ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-930-942

Оригинальная статья
http://fptt.ru

Теплофизические параметры арбузного полуфабриката как объекта влагоудаления

А. Х.-Х. Нугманов[1,*], Г. С. Мещерякова[1], В. А. Лебедев[2], Д. М. Бородулин[3], И. Ю. Алексанян[1], Е. В. Соколова[1]

[1] *Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия*

[2] *ООО «Инновационные технологии продуктов питания», Астрахань, Россия*

[3] *Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия*

Поступила в редакцию: 09.09.2021

Принята после рецензирования: 21.10.2021
Принята в печать: 01.12.2021

**e-mail: albert909@yandex.ru*
© А. Х.-Х. Нугманов, Г. С. Мещерякова, В. А. Лебедев, Д. М. Бородулин, И. Ю. Алексанян, Е. В. Соколова, 2021

Аннотация.
Введение. Разработка защитных покрытий на базе пектина ориентирована на снятие проблем при производстве биоразлагаемой съедобной пленки. Перспективным ресурсом для ее выработки может послужить вторичное арбузное сырье, остающееся на полях в большом количестве. В нем присутствует 13,4 % пектиновых компонентов, из которых 8,1 % протопектина. Цель исследования – определение плотности и теплофизических характеристик пектинового экстракта для проектирования процесса сушки.
Объекты и методы исследования. Пектиновый экстракт из корки арбуза. Определение его теплофизических характеристик проводилось по способу, опирающемуся на термическую инерцию термопары. При изменении агрегатного состояния объекта применялся калориметрический метод. Плотность объекта находилась пикнометрическим способом. Коэффициент теплоотдачи рассчитывался по критериальным уравнениям.
Результаты и их обсуждение. В результате исследований арбузного полуфабриката как объекта влагоудаления получены: усредненная плотность конечного пленочного материала (652 кг/м^3) и жидкого полуфабриката (1028 кг/м^3); зависимость его физической плотности и влажности W; теплоемкость c_M, температуропроводность и теплопроводность. При различных значениях W (80, 70, 60 и 50 %) получены усредненные значения c_M – 3393, 3225, 3137 и 3113 соответственно. Была скорректирована и модифицирована критериальная зависимость для определения коэффициента теплооотдачи α от скорости воздушного теплоносителя и традиционно применяемой температуры теплоносителя (≈ 100 °C) в контакте с поверхностью пищевого продукта (≈ 80 °C).
Выводы. С целью проведения расчетных процедур при проектировании агрегатов для сушки найдены теплофизические характеристики и физическая плотность арбузного геля в определенных пределах варьирования влажности и параметров теплового агента. Была скорректирована и модифицирована критериальная зависимость для определения коэффициента теплоотдачи. Полученные данные можно использовать при проектировании не только операций обезвоживания, но и других теплофизических процессов и их аппаратурного оформления.

Ключевые слова. Арбузное сырье, корка, пектиновые экстракты, защитная пленка, теплофизические параметры, структурно-механические характеристики, сушка

Для цитирования: Теплофизические параметры арбузного полуфабриката как объекта влагоудаления / А. Х.-Х. Нугманов [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 930–942. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-930-942.

Original article

Available online at http://fptt.ru/eng

Thermophysical Parameters of a Semi-Finished Watermelon Product as an Object of Dehumidification

Albert H.-H. Nugmanov[1,*], Galina S. Meshcheryakova[1], Viktor A. Lebedev[2], Dmitry M. Borodulin[3], Igor Yu. Aleksanian[1], Ekaterina V. Sokolova[1]

[1] Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

[2] LLC Innovative Food Technologies, Astrakhan, Russia

[3] Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Received: September 09, 2021

Accepted in revised form: October 21, 2021
Accepted for publication: December 01, 2021

*e-mail: albert909@yandex.ru
© A.H.-H. Nugmanov, G.S. Meshcheryakova, V.A. Lebedev, D.M. Borodulin, I.Yu. Aleksanian, E.V. Sokolova, 2021

Abstract.
Introduction. Pectin-based protective coatings can produce a perfect biodegradable edible film. Secondary watermelon raw materials are a promising resource for this type of food coating as it contains 13.4% of pectin components, of which 8.1% is protopectin. The present research objective was to find the density and thermophysical characteristics of the pectin extract in order to optimize the drying process.
Study objects and methods. The research featured a pectin extract from watermelon rind. Its thermophysical properties were defined according to the thermocouple inertia method. The calorimetric method was used to change the aggregation state, while the pycnometric method was applied to calculate the density. The method of criterion equations helped to define the heat transfer coefficient.
Results and discussion. The average density of the final film material was 652 kg/m^3 and that of the liquid semi-finished product was 1.028 kg/m^3. The research also revealed the dependence of physical density and humidity W, heat capacity, thermal diffusivity, and thermal conductivity. For different W, averaged were 3393, 3225, 3137, and 3113, respectively. The study also provided the criterion dependence for determining the heat transfer coefficient and modified α on the speed of the air coolant for artificial convection at conventional coolant temperature (≈ 100°C) in contact with the food product surface (≈ 80°C).
Conclusion. The article introduces the thermophysical characteristics and physical density of watermelon gel for various humidity and thermal agent parameters, as well as a modified criterion dependence for determining the heat transfer coefficient. The research results can be used to design dehydration operations, other thermophysical processes, and their equipment.

Keywords. Watermelon raw materials, rind, pectin extracts, protective film, thermophysical parameters, structural and mechanical characteristics, drying

For citation: Nugmanov AH-H, Meshcheryakova GS, Lebedev VA, Borodulin DM, Aleksanian IYu, Sokolova EV. Thermophysical Parameters of a Semi-Finished Watermelon Product as an Object of Dehumidification. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):930–942. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-930-942.

Введение

Пристальное внимание в мире стали обращать на интенсивное и спонтанное увеличение использования синтетических полимерных упаковочных материалов для пищевых продуктов, что обуславливает перманентный рост отходов, которые не подвержены биоразложению. Это предопределяет актуальность решения задач по разработке и производству пищевой современной упаковки в различных секторах пищевой индустрии. Она позволит уменьшить отрицательное воздействие на внешнюю среду обитания человека через понижение времени биодеградации упаковки после ее применения. Одним из максимально пригодных методов решения данных задач служит широкое использование в инженерной практике съедобных защитных пленок на основе пектина из возобновляемых пищевых сырьевых источников.

Разработка защитных покрытий на базе пектиновых субстанций, служащих натуральными структурообразователями, выработанными из вторичной ресурсной базы, ориентирована на снятие комплексной проблемы при производстве готовых изделий путем глубокой обработки основных сырьевых материалов и разработки оригинального пленочного материала [1, 2]. Техническим результатом получения пектиносодержащих пленочных структур является их способность обеспечить защиту пищевым продуктам от микробиологической порчи и естественных потерь при хранении, а также обеспечить сохранность показателей качества и безопасности. Следует отметить, что в условиях нарастания рыночной потребности в пленочных покрытиях определяющей становится задача выявления новых источников для их производства.

Все преимущества пленочных структур, полученных как из растительного, так и животного сырья, обусловлены их структурно-механическими параметрами, определяющими скорость внутреннего

переноса влаги и тепловой энергии, а также процедурой формирования заданной структуры у готовой продукции. По этой причине в процессе осуществления теплотехнических исследований, например, конвективного обезвоживания гелеобразных покрытий на базе пектиновых экстрагированных компонентов арбузной корки (арбузный полуфабрикат), необходимо обладать информацией о теплофизических характеристиках (ТФХ) объекта сушки, включая его плотность. Эти сведения дают возможность выявить и обосновать рациональную интенсивность операции влагоудаления на экспериментальном стенде, предназначенном для изучения сушки исследуемого объекта при варьировании режимных параметров этого процесса.

Целью исследования является нахождение структурно-механических и теплофизических характеристик пектинового экстракта для проектирования процесса его сушки.

Объекты и методы исследования

Перспективным вторичным ресурсом для производства пектиносодержащей пленки может стать арбузное сырье. Во-первых, в нем присутствует 13,4 % пектиновых компонентов, из которых 8,1 % приходится на протопектин, определяющий прочность плодовой ткани [3]. Во-вторых, согласно данным волгоградских ученых, невостребованной арбузной продукции на полях остается около 150 тыс. т [4]. Это выброшенные ресурсы, используя которые можно получить различные и нужные на рынке пищевые продукты, в том числе глубокой переработки. Например, пленочные пектиносодержащие структуры.

Конкретным объектом данного исследования послужил пектиновый экстракт из неутилизируемой корки арбуза.

Определяющей структурно-механической характеристикой пищевого продукта служит его плотность, которая для влажных гидрогелевых структур в пределах варьирований температур *T* от 273 до 363 °К не меняется. По этой причине в этом температурном интервале можно осуществить опытную серию пикнометрическим способом [5–7].

В процессе конвективной сушки из жидкого арбузного полуфабриката получается пленочная структура, значение плотности которой в начальном и итоговом состоянии различается при варьировании ее влагосодержания. При этом можно ограничиться нахождением плотности в начальном и итоговом состоянии образца, а ее промежуточная величина определяется путем интерполяции при линейной аппроксимации данных пороговых значений.

В работе [8, 9] приведен способ нахождения комплекса ТФХ (коэффициенты теплопроводности λ, температуропроводности α и удельной теплоемкости c_M) жидких, пастообразных и тонкодисперсных субстанций в процессе их термообработки, опирающийся на теплоинерционные параметры термодатчика [10].

Очевидно, что скорость изменения температуры датчика, оперативно введенного в образец, обусловлена его свойствами и параметрами. Это легло в основу экспресс-метода по нахождению ТФХ [8, 9]. Скорость повышения температуры термодатчика находится из соотношения (1) [8]:

$$\theta_{(\tau)} = \frac{T_c - T_{2(\tau)}}{T_c - T_0} = \frac{2K}{\pi}\int_0^{\infty} \frac{exp(-u^2 Fo)u^2 du}{(u^2-K)^2+u^2K^2} \quad (1)$$

где $\theta_{(\tau)} = \frac{T_c - T_{2(\tau)}}{T_c - T_0}$ – безразмерная *T*; Fo – обобщенная переменная Фурье; $K = mc_1\rho_1$ – обобщенная переменная, определяющая соотношение объемных теплоемкостей образца и термопары; $m = \left(\frac{c_2\rho_2}{3}\right)^{-1}$ – константа термопары, (м^3·К)/Дж; $c_1\rho_1$ и $c_2\rho_2$ – объемные теплоемкости образца и термопары, Дж/(м^3·К).

Из публикации [8] следует, что по скорости повышения температуры термопары можно найти следующие ТФХ: λ, a и $c_1\rho_1$ [10]. С этой целью применили разложение функционала $\theta_{(\tau)}$ в ряд при значительных величинах Fo. В итоге имеем [8]:

$$\theta_{(\tau)} = \frac{1}{2K\sqrt{\pi}\sqrt{Fo^3}} \cdot \left\{ \begin{array}{l} 1 + \frac{3(2-K)}{2K}\cdot\frac{1}{Fo} + \frac{15[(K-2)^2-1]}{4K^2}\cdot\frac{1}{Fo^2} + \\ + \frac{105(K-2)[(K-2)^2-2]}{8K^3}\cdot\frac{1}{Fo^3} + \cdots + R_n(Fo) \end{array} \right\} \quad (2)$$

Для остаточного слагаемого $R_n(Fo)$ погрешность, приемлемая после замены ряда конкретной, по модулю меньше конечного не отброшенного слагаемого. По этой причине, оставив первые три слагаемых, имеем соотношение, дающее возможность найти Fo и *K*:

$$\theta_{2(\tau)} \approx \frac{1}{2K\sqrt{\pi}\sqrt{Fo^3}}\left\{1 + \frac{3(2-K)}{2K}\cdot\frac{1}{Fo} + \frac{15[(K-2)^2-1]}{4K^2}\cdot\frac{1}{Fo^2}\right\} \quad (3)$$

При максимально возможной ошибке:

$$\delta_{max} \le \left|\frac{15[(K-2)^2-1]}{4K^2}\cdot\frac{1}{Fo^2}\right| \quad (4)$$

Соотношение (3) при $1 < K < 2$ в координатной сетке $y = \theta_{2(\tau)}(Fo)\sqrt{Fo^3}$ и $x = 1/Fo$ приобретает параболический вид с максимумом при определенной величине Fo_{max}. Опытное тестирование полученных результатов для ряда продуктов приведено в публикации [8].

Согласно условию экстремума функционала (3) имеем:

$$\frac{1}{Fo} = -\frac{1}{5}\cdot\frac{(2-K)K}{[(K-2)^2-1]} \quad (5)$$

$$\theta_{2(\tau)}\sqrt{Fo^3} = -\frac{1}{2K\sqrt{\pi}}\left[\frac{0{,}15(2-K)^2}{(K-2)^2-1} - 1\right] \quad (6)$$

Осуществив опытную серию и трансформировав данные в графический вид $\theta\sqrt{\tau^3} = f\left(\frac{1}{\tau}\right)$, находим θ_{max}, из соотношения (7) – *K*, а из 5 – Fo_{max}, обусловленный величиной *K*:

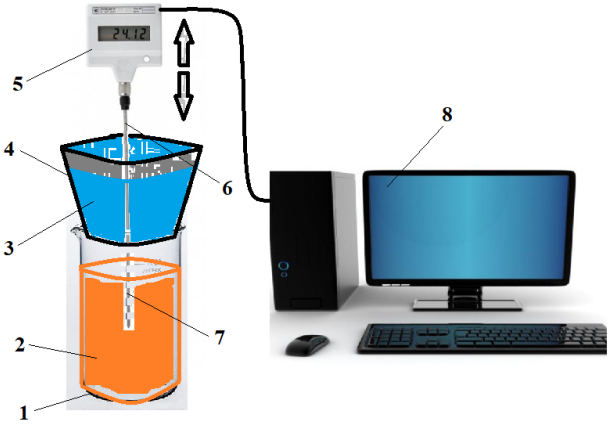


Рисунок 1. Опытный стенд: *1* – емкость для образца; *2* – материал с комнатной температурой; *3* – водоледяная смесь для поддержания *t* около 0 °С; *4* – емкость из бумаги; *5* – ЛТ-300; *6* – зонд для замера в исходном состоянии; *7* – он же в итоговом состоянии; *8* – компьютер с программным обеспечением ThermoChart

Figure 1. Experimental stand: *1* – sample container; *2* – material with room temperature; *3* – water-ice mixture to maintain the temperature at about 0°C; *4* – paper container; *5* – LT-300; *6* – probe in the initial state; *7* – probe in the final state; *8* – computer with ThermoChart software

$$\theta_{max}\sqrt{\left\{-\frac{(2-K)K}{5\cdot[(K-2)^2-1]}\right\}^{-3}} = \frac{1}{2K\sqrt{\pi}}\left[\frac{0{,}15(2-K)^2}{(K-2)^2-1}-1\right] \quad (7)$$

По методике [8] можно найти ТФХ по величинам Fo_{max} и K при τ_{max} и θ_{max}. Итоговые соотношения имеют следующую форму:

$$a = \frac{Fo_{max}R^2}{\tau_{max}} \quad (8)$$

$$c_M\rho_M = \frac{K}{m} \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{Fo_{max}R^2}{\tau_{max}}\cdot\frac{K}{m} \quad (10)$$

где R – эквивалентный радиус зондового элемента, м.

С целью осуществления опытной серии по определению ТФХ арбузного полуфабриката по описанной методике использовался электронный термометр ЛТ-300, где чувствительным элементом служит платиновый термометр сопротивления пленочного типа на керамической поверхности. Данный элемент обладает хорошим воспроизводством характеристики *T* и длительной стабильностью при эксплуатации. На рисунке 1 представлена схема экспериментальной установки.

В процессе осуществления опыта температура водоледяной композиции доводится в емкости из бумаги до значения в пределах 1–4 °С. Затем активизируется программное обеспечение ThermoChart, которое фиксирует на мониторе значение *T* с помощью ЛТ-300.

Для изучения подготовленный образец с комнатной температурой погружается в емкость, над которой размещается емкость из бумаги с водоледяной смесью и зондом. После подключения термодатчика к компьютеру и активизации программного обеспечения на мониторе появляются значения величины *T* и оперативно пробивается зондом донышко емкости из бумаги, который погружается в область замера *T*. Программное обеспечение отражает варьирование величины *T*. Опыт пятикратно дублируется, результаты табулируются и по методу [8] рассчитываются ТФХ.

Последующее определение ТФХ арбузного полуфабриката предопределяет установление их зависимостей от содержания влаги в пределах варьирования $0{,}1 \le W \le 0{,}91$ кг/кг. Изменение теплоемкости при варьировании влажности пищевых продуктов можно принять линейным. Поэтому информация о величине этого параметра в нескольких (как минимум в двух) точках дает возможность получить аппроксимирующую зависимость его влажности в заданном диапазоне, используя методы экстра- или интерполяции. Что касается коэффициента теплопроводности, то его можно найти по соотношению (13), полученному М. А. Громовым для жидких пищевых продуктов. Расчет коэффициента температуропроводности связан с его зависимостью от λ, c_M и ρ.

Информация о величине коэффициента теплоемкости арбузного полуфабриката при фиксированных значениях его влажности была получена экспериментальным путем на опытной установке, представленной на фотографии (рис. 2). Следует отметить, что сравнительно точный метод адиабатического калориметра малопригоден для термолабильных пищевых материалов, поэтому целесообразно реализовать другую калориметрическую методику [11–13]. Она опирается на нахождение калориметрической константы *K*, зависящей от потерь подведенной теплоты, при наличии высокочувствительной схемы замеров, дающей возможность проводить их в малых (около 2 °К) вариациях *T* пробы за несколько минут.

Опытный стенд (рис. 2) скомпонован из 2-х отсеков – термического и измерительного. Первый является термоизолированным резервуаром (термосом), где размещаются изучаемые пробы. Второй скомпонован из схем питания и замера разности электрических потенциалов и силы тока в нагревательном узле, а также определения температуры и ее временной фиксации. Схема экспериментального стенда приведена на рисунке 3.

Величина удельной теплоемкости находится по соотношению:

$$c_M = \frac{Q_{пол}}{M_{обр}\cdot\Delta T},\ (Дж/(кг\cdot К) \quad (11)$$

Рисунок 2. Опытный стенд для нахождения теплоемкости

Figure 2. Experimental stand for calculating heat capacity

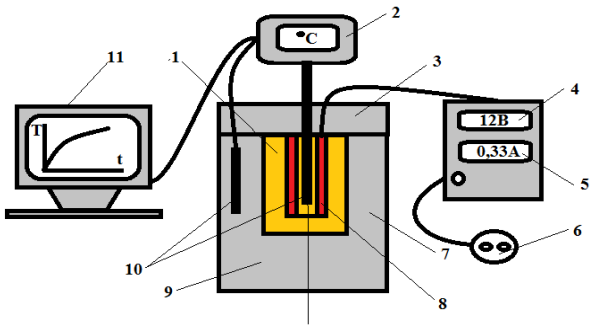


Рисунок 3. Принципиальная схема опытной установки для определения теплоемкости материалов: *1* – изучаемая проба; *2* – табло теплового датчика; *3* – калориметрическая крышка; *4* – вольтметр; *5* – амперметр; *6* – электроточка; *7* – термостатическая калориметрическая емкость; *8* – электрический термоэлемент; *9* – теплоизоляция; *10* – термодатчики; *11* – компьютер

Figure 3. Pilot set for determining heat capacity: *1* – sample; *2* – thermal sensor board; *3* – calorimetric cover; *4* – voltmeter; *5* – ammeter; *6* – electric point; *7* – thermostatic calorimetric container; *8* – electric thermal element; *9* – thermal insulation; *10* – temperature sensors; *11* – computer

где $Q_{пол}$ – полезное тепло, подводимое к материалу, Дж; $M_{обр}$ – его масса, кг; ΔT – варьирование его *T*, °К.

Из (11) вытекает перечень параметров, подлежащих определению. Причем $Q_{пол}$, подводимое электронагревательным узлом, находится по закономерности Джоуля-Ленца:

$$Q_{пол} = U \cdot I \cdot \Delta\tau (Дж) \qquad (12)$$

где U – разность электрических потенциалов на нагревательном узле, В; *I* – сила тока в нем, А; $\Delta\tau$ – временной промежуток прохождения через него тока, с.

Из соотношений (11) и (12) вытекает, что для нахождения удельной теплоемкости объекта исследования нужно корректно определять U, *I*, $\Delta\tau$, и ΔT от подведенной энергии при минимальных теплопотерях. Изучаемый пищевой материал обладает специфическими особенностями, что не дает возможности разместить его в герметичных резервуарах и воспользоваться адиабатическими точными калориметрическими установками. В нашем варианте целесообразно минимизировать теплопотери, не создавая адиабатные условия при хорошей теплоизоляции.

Калориметрическая постоянная, которая табулирована в зависимости от водной теплоемкости воды, находится в результате опытной серии по выявлению зависимости *t* в определенных временных рамках $\Delta\tau$. Такие опыты для *t* = 25–40 °С осуществлены и приведены в публикации [14]. По причине малозаметной вариабильности калориметрической постоянной в данном диапазоне температур ее можно с определенной погрешностью считать равной 15,3 Дж.

Таким образом, итоговое соотношение для нахождения жидкого арбузного полуфабриката будет иметь следующий вид:

$$c_M = \frac{U \cdot I \cdot \Delta\tau - K}{M_{обр} \cdot \Delta T}$$

где *K* = 15,3 – калориметрическая постоянная, Дж.

Коэффициент теплопроводности является не аддитивным параметром. По этой причине для его нахождения можно применить соотношение (13) [10]:

$$\lambda = \frac{B}{\alpha}\rho \qquad (13)$$

где *B* – константа, обусловленная природой жидкой среды и ее влажностью; ρ – плотность экстракта, кг/м³; α – коэффициент, характеризующий степень ассоциации [10].

Важным аспектом выявления рациональных режимных показателей влагоудаления из арбузного геля и размеров рабочей зоны обезвоживания является соотношение расходов теплового носителя и объекта сушки при заданном виде его слоя: плотный, псевдоожиженный и др. [15, 16]. Расчет данного соотношения опирается на материальные и тепловые балансовые соотношения, кинетические уравнения и статические зависимости, определяемые 3-мя термодинамическими началами [17–20]. В них включены коэффициенты тепло- (α) и массоотдачи (β).

Анализ большого количества публикаций в РФ и за рубежом по определению коэффициентов тепло- (α) и массоотдачи (β) не дает однозначного подхода к данному вопросу [17]. Принято, что минимальные величины α = 10–50 Вт/(м²·К) присущи теплообмену с газовыми средами. Что касается водных и жидких сред, то диапазон варьирования коэффициента теплоотдачи другой: α = 200–10000. Это говорит в пользу того, что эффективность теплообмена с газовой

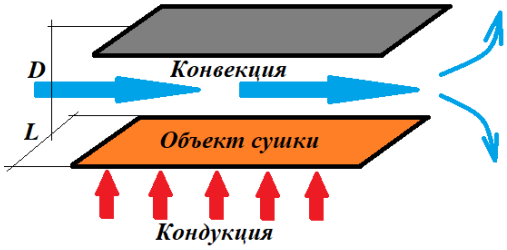
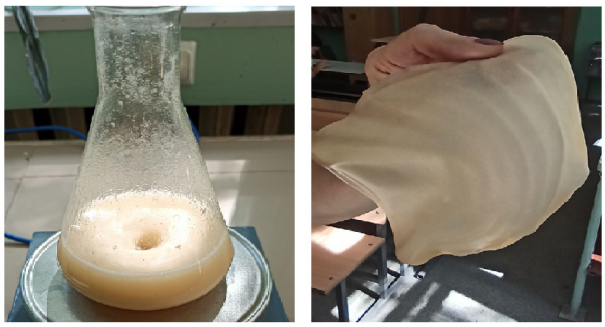


Рисунок 4. Плоский зазор между объектом сушки и верхней частью сушильной камеры

Figure 4. Flat gap between the drying object and the top of the drying chamber



a b

Рисунок 5. Фотографии арбузного полуфабриката (a) и полученной из нее пленочной структуры (b)

Figure 5. Semi-finished watermelon product (a) and watermelon film (b)

средой наименее интенсивна, что целесообразно принять во внимание в процессе изучения операции сушки арбузного полуфабриката.

В рекомендованных вариантах сушки исследуемого полуфабриката предполагается обезвоживание его слоя на поверхности вальца или плоского транспортера. С теплофизической точки зрения в обоих случаях рассматривается вариант комбинированного энергоподвода, осуществляемый путем конвекции с внешней стороны слоя и его кондукции с внутренней стороны при контакте с нагретой конвейерной лентой или поверхностью вальца (рис. 4). Это говорит в пользу того, что для расчета теплотехнических параметров сушки объекта исследования, в частности коэффициента теплоотдачи, можно использовать апробированную методику, изложенную в работе [21].

Ниже приведены критериальные уравнения, описывающие конвективную теплоотдачу в зазоре между двумя плоскими поверхностями (рис. 4) в условиях вынужденного движения среды в нем. Зазор образован двумя параллельными плоскостями с определяющим размером L в направлении движения потока среды и расстоянием D между плоскостями.

Если число Рейнольдса с определяющим размером L принадлежит диапазону значений от 2×10^2 до $1{,}2\times10^5$, то критериальное уравнение для числа Нуссельта Nu записывается следующим образом:

$$Nu = \frac{\alpha\cdot L}{\lambda_{sr}} = 1{,}35\left(\frac{L}{D\cdot Re_D}\right)^{0,1}\cdot Re_L{}^{0,5}\cdot Pr_{sr}{}^{0,33}\cdot\left(\frac{Pr_{sr}}{Pr_s}\right)^{0,25} \quad (14)$$

где $Re_D = \frac{\rho_{sr}\omega_{sr}D}{\mu_{sr}}$; $Re_L = \frac{\rho_{sr}\omega_{sr}L}{\mu_{sr}}$; $Pr = \frac{\nu}{a}$; Re_D, Re_L и Pr_{sr} вычисляются при определенной температуре, равной температуре сушильного агента на входе в зазор; Pr_s вычисляется при средней температуре на поверхности объекта сушки; ω_{sr} – интенсивность движения теплового носителя, м/с; ρ_{sr} – его плотность, кг/м^3; μ_{sr} – его динамическая вязкость, Па·с; λ_{sr} – для теплоносителя, Вт/(м·К); ν – кинематическая вязкость для теплоносителя, м^2/с; α – коэффициент температуропроводности сушильного агента, м^2/с; L – ширина валка или транспортирующей ленты, м; D – расстояние между объектом сушки и верхней частью сушильной камеры, м.

Если скорость движения теплоносителя и определяющий размер зазора таковы, что $Re_L > 1{,}2\times10^5$, то для вычисления безразмерного комплекса Nu потребуется уравнение, представленное ниже:

$$Nu = \frac{\alpha\cdot L}{\lambda_{sr}} = 0{,}037\cdot Re_L{}^{0,8}\cdot Pr_{sr}{}^{0,43}\cdot\left(\frac{Pr_{sr}}{Pr_s}\right)^{0,25} \quad (15)$$

Результаты и их обсуждение

На рисунке 5 показаны фотоснимки жидкого

Таблица 1. Плотность жидкого полуфабриката и сухой пищевой пленки

Table 1. Density of liquid semi-finished product and dry film

Наименование	Плотность ρ, кг/м^3
Арбузный полуфабрикат, полученный из пектинового экстракта, концентрация сухих веществ 9 %	1028 ± 3
Полимерный материал, полученный методом конвективной сушки арбузного полуфабриката, концентрация сухих веществ 90 %	652 ± 3

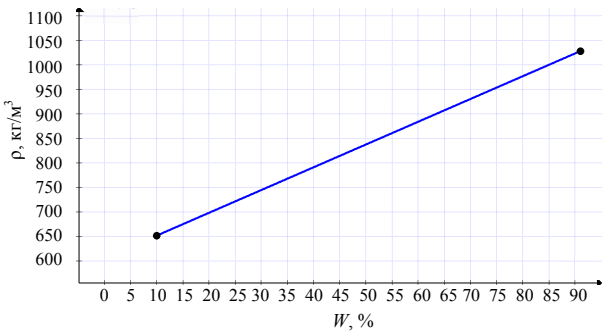


Рисунок 6. Зависимость физической плотности объекта изучения в пределах варьирования W от 0,1 до 0,91 кг/кг и T = 273–363 °К

Figure 6. Dependence of the physical density within the variation range of W from 0.1 to 0.91 kg/kg and T = 273–363°K

арбузного полуфабриката при доле сухого остатка в нем 9 %, а также полученной из него влагоудалением пленочной структуры с влажностью 10 %.

Опытные данные по нахождению плотности жидкого полуфабриката ρ и конечного пленочного материала сведены в таблице 1.

На рисунке 6 показана зависимость физической плотности объекта изучения в пределах варьирования влажности W от 0,1 до 0,91 кг/кг и T = 273–363 °К.

Данная зависимость линейно аппроксимирована для $0{,}1 \le W \le 0{,}91$ кг/кг и действует в интервале температур от 273 до 363 °К:

$$\rho = 4{,}64W + 605{,}6 \qquad (16)$$

Для арбузного полуфабриката при W = 91 % получены величины ТФХ, представленные в таблице 2.

Опытные данные по нахождению теплоемкости полуфабриката c_M при варьировании влажности в образце W сведены в таблице 3. Дальнейшее изменение c_M было получено при использовании методов экстра- или интерполяции.

На рисунке 7 показан результат графической аппроксимации зависимости c_M в пределах варьирования T = 273–363 °К и W от 0,1 до 0,91 кг/кг.

Линейная зависимость (рис. 7) получена путем аппроксимации эмпирических точек при: $0{,}1 \le W \le 0{,}91$ кг/кг и T от 273 до 363 °К:

$$c_M = 8{,}97W + 2622 \qquad (17)$$

Таблица 2. Результаты по опытному нахождению ТФХ объекта изучения

Table 2. Results of experimental finding of the thermophysical characteristics of the object of study

W, %	c_M, Дж/(кг·К)	$\alpha\times10^8$, м²/с	λ, Вт/(м·К)
≈ 91	≈ 3 439	≈ 11,59	≈ 0,41

Таблица 3. Значения коэффициента теплоемкости жидкого полуфабриката при разных влажностях

Table 3. Coefficient of heat capacity of the liquid semi-finished product at different humidity

Влажность образца, %	Удельная теплоемкость c_M, Дж/(кг·К)
91	3439
80	3393
70	3225
60	3137
50	3113

В соотношении (13) параметр B, обобщенный для множества жидких пищевых систем, целесообразно откорректировать для изучаемого продукта путем добавления поправочного коэффициента $B_{пор}$, найденного посредством корреляции опытного и вычисленного по соотношению (18) параметров при равнозначных влажностях [10].

$$B_{пор} = \frac{A_T \cdot c_M \cdot \rho^{\frac{1}{3}}}{M^{\frac{1}{3}}} \qquad (18)$$

где A_T = 0,428×10⁻⁷ – инвариант, зависящий от температуры жидкой среды без учета ее природы [10]; M = 18 – молярная масса жидкой основы полуфабриката.

Подставив зависимость (18) в уравнение (13), получим:

$$\lambda = \frac{A_T' \cdot c_M \cdot \rho^{\frac{1}{3}}}{\alpha}\rho \qquad (19)$$

где $A_T' = \frac{0{,}428}{18^{\frac{1}{3}}}\times10^{-7} = 0{,}1633\times10^{-7}$ – инвариант, который определяется температурой жидкости и зависит от ее вида.

Зная значения λ, c_M и ρ для влажности полуфабриката, равной 91 %, найдем из уравнения

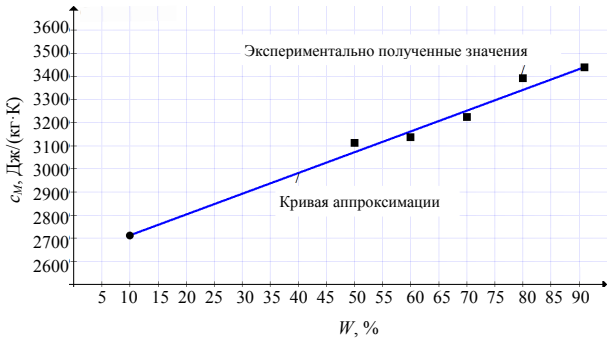


Рисунок 7. График зависимости теплоемкости объекта исследования от его влажности в интервале температур 273–363 °К

Figure 7. Effect of humidity on heat capacity at 273–363°K

(19) величину, характеризующую степень ассоциации, т. е. α:

$$\alpha = \frac{A_T{}' \cdot c_M \cdot \rho^{\frac{1}{3}}}{\lambda}\rho =$$

$$= \frac{0{,}1633 \times 10^{-7} . 3439 \cdot 1028^{\frac{1}{3}}}{0{,}41} 1028 = 1{,}4211$$

Определив величину α, запишем математическую зависимость искомой теплофизической характеристики λ от ее влажности W в следующем виде:

$$\lambda(W) = \frac{A_T{}' . c_M(W) \cdot \rho(W)^{\frac{1}{3}}}{\alpha}\rho(W) \quad (20)$$

или

$$\lambda(W) = A_T{}'' . c_M(W) \cdot \rho(W)^{\frac{1}{3}} \cdot \rho(W) \quad (21)$$

где $A_T{}'' = A_T{}'/_{\alpha} = 0{,}1149 \times 10^{-7}$.

На рисунке 8 показана зависимость $\lambda(W)$ при T = 273–363 °К и W от 0,1 до 0,91 кг/кг.

Коэффициент температуропроводности для заданных пределов варьирования W исследуемого гидрогеля от 0,1 до 0,91 кг/кг определяется как $a(W) = \frac{\lambda(W)}{c(W)\rho(W)}$. На рисунке 9 представлен график этой зависимости для исследуемого продукта в заданных пределах варьировании W и T.

Учитывая, что целесообразным способом сушки исследуемого полуфабриката является обезвоживание с комбинированным кондуктивно-конвективным энергоподводом, то для получения высококачественного конечного продукта максимально возможная температура сушильного агента не должна превышать 100 °С. Его максимальная скорость после проведения постановочных экспериментов не может быть выше 2,7 м/с, направленная прямо- или противотоком. Следует отметить, что превышение порогового значения скорости сушильного агента приводит к деформации поверхностного слоя, а также вероятности уноса геля (сдувание) с рабочей поверхности сушилки. При этом такие величины скорости рекомендуются для

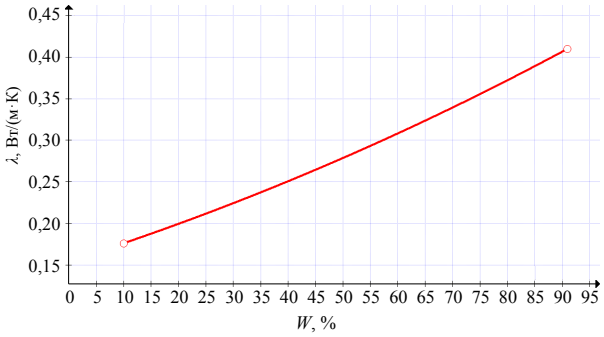


Рисунок 8. Зависимость $\lambda(W)$ при T = 273–363 °К и W от 0,1 до 0,91 кг/кг

Figure 8. Dependence of $\lambda(W)$ at T = 273–363°K and W = 0.1–0.91 kg/kg

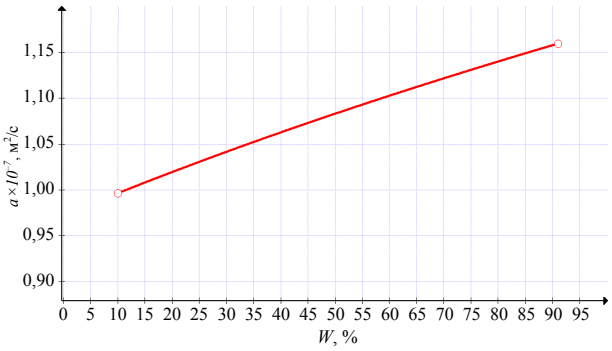


Рисунок 9. Зависимость коэффициента температуропроводности геля от его влажности при T = 273–363 °К

Figure 9. Effect of moisture content on thermal diffusivity of the gel at T = 273–363°K

промышленных ленточных и вальцовых конвективных сушилок [22–27]. По ГОСТ 20-85 и ГОСТ 22644-77 значение величины L можно ограничить стандартной шириной ленты в 500 мм, т. к. в ТУ на пищевые полимерные пленки их максимальная рациональная ширина не превышает 400 мм [28]. Представленные сведения позволяют вычислить максимальное значение критерия Re_L и выбрать необходимую формулу для расчета критерия Nu.

В таблице 4 представлены сведения для расчета максимального значения безразмерного комплекса Re_L.

В итоге Re_L = 58315, что меньше $1{,}2 \times 10^5$. Следовательно, для вычисления безразмерного комплекса Nu потребуется уравнение (14), рассчитав которое при разных условиях сушки, получим диапазон варьирования α. Для его упрощения и представления в более компактной форме проведем математическое преобразование и коррекцию численного коэффициента в уравнении (14). В результате получим следующее выражение для расчета коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = 4{,}35 \left(\frac{\rho_{sr}\omega_{sr}}{L}\right)^{0{,}4} \cdot \frac{\lambda_{sr}{}^{0{,}67} \cdot C_{sr}{}^{0{,}33}}{\mu_{sr}{}^{0{,}07} \cdot D^{0{,}2}} \cdot \Psi^{0{,}25} \quad (22)$$

где $\Psi = \frac{Pr_{sr}}{Pr_s}$; C_{sr} – коэффициент теплоемкости сушильного агента, Дж/(кг·К).

Величина D в уравнении (22), т. е. расстояние

Таблица 4. Значения величин $\underline{\omega_{sr}}$, L, ρ_{sr} и $\underline{\mu_{sr}}$ для расчета критерия Рейнольдса [29]

Table 4. Values of ω_{sr}, L, ρ_{sr} and $\underline{\mu_{sr}}$ for calculating the Reynolds criterion [29]

t, °C	$\underline{\omega_{sr}}$, м/с	$\underline{\mu_{sr}}$, Па·с	ρ_{sr}, кг/м³	L, м
100	2,7	$21{,}9 \times 10^{-6}$	0,946	0,5

Таблица 5. Данные для расчета симплекса Ψ и результат расчета [30]

Table 5. Calculating the Ψ simplex [30]

t, °C	Наименование	ν, м²/с	α, м²/с	Ψ
100	Сушильный агент	$23{,}13\times10^{-6}$	$33{,}6\times10^{-6}$	0,986
80	Арбузный полуфабрикат	$21{,}09\times10^{-6}$	$30{,}2\times10^{-6}$	

Таблица 6. Значения величин C_{sr} и λ_{sr} для расчета коэффициента теплоотдачи [30]

Table 6. Values of C_{sr} and λ_{sr} for calculating the heat transfer coefficient [30]

t, °C	C_{sr}, Дж/(кг·К)	λ_{sr}, Вт/(м·К)	α, Вт/(м²·К)
100	1009	0,0321	26,53

между поверхностью объекта сушки и верхней внутренней поверхностью корпуса сушильной камеры, в аспекте уменьшения габаритов сушилки должна быть минимальной, но не менее 100 мм, согласно техническим рекомендациям по проектированию агрегатов для обезвоживания [23, 26, 27]. В этой связи рекомендуемое значение D, равное 100 мм, обусловленное минимизацией возможного загрязнения внутренней поверхности рабочей камеры, было принято как исходное при проведении исследований и проектирования технологического оборудования. При росте интенсивности влагоудаления в случае увеличения скорости теплоносителя в сушильной камере целесообразно из-за варьирования этого параметра принять ее величину 2,5 м/с.

Расчет симплекса Ψ в уравнении (22) связан с выявлением средней температуры на поверхности объекта сушки, которая, как и температура теплоносителя, является важным параметром процедуры обезвоживания, т. к. влияет на интенсивность этого процесса в любой из его стадий. Влияние температуры определяется как увеличением потенциала влагоудаления (психрометрическая разница T) при ее росте, так и резким ростом интенсивности внутреннего массопереноса при увеличении потенциалопроводности объекта изучения [22, 24].

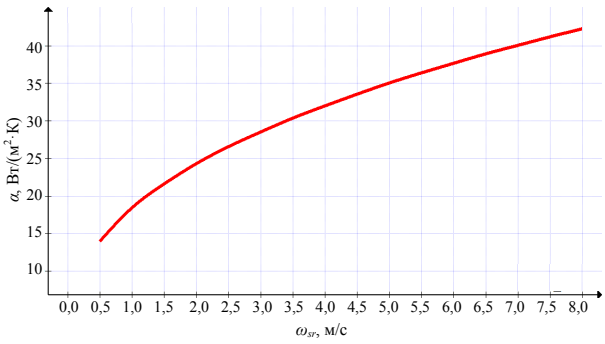


Рисунок 10. График зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости сушильного агента при его температуре 100 °C

Figure 10. Effect of drying agent speed on heat transfer coefficient at 100°C

Результаты экспериментальных исследований процесса сушки пищевых материалов могут быть представлены в виде зависимостей средних значений температуры объектов обезвоживания от продолжительности. При этом их характер для большинства высоковлажных материалов типичен [29]. Анализ выводов, обоснованных в работах [24, 29], показывает, что для большинства промышленно реализуемых процессов сушки пищевых материалов характерно отличие температуры сушильного агента от температуры объекта сушки на 15–20 %.

Таким образом, с приемлемой погрешностью возможно принять, что среднее значение температуры на поверхности объекта сушки, которая является важным параметром процедуры обезвоживания, будет меньше температуры сушильного агента на 20 %, т. е. составлять 80 °C. Такое заключение позволяет вычислить значение симплекса Ψ. В таблице 5 представлен результат расчета и данные для его вычисления (кинематическая вязкость ν и коэффициент температуропроводности α сушильного агента).

В соотношении (22) значения практически всех величин, входящих в него, уже известны (табл. 5), кроме коэффициентов теплоемкости C_{sr} и теплопроводности λ_{sr} сушильного агента. В таблице 6 представлены эти параметры и результат расчета коэффициента теплоотдачи α.

Для наглядности и удобства использования, при исключении математических операций, на рисунке 10 показана зависимость α от скорости сушильного агента (воздух) ω_{sr} в случае искусственной конвекции и традиционно применяемой температуры теплоносителя (≈ 100 °C) в контакте с поверхностью пищевого продукта (≈ 80 °C).

Выводы

В результате проведения исследований по нахождению теплофизических параметров арбузного полуфабриката как объекта влагоудаления получены следующие данные:

– усредненные величины плотности жидкого полуфабриката – 1028 кг/м³ и конечного пленочного материала – 652 кг/м³;

– зависимость физической плотности объекта

изучения в пределах варьирования влажности W от 0,1 до 0,91 кг/кг и T = 273–363 °К – $\rho = 4{,}64W + 605{,}6$;
– величины теплофизических характеристик для арбузного полуфабриката при W = 91 %: $c_M = 3439$ Дж/(кг·К); $a = 11{,}59 \times 10^{-8}$ м²/с; λ = 0,41 Вт/(м·К);
– усредненные значения удельной теплоемкости c_M для арбузного полуфабриката при различных W (80, 70, 60 и 50 %) – 3393, 3225, 3137 и 3113 Дж/(кг·К) соответственно;
– зависимость удельной теплоемкости объекта изучения в пределах варьирования влажности W от 0,1 до 0,91 кг/кг и T = 273–363 °К – – $c_M = 8{,}97W + 2622$;
– зависимость коэффициента теплопроводности объекта изучения в пределах варьирования влажности W от 0,1 до 0,91 кг/кг и T = 273–363 °К – $\lambda(W)$= $A_T''.c_M(W) \cdot \rho(W)^{\frac{1}{3}} \cdot \rho(W)$, где $A_T'' = {A_T'}/{\alpha} = 0{,}1149 \times 10^{-7}$;
– зависимость коэффициента теплоотдачи α от скорости сушильного агента (воздух) ω_{sr} в случае искусственной конвекции и традиционно применяемой температуры теплоносителя (≈ 100 °С) в контакте с поверхностью пищевого продукта (≈ 80 °С) – $\alpha = 4{,}35\left(\frac{\rho_{sr}\omega_{sr}}{L}\right)^{0,4} \cdot \frac{\lambda_{sr}^{0,67} \cdot C_{sr}^{0,33}}{\mu_{sr}^{0,07} \cdot D^{0,2}} \cdot \Psi^{0,25}$. Все входящие в уравнение члены для теплоносителя известны (расшифровка символов и численные значения параметров представлены в разделе статьи «результаты и их обсуждение») и постоянны, кроме скорости, которая варьируется от 0,5 до 8 м/с.

Таким образом, с целью проведения расчетных процедур при проектировании агрегатов для сушки теоретически и опытным путем найдены ТФХ и физическая плотность арбузного геля в определенных пределах варьирования влажности и параметров теплового агента. Кроме того, была скорректирована и модифицирована критериальная зависимость для определения коэффициента теплооотдачи с учетом известных литературных данных и авторских тестирующих экспериментов. Это позволило рассчитать искомый коэффициент в зависимости от варьирования влияющих на него физических параметров.

Критерии авторства

А. Х.-Х. Нугманов руководил научной работой. Г. С. Мещерякова, Е. В. Соколова и В. А. Лебедев составляли план экспериментов, скомпоновывали лабораторные стенды и проводили опытные серии, табулировали полученные данные и получали их графическую интерпретацию. Д. М. Бородулин участвовал в оценке актуальности и постановке задач исследования, обсуждении его результатов, а также вносил редакционные правки с учетом требований к публикации. И. Ю. Алексанян проводил математическую обработку полученных данных и оценивал адекватность проведенных экспериментальных исследований к известным научно-техническим результатам в рассматриваемой области.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

A.H.-H. Nugmanov supervised the research. G.S. Meshcheryakova, E.V. Sokolova, and V.A. Lebedev planned the experiments, arranged the laboratory stands, carried out experiments, tabulated the obtained data, and compiled their graphic interpretation. D.M. Borodulin assessed the relevance, set the research objectives, discussed the results, and proofread the manuscript. I.Yu. Aleksanian processed the data and assessed the adequacy of the experimental research.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Хатко З. Н., Ашинова А. А. Пектиносодержащие пленочные структуры. Майкоп: Майкопский государственный технологический университет, 2019. 112 с.

2. Modelling formation and removal of biofilms in secondary dairy raw materials / S. A. Ryabtseva [et al.] // Foods and Raw Materials. 2021. Vol. 9. № 1. P. 59–68. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-59-68.

3. Advances in the pectin production process using novel extraction techniques: A review / L. R. Adetunji [et al.] // Food Hydrocolloids. 2017. Vol. 62. P. 239–250. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.015.

4. Effect of rootstock on growth dynamics and yield components of early watermelon cultivars / N. Toth [et al.] // Acta Horticulturae. 2021. Vol. 1320. P. 355–362. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1320.47.

5. Rahman M. M., Joardder M. U. H., Karim A. Non-destructive investigation of cellular level moisture distribution and morphological changes during drying of a plant-based food material // Biosystems Engineering. 2018. Vol. 169. P. 126–138. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.02.007.

6. Zielinska M., Ropelewska E., Markowski M. Thermophysical properties of raw, hot-air and microwave-vacuum dried cranberry fruits (*Vaccinium macrocarpon*) // LWT. 2017. Vol. 85. P. 204–211. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.07.016.

7. An innovative hybrid-solar-vacuum dryer to produce high-quality dried fruits and vegetables / T. B. Roratto [et al.] // LWT. 2021. Vol. 140. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110777.

8. The method and the device for measuring thermophysical properties of liquids / A. Divin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 693. № 1. https://doi.org/10.1088/1757-899X/693/1/012020.

9. Albouchi F., Abdelmajid J. Photothermal investigations of conductive and optical properties of liquids in the near infrared // Instrumentation Mesure Metrologie. 2021. Vol. 20. № 1. P. 49–56. https://doi.org/10.18280/I2M.200107.

10. Определение теплофизических характеристик тропических фруктов для использования их при производстве сухих молочных продуктов / И. А. Короткий [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 2. С. 220–231. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-220-231.

11. Jafari S. M., Saremnejad F., Dehnad D. Nano-fluid thermal processing of watermelon juice in a shell and tube heat exchanger and evaluating its qualitative properties // Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2017. Vol. 42. P. 173–179. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.003.

12. El Matarawy A., El-Dien E. M. Precise temperature controlling algorithm for metrological adiabatic calorimeters based on proportional-integration (α) thermal energy // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021. https://doi.org/10.1007/s10973-021-10806-2.

13. Morphological, textural and physico-chemical characterization of processed meat products during their shelf life / E. Melro [et al.] // Food Structure. 2020. Vol. 26. https://doi.org/10.1016/j.foostr.2020.100164.

14. Исследование теплоемкости пастообразных пищевых продуктов / А. Х.-Х. Нугманов [и др.] // Естественные и технические науки. 2015. Т. 84. № 6. С. 487–489.

15. Study of granular food material drying in a pilot-scale rotating fluidized bed with static geometry dryer / P. Singh [et al.] // Recent advances in mechanical engineering: Select proceedings of ICRAME 2020 / editors K. M. Pandey [et al.]. Singapore: Springer, 2021. P. 555–562. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7711-6_55.

16. Physical properties of barley grains at hydration and drying conditions of malt production / G. R. Carvalho [et al.] // Journal of Food Process Engineering. 2021. Vol. 44. № 4. https://doi.org/10.1111/jfpe.13644.

17. Hijjaji K., Gabsi S., Frikha N. Determination of heat and mass transfer coefficients in a spray humidifier humidification–dehumidification desalination system // Desalination and Water Treatment. 2021. Vol. 225. P. 392–401. https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27218.

18. Reinhardt A., Cheng B. Quantum-mechanical exploration of the phase diagram of water // Nature Communications. 2021. Vol. 12. № 1. https://doi.org/10.1038/s41467-020-20821-w.

19. Encapsulation of *Lactobacillus casei* in quince seed gum-alginate beads to produce a functional synbiotic drink powder by agro-industrial by-products and freeze-drying / M. Jouki [et al.] // Food Hydrocolloids. 2021. Vol. 120. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106895.

20. Özbek H. N. Radio frequency-assisted hot air drying of carrots for the production of carrot powder: Kinetics and product quality // LWT. 2021. Vol. 152. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112332.

21. Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer of *Lavandula* x *allardii* leaves during non-isothermal convective drying / V. Chasiotis [et al.] // Journal of Food Engineering. 2021. Vol. 311. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110708.

22. Mathematical model of high-temperature tubeshaped pasta drying in a conveyer belt drier / A. N. Ostrikov [et al.] // International Journal of Food Engineering. 2021. Vol. 17. № 3. P. 209–215. https://doi.org/10.1515/ijfe-2020-0101.

23. Parameters of the drying medium and dried hops in belt dryer / A. Rybka [et al.] // Research in Agricultural Engineering. 2017. Vol. 63. P. S24–S32. https://doi.org/10.17221/35/2017-RAE.

24. Water leakage control by using vibratory roller on a dry-seeded rice field in southwestern Japan / K. Fukami [et al.] // Soil and Tillage Research. 2017. Vol. 166. P. 138–146. https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.011.

25. Neuro-fuzzy modeling of a conveyor-belt grain dryer / O. F. Lutfy [et al.] // Journal of Food, Agriculture and Environment. 2010. Vol. 8. № 3–4. P. 128–134.

26. Kamata T., Wada K., Ichikawa H. Dry pre-coating of active pharmaceutical ingredient with submicron-sized hydroxypropylcellulose in dry granulation using roller compactor improves granule properties // Journal of Drug Delivery Science and Technology. 2018. Vol. 43. P. 34–43. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2017.08.009.

27. Friso D. Conveyor-belt dryers with tangential flow for food drying: Mathematical modeling and design guidelines for final moisture content higher than the critical value // Inventions. 2020. Vol. 5. № 2. https://doi.org/10.3390/inventions5020022.

28. Технические условия на пленки полимерные для пищевой промышленности. URL: https://всероссийская-база-ту.рф/tekhnicheskie-usloviya-na-pljonki-polimernye-dlya-pishchevoj-produktsii (дата обращения: 02.07.2021).

29. Effects of maltodextrin content in double-layer emulsion for production and storage of spray-dried carotenoid-rich microcapsules / M. L. F. F. Ribeiro [et al.] // Food and Bioproducts Processing. 2020. Vol. 124. P. 208–221. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.09.004.

30. Computational analysis of the thermal performance of rarefied air flow in V-shaped microchannels / M. Hader [et al.] // Heat Transfer. 2021. Vol. 50. № 4. P. 3977–3995. https://doi.org/10.1002/htj.22060.

References

1. Khatko ZN, Ashinova AA. Pektinosoderzhashchie plenochnye struktury [Pectin-containing film structures]. Maykop: Maykop State Technological University; 2019. 112 p. (In Russ.).

2. Ryabtseva SA, Tabakova YuA, Khramtsov AG, Anisimov GS, Kravtsov VA. Modelling formation and removal of biofilms in secondary dairy raw materials. Foods and Raw Materials. 2021;9(1):59–68. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-59-68.

3. Adetunji LR, Adekunle A, Orsat V, Raghavan V. Advances in the pectin production process using novel extraction techniques: A review. Food Hydrocolloids. 2017;62:239–250. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.015.

4. Toth N, Sedlar A, Radman S, Fabek Uher S, Zutic I, Benko B. Effect of rootstock on growth dynamics and yield components of early watermelon cultivars. Acta Horticulturae. 2021;1320:355–362. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1320.47.

5. Rahman MM, Joardder MUH, Karim A. Non-destructive investigation of cellular level moisture distribution and morphological changes during drying of a plant-based food material. Biosystems Engineering. 2018;169:126–138. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.02.007.

6. Zielinska M, Ropelewska E, Markowski M. Thermophysical properties of raw, hot-air and microwave-vacuum dried cranberry fruits (*Vaccinium macrocarpon*). LWT. 2017;85:204–211. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.07.016.

7. Roratto TB, Monteiro RL, Carciofi BAM, Laurindo JB. An innovative hybrid-solar-vacuum dryer to produce high-quality dried fruits and vegetables. LWT. 2021;140. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110777.

8. Divin A, Ponomarev S, Petrasheva M, Lyubimova D, Mozgova G, Belyaev P, et al. The method and the device for measuring thermophysical properties of liquids. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019;693(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/693/1/012020.

9. Albouchi F, Abdelmajid J. Photothermal investigations of conductive and optical properties of liquids in the near infrared. Instrumentation Mesure Metrologie. 2021;20(1):49–56. https://doi.org/10.18280/I2M.200107.

10. Korotkiy IA, Neverov EN, Vladimirov AA, Neverova OA, Proskuryakova LA. Thermophysical characteristics of tropical fruits in milk powder products. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(2):220–231. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-220-231.

11. Jafari SM, Saremnejad F, Dehnad D. Nano-fluid thermal processing of watermelon juice in a shell and tube heat exchanger and evaluating its qualitative properties. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2017;42:173–179. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.003.

12. El Matarawy A, El-Dien EM. Precise temperature controlling algorithm for metrological adiabatic calorimeters based on proportional-integration (α) thermal energy. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021. https://doi.org/10.1007/s10973-021-10806-2.

13. Melro E, Antunes F, Cruz I, Ramos PE, Carvalho F, Alves L. Morphological, textural and physico-chemical characterization of processed meat products during their shelf life. Food Structure. 2020;26. https://doi.org/10.1016/j.foostr.2020.100164.

14. Nugmanov AKh-Kh, Krasnov VA, Maksimenko YuA, Fomenko EV. Issledovanie teploemkosti pastoobraznykh pishchevykh produktov [Heat capacity of pasty food products]. Natural and Technical Sciences. 2015;84(6):487–489. (In Russ.).

15. Singh P, Kalita P, Mahanta P, Das HJ. Study of granular food material drying in a pilot-scale rotating fluidized bed with static geometry dryer. In: Pandey KM, Misra RD, Patowari PK, Dixit US, editors. Recent advances in mechanical engineering: Select proceedings of ICRAME 2020. Singapore: Springer; 2021. pp. 555–562. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7711-6_55.

16. Carvalho GR, Polachini TC, Augusto PED, Telis-Romero J, Bon J. Physical properties of barley grains at hydration and drying conditions of malt production. Journal of Food Process Engineering. 2021;44(4). https://doi.org/10.1111/jfpe.13644.

17. Hijjaji K, Gabsi S, Frikha N. Determination of heat and mass transfer coefficients in a spray humidifier humidification–dehumidification desalination system. Desalination and Water Treatment. 2021;225:392–401. https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27218.

18. Reinhardt A, Cheng B. Quantum-mechanical exploration of the phase diagram of water. Nature Communications. 2021;12(1). https://doi.org/10.1038/s41467-020-20821-w.

19. Jouki M, Khazaei N, Rashidi-Alavijeh S, Ahmadi S. Encapsulation of *Lactobacillus casei* in quince seed gum-alginate beads to produce a functional synbiotic drink powder by agro-industrial by-products and freeze-drying. Food Hydrocolloids. 2021;120. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106895.

20. Özbek HN. Radio frequency-assisted hot air drying of carrots for the production of carrot powder: Kinetics and product quality. LWT. 2021;152. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112332.

21. Chasiotis V, Tzempelikos D, Mitrakos D, Filios A. Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer of *Lavandula* x *allardii* leaves during non-isothermal convective drying. Journal of Food Engineering. 2021;311. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110708.

22. Ostrikov AN, Ospanov AA, Shevtsov AA, Muslimov NZh, Timurbekova AK, Jumabekova GB. Mathematical model of high-temperature tubeshaped pasta drying in a conveyer belt drier. International Journal of Food Engineering. 2021;17(3):209–215. https://doi.org/10.1515/ijfe-2020-0101.

23. Rybka A, Heřmánek P, Honzík I, Krofta K. Parameters of the drying medium and dried hops in belt dryer. Research in Agricultural Engineering. 2017;63:S24–S32. https://doi.org/10.17221/35/2017-RAE.

24. Fukami K, Mukunoki T, Nakano K, Matsuo N, Okayasu T. Water leakage control by using vibratory roller on a dry-seeded rice field in southwestern Japan. Soil and Tillage Research. 2017;166:138–146. https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.011.

25. Lutfy OF, Mohd Noor SB, Marhaban MH, Abbas KA, Mansor H. Neuro-fuzzy modeling of a conveyor-belt grain dryer. Journal of Food, Agriculture and Environment. 2010;8(3–4):128–134.

26. Kamata T, Wada K, Ichikawa H. Dry pre-coating of active pharmaceutical ingredient with submicron-sized hydroxypropylcellulose in dry granulation using roller compactor improves granule properties. Journal of Drug Delivery Science and Technology. 2018;43:34–43. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2017.08.009.

27. Friso D. Conveyor-belt dryers with tangential flow for food drying: Mathematical modeling and design guidelines for final moisture content higher than the critical value. Inventions. 2020;5(2). https://doi.org/10.3390/inventions5020022.

28. Tekhnicheskie usloviya na plenki polimernye dlya pishchevoy promyshlennosti [Specifications for polymer films in food industry] [Internet]. [cited 2021 Jul 02]. Available from: https://всероссийская-база-ту.рф/tekhnicheskie-usloviya-na-pljonki-polimernye-dlya-pishchevoj-produktsii.

29. Ribeiro MLFF, Roos YH, Ribeiro APB, Nicoletti VR. Effects of maltodextrin content in double-layer emulsion for production and storage of spray-dried carotenoid-rich microcapsules. Food and Bioproducts Processing. 2020;124:208–221. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.09.004.

30. Hader M, Al-Kouz W, Kiwan S, Alshare A, Chamkha A. Computational analysis of the thermal performance of rarefied air flow in V-shaped microchannels. Heat Transfer. 2021;50(4):3977–3995. https://doi.org/10.1002/htj.22060.