



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664.681.15

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.020



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНОПЛЯНОЙ МУКИ НА ГИГРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА САХАРНОГО ПЕЧЕНЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ ГУГГЕНХАЙМА-АНДЕРСОНА-ДЕ БУРА

Юлия Александровна Ускова ¹, Роман Хажсетович Кандроков ²

^{1,2} Российский биотехнологический университет «РОСБИОТЕХ», Москва, Россия

¹ juluskova@yandex.ru

² nart132007@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2003-2918>

Аннотация. Статья посвящена проблемам моделирования сорбции влаги в сахарном печенье, где традиционные модели Лэнгмюра и БЭТ признаются недостаточно точными. В качестве альтернативы авторы применяют модель Гуггенхайма-Андерсона-де Бура (ГАБ). Исследование направлено на изучение влияния добавления частично обезжиренной конопляной муки на реологию и гигроскопичность печенья. Для получения данных об изотермах сорбции использовался статический гравиметрический метод. Анализ модели ГАБ показал, что добавление 4 % конопляной муки увеличивает монослойную сорбцию влаги, усиливая гигроскопичность. Продукт демонстрирует тенденцию к поглощению влаги из окружающей среды, а не к её потере, характерной для черствения. По мнению авторов, наблюдаемый эффект, вероятно, обусловлен увеличением количества полярных связывающих центров или формированием более пористой структуры изделия под воздействием конопляной муки.

Ключевые слова: сахарное печенье, конопляная мука, изотерма сорбции, модель Гуггенхайма-Андерсона-де Бура.

Для цитирования: Ускова Ю. А., Кандроков Р. Х. Исследование влияния конопляной муки на гигроскопические свойства сахарного печенья с применением модели Гуггенхайма-Андерсона-де Бура // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 132–136. doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2025.02.020. EDN: <https://elibrary.ru/MFHXJO>.

Original article

HYGROSCOPIC PROPERTIES OF SUGAR COOKIES WITH HEMP FLOUR: APPLICATION OF GUGGENHEIM-ANDERSON-DE BOER MODEL

Yulia A. Uskova ¹, Roman Kh. Kandrov ²

^{1,2} Russian Biotechnological University (ROSBIO-TECH), Moscow, Russia

¹ juluskova@yandex.ru

² nart132007@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2003-2918>

Abstract. The article focuses on the challenges of modelling moisture sorption in sugar cookies, where traditional Langmuir and BET models are acknowledged to be insufficiently accurate. Alternatively, the authors employ the Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) model. The study investigates the effect of adding partially defatted hemp flour on the rheology and hygroscopicity of the cookies. A static gravimetric method was used to get sorption isotherm data. The GAB model revealed that the addition of 4 % hemp flour increases monolayer moisture sorption, which enhances hygroscopicity. The product tends to absorb moisture from the environment instead of losing it. Adding hemp flour to the product may result in an increase in the number of polar binding sites or the formation of a more porous structure in the product, according to the authors.

Keywords: sugar cookies, hemp flour, sorption isotherm, Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) model.

For citation: Uskova, Y.A., Kandrov, R.Kh. (2025). Hygroscopic properties of sugar cookies with hemp flour: application of the Guggenheim-Anderson-de Boer model. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 132-136. (In Russ). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.020. EDN: <https://elibrary.ru/MFHXJO>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНОПЛЯНОЙ МУКИ НА ГИГРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА САХАРНОГО ПЕЧЕНЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ ГУГГЕНХАЙМА-АНДЕРСОНА-ДЕ БУРА

ВВЕДЕНИЕ

Необходимый шаг к улучшению рациона населения и борьбе с микронутриентной недостаточностью – совершенствование рецептур распространенных продуктов питания. Высокая потребляемость мучных кондитерских изделий, таких как сахарное печенье, делает их модификацию особенно актуальной задачей. В связи с этим, многие исследования сейчас фокусируются на поисках различных способов обогащения этой продукции без ухудшения её вкусовых качеств и потребительских свойств [1].

Пищевые продукты – это сложные системы, состоящие из воды, углеводов, белков, жиров и минеральных веществ. Их структура многоуровневая: от взаимодействия отдельных молекул (влияющего на растворимость, вязкость и гелеобразование) до макроскопического уровня, определяющего форму, текстуру и внешний вид. Промежуточные уровни – надмолекулярный (например, образование белковых агрегатов и крахмальных гранул) и микроскопический (структура тканей) – также существенно влияют на свойства продукта [2, 3].

Понимание этой многоуровневой организации крайне важно для обеспечения стабильности и сохранности продуктов. Изменения на любом из уровней могут привести к порче. Чаще всего это связано с изменением влажности (убыль, прирост, перераспределение). Перемещение влаги, обусловленное разностью химических потенциалов, нарушает баланс пищевой системы. Активность воды (a_w) – показатель термодинамического потенциала воды, то есть доли свободной воды, участвующей в химических реакциях в качестве растворителя и реагента [4].

Содержание влаги (определяемое, например, методом Карла Фишера) и активность воды связаны, но эта зависимость сложна и специфична для каждого продукта. Как правило, повышение активности воды ведет к увеличению содержания влаги, но эта зависимость нелинейна. Зависимость равновесного содержания влаги от активности воды при постоянной температуре описывают сорбционные изотермы. Сорбционные изотермы помогают оптимизировать обработку пищевых продуктов (сушку, смешивание, упаковку, концентрирование, дегидратацию) и прогнозировать их срок хранения [5, 6].

Форма изотермы зависит от характеристик продукта. Существует три основных типа изотерм сорбции (рис. 1). Наиболее распространенный – сигмовидный (тип II), типичный для продуктов со средним содержанием влаги. В таких материалах адсорбция не ограничивается образованием одного монослоя; она начинается при относительно низком давлении пара и продолжается с образованием нескольких слоев молекул. К сигмоидальным изотермам (тип II) относятся, например, кривые сорбции-десорбции водяного пара крахмалом. В этом случае вода образует многослойные структуры на поверхности, удерживаясь водородными связями. Хотя точный механизм влияния многослойной адсорбции на свойства гидроколлоидов неясен, известно, что тип II связан с полимолекулярной адсорбцией, бесконечно увеличивающейся по мере приближения к давлению насыщенного пара (как у непористых материалов [7]).

Существует более ста уравнений, описывающих сорбцию паров воды и других низкомолекулярных жидкостей различными материалами. Выбор подходящей математической модели зависит от специфики исследуемого материала и условий сорбции. Наибо-

лее известные и часто применяемые модели – это модель Лэнгмюра и модель Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ). Однако эти модели имеют свои ограничения. Модель Лэнгмюра, например, предполагает образование только мономолекулярного слоя адсорбата, что не всегда соответствует действительности, особенно для пищевых продуктов с пористой структурой или высоким содержанием влаги. Модель БЭТ, хотя и учитывает многослойную адсорбцию, часто требует сложных расчетов и не всегда обеспечивает высокую точность предсказаний для сложных пищевых систем [8].

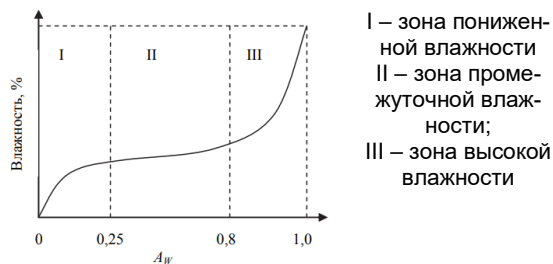


Рисунок 1 – Общий вид изотермы сорбции воды в пищевом продукте

Figure 1 – General representation of the water sorption isotherm in a food product

Модель Гуггенхайма-Андерсона-де Бура представляет собой усовершенствованный подход, особенно эффективный при описании многослойной адсорбции, часто встречающейся в пищевых продуктах. В отличие от модели БЭТ модель ГАБ более проста в применении и дает более точные результаты для определённого диапазона условий. Её преимущество заключается в способности учитывать накопление влаги не только на поверхности материала, но и внутри его пористой структуры. Это особенно важно для таких продуктов, как печенье, где повышенное содержание влаги в упаковке может привести к размягчению продукта, образованию плесени и, как следствие, уменьшению срока годности. Точное описание сорбционных изотерм с помощью модели ГАБ позволяет оптимизировать условия хранения и упаковки печенья и других подобных продуктов, минимизируя риски порчи и продлевая срок их хранения [9, 10, 11].

Целью исследования является сравнительный анализ гигроскопических свойств сахарного печенья из пшеничной муки и печенья с добавлением конопляной муки, описываемых моделью Гуггенхайма-Андерсона-де Бур (ГАБ).

МЕТОДЫ

Кондитерские изделия готовились по унифицированной рецептуре «Юбилейное». Для обеспечения оптимального формирования теста в лабораторных условиях его влажность была установлена на уровне $16,5 \pm 0,5$ %. Выпечка изделий проводилась при температуре 185°C в течение 10,5 минут. Образцы охлаждали до комнатной температуры и упаковывали в герметичные пакеты из полипропиленовой пленки 40 мкм толщиной. Хранение осуществлялось при температуре в лаборатории $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. На рисунке 2 показаны образцы сахарного печенья, где визуально видно, как меняется продукт при увеличении количества добавляемой конопляной муки.

Предыдущее исследование показало, что добавление конопляной муки в тесто для сахарного

печенья оказывает комплексное влияние на его реологические свойства. Оптимальным количеством для производства сахарного печенья является введение 4 % обезжиренной муки конопляной взамен муки пшеничной.



Рисунок 2 – Сахарное печенье с разными дозировками частично обезжиренной конопляной муки

Figure 2 – Sugar cookies containing different amounts of partially defatted hemp flour

Изотермы адсорбции и десорбции для образцов сахарного печенья с 0 % и 4 % конопляной муки были построены с использованием гравиметрического метода. Навески весом в 1 грамм помещали в эксикаторы, содержащие насыщенные растворы солей, которые применяются в качестве эталонов активности воды с известными и постоянными уровнями активности воды. Когда разница между весом образца составляла менее 1 мг/г твердых веществ в течение двух недель подряд, считалось, что образец достиг равновесия [12].

Для периодической проверки значений активности воды рабочих растворов использовался прибор Novasina Lab Master-Aw (Novasina, Швейцария). Содержание воды в образцах в равновесном состоянии определяли с помощью влагомера MA 50/1.X2.A (Radwag, Польша) и пересчитывали на сухое вещество.

Для описания сорбционных изотерм была применена модель Гуггенгейма-Андерсона-де Бура (ГАБ) [12]:

$$M = \frac{m_0 c_1 c_2 a_w}{(1 - c_2 a_w)(1 - c_2 a_w + c_1 c_2 a_w)} \quad (1),$$

где M – равновесное содержание влаги (PCB, грамм воды на грамм сухого вещества);

m_0 – содержание влаги в мономолекулярном слое на поверхности материала, г/г;

c_1 – константа, связанная со свойствами монослойной влаги;

c_2 – константа, связанная со свойствами полислойной влаги;

a_w – активность воды.

Уравнение ГАБ было преобразовано в квадратное уравнение для вычисления констант c_1 и c_2 :

$$\frac{a_w}{M} = b_1 + b_2 a_w + b_3 a_w^2 \quad (2),$$

где эквиваленты выражены как: $b_1 = 1/m_0 c_1 c_2$; $b_2 = (1 - 2/c_1)/m_0$; $b_3 = (c_2/m_0)/(1/c_1 - 1)$.

Для поиска параметров этого квадратного уравнения используется метод линейной регрессии, который определяет параметры прямой линии, аппроксимирующей экспериментальные данные, на основе которых можно найти корни уравнения.

Температурная зависимость констант ГАБ была оценена с использованием следующих уравнений типа Аррениуса:

$$m_0(T) = m'_0 \cdot \exp(\Delta H'/RT) \quad (3)$$

$$c_1(T) = c'_1 \cdot \exp[(H_1 - H_m)/RT] \quad (4)$$

$$c_2(T) = c'_2 \cdot \exp[(H_L - H_m)/RT] \quad (5)$$

где m'_0 , c'_1 , c'_2 – предэкспоненциальные множители; $\Delta H'$ – энергетический фактор Аррениуса (кДж/моль);

H_1 – теплота сорбции первого слоя (кДж/моль);

H_m – теплота сорбции полислюя (кДж/моль);

H_L – теплота конденсации чистого водяного пара (кДж/моль).

Статистическую обработку данных проводили с использованием компьютерной программы Microsoft Excel 365 MSO (Version 2408). Число параллельных опытов в каждой точке $n = 3$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

«Изотерма сорбции» в данном исследовании представляет собой комбинацию двух процессов: десорбции, когда образец отдает воду, и адсорбции, когда образец поглощает воду. Какой из процессов будет преобладать, зависит от того, как активность воды в окружающей среде (созданной насыщенными солевыми растворами) соотносится с начальной активностью воды образца. На графиках (рис. 3, 4) представлены изотермы сорбции влаги для двух видов сахарного печенья: контрольного (из 100 % пшеничной муки) и с добавлением 4 % конопляной муки. Измерения проводились при 20 °C и 30 °C.

Для построения графиков использовали пять различных солей определенной концентрации: ацетат калия (CH_3COOK), карбонат калия (K_2CO_3), нитрат магния ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$), хлорид натрия (NaCl) и хлорид калия (KCl). Эти соли, имеющие различную способность связывать воду, позволяли получить широкий диапазон активности воды. Порядок увеличения PCB при разных a_w для каждой соли постоянен, что свидетельствует о постоянной сорбционной способности материалов в данном диапазоне активности воды.

Анализ полученных данных сорбции влаги в образцах сахарного печенья выявил четкую и повторяющуюся закономерность. Наблюдается прямо пропорциональная зависимость между активностью воды (a_w) и равновесным содержанием влаги (PCB): с увеличением a_w , PCB в образцах печенья, как контрольных, так и с добавлением конопляной муки, стабильно возрастает. Эта закономерность является типичной для гигроскопичных материалов, поскольку более высокая a_w указывает на большую доступность влаги в окружающей среде, что способствует ее поглощению материалом до достижения состояния равновесия.

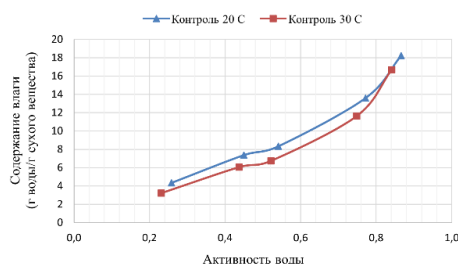


Рисунок 3 – Изотерма сорбции для продукта из 100 % муки пшеничной

Figure 3 – Sorption isotherm for 100 % wheat flour product

В то же время установлено, что температура оказывает обратное воздействие на PCB. При фиксированном значении a_w , равновесное содержание влаги в образцах снижается с повышением температуры от 20 °C до 30 °C. Этот эффект обусловлен увеличением кинетической энергии молекул воды при повышении температуры. При более высокой кинетической энергии молекулам воды становится труднее удерживаться на поверхности материала, а также внутри него посредством процессов адсорбции и абсорбции. В

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНОПЛЯНОЙ МУКИ НА ГИГРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА САХАРНОГО ПЕЧЕНЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ ГУГЕНХАЙМА-АНДЕРСОНА-ДЕ БУРА

результате материал способен сорбировать меньше влаги до достижения равновесного состояния.

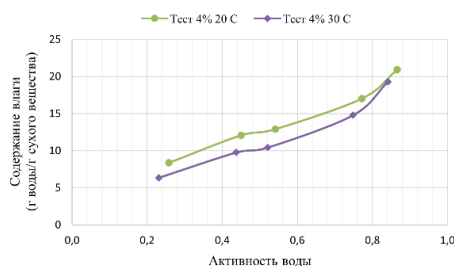


Рисунок 4 – Изотерма сорбции для продукта с добавлением 4 % муки конопляной

Figure 4 – Sorption isotherm for a product with the addition of 4 % hemp flour

Сравнительный анализ сорбционных свойств контрольного образца сахарного печенья (100 % пшеничной муки) и образца с добавлением 4 % конопляной муки показал, что последний, как правило, демонстрирует более высокое равновесное содержание влаги при всех исследованных значениях активности воды и обеих температурах (20 °C и 30 °C). Это позволяет предположить, что добавление конопляной муки увеличивает гигроскопичность сахарного печенья по сравнению с контрольным образцом, делая его более склонным к поглощению влаги из окружающей среды. Различия в значениях РСВ, полученные для разных образцов, могут быть обусловлены влиянием конопляной муки на структуру, пористость и химический состав печенья и потенциально – на взаимодействие с молекулами воды.

Таблица 1 – Параметры модели ГАБ, полученные для изотерм сорбции отдельных продуктов

Table 1 – GAB model parameters derived from the sorption isotherms for each product

Образец	Температура, °C	m_0 , кг/кг	c_1	c_2
Контроль из 100 % муки пшеничной	20	0,007	6,196	0,589
	30	0,005	5,798	0,632
Тестовый образец с добавлением 4 % частично обезжиренной конопляной муки	20	0,010	15,551	0,556
	30	0,007	15,553	0,662

Таблица 2 – Температурная зависимость параметров ГАБ

Table 2 – Influence of temperature on GAB parameters

Образец	$m_0(T)$		$c_1(T)$		$c_2(T)$	
	m'_0 (кг/кг)	$\Delta H'$ (кДж/моль)	c'_1	$H_1 - H_m$ (кДж/моль)	c'_2	$H_L - H_m$ (кДж/моль)
Контроль из 100 % муки пшеничной	$5,08 \cdot 10^{-6}$	17,56	0,82	4,9	5,09	- 5,25
Тестовый образец с добавлением 4 % частично обезжиренной конопляной муки	$7,56 \cdot 10^{-7}$	23,11	15,6	- 0,01	112,01	- 12,92

Как видно из таблицы 2, контрольный образец сахарного печенья имеет положительную энтальпию сорбции (17.56 кДж/моль), что указывает на то, что сорбция влаги в монослой – это эндотермический процесс, требующий затрат энергии. У образца с добавлением конопляной муки $\Delta H'$ (23.11 кДж/моль) немного выше, чем у контрольного образца, что может свидетельствовать о том, что добавление конопляной муки немного увеличивает количество активных центров связывания. Отрицательное значение разницы энтальпий указывает на более сложное взаимодействие с водой в первом слое.

Следовательно, добавление 4 % частично обезжиренной конопляной муки меняет сорбционные свойства продукта. Можно предположить, что конопляная мука меняет природу активных центров и уменьшает общее количество воды, которое может быть сорбировано.

Параметры модели ГАБ, полученные для изотерм сорбции сахарного печенья из контрольной 100 % муки пшеничной и с добавлением 4 % частично обезжиренной конопляной муки в пшеничную муку, представлены в таблице 1.

Анализ параметров модели ГАБ показал, что с повышением температуры с 20 °C до 30 °C величина m_0 (массовая доля влаги в монослой) снижается, что свидетельствует об уменьшении количества воды, необходимого для формирования мономолекулярного слоя на поверхности печенья. При этом добавление конопляной муки увеличивает значение m_0 при обеих температурах, что указывает на усиление гигроскопичности печенья, возможно, из-за увеличения доступности полярных связывающих центров или более пористой структуры, обеспечивающей большую площадь поверхности для связывания воды.

Значение c_1 (сила взаимодействия вода–поверхность) для контрольного образца уменьшается с повышением температуры. При более высокой температуре вода хуже притягивается к поверхности материала. Для тестового образца значение c_1 значительно выше и остается практически постоянным с увеличением температуры. На основании этих результатов выдвигается гипотеза о том, что введение конопляной муки в рецептуру мучных кондитерских изделий способно замедлить темпы черствения.

Температурная зависимость констант ГАБ представлена в таблице 2. Можно отметить, что образец с добавлением конопляной муки имеет более низкую гипотетическую монослойную сорбцию, так как параметр m'_0 на порядок меньше контрольного образца.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты показывают, что добавление конопляной муки влияет не только на реологические свойства теста для печенья, но и на его сорбционные характеристики, которые тесно связаны с содержанием влаги в готовом продукте. Повышенная плотность теста, вызванная добавлением конопляной муки, может изменить структуру пористости, что, в свою очередь, повлияет на доступность поверхности для адсорбции воды и, следовательно, на параметры модели ГАБ. Реологические изменения, вызванные добавлением конопляной муки, необходимо учитывать при оптимизации технологического процесса и прогнозировании срока хранения готового продукта.

Дальнейшие исследования, включающие применение

ние модели ГАБ к сахарному печенью с разным содержанием конопляной муки, помогут установить количественную зависимость между реологическими свойствами теста и параметрами сорбции. В частности, изучение влияния дисперсности конопляной муки на влагоудерживающую способность может пролить свет на механизмы взаимодействия компонентов теста и соответственно, прогнозирование срока годности готового печенья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мистенева С.Ю., Солдатова Е.А., Савенкова Т.В. Разработка мучных кондитерских изделий с использованием нерафинированного растительного сырья // Пищевая промышленность. 2019. № 8. С. 66–71. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10129.
2. Базарнова Ю.Г. Теоретические основы методов исследования пищевых продуктов : учеб. пособие. СПб. : НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. 136 с.
3. Васильева Н.Г. Основы химии полимеров : учеб. пособие. Минск : БГПУ, 2018. 169 с.
4. Срок годности пищевых продуктов: расчет и испытание / Под ред. Р. Стеле; пер. с англ. В. Широкова под общ. ред. Ю.Г. Базарновой. СПб. : Профессия, 2006. 480 с.
5. Цуканов М.Ф., Черноморец А.Б. Технологические аспекты показателя «Активность воды» и его роль в обеспечении качества продукции общественного питания // ТТПС. 2010. №11. С. 58–63.
6. Bashir O., Hussain S.Z., Ameer K., Amin T., Beenish Ahmed, I.A.M., Aljobair M.O., Gani G., Mir S.A., Ayaz Q. & Nazir N. (2023). Influence of Anticaking Agents and Storage Conditions on Quality Characteristics of Spray Dried Apricot Powder: Shelf Life Prediction Studies Using Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) Model. *Foods*, 12(1), 171. doi: 10.3390/foods12010171.
7. Подорожная И.В., Ветохин С.С., Орси́к М.В. Изотермы сорбции молочных композиций // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2015. № 4 (177). С. 256–261.
8. Адамова Л.В., Сафронов А.П. Сорбционный метод исследования пористой структуры наноматериалов и удельной поверхности наноразмерных систем : учеб. пособие. Екатеринбург : УрГу, 2008. 62 с.
9. Kim S.S., Kim S.Y., Kim D.W., Shin S.G. & Chang K.S. (1999). Moisture Sorption Characteristics of Composite Foods Filled with Chocolate. *Journal of Food Science*, 64(2), 300–302. doi:10.1111/j.1365-2621.1999.tb15887.x.
10. Nayab A.K., Valík L., Acai P. (2024). Sorption isotherm modelling of dried tomatoes. *Czech. J. of Food Science*, 42, 21–30. doi: 10.17221/109/2023-CJFS.
11. Ускова Ю.А., Кандроков Р.Х. Применение метода симплексных решеток при моделировании рецептуры имбирного печенья // Вестник КрасГАУ. 2023. № 6 (195). doi: 10.36718/1819-4036-2023-6-193-202.
12. Resnik S.L., Favetto G., Chifre J. & Fontan C.F. (1984). A World Survey of Water Activity of Selected Saturated Salt Solutions used as Standards at 25 °C. *Journal of Food Science*, 49(2), 510–513. doi:10.1111/j.1365-2621.1984.tb12454.x.

Информация об авторах

Ю.А. Ускова – аспирант кафедры «Зерна, хлебопекарных и кондитерских технологий» ФГБОУ ВО
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 23 августа 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 23 Aug 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

«РОСБИОТЕХ».

Р.Х. Кандроков – к.т.н., доцент кафедры «Зерна, хлебопекарных и кондитерских технологий» ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ».

REFERENCES

1. Misteneva, S.Yu., Soldatova, E.A. & Savenkova, T.V. (2019). Development of flour confectionery products using unrefined plant raw materials. *Food Industry*, 8, 66-71. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10129.
2. Bazarnova, Yu.G. (2014). *Theoretical foundations of methods for food research: Textbook*. St. Petersburg: NRU ITMO; IHiBT. 136 p.
3. Vasilieva, N.G. (2018). *Fundamentals of polymer chemistry: Textbook*. Minsk: BSPU. 169 p.
4. Stehle, R. (Ed.). (2006). *Shelf life of food: Calculation and testing* (V. Shirokov, Trans.; Yu.G. Bazarnova, Gen. Ed.). St. Petersburg: Professiya. 480 p.
5. Tsukanov, M.F. & Chernomorets, A.B. (2010). Technological aspects of the "Water Activity" indicator and its role in ensuring the quality of public catering products. *TTPS*, 11, 58-63.
6. Bashir, O., Hussain, S.Z., Ameer, K., Amin, T., Beenish, Ahmed, I.A.M., Aljobair, M.O., Gani, G., Mir, S.A., Ayaz, Q. & Nazir, N. (2023). Influence of Anticaking Agents and Storage Conditions on Quality Characteristics of Spray Dried Apricot Powder: Shelf Life Prediction Studies Using Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) Model. *Foods*, 12(1), 171. doi: 10.3390/foods12010171.
7. Podorozhnaya, I.V., Vetokhin, S.S. & Orsik, M.V. (2015). Sorption isotherms of milk compositions. *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical Technologies, Biotechnology, Geoecology*, 4 (177), 256-261.
8. Adamova, L.V. & Safronov, A.P. (2008). Sorption method for studying the porous structure of nanomaterials and the specific surface area of nanosized systems: Textbook. Yekaterinburg: UrGU. 62 p.
9. Kim, S.S., Kim, S.Y., Kim, D.W., Shin, S.G. & Chang, K.S. (1999). Moisture Sorption Characteristics of Composite Foods Filled with Chocolate. *Journal of Food Science*, 64(2), 300-302. doi: 10.1111/j.1365-2621.1999.tb15887.x.
10. Nayab, A.K., Valík, L., Acai, P. (2024). Sorption isotherm modelling of dried tomatoes. *Czech. J. of Food Science*, 42, 21-30. doi: 10.17221/109/2023-CJFS.
11. Uskova, Yu.A. & Kandrov, R.Kh. (2023). Application of the simplex lattice design in modeling the formulation of ginger cookies. *The Bulletin of KrasGAU*, 6 (195). doi: 10.36718/1819-4036-2023-6-193-202.
12. Resnik, S.L., Favetto, G., Chifre, J. & Fontan, C.F. (1984). A World Survey of Water Activity of Selected Saturated Salt Solutions used as Standards at 25 °C. *Journal of Food Science*, 49(2), 510-513. doi:10.1111/j.1365-2621.1984.tb12454.x.

Information about the authors

Yu.A. Uskova - Postgraduate student at the Department of Grain, Baking and Confectionery Technologies, Russian Biotechnological University (ROSBIO-TECH).

R.Kh. Kandrov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Grain, Baking and Confectionery Technologies, Russian Biotechnological University (ROSBIO-TECH).