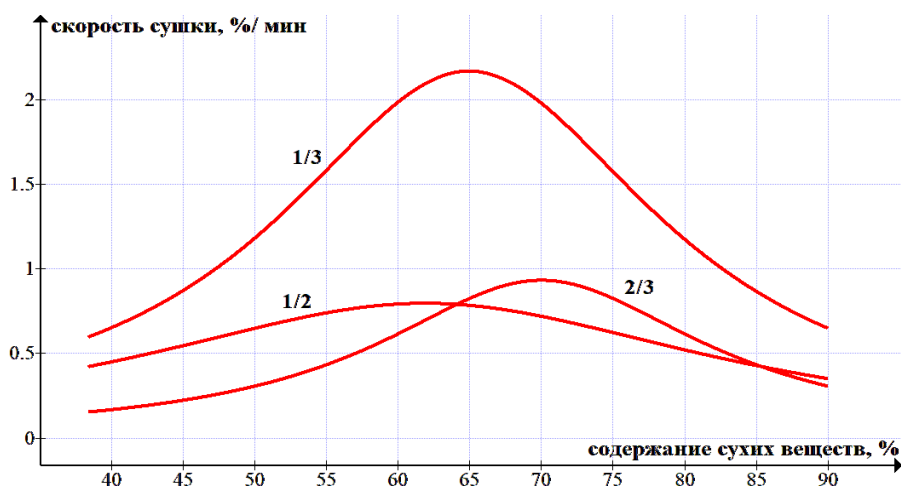


Рисунок 7 – Кинетические кривые обезвоживания при различной степени заполнения / Figure 7 – Kinetic curves of dehydration at different degrees of filling

Как видно на кривой интенсивности сушки присутствуют две зоны, которые согласуются с подобными исследованиями.

В 1-ой зоне при повышении интенсивности процесса до пика отводится в основном вода в свободном состоянии от поверхности навески. При этом по причине парообразования при отнятии тепла нет риска перегрева образца. При этом вследствие увеличения S уменьшаются зазоры между частицами дисперсной среды, что обуславливает организацию внутренней капиллярно-пористой структуры сухого материала. В конце 1-й стадии W на границе образца становится гигроскопической и начинает удаляться связанная вода, что обуславливает падение десорбционной усадки. Во 2-ой зоне после прохождения экстремума по причине увеличения несоответствия расхода пара при испарении расходу воды, продвигающейся изнутри образца, наблюдается углубление границы парообразования. T по объему образца поднимается, стремясь к T теплоносителя, при этом появляется вероятность растрескивания поверхностного слоя.

Заключение. В результате проведенных экспериментальных исследований по сушке рафината из мякоти хурмы были получены кинетические закономерности этого процесса, которые необходимы для определения рациональной длительности обезвоживания и выявления его механизма, в том числе, и на основе данных по гигроскопическим характеристикам обезвоживаемого образца, причем, необходимо отметить, что полученный вид кривой сушки типичен для продуктов растительной природы, к коим относится и исследуемый объект.

Проведенные исследования позволили выявить рациональные режимные параметры конвективной сушки фруктового рафината из мякоти хурмы определенных сортов, а именно:

- анализ построенных изотерм сорбции влаги мякотью хурмы позволил выявить итоговую влажность сухого продукта от 9 до 11 %, при этом влажность в хранилище с учетом тех же изотерм сорбции должна быть не выше 60 %;

- скорость сушильного агента принять равной 2,5 м/с, его температуру 75 °C и уровень заполнения рабочего пространства барабана – 1/2;

Сравнение полученных данных с данными иных исследователей приводит к выводу о том, что они не противоречат друг другу, в связи с чем считаем, что полученные результаты можно применить при моделировании процесса удаления влаги из рафината мякоти хурмы и проектировании соответствующих сушильных барабанных установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Piskunova N. A., Osmolovskiy P. D., Dorozhkina A. A., Nemenushchaya L. A., Vorobyova N. N. Particular qualities of formation of sensory characteristics of jam made from the fruits from musky squash // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Art. No. 012105. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012105>
2. Гафизов Г. К., Мамедов Н. А. Технология получения пищевого продукта из выдержанной размягченной хурмы: функциональные возможности и перспективы коммерциализации // Modern Economy Success. 2017. № 1. С. 25–46.
3. Бахшалиева Н. З., Мамедов Д. И. О., Алиева К. А. А. Биохимический состав плодов местных сортов и форм хурмы, распространенных в Шеки-Закатальском экономическом районе // Аграрный научный журнал. 2023. № 3. С. 4–7. <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i3>
4. Омаров М. Д., Омарова З. М., Белоус О. Г. Сортвые особенности качества плодов хурмы восточной и её значение // Проблемы развития АПК региона. 2019. № 2 (38). С. 131–135.
5. Назаров А. М., Болтаев М. А. Способы сушки плодов хурмы в электрическом сушильном оборудовании // Символ науки: международный научный журнал. 2021. № 3. С. 42–45.
6. Загиров Н. Г., Ибрагимов Н. А. Интродуцированные сорта хурмы восточной и их биохимический состав в условиях сухих субтропиков Южного Дагестана // Субтропическое и декоративное садоводство. 2019. № 68. С. 46–51. <https://doi.org/10.31360/2225-3068-2019-68-46-51>
7. Гафизов Г. К. Влияние способа подготовки к сушке и различных режимов воздушно-теплого обогрева на некоторые качественные показатели обезвоженной хурмы // Евразийское Научное Объединение. 2021. № 6-2 (76). С. 97–102. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5090204>
8. Melnikov V. A., Panyushkina E. S., Plugatar Y. V., Khokhlov S. Y. Morpho-biological features of oriental persimmon pollen // Acta Horticulturae. 2022. Vol. 1339. P. 133–137. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1339.18>
9. Нормаматов Р. Хурма - ценный источник каротина // Пищевая промышленность. 2023. № 1. С. 33–35. <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.1.1.007>
10. Polat A., Taşkın O., İzli N. Assessment of freeze, continuous, and intermittent infrared drying methods for sliced persimmon // Journal of Food Science. 2024. Vol. 89 (4). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16994>
11. Kursun E., Karaca H. Dried persimmons: bioactive components, health aspects and current drying techniques // Acta Horticulturae. 2018. Vol. 1195 (1195). P. 169–176. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1195.27>
12. Silva de Jesus M., Araujo H., Denadai M., Sandes R. D. D. Effect of different drying methods on the phenolic and volatile compounds of persimmon (*Diospyros kaki* L.) // Journal of Food Measurement and Characterization. 2023. Vol. 17 (5762). P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01803-6>
13. Oliveira N., Silva S.H., Figueiredo J.D.A., Norcino L. Infrared-assisted freeze-drying (IRFD) of açai puree: Effects on the drying kinetics, microstructure and bioactive compounds // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2021. Vol. 74 (2). Art. No. 102843. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102843>
14. Курбанов Н. М., Файзуллаева М. Ф. К., Розикова Д. А., Хусанова М. Н. Основные технологические процессы естественной сушки хурмы (*Diospyros*) // Universum: технические науки. 2023. № 5-10 (98). С. 10–13.
15. Бурдо О. Г., Терзиев С. Г., Гаврилов А. В., Сиротюк И. В., Щербич М. В. Система инновационных энерготехнологий обезвоживания пищевого сырья // Проблемы региональной энергетики. 2020. № 2 (46). С. 92–107. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898317>
16. Hafizov G. Research of Functional and Technological Properties of Persimmon Fruits as an Object of Drying // Earth Sciences. 2021. Vol. 10 (3). P. 118–127. <https://doi.org/10.11648/j.earth.20211003.15>
17. Shi B.-Z., Duan X.-C., Wu Y.-T., Liang L.-Y., Jiao Z.-G., Feng S.-L. Patterns of the Physiological and Biochemical Changes during the Persimmon Drying Process // Modern Food Science and Technology. 2017. Vol. 33(9). P. 224–230. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.9.033>
18. Yang K. W., Wang D., Vidyarthi S., Li S.-B., Liu Z., Wang H., Chen X.-J., Xiao H.-W. Pulsed Vacuum Drying of Persimmon Slices: Drying Kinetics, Physicochemical Properties, Microstructure and Antioxidant Capacity // Plants. 2022. Vol. 11 (19). <https://doi.org/10.3390/plants11192500>
19. Kang S. W., Hwang J. H., Chung K. H., Park S. H. Evaluation of infrared assisted freeze drying for strawberry snacks: drying kinetics, energy efficiency and quality attributes // Food Science and Biotechnology. 2021. Vol 30. (3). <https://doi.org/10.1007/s10068-021-00949-1>

20. Gavrilov A. V., Gerber Yu. B. Study of the features of modeling microwave vacuum evaporation // BIO Web of Conferences. 2023. Vol. 78. Art. No. 06003. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237806003>
21. Mikayilov V., Omarova E., Kazimova I., Aliyeva J., Fatma A. Development of technology for obtaining juice from persimmon fruit (*Diospyros kaki* L.) // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 2(11(128)). P. 34–45. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302282>
22. Ташиев Н. М., Дилишатов О. У. Влияние характера движения теплоносителя на скорость сушки продуктов // Наука. Образование. Техника. 2023. № 3 (78). С. 5–11. https://doi.org/10.54834/16945220_2023_3_5
23. Андреева Е. В., Евсеева С. С., Нугманов А. Х. Х., Алексанян И. Ю. Гигроскопические параметры рафината как объекта обезвоживания после экстракции красящих компонентов из плодовоовощного сырья // Индустрия питания. 2021. № 6 (1). С. 75–82. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2021-6-1-9>
24. Demiray E., Tulek Y. The effect of pretreatments on air drying characteristics of persimmons // Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 53 (1). <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1797-2>
25. Corrêa J., Lopes F. J., Mello Junior R. E., Jesus de Junqueira J. R., Soares de Mendonça K., Macedo L. L., Salvio L. G. A. Drying of persimmon fruit (*Diospyros kaki* L.) pretreated by different osmotic processes // Journal of Food Process Engineering. 2021. Vol. 44 (10). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13809>
26. Hssaini L., Ouaabou R., Charafi J., Idlimam A., Lamharrar A., Razouk R., Hanine H. Hygroscopic properties of fig (*Ficus carica* L.): Mathematical modelling of moisture sorption isotherms and isosteric heat kinetics // South African Journal of Botany. 2022. Vol. 145. P. 265–274. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.11.026>

REFERENCES

1. Piskunova NA, Osmolovskiy PD, Dorozhkina AA, Nemenushchaya LA, Vorobyova NN. Particular qualities of formation of sensory characteristics of jam made from the fruits from musky squash. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021;012105. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012105>
2. Gafizov GK, Mammadov NA. Technology of obtaining a food product from aged softened persimmon: functionality and prospects of commercialization. Modern Economy Success. 2017;(1):25-46. (In Russ.).
3. Bakhshalieva NZ, Mammadov DIO, Alieva KAA. Biochemical composition of persimmon fruits of local varieties and forms common in Shaki-Zagatala economic district. Agrarian Scientific Journal. 2022;(3):4-7. (In Russ.). <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i3>
4. Omarov MD, Omarova ZM, Belous OG. Varietal characteristics of the quality of oriental persimmon fruits and its significance. Problemy razvitiya APK regiona = Problems of development of the agro-industrial complex of the region. 2019;2(38):131-135. (In Russ.).
5. Nazarov AM, Boltaev MA. Methods of drying persimmon fruits in electric drying equipment. Simvol nauki: mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal = Symbol of Science: an international scientific journal. 2021;(3):42-45 (In Russ.).
6. Zagirov NG, Ibragimov NA. Introduced varieties of oriental persimmon and their biochemical composition in the conditions of dry subtropics of Southern Dagestan. Subtropical and ornamental horticulture. 2019;(68):46-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.31360/2225-3068-2019-68-46-51>
7. Gafizov GK. The influence of the method of preparation for drying and various modes of air-thermal heating on some qualitative indicators of dehydrated persimmons. Evraziiskoe Nauchnoe Ob"edinenie = Eurasian Scientific Association. 2021;6-2(76):97-102. (In Russ.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.5090204>
8. Melnikov VA, Panyushkina ES, Plugatar YV, Khokhlov SY. Morpho-biological features of oriental persimmon pollen. Acta Horticulturae. 2022;1339:133-137. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1339.18>
9. Normakhmatov R. Persimmon is a valuable source of carotene. Food processing industry. 2023;1:33-35 (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.1.1.007>
10. Polat A, Taşkın O, İzli N. Assessment of freeze, continuous, and intermittent infrared drying methods for sliced persimmon. Journal of Food Science. 2024;89(4). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16994>

11. Kursun E, Karaca H. Dried persimmons: bioactive components, health aspects and current drying techniques. *Acta Horticulturae*. 2018;1195(1195):169-176. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1195.27>
12. Silva de Jesus M, Araujo H, Denadai M, Sandes RDD. Effect of different drying methods on the phenolic and volatile compounds of persimmon (*Diospyros kaki* L.). *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2023;17(5762):1-19. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01803-6>
13. Oliveira N, Silva SH, Figueiredo JDA, Norcino L. Infrared-assisted freeze-drying (IRFD) of açai puree: Effects on the drying kinetics, microstructure and bioactive compounds. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2021; 74 (2): 102843. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102843>
14. Kurbanov NM, Fayzullayeva MFK, Rozikova DA, Khusanova MN. The main technological processes of natural drying of persimmons (*Diospyros*). *Universum: tekhnicheskie nauki = Universum: Technical Sciences*. 2022;5-10(98):10-13 (In Russ.)
15. Burdo OG, Terziev SG, Gavrilov AV, Sirotiyuk IV, Shcherbich MV. The system of innovative energy technologies for dehydration of food raw materials. *Problems of regional energy*. 2020;(46):92-107. (In Russ.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898317>
16. Hafizov G. Research of Functional and Technological Properties of Persimmon Fruits as an Object of Drying. *Earth Sciences*. 2021;10(3):118-127. <https://doi.org/10.11648/j.earth.20211003.15>
17. Shi B-Z, Duan X-C, Wu Y-T, Liang L-Y, Jiao Z-G, Feng S-L. Patterns of the Physiological and Biochemical Changes during the Persimmon Drying Process. *Modern Food Science and Technology*. 201; 33(9):224-230. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.9.033>
18. Yang KW, Wang D, Vidyarthi S, Li S-B, Liu Z, Wang H, Chen X-J, Xiao H-W. Pulsed Vacuum Drying of Persimmon Slices: Drying Kinetics, Physicochemical Properties, Microstructure and Antioxidant Capacity. *Plants*. 2022;11(19). <https://doi.org/10.3390/plants11192500>
19. Kang SW, Hwang JH, Chung KH, Park SH. Evaluation of infrared assisted freeze drying for strawberry snacks: drying kinetics, energy efficiency and quality attributes. *Food Science and Biotechnology*. 2021;30(3). <https://doi.org/10.1007/s10068-021-00949-1>
20. Gavrilov AV, Gerber YuB. Study of the features of modeling microwave vacuum evaporation. *BIO Web of Conferences*. 2023;78:06003. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237806003>
21. Mikayilov V, Omarova E, Kazimova I, Aliyeva J, Fatma A. Development of technology for obtaining juice from persimmon fruit (*Diospyros kaki* L.). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024;2(11(128)):34-45. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302282>
22. Tashiev NM, Dilishatov OU. The influence of the nature of the movement of the coolant on the drying rate of products. *Nauka. Obrazovanie. Tekhnika. = Science. Education. Technic*. 2023;3(78):5-11 (In Russ.). https://doi.org/10.54834/16945220_2023_3_5
23. Andreeva EV, Evseeva SS, Nugmanov АНН, Аleksanyan IYu. Hygroscopic parameters of raffinate as an object of dehydration after extraction of coloring components from fruit and vegetable raw materials. *The food industry*. 2021;6(1):75-82. (In Russ.). <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2021-6-1-9>
24. Demiray E, Tulek Y. The effect of pretreatments on air drying characteristics of persimmons // *Heat and Mass Transfer*. 2017; 53(1). <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1797-2>
25. Corrêa J, Lopes FJ, Mello Junior RE, Jesus de Junqueira JR, Soares de Mendonça K, Macedo LL, Salvio LGA. Drying of persimmon fruit (*Diospyros kaki* L.) pretreated by different osmotic processes. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(10). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13809>
26. Hssaini L, Ouabou R, Charafi J, Idlimam A, Lamharrar A, Razouk R, Hanine H. Hygroscopic proprieties of fig (*Ficus carica* L.): Mathematical modelling of moisture sorption isotherms and isosteric heat kinetics. *South African Journal of Botany*. 2022;145:265-274. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.11.026>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Артем Евгеньевич Макаров – технолог продукции общественного питания, ООО «ПАСТАПИЦЦА», <http://orcid.org/0000-0002-6787-7697>, artem.makarov.2011@mail.ru

Альберт Хамед-Харисович Нугманов – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии хранения и переработки плодоовощной и растениеводческой продукции, ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева, <http://orcid.org/0000-0002-4093-9982>, nugmanov@rgau-msha.ru

Игорь Юрьевич Алексанян – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологических машин и оборудования», Астраханский государственный технический университет, <http://orcid.org/0000-0001-5494-1226>, 16081960igor@gmail.com

Павел Дмитриевич Осмоловский – канд. с.-х. наук, младший научный сотрудник лаборатории селекции и семеноводства рапса, Липецкий НИИ рапса – филиал ФГБНУ ФНЦ «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В.С. Пустовойта», ScopusID: 57360896200, ResearcherID: AFI-8004-2022, <http://orcid.org/0000-0003-1131-1552>, pavel.osmolovsku@mail.ru

Семид Михайлович Арабов – аспирант 4-го года обучения, ГБОУ АО ВО «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет», <http://orcid.org/https://orcid.org/0009-0008-5051-4428>, ms.arabov@mail.ru

Вклад авторов:

Макаров А.Е. – проведение эксперимента, обработка данных эксперимента, полученных в ходе исследования;

Нугманов А.Х.-Х. – научное руководство, разработка концепции научного исследования, контроль над проведением научного исследования;

Алексанян И.Ю. – обоснование концепции исследования, контроль над проведением научного исследования;

Осмоловский П.Д. – обработка данных эксперимента, полученных в ходе исследования, подготовка научной статьи под требования журнала;

Арабов С.М. – обзор литературных источников, их анализ.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию: 07.10.2024;
одобрена после рецензирования: 28.11.2024;
принята к публикации: 10.12.2024.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Artem E. Makarov – Technologist of Public Catering Products, LLC "PASTAPITZA", <http://orcid.org/0000-0002-6787-7697>, artem.makarov.2011@mail.ru

Albert H.-Kh. Nugmanov – Dr. Sci. (Techn), Professor, Professor of Technologies of Storage and Processing of Fruit and Vegetable and Crop Products Department, Russian State Agrarian University named after K.A. Timiryazev, <http://orcid.org/0000-0002-4093-9982>, nugmanov@rgau-msha.ru

Igor Yu. Aleksanyan – Dr. Sci. (Techn), Professor, Professor of the Department of Technological Machines and Equipment, Astrakhan State Technical University, <http://orcid.org/0000-0001-5494-1226>, 16081960igor@gmail.com

Pavel D. Osmolovskiy – Cand. (Agric.), Junior Researcher at the Laboratory of Rapeseed Breeding and Seed Production, Lipetsk Rapeseed Research Institute – branch of the All-Russian Scientific Research Institute of Oilseeds named after V.S. Pustovoyt, ScopusID: 57360896200, ResearcherID: AFI-8004-2022, <http://orcid.org/0000-0003-1131-1552>, pavel.osmolovsku@mail.ru

Semid M. Arabov – Postgraduate Student of the 4th year of study, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, <http://orcid.org/https://orcid.org/0009-0008-5051-4428>, ms.arabov@mail.ru

Contribution of the authors:

Artem E. Makarov – conducting an experiment, processing experimental data obtained during the study;

Albert H.-Kh. Nugmanov – scientific leadership, development of the concept of scientific research, control over the conduct of scientific research;

Igor Yu. Aleksanyan – substantiation of the research concept, control over the conduct of scientific research;

Pavel D. Osmolovskiy – processing of experimental data obtained during the research, preparation of a scientific article according to the requirements of the journal;

Semid M. Arabov – review of literary sources, their analysis.

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted: 07.10.2024;
approved after reviewing: 28.11.2024;
accepted for publication: 10.12.2024.