

Научная статья

УДК [664.834:635.615]:[001.891.57:604.4:577.16]

DOI: 10.17586/2310-1164-2021-14-2-31-39

Реализация адаптированной математической модели сушки арбузного полуфабриката

В.А. Лебедев¹, И.Ю. Александян², А.Х.-Х. Нугманов^{2*}, Ю.А. Максименко², В.Н. Лысова²¹ООО «Газпром переработка», Россия, Астраханская область, с. Джанай²Астраханский государственный технический университет, Россия, Астрахань, *albert909@yandex.ru

Аннотация. Определяли эволюции температурного фронта по слою продукта в процессе сушки арбузного полуфабриката в рамках температурных и технологических ограничений. Решали ряд задач по выявлению температурных ограничений и граничных условий при контакте фаз в процессе сушки арбузного полуфабриката, построению математической модели тепломассопереноса и обоснованию допущений при ее решении методом конечных разностей. Объектом исследования являлся арбузный полуфабрикат – специально подготовленная мякоть ягоды с добавлением пищевого мела и соды. При его обезвоживании до заданной конечной влажности можно получить порошок, из которого впоследствии экстрагируют каротиноидный пигментный комплекс – ликопин (E-160d). Наиболее подходящим для этого методом является сушка при кондуктивно-конвективном подводе тепловой энергии посредством нагретого углекислого газа при температуре 90°C, благодаря термолабильности продукта и для исключения негативного для ликопина контакта с кислородом. Перемещение теплоносителя осуществлялось вдоль поверхности высушиваемого материала, нанесенного тонким слоем на предварительно нагретую этим же теплоносителем рабочую дисковую поверхность. Влажный продукт для интенсификации процесса влагоудаления заранее нагревается до технологически заданной температуры. В данной технологической схеме получения ликопина процесс сушки являлся наиболее энергоемкой стадией технологии и определяющей конечное качество готовой продукции. В связи с этим от результата решения поставленных задач, сводимых к распределению температуры по слою продукта в течение всего процесса обезвоживания, зависит, будет ли зафиксирован факт превышения порогового значения температуры, равного 363 К. Измерить температуру не представляется возможным, а ее контроль необходим для сохранения потребительских свойств целевого компонента в высушиваемом арбузном полуфабрикate.

Ключевые слова: процессы тепломассообмена; обработка сушкой; математическая модель; численные методы; поля температур; мякоть арбуза; ликопин

Original article

Implementation of the mathematical model for drying watermelon semi-finished product

Viktor A. Lebedev¹, Igor Yu. Aleksanian², Albert H.-H. Nugmanov^{2*}, Yury A. Maksimenko², Vera N. Lysova²¹Gazprom Pererabotka LLC, Janay vlg., Astrakhan reg., Russia²Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, *albert909@yandex.ru

Abstract. The aim of the study is to determine the evolution of the temperature front along the product layer during the drying within the temperature and technological constraints. To achieve this goal, a number of tasks have been solved such as: identification of temperature restrictions and boundary conditions at phase contact during the drying of watermelon semi-finished product, and construction of a mathematical model for heat and mass transfer and justification of assumptions when solving it by the finite difference method. Watermelon semi-finished product is specially prepared berry pulp with the addition of food chalk and soda, which is dehydrated to a given final humidity when you can get a powder product, from which the carotenoid pigment complex – lycopene (E-160d), which is in demand on the Russian market, is subsequently extracted. The most suitable method of dehydration of watermelon semi-finished product is drying with a conductive-convective supply of heat energy by means of heated carbon dioxide at the temperature of 90°C, due to the thermal stability of the product and to exclude its negative contact with oxygen for lycopene. The transfer of the heat carrier is carried out along the surface of the material to be dried, applied in a thin layer on the working disk surface preheated with the same heat carrier. To intensify the dehumidification process, the wet product is preheated to a technologically set temperature. In the presented technological scheme for obtaining lycopene, the drying process is the most energy-intensive stage of the technology and determines the final quality of the finished product, therefore, the result of solving the tasks set, which are ultimately reduced to the temperature distribution over the product layer during the entire dewatering process, depends on whether the fact of exceeding the threshold temperature value of 363 K, which is not possible to measure, is recorded, and its control is necessary to preserve

the consumer properties of the target component in the dried watermelon semi-finished product.

Keywords: heat and mass transfer processes; drying; mathematical model; numerical methods; temperature fields; watermelon pulp; lycopene

Введение

На российском рынке существует потребность в биологически активных витаминных и антиоксидантных комплексах природного происхождения. Введение в структуру питания подобных добавок даже в незначительной доле ведет к минимизации появления ряда патологий и стабилизирует иммунную систему человека [1, 2]. На современном этапе можно выделить такую перспективную универсальную биоактивную композицию, как каротиноидный пигментный комплекс ликопин (E-160d), с помощью которого плодоовощное сырье, к примеру, помидоры и арбузы обладают насыщенным красным оттенком [3, 4]. Известно, что ликопин кроме красящей способности обладает биологически активными свойствами [4], но сравнительно большая стоимость и малая доступность на рынке ограничивают его использование в пищевом ежедневном рационе.

Ликопин обладает общеукрепляющим свойством на человеческий организм и рядом позитивных фармакологических характеристик. Его биоактивная функция обусловлена, в первую очередь, антиоксидантной способностью, т.е. возможностью ингибировать свободнорадикальные клеточные процедуры. Учитывая повышение востребованности ликопина, поиску новых источников его получения уделяют все больше внимания. До настоящего момента его источником преимущественно служили специально селектированные в этом аспекте сорта томатов [4, 5], но малый удельный выход (0,3...0,4 мг/г) сырья [4] и ряд иных параметров обуславливают высокую себестоимость конечного продукта и малую экономическую эффективность. Помимо томатов к числу видов сельскохозяйственного сырья, богатого на ликопин, относится арбуз, который не уступает помидорам в его содержании (содержание ликопина в арбузе – 4,30...6,20 мг/100г, в томате – 2,30...3,0 мг/100г) [6–8]. Как заявляют разработчики [9, 10], технология получения ликопина из арбузов имеет два преимущества: нет необходимости проведения многоэтапных технологических процедур, и из арбузной мякоти выход целевого компонента с единицы массы исходного сырья будет выше.

На основе анализа известных способов извлечения ликопина из томатного сырья [11] и анализа публикаций, описывающих потенциальную возможность использования мякоти арбузов в технологии ликопина [9, 10], можно определить основные технологические стадии по подготовке арбуза к его промышленной переработке (рисунок 1).

Из представленной технологической схемы (рисунок 1) можно выделить две наиболее энергоемких и определяющих качество готовой продукции операции: замораживание арбузной мякоти и сушка рецептурной смеси. Для максимально возможного снижения энергозатрат при их осуществлении необходимо найти рациональные научно-технические решения по усовершенствованию тепловых и массообменных процессов. Их корректная реализация невозможна без соблюдения температурных ограничений при тепловой обработке смеси мякоти с функциональными премиксами и обеспечения рационального температурного режима, выявить который возможно решением математической модели процесса сушки, адаптированной к изучаемому материалу. Из данных литературных источников [9–11] видно, что для арбузного полуфабриката наиболее подходящим методом обезвоживания является сушка при конвективном подводе тепловой энергии посредством нагретого углекислого газа при температуре 90°C, благодаря термолабильности продукта и для исключения негативного для ликопина контакта с кислородом. Перемещение теплоносителя осуществляется вдоль поверхности высушиваемого материала, нанесенного тонким слоем на рабочую дисковую поверхность. Влажный продукт для интенсификации процесса влагоудаления может быть заранее нагрет до технологически заданной температуры.

Для рационализации обезвоживания необходимо подобрать режимные параметры, позволяющие не только провести удаление влаги из арбузного пюре в этом аппарате, но и существенно сократить время на его сушку. Для решения математической модели переноса энергии и вещества выявлены закономерности влагоотнятия при обезвоживании пюреобразного арбузного полуфабриката, базирующиеся на изучении кинетики операции удаления воды.

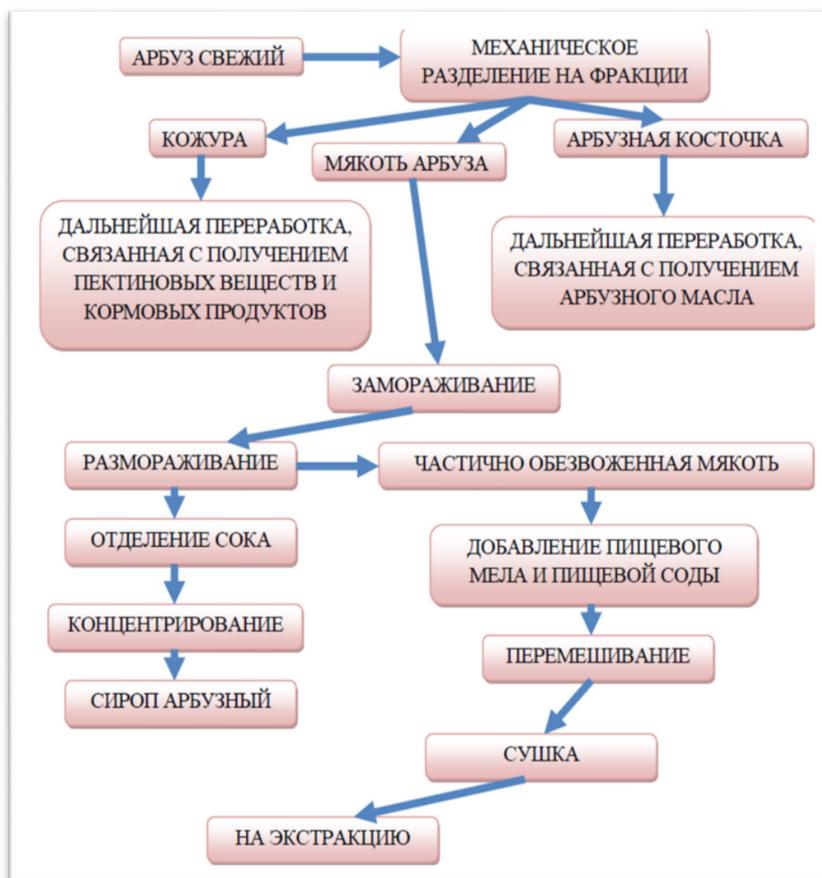


Рисунок 1 – Основные технологические стадии по подготовке арбуза к его промышленной переработке
 Figure 1. The main technological stages for the preparation of watermelon for its industrial processing

Целью исследования является определение эволюции температурного фронта в процессе сушки в рамках температурных и технологических ограничений. Для ее реализации решался ряд задач:

- ✓ выявление температурных ограничений и граничных условий при контакте фаз в процессе сушки арбузного полуфабриката;
- ✓ построение математической модели тепломассопереноса и обмена энергией и веществом на границе раздела фаз при сушке арбузного полуфабриката и обоснование допущений при ее решении;
- ✓ решение модели методом конечных разностей;
- ✓ анализ полученных данных и оценка адекватности полученного решения реальным условиям обезвоживания.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования стал арбузный полуфабрикат, полученный после размораживания блоков мякоти спелых арбузов, естественного отделения арбузного сока и добавления определенной доли пищевой соды и мела, необходимых для эффективного извлечения ликопина по предлагаемой технологии.

Теоретически определить температурное объемное распределение в обезвоживаемом арбузном полуфабрикате можно путем решения системы уравнений переноса тепловой энергии и влияния в частных производных, но проще это можно осуществить, решая лишь уравнение трансфера тепловой энергии с использованием математически обобщенных опытных кинетических закономерностей процесса влагоудаления [12–14]. Такой подход применен, опираясь на преобразования и допущения, обоснованные в трудах [12, 15], путем численного решения системы соотношений – уравнения трансфера тепловой энергии и опытного уравнения трансфера влаги методом конечных разностей с использованием ранее найденных закономерностей варьирования термодинамических, теплофизических и структурных параметров объекта обезвоживания. Преобразованное уравнение трансфера тепловой энергии при ее

конвективном подводе в варианте одномерной постановки задачи выглядит следующим образом

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \frac{a}{\frac{\partial C}{\partial \tau}} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{r\rho}{C_v}, \quad (1)$$

где x – ордината глубины слоя в образце, м;

a – его коэффициент температуропроводности, м²/с;

$\frac{\partial C}{\partial \tau}$ – интенсивность обезвоживания, принимая его изотропность, кг/(кг·с);

r – энергия парообразования и преодоление связи воды с сухим остатком, найденная при анализе внутреннего трансфера влаги с термодинамической точки зрения, Дж/кг;

ρ – плотность образца, кг/м³;

C_v – объемная теплоемкость образца, Дж/(м³·К).

Для упрощения и иллюстративности численного решения соотношения (1), влажность W заменим долей сухого остатка C , принимая во внимание, что $C = 1 - W$.

Условия второго рода обмена тепловой энергией на поверхности образца со стороны контакта с сушильным агентом можно определить в виде

$$\lambda(C) \frac{\partial T}{\partial x} = -\alpha(T_{c.a} - T_{пов}),$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

$T_{c.a}$ – температура теплоносителя при заданном давлении в камере, К;

$T_{пов}$ – температура поверхности материала, К.

Условия первого рода при контакте нагретого продукта с начальной температурой $T = 323$ К, стремящейся экспоненциально к температуре 363 К более нагретой рабочей поверхности транспортирующего диска определяются следующим образом

$$T_{пр} = 363 - e^{5(C_{нач}-c)},$$

где $T_{пр}$ – текущая температура продукта, К;

$C_{нач}$ – исходная доля сухого остатка в образце, кг/кг;

c – текущая доля сухого остатка в образце, кг/кг.

Математически аппроксимированные данные по закономерностям варьирования характеристик для исследуемого материала от влияющих параметров дают возможность при их подстановке в соотношение (1) решить его методом конечных разностей, который обуславливает замену производных, определенных на континууме в виде сеточного ареала их разностными аналогами.

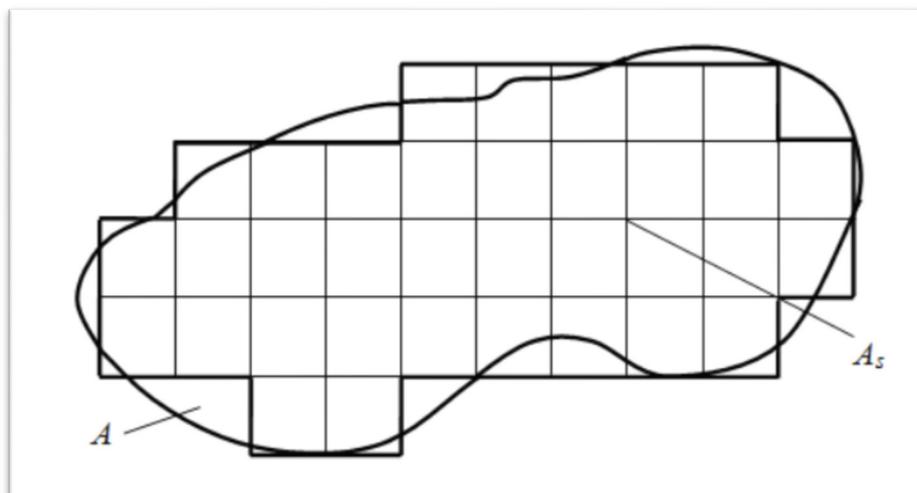


Рисунок 2 – Сеточный ареал
Figure 2. Gridarea

Суть такого подхода к приближенному решению описана еще в работах Эйлера, но реальное его использование началось при появлении скоростной компьютерной техники. Основа данной методики заключается в варианте решения двумерного уравнения при краевых условиях в частных производных. Состоит она в том, что в плоском ареале A , где определяется решение, строится сеточный ареал A_s (рисунок 2), разбитый на равнозначные ячейки с шагом s , который служит приближением ареала A к заданному изначально уравнению в частных производных. В сеточных узлах ареала A_s определяется конечно-разностное соотношение, принимая во внимание условия на границе фазового раздела, и находятся величины решения искомой задачи в пограничных узлах ареала A_s .

Модельное решение уравнения трансфера тепловой энергии и влаги при конвективно-кондуктивном подводе энергии к арбузному полуфабрикату в пюреобразном состоянии осуществлено с помощью программного продукта Mathcad Professional при рациональных режимных параметрах операции влагоудаления. Алгоритм реализации численного решения модели трансфера тепловой энергии и влаги при обезвоживании исследуемого продукта представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Блок-схема определения эволюции температурных полей в объекте сушки
 Figure 3. Block diagram for determining the evolution of temperature fields in the drying object

Результаты и их обсуждение

Как было уже отмечено, объектом обезвоживания является пюреобразная масса, включающая арбузную мякоть, прошедшую процедуру размораживания, пищевой мел и пищевую соду. Данная пищевая смесь, согласно выбранному способу экстракции из нее ликопина [11], должна быть высушена

Применение предложенной конструкции для обезвоживания арбузного полуфабриката позволит эффективно проводить процесс сушки, т.к. сушильная поверхность образована совокупностью поверхностей сплошных дисков, частично погружаемых в пюреобразную массу, что значительно увеличивает полезную площадь рабочих зон по отношению к общему объему аппарата. Нанесение поре тонким слоем на сушильную поверхность и последующая сушка происходят при равномерном вращении вала менее чем за один оборот, что значительно сокращает энергозатраты на процесс и обеспечивает получение качественного продукта.

Рисунок 5 иллюстрирует эволюцию температурного фронта по глубине слоя и концентрации сухих веществ, определенную при решении построенной и адаптированной к объекту изучения модели, т.е. для арбузного полуфабриката толщиной 0,4 мм.

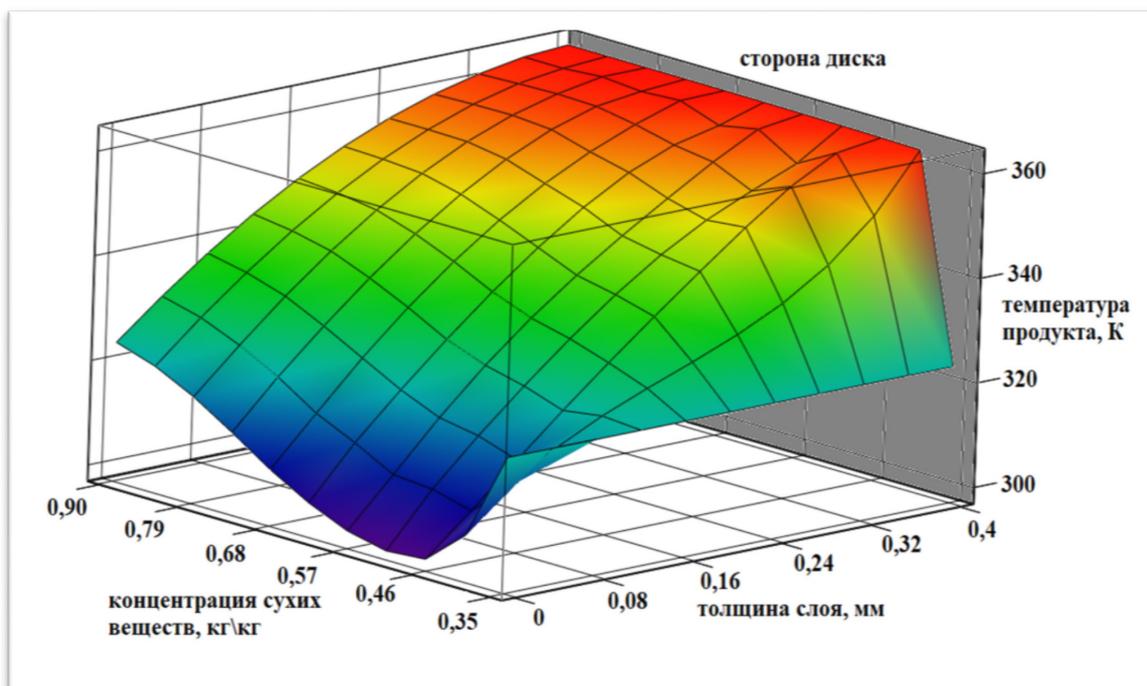


Рисунок 5 – Трансформация полей температур в течение процесса обезвоживания арбузного полуфабриката
Figure 5. Transformation of temperature fields during the process of semi-finished watermelon dehydration

Из полученного трехмерного графика (рисунок 5) следует, что при любом значении влажности высушиваемого материала наблюдаются температурные градиенты вследствие инерционности переноса тепловой энергии по объему объекта исследования. Снижение температуры у приграничных слоев, контактирующих с газовым теплоносителем, в начале процесса обезвоживания можно объяснить тем, что в этот период наблюдается сравнительно интенсивное испарение влаги в свободном состоянии за счет внутренней энергии предварительно нагретого продукта и теплообмена с сушильным агентом. Это обуславливает отсутствие участка прогрева как в традиционно представляемых кривых скорости сушки. Далее при обезвоживании пограничного слоя и комплексном удалении как свободной, так и связанной влаги, и впоследствии только в связанном состоянии, наблюдается перманентный рост температуры.

На границе контакта материала с предварительно нагретой рабочей поверхностью, за счет взаимодействия ее с теплоносителем без продукта в начальный момент операции, наблюдается рост температуры, стремящийся экспоненциально к температуре диска, и впоследствии материал принимает значения температур рабочей поверхности.

Для удобства анализа полученных температурных полей (рисунок 5) на рисунке 6 представлена информация о полученных значениях температур в узловых точках.

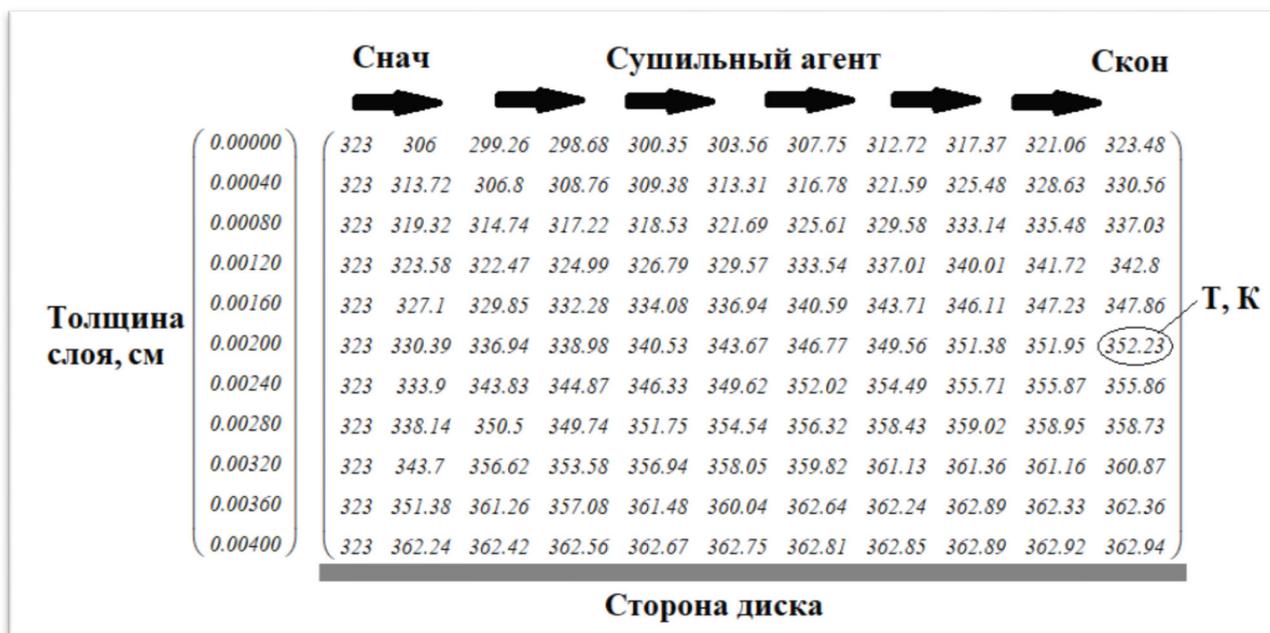


Рисунок 6 – Значения температур в узловых точках
 Figure 6. Temperature values at nodal points

Выводы

Посредством численного решения модели трансфера тепловой энергии и влаги, адаптированной к арбузному полуфабрикату в пюреобразном состоянии, определена эволюция температурного фронта по глубине слоя продукта и варьируемой в течение обезвоживания доли сухого остатка, т.е. решена задача определения температурного варьирования при операции влагоудаления в рамках технологических ограничений.

Как видно из рисунка 5, рассчитанное распределение температуры в течение всего процесса не превышало заданных пороговых значений 363 К, необходимых для сохранения ликопина в высушиваемом арбузном полуфабрикате. Из этого следует, что рекомендованные режимы варьирования температур в процессе конвективно-кондуктивного обезвоживания арбузного полуфабриката в пюреобразном состоянии, можно реализовать в производственных условиях при производстве ликопинсодержащих пищевых продуктов.

Литература

1. Тутельян В.А., Суханов Б.П. Современные подходы к обеспечению качества и безопасности биологически активных добавок к пище в Российской Федерации // Тихоокеанский медицинский журнал. 2009. № 1. С. 12–19.
2. Тутельян В.А. Стратегия разработки, применения и оценка эффективности биологически активных добавок к пище // Вопросы питания. 1996. № 6. С. 3–11.
3. Дополнения к «Медико-биологическим требованиям и санитарным нормам качества продовольственного сырья и пищевых продуктов». Пищевые добавки. М.: Госкомсанэпиднадзор РФ, 1994. 44 с.
4. Авчиев М.И. Разработка технологии получения ликопина на основе пары штаммов гриба *Blakesleatrispora* ВСБ-129(-) и ВСБ-130(+): дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2003. 152 с.
5. Steinberg D., Parthasarathy S., Care T.E., Khoo J.C., Witztum J.L. Beyond cholesterol: Modifications of low-density lipoprotein that increases its atherogenicity. *N Engl J Med.* 1989, V. 320, pp. 915–924.
6. Шамбазов Д.В., Абдулгафарова Г.Х., Газетдинов Р.Р. Определение содержания ликопина в природном сырье // Инновационная наука. 2020. № 3. С. 15–16.
7. Самбуров А.М. Химический состав и экологическая безопасность арбуза // Экологическая безопасность в техноферном пространстве: сб. тр. Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. эконом. ун-та, 2018. С. 94–96.
8. Perkins P., Collins J.K., Pair S.D., Roberts W. Lycopene content differs among red-fleshed watermelon cultivars. *Science of Food and Agriculture.* 2001, V. 81, Is. 10, pp. 983–987.
9. Katherine L.S., Edgar C.C., Jerry W.K., Howard L., Carrier D.J. Extraction conditions affecting supercritical fluid extraction (SFE) of lycopene from watermelon. *Bioresource Technology.* 2008, V. 99, Is. 16, pp. 7835–7841.
10. Shi X.F., Xu Y., Li Y.H., Zeng H.X., Sun Y.H. Optimization of extraction process of lycopene from watermelon

(*Citrulluslanatus*) by response surface methodology. *Applied Mechanics and Materials*. 2011, V. 140, no. 2, pp. 385–393.

11. Газиев А.И. Способ получения ликопина: пат. 2172608 Российская Федерация. 2001. 7 с.
12. Алексанян И.Ю., Буйнов А.А. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование. Астрахань: Изд-во Астрахан. гос. техн. ун-та, 2004. 380 с.
13. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 471 с.
14. Максименко Ю.А. Развитие научно-практических основ и совершенствование процессов сушки растительного сырья в диспергированном состоянии: дис. ... докт. техн. наук. Астрахань, 2016. 502 с.
15. Максименко Ю.А., Алексанян И.Ю. Интенсификация процессов сушки продуктов микробиологического синтеза. Теория и практика сушки в диспергированном состоянии. Lambert Academic Publishing, 2011. 273 с.

References

1. Tutel'yan V., Sukhanov B. Modern approaches to the maintenance of quality and safety of biologically active additives in the Russian Federation. *Pacific Medical Journal*. 2009, no. 1. pp. 12–19. (In Russian)
2. Tutelyan V.A. Strategy for the development, application and evaluation of the effectiveness of biologically active food supplements. *Problems of Nutrition*. 1993, no. 1. p. 3. (In Russian)
3. Nutritional supplements. Additions to "Medical and biological requirements and sanitary standards for the quality of food raw materials and food products". Moscow, State Committee for Sanitary and Epidemiological Supervision of the Russian Federation, 1994, 44 p. (In Russian)
4. Avchiev M.I. Development of technology for obtaining lycopene based on a pair of strains of the fungus *Blakesleatrispora* VSB-129 (-) and VSB-130 (+). *Candidate's thesis*. Moscow. 2003, 152 p. (In Russian)
5. Steinberg D., Parthasarathy S., Care T.E., Khoo J.C., Witztum J.L. Beyond cholesterol: Modifications of low-density lipoprotein that increases its atherogenicity. *N Engl J Med*. 1989, V. 320, pp. 915–924.
6. Shambazov D.V., Abdulgafarova G.Kh., Gazetdinov R.R. Determination of the content of lycopene in natural raw materials. *Innovative Science*. 2020, no. 3. pp. 15–16. (In Russian)
7. Samburov A.M. Chemical composition and environmental safety of watermelon. *Environmental safety in the technosphere space. Proceedings of the Conference Title*. Ekaterinburg. 2018, pp. 94–96. (In Russian)
8. Perkins P., Collins J.K., Pair S.D., Roberts W. Lycopene content differs among red fleshed watermelon cultivars. *Science of Food and Agriculture*. 2001, V. 81, Is. 10, pp. 983–987.
9. Katherine L.S., Edgar C.C., Jerry W.K., Howard L., Carrier D.J. Extraction conditions affecting supercritical fluid extraction (SFE) of lycopene from watermelon. *Bioresource Technology*. 2008, V. 99, Is. 16, pp. 7835–7841.
10. Shi X.F., Xu Y., Li Y.H., Zeng H.X., Sun Y.H. Optimization of extraction process of lycopene from watermelon (*Citrulluslanatus*) by response surface methodology. *Applied Mechanics and Materials*. 2011, V. 140, no. 2, pp. 385–393.
11. Gaziev A.I. *Method of licopin preparing*. Patent RF, no. 2172608. 2001.
12. Aleksanyan I.Yu., Buinov A.A. *High intensity food drying. Foam drying. Theory. Practice. Modeling*. Astrakhan, Astrakhan State Technical University Publ., 2004. 380 p. (In Russian)
13. Lykov A.V. *Drying theory*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 471 p. (In Russian)
14. Maksimenko Yu. A. Development of scientific and practical foundations and improvement of drying processes for plant materials in a dispersed state. *Doctor's thesis*. Astrakhan, 2016, 502 p. (In Russian)
15. Maksimenko Yu.A., Aleksanyan I.Yu. Intensification of drying processes for products of microbiological synthesis. Theory and practice of drying in a dispersed state. Germany, Lambert Academic Publishing, 2011. 273 p. (In Russian).

Информация об авторах

Виктор Александрович Лебедев – машинист технологических насосов

Игорь Юрьевич Алексанян – д-р техн. наук, профессор Кафедры технологические машины и оборудование

Альберт Хамед-Харисович Нугманов – д-р техн. наук, доцент Кафедры технологические машины и оборудование

Юрий Александрович Максименко – д-р техн. наук, доцент, проректор по научной работе и инновациям

Вера Николаевна Лысова – канд. техн. наук, доцент Кафедры технологические машины и оборудование

Information about the authors

Viktor A. Lebedev, Process pump operator

Igor Yu. Aleksanian, D. Sc., Professor of the Department of Technological Machines and Equipment

Albert H.-H. Nugmanov, D. Sc., Associate Professor of the Department of Technological Machines and Equipment

Yury A. Maksimenko, D. Sc., Associate Professor, Vice-Rector for Research and Innovation

Vera N. Lysova, Ph.D., Associate Professor of the Technological Machines and Equipment

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 07.05.2021

Одобрена после рецензирования 24.05.2021

Принята к публикации 31.05.2021

The article was submitted 07.05.2021

Approved after reviewing 24.05.2021

Accepted for publication 31.05.2021