

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

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE

Термодинамика взаимодействия инулинового комплекса с водой

Юрий А. Максименко, Ольга И. Коннова*, Игорь Ю. Алексанян

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»;

ул. Татищева, стр. 16/1, г. Астрахань, 414056, Российская Федерация

Аннотация. В настоящее время к ключевым тенденциям мирового продовольственного рынка можно отнести быстроразвивающуюся индустрию функционального питания, которая вызывает большой интерес у потребителей. Инулин – природный полисахарид растительного происхождения, состоящий из остатков Е-фруктофуранозы (фруктозы). Объектом исследования послужил инулиновый экстракт из топинамбура при разной влажности. Установлено, что для интенсификации процесса сушки экстракта инулина целесообразно повышение поверхности массообмена, которое может быть достигнуто при распылении исходного продукта, и использовании объемных способов энергоподвода, в частности, радиационного энергоподвода. Важные и наиболее энергоемкие стадии сушки осуществляются в гигроскопическом ареале равновесной влажности объекта исследования, что обуславливает интенсивность и механизм операции влагоудаления, с целью повышения степени совершенства которой, выбрана рациональных режимных параметров, а также построения, адаптации к объекту анализа и решения математической модели удаления из него влаги. Опираясь на построенные в предварительных исследованиях изотермы сорбции и гигроскопические параметры инулинового экстракта, полученного при обезвоживании экстракта инулина из топинамбура (сорт «Скороспелка», выращенного АО «Чаганское», Астраханская область), проведен термодинамический анализ процесса сорбции и десорбции в разных рамках варьирования влажности, найдена общая энергия связи влаги с сухим остатком инулина и ее термодинамические составляющие. Полученные данные не противоречат известным литературным источникам и могут быть рекомендованы при проектировании процессов влагоудаления из инулинового экстракта и конструировании сушильных аппаратов.

Ключевые слова: топинамбур, инулин, активность воды, влажность, изотермы сорбции, связь влаги с материалом, термодинамический анализ, сушка

Для цитирования: Максименко Ю.А., Коннова О.И., Алексанян И.Ю. Термодинамика взаимодействия инулинового комплекса с водой. Новые технологии / New technologies. 2023; 19(4): 111-118. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2023-19-4-111-118>

Thermodynamics of interaction of inulin complex with water

Yuriy A. Maksimenko, Olga I. Konnova*, Igor Yu. Aleksanian

FSBEI HE «Astrakhan State Technical University»;

16/1 Tatishchev str., Astrakhan, 414056, the Russian Federation

Abstract. Currently, the key trends in the global food market include the rapidly developing functional nutrition industry, which is of great interest to consumers. Inulin is a natural polysaccharide of plant origin, consisting of residues of E-fructofuranose (fructose). The object of the research is inulin extract from Jerusalem artichoke at different humidity levels. It has been established that to intensify the drying process of inulin extract,

it is advisable to increase the mass transfer surface, which can be achieved by spraying the initial product, and using volumetric energy supply methods, in particular, radiation energy supply. The important and most energy-intensive stages of drying are carried out in the hygroscopic area of equilibrium humidity of the object of the research, which determines the intensity and mechanism of the dehumidification operation in order to increase the degree of perfection, select rational operating parameters, adapt to the object of the analysis and solve a mathematical model of removal moisture from it. Based on the sorption isotherms and hygroscopic parameters of the inulin extract obtained in preliminary studies, obtained by dehydrating the inulin extract from Jerusalem artichoke (variety «Skorospelka», grown by JSC «Chaganskoe», the Astrakhan region), a thermodynamic analysis of the process of sorption and desorption was carried out in different ranges of humidity variation. The total binding energy of moisture with the dry residue of inulin and its thermodynamic components were found. The data obtained do not contradict known literature sources and can be recommended when designing processes for removing moisture from inulin extract and designing drying devices.

Keywords: Jerusalem artichoke, inulin, water activity, humidity, sorption isotherms, relationship between moisture and material, thermodynamic analysis, drying

For citation: Maksimenko Yu.A., Konnova O.I., Aleksanyan I.Yu. Thermodynamics of interaction of inulin complex with water. *Novye tehnologii / New technologies*. 2023; 19(4): 111-118. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2023-19-4-111-118>

Введение

Инновационные подходы глубокой переработки растительного сырья стали необходимым условием для решения продовольственных, топливных, энергетических и экологических проблем. В настоящее время к ключевым тенденциям мирового продовольственного рынка можно отнести быстроразвивающуюся индустрию функционального питания, которая вызывает большой интерес у потребителей.

Существует зависимость между иммунным статусом человека и потребляемой им пищей. Производители расширяют ассортимент такой продукции за счет использования новых функциональных ингредиентов и создания новых видов продуктов. В связи с этим большой практический интерес представляет сырье, содержащее инулин, в первую очередь топинамбура, на основе которого во многих развитых странах осуществляется крупнотоннажное промышленное производство инулина [1, 2, 3, 4, 5].

Инулин – природный полисахарид растительного происхождения, состоящий из остатков Е-фруктофуранозы (фруктозы) [1, 2].

В предварительных исследованиях были построены изотермы сорбции (ИС) для инулинового комплекса (ИК), как зависимость активности воды A_w от равновесной влажности W_p и температуры T , опираясь на которые определены его гигроскопические параметры, выявлен механизм сорбции в разных рамках варьирования W_p , рекомендована конечная влажность сухого порошка ИК, полученного при конвективно-радиационном обезвоживании ИК в распыленном состоянии

Важные и наиболее энергоемкие стадии сушки осуществляются в гигроскопическом ареале W_p объекта исследования, что обуславливает интенсивность и механизм операции влагоудаления, с целью повышения степени совершенства

которой, выбора рациональных режимных параметров, а также построения, адаптации к объекту анализа и решения математической модели удаления из него влаги.

Объект и методы исследования

Объектом исследования послужил инулиновый комплекс из топинамбура при разной влажности.

С целью изучения процедур переноса массы и тепловой энергии внутри образца ИК при сушке различных материалов традиционно используется термодинамический подход, в основе которого лежат законы классической термодинамики, причем используется определяющий динамику переноса влаги параметр – его потенциал Θ [1, 2, 3, 4, 5], который идентичен химическому потенциалу μ трансфера влаги в виде пара в паровоздушной среде в гигроскопическом ареале W_p [6, 7]:

$$|\Theta| = |\mu| = RT \ln A_w \quad (1)$$

где $R = 8,314$ – универсальная газовая константа, Дж/(моль·К).

В данном ареале $\mu = f(W_p, T)$, а μ_0 между μ_0 и μ для влаги в свободном и связанном состоянии служит движущей силой сорбционных процедур и по модулю идентичен энергии взаимодействия воды с сухим веществом E_c или варьированию свободной энергии Гельмгольца.

$$|\Delta\mu| = E_c = - \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right) = -RT \ln A_w \quad (2)$$

Варьирование свободной энергии выявляем посредством взятия производной от закономерности Гиббса-Гельмгольца по W_p ($P, T = \text{const}$) [6]: $\Delta F = \Delta E - T \cdot \Delta S$, где ΔE – варьирование внутренней и $T \cdot \Delta S$ – связанной энергий, где ΔS – энтропийное варьирование.

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p} \right)_{T,P} - T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} \quad (3)$$

При дифференцировании выражения (3) по T получаем:

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_{T,P} = - \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} \quad (4)$$

С учетом (2), получим:

$$\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} = - \frac{\partial (R \cdot T \cdot \ln Aw(W_p, T))}{\partial T} \quad (5)$$

Таким образом, зная зависимость $Aw(W_p, T)$ можно определить численные значения свободной энергии, связанной энергии и внутренней энергии процесса сорбции.

Зависимость изменения теплового эффекта сорбции:

$$\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p} \right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_{T,P} + T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} \quad (6)$$

Отметим, что термодиффузионный коэффициент δ_p является частью относительного

Для использования в инженерной практике экспериментальные данные по сорбции математически аппроксимированы функциональной зависимостью:

$$Aw(W_p, T) = (a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h) \quad (10),$$

где $a = -0,46827545$, $b = -54,14911015$, $c = 0,11497765$, $d = 33,20094755$, $e = 0,00162935$, $f = -1,26464555$, $g = 0,000163025$, $h = -0,043755325$ – эмпирические коэффициенты.

Опираясь на известную зависимость получим:

$$Ec = -\Delta\mu = -R \cdot T \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h)) \quad (10).$$

Зависимость дифференциального изменения свободной энергии:

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_{T,P} = T \cdot R \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h)) \quad (11).$$

Зависимость дифференциального изменения связанной энергии:

$$T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} = -T \cdot R \cdot \left[\frac{\ln((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h)) + (a \cdot W_p^3 + c \cdot W_p^2 + e \cdot W_p + g)}{((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h))} \right] \quad (12)$$

В графическом виде на рисунке 1 представлены полученные зависимости для инулина. Характер дифференциального изменения связанной энергии (энтропийной составляющей) определен устремлению термодинамической системы к равновесию.

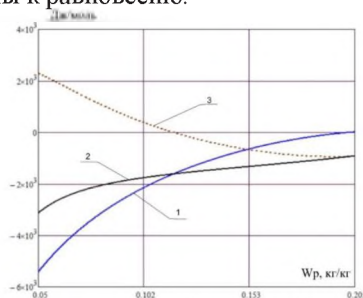


Рис. 1. Закономерности варьирования $\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_{T,P}$ (1), $T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P}$ (2) и $\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p} \right)_{T,P}$ (3) при $T = 293$ K для ИК

Fig. 1. Patterns of variation $\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_{T,P}$ (1), $T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P}$ (2) and $\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p} \right)_{T,P}$ (3) at $T = 293$ K for IR

показателя термодиффузии δ . В равновесных условиях δ_p идентичен δ [6, 7, 8]:

$$\delta_p = c_m \cdot \left(\frac{\partial \Delta \mu}{\partial T} \right)_{W_p=const} \quad (7),$$

где $c_m = \left(\frac{\partial W_p}{\partial \Delta \mu} \right)_{T=const}$ – удельная изотермическая влагоемкость материала.

$$\delta_p = \left(\frac{\partial \Delta \mu}{\partial T} \right)_{W_p} \cdot \left(\frac{\partial W_p}{\partial \Delta \mu} \right)_T \quad (8)$$

С использованием формулы (2), получим:

$$\left(\frac{\partial \Delta \mu}{\partial T} \right)_{W_p} = \left(\frac{\partial (RT \ln Aw(W_p, T))}{\partial T} \right) \quad (9)$$

Отметим, что закономерность (9) служит дифференциальным варьированием сорбционной энтропии и представляется, как температурный коэффициент [9, 10, 11].

Результаты исследования и их обсуждение

Величина $\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p}\right)_{T,p}$ отрицательна в определенных рамках варьирования, W_p , что обуславливает термические эффекты при сорбции водяных паров ИК. Принимая во внимание (2) имеем:

$$\left(\frac{\partial W_p}{\partial \Delta \mu}\right)_T = \frac{1}{(\partial \Delta \mu / \partial W_p)_T}, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \Delta \mu}{\partial T}\right)_{W_p} &= \frac{\partial(T \cdot R \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h)))}{\partial T} = \\ &= R \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h)) + \\ &+ R \cdot T \cdot \frac{(a \cdot W_p^3 + c \cdot W_p^2 + e \cdot W_p + g)}{((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h))} \end{aligned} \quad (13)$$

Опираясь на (12), имеем:

$$\left(\frac{\partial W_p}{\partial \Delta \mu}\right)_T = \frac{1}{\left(-T \cdot R \cdot \frac{(3 \cdot (a \cdot T + b) \cdot W_p^2 + 2 \cdot (c \cdot T + d) \cdot W_p + (e \cdot T + f))}{((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h))}\right)} \quad (14)$$

Введя в (8) закономерности (13) и (14) имеем варьирование δ_p , (рисунок 2) в зависимости от T и W_p . Полученные закономерности не входят в конфликт с уже известными для растительных субстанций [5, 6, 8, 9, 10, 11, 12].

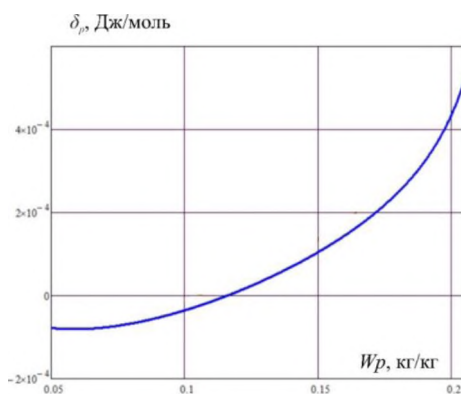


Рис. 2. Закономерность варьирования δ_p при $T = 333$ К для ИК

Fig. 2. Regularity of variation of δ_p at $T = 333$ K for IR

Термоградиентный коэффициент δ_p служит для анализа процедуры термотрансфера влаги в образце и его значение зависит от вида и энергетики связи влаги с сухим веществом. На стадии соответствующей адсорбционно-связанной воде (рисунок 2), δ_p ниже нуля по причине феномена относительного термодиффузионного переноса в газовых композициях [12]. Воздушная среда с более высоким молекулярным весом по отношению к парам воды, диффундирует в одном направлении с тепловым потоком, что обуславливает трансфер пара в обратном направлении по отношению к тепловому потоку. Относительная термодиффузия усугубляется феноменом теплового скольжения при эффузии паровой среды при перемещении водных молекул по капиллярной стенке при варьировании T вдоль его протяженности. Так при падении T в капилляре на

протяженности его стенки падает и T контактирующей с ней паровой прослойки, причем этом наблюдается перемещение паропотока направления роста T , то есть против теплоточка.

Опираясь на данные публикаций [13, 14, 15, 16, 17, 18] и авторские результаты, приходим к заключению о том, что с целью ускорения операции обезвоживания ИК желателен рост площади поверхности обмена веществом, что возможно при диспергировании материала, в частности путем его распыления при реализации методов объемного подведения тепловой энергии при инфракрасном облучении объекта.

В процессе отведения влаги, связанной с сухим веществом, удельная теплота образования пара r в уравнении переноса тепловой энергии [15, 16, 17] определяется сложением теплот на отведение влаги в свободном состоянии r' и

смачивания $r_{см}$, а также энтропийного слагаемого $r_{энт}$. Тогда общую энергию на отведение 1 кг влаги определяем [18, 19], как:

$$r = r' + r_{см} + r_{энт} \quad (15)$$

При этом $r'(T)$, Дж/кг является в заданных рамках варьирования T линейной функцией и находится, как:

$$r'(T) = 3118,4581 \cdot 10^3 - 2286,66 \cdot T \quad (16)$$

$r_{см}$, Дж/моль, определяется [1, 6, 19], как:

$$r_{см}(Wp, T) = -\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial Wp}\right)_{T,P} = -T \cdot R \cdot \ln Aw(Wp, T) \quad (17)$$

$r_{энт}$, Дж/моль находится [6, 19], как:

$$r_{энт}(Wp, T) = T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial Wp}\right)_{T,P} = -T \cdot \left(\frac{\partial(T \cdot R \cdot \ln Aw(Wp, T))}{\partial T}\right) \quad (18)$$

Учитывая, что для водной фазы относительная молярная масса соответствует 18 кг/моль имеем $r_{см}$ и $r_{энт}$ в Дж/кг:

$$r_{см}(Wp, T) = -\frac{1}{0,018} \cdot \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial Wp}\right)_{T,P} = -55, (5) \cdot T \cdot R \cdot \ln Aw(Wp, T) \quad (19)$$

$$r_{энт}(Wp, T) = \frac{1}{0,018} \cdot T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial Wp}\right)_{T,P} = -55, (5) \cdot T \cdot \left(\frac{\partial(T \cdot R \cdot \ln Aw(Wp, T))}{\partial T}\right) \quad (20)$$

Тогда $r(Wp, T)$ находим, как:

$$r(Wp, T) = 3118,4581 \cdot 10^3 - 2286,66 \cdot T - 55, (5) \cdot T \cdot R \cdot \ln Aw(Wp, T) + 55,5 \cdot T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial Wp}\right)_{T,P} \quad (21)$$

В результате имеем $r(Wp, T)$ в Дж/кг (рисунок 3).

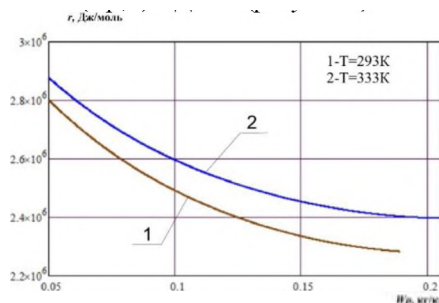


Рис. 3. Зависимость удельной тепловой энергии испарения от равновесной влажности в процессе сорбции паров пектином

Fig. 3. Dependence of the specific thermal energy of evaporation on equilibrium humidity in the process of vapor sorption by pectin

Энергетическую связь 1 кг воды с сухим веществом Δr с учетом энтропийного варьирования находим, как:

$$\Delta r(Wp, T) = r_{см}(Wp, T) + r_{энт}(Wp, T) = -55, (5) \cdot T \cdot R \cdot \ln Aw(Wp, T) + 55, (5) \cdot T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial Wp}\right) \quad (22)$$

Зависимость (21) позволяет определить значения удельной тепловой энергии испарения $r(Wp, T)$ для подстановки в дифференциальное уравнение теплопереноса [20, 21, 22, 23, 24] при моделировании тепломассообменных процессов сушки.

Вывод

Таким образом, опираясь на поостренные изотермы сорбции и гигроскопические параметры ИК, полученного при полученного при конвективно-радиационном обезвоживании экстракта ИК из топинамбура (сорт «Скороспелка», выращенного АО «Чаганское», Астраханская область), проведен термодинамический анализ

процесса сорбции и десорбции в разных рамках варьирования влажности, найдена общая энергия связи влаги с сухим остатком ИК и ее термодинамические составляющие.

Установлено, что для интенсификации процесса сушки ИК целесообразно повышение поверхности массообмена, которое может быть достигнуто при распылении исходного

продукта, и использовании объемных способов энергоподвода, в частности, радиационного энергоподвода.

Полученные данные не противоречат известным литературным источникам и могут быть рекомендованы при проектировании процессов влагоудаления из ИК и конструировании сушильных аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эгамова М.М., Сафарзода Р.Ш., Фаридуни К.Р. и др. Исследование химического состава флавоноидных соединений в траве топинамбура методом ВЭЖХ – МС. Наука и инновация. 2022; 3: 152-161.
2. Туршатов М.В., Соловьев А.О., Волкова Г.С. и др. Комплексная переработка топинамбура с получением пищевых функциональных продуктов. Актуальная биотехнология. 2022; 1: 255.
3. Бызов В.А., Пучкова Т.С., Пихало Д.М. Оценка показателей качества клубней топинамбура для переработки на инулин и его производные. Пищевая промышленность. 2023; 4: 58-62.
4. Анакулов М.М., Розикова М.Т., Сафаров М.М. и др. Адсорбционные свойства сушеных клубней топинамбура. Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2020; 2(50): 13-15.
5. Vukov K., Erdélyi M., Pichler-magyar E. Preparation of Pure Inulin and Various Inulin-Containing Products from Jerusalem Artichoke for Human Consumption and for Diagnostic Use. Studies in Plant Science. 1993; 3: 341-345.
6. Алексанян И.Ю., Петровичев О.А., Максименко Ю.А. и др. Зависимость теплофизических свойств пектиновых концентратов от влияющих факторов. Российский пектин: история, настоящее, перспективы: материалы конференции. Воронеж; 2006: 56-59.
7. Gaafar A.M., El-Din Serag M.F., Boudy A. et al. Extraction Conditions of Inulin from Jerusalem Artichoke Tubers and its Effects on Blood Glucose and Lipid Profile in Diabetic Rats. Journal of American Science. 2010; 6(5): 36-43.
8. Kheto A., Bist Y., Awana A., Kaur S., Kumar Y., Sehrawat R. Utilization of inulin as a functional ingredient in food: Processing, physicochemical characteristics, food applications, and future research directions. Food Chemistry Advances. 2023; 3.
9. Максименко Ю.А., Свирина С.А., Бахарева А.А. и др. Исследование удельной теплоемкости жидких и пастообразных растительных материалов. Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2022; 1: 121-128.
10. Нугманов А.Х.-Х., Краснов В.А., Максименко Ю.А. и др. Исследование теплоемкости пастообразных пищевых продуктов. Естественные и технические науки. 2015; 6(84): 512-514.
11. Журавлев А.В., Марухин А.С., Киринос А.В. Разработка конструкции сушильной камеры с закрученными потоками теплоносителя и ИК-энергоподводом. Материалы LVII отчетной научной конференции преподавателей и научных сотрудников ВГУИТ за 2018 год. Воронеж; 2019: 38.
12. Tsotsas E. Modern Drying Technology. V. 5. Process Intensification / Ed. Tsotsas E., Mujumdar A.S. Weinheim: Wiley-VCH; 2014.
13. Wisniewski, R. Spray Drying Technology Review. Proc. 45th International Conference on Environmental Systems. Bellevue, Washington; 2015: 1.
14. Varghese S.K., Gangamma S. Evaporation of Water Droplets by Radiation: Effect of Absorbing Inclusions. Aerosol and Air Quality Research. 2007; 7: 95-105.
15. Муцаев Р.В., Алексанян И.Ю., Нугманов А.Х. и др. Термодинамический анализ механизма взаимодействия инулина с водой. Современная наука и инновации. 2017; 4: 79-84.
16. Исаков И.Ж., Кучеренко В.Я., Алексеев Г.В. и др. Совершенствование процесса извлечения пектина из топинамбура. Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2022; 3: 223-231.
17. Максименко Ю.А., Подледнева Н.А., Губа О.Е. Сушильная установка для получения порошков из жидких продуктов. Вестник АГТУ. 2011; 2(52): 41-44.
18. Acosta-Esquivarosa J., Jáuregui-Haza U., Amaro-González D. et al. Spray Drying of Aqueous Extract of *Mangifera indica* L (Vimang): Scale up for the Process. World Applied Sciences Journal. 2009; 6(3): 408-412.
19. Chen X.D., Mujumdar A.S. Drying Technologies in Food Processing. Oxford: Blackwell Publishers; 2008.
18. Jirayucharoensak R., Khuenpet K., Jittanit W. et al. Physical and chemical properties of powder produced from spray drying of inulin component extracted from Jerusalem artichoke tuber powder. Drying Technology. 2019; 37(10): 1215-1227.

19. Shene C., Cabezas M., Bravo S. Effect of Drying Air Temperature on Drying Kinetics Parameters and Fructan Content in Helianthus tuberosus and Cichorium intybus. *Drying Technology*. 2003; 21: 945-956.
20. Muzaffar K., Kumar P. Moisture Sorption Isotherms and Storage Study of Spray Dried Tamarind Pulp Powder. *Powder Technol.* 2016; 291: 322-327.
21. Musthafa Mohamed Essa, Muhammed Bishir, Abid Bhat et al. Freidland, Walid Qoronfleh Functional foods and their impact on health. *Journal of Food Science and Technology*. 2023; 60: 820-834.
22. Mohammed S. Ali, Rasha M. Hussein, Yasser Gaber et al. Modulation of JNK-1/ β -catenin signaling by Lactobacillus casei, inulin and their combination in 1,2-dimethylhydrazine-induced colon cancer in mice. *RSC Advances*. 2019; 50: 29368-29383.

REFERENCES:

1. Egamova M.M., Safarzoda R.Sh., Fariduni K.R. et al. Study of the chemical composition of flavonoid compounds in Jerusalem artichoke herb using HPLC – MS. *Science and innovation*. 2022; 3: 152-161.
2. Turshatov M.V., Solovyov A.O., Volkova G.S. et al. Complex processing of Jerusalem artichoke to produce functional food products. *Current biotechnology*. 2022; 1:255.
3. Byzov V.A., Puchkova T.S., Pikhalo D.M. Assessment of quality indicators of Jerusalem artichoke tubers for processing into inulin and its derivatives. *Food industry*. 2023; 4: 58-62.
4. Anakulov M.M., Rozikova M.T., Safarov M.M. et al. Adsorption properties of dried Jerusalem artichoke tubers. *Polytechnic Bulletin. Series: Intelligence. Innovation. Investments*. 2020; 2(50): 13-15.
5. Vukov K., Erdélyi M., Pichler-magyar E. Preparation of Pure Inulin and Various Inulin-Containing Products from Jerusalem Artichoke for Human Consumption and for Diagnostic Use. *Studies in Plant Science*. 1993; 3: 341-345.
6. Aleksanyan I.Yu., Petrovichev O.A., Maksimenko Yu.A. et al. Dependence of the thermophysical properties of pectin concentrates on influencing factors. *Russian pectin: history, present, prospects: conference materials*. Voronezh; 2006: 56-59.
7. Gaafar A.M., El-Din Serag M.F., Boudy A. et al. Extraction Conditions of Inulin from Jerusalem Artichoke Tubers and its Effects on Blood Glucose and Lipid Profile in Diabetic Rats. *Journal of American Science*. 2010; 6(5): 36-43.
8. Kheto A., Bist Y., Awana A., Kaur S., Kumar Y., Sehrawat R. Utilization of inulin as a functional ingredient in food: Processing, physicochemical characteristics, food applications, and future research directions. *Food Chemistry Advances*. 2023; 3.
9. Maksimenko Yu.A., Svirina S.A., Bakhareva A.A. et al. Study of the specific heat capacity of liquid and paste-like plant materials. *Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex – healthy food products*. 2022; 1: 121-128.
10. Nugmanov A.Kh.-Kh., Krasnov V.A., Maksimenko Yu.A. et al. Study of the heat capacity of pasty food products. *Natural and technical sciences*. 2015; 6(84): 512-514.
11. Zhuravlev A.V., Marukhpn A.S., Kirnosov A.V. Development of a drying chamber design with swirling coolant flows and IR energy supply: materials of the LVII reporting scientific conference of teachers and researchers of VSUIT for 2018. *Voronezh*; 2019: 38.
12. Tsotsas E. *Modern Drying Technology. V. 5. Process Intensification* / Ed. Tsotsas E., Mujumdar A.S. Weinheim: Wiley-VCH; 2014.
13. Wisniewski, R. *Spray Drying Technology Review*. Proc. 45th International Conference on Environmental Systems. Bellevue, Washington; 2015: 1.
14. Varghese S.K., Gangamma S. Evaporation of Water Droplets by Radiation: Effect of Absorbing Inclusions. *Aerosol and Air Quality Research*. 2007; 7: 95-105.
15. Mutsaev R.V., Aleksanyan I.Yu., Nugmanov A.Kh. et al. Thermodynamic analysis of the mechanism of interaction of inulin with water. *Modern science and innovation*. 2017; 4: 79-84.
16. Iskakov I.Zh., Kucherenko V.Ya., Alekseev G.V. et al. Improving the process of extracting pectin from Jerusalem artichoke. *Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex – healthy food products*. 2022; 3: 223-231.
17. Maksimenko Yu.A., Poledneva N.A., Guba O.E. Drying plant for producing powders from liquid products. *Bulletin of ASTU*. 2011; 2(52): 41-44.
18. Acosta-Esquivarosa J., Jáuregui-Haza U., Amaro-González D. et al. Spray Drying of Aqueous Extract of Mangifera indica L (Vimang): Scale up for the Process. *World Applied Sciences Journal*. 2009; 6(3): 408-412.
19. Chen X.D., Mujumdar A.S. *Drying Technologies in Food Processing*. Oxford: Blackwell Publishers; 2008.
20. Jirayucharoenrak R., Khuenpet K., Jittanit W. et al. Physical and chemical properties of powder produced from spray drying of inulin component extracted from Jerusalem artichoke tuber powder. *Drying Technology*. 2019; 37(10): 1215-1227.

21. Shene C., Cabezas M., Bravo S. Effect of Drying Air Temperature on Drying Kinetics Parameters and Fructan Content in Helianthustuberosus and Cichorium intybus. *Drying Technology*. 2003; 21: 945-956.
22. Muzaffar K., Kumar P. Moisture Sorption Isotherms and Storage Study of Spray Dried Tamarind Pulp Powder. *Powder Technol.* 2016; 291: 322-327.
23. Musthafa Mohamed Essa, Muhammed Bishir, Abid Bhat et al. Freidland, Walid Qoronfleh Functional foods and their impact on health. *Journal of Food Science and Technology*. 2023; 60: 820-834.
24. Mohammed S. Ali, Rasha M. Hussein, Yasser Gaber et al. Modulation of JNK-1/ β -catenin signaling by Lactobacillus casei, inulin and their combination in 1,2-dimethylhydrazine-induced colon cancer in mice. *RSC Advances*. 2019; 50: 29368-29383.

Информация об авторах / Information about the authors

Юрий Александрович Максименко, профессор, доктор технических наук, проректор по научной работе и инновациям, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
amxsl@yandex.ru

Ольга Ивановна Коннова, ассистент кафедры «Технология товаров и товароведение», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
okonnova88@gmail.com
тел.: +7 (905) 480 14 95

Игорь Юрьевич Алексанян, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Пищевые системы и биотехнологии», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
16081960igor@gmail.com
тел.: +7 (960) 863 26 04

Yuriy A. Maksimenko, Dr Sci. (Engineering), Professor, Vice rector for scientific work and innovations, Professor, Department of Technological Machines and Equipment, FSBEI HE «Astrakhan State Technical University»
amxsl@yandex.ru

Olga I. Konnova, Assistant, the Department of Technology of Goods and Commodity Expertise, FSBEI HE «Astrakhan State Technical University»
okonnova88@gmail.com
tel.: +7 (905) 480 14 95

Igor Yu. Aleksanyan, Dr Sci. (Engineering), Professor, the Department of Technological Machines and Equipment, Head of the research laboratory of Food systems and Biotechnologies, FSBEI HE «Astrakhan State Technical University»
16081960igor@gmail.com
tel.: +7 (960) 863 26 04

Поступила в редакцию 24.10.2023; поступила после рецензирования 27.11.2023; принята к публикации 28.11.2023

Received 24.10.2023; Revised 27.11.2023; Accepted 28.11.2023