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

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2518
https://elibrary.ru/QHPVCO

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Применение методики среднеинтегральной оценки водоудерживающей способности сахаросодержащих продуктов в кондитерском производстве

В. М. Арапов[1], И. В. Плотникова[1,*], Д. А. Казарцев[2], К. К. Полянский[3], Г. О. Магомедов[1], М. В. Копылов[1], В. Е. Плотников[1]

[1] *Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия*

[2] *Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), Москва, Россия*

[3] *Воронежский филиал Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова, Воронеж, Россия*

Поступила в редакцию: 09.01.2024
Принята после рецензирования: 16.04.2024
Принята к публикации: 07.05.2024

**И. В. Плотникова: plotnikova_2506@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5959-6652*
В. М. Арапов: https://orcid.org/0009-0007-9611-5142
Д. А. Казарцев: https://orcid.org/0000-0001-6597-2327
К. К. Полянский: https://orcid.org/0000-0002-8817-1466
Г. О. Магомедов: https://orcid.org/0000-0002-7201-8387
М. В. Копылов: https://orcid.org/0000-0003-2678-2613
В. Е. Плотников: https://orcid.org/0000-0001-6707-8337

© В. М. Арапов, И. В. Плотникова, Д. А. Казарцев, К. К. Полянский, Г. О. Магомедов, М. В. Копылов, В. Е. Плотников, 2024

Аннотация.
При разработке пищевых продуктов, в том числе и кондитерских изделий, является важным сохранение их свежести в течение всего срока годности. Поэтому изучение влагосвязывающей способности продуктов является актуальным направлением. Цель работы – исследование среднеинтегральной влагосвязывающей способности сахаросодержащих продуктов для дальнейшего их использования в рецептуре кондитерских изделий.
Объекты исследования – высококонцентрированные сиропы (сахарный, сахаро-паточный, глюкозный, фруктозный, глюкозно-фруктозный, изомальтный) с влажностью 17,2–19,8 % и сахаристые гидролизаты крахмала (патока крахмальная различных видов и глюкозно-фруктозный сироп) с влажностью 17,0–22,4 %. Для оценки влагосвязывающей способности веществ применяли методику, разработанную проф. В. М. Араповым.
Результаты определения среднеинтегральной прочности связи влаги в продуктах показали, что чем выше общий относительный эквивалент свободной воды – $\omega_{об}(U_1, U_2)$, тем выше влагосвязывающая способность продукта. Чем ниже величина показателя $\omega_{об}(U_1, U_2)$, тем выше показатель активности воды – A_w. В сахарном сиропе (A_w = 0,830, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 13), сахаро-паточном сиропе (A_w = 0,701, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 14,5), патоке низкоосахаренной (A_w = 0,745, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 16,5), патоке карамельной кислотной (A_w = 0,727, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 27,5), изомальтном сиропе (A_w = 0,623, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 44,5), патоке высокоосахаренной (A_w = 0,680, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 46), глюкозном сиропе (A_w = 0,548, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 48,5), глюкозно-фруктозном сиропе (A_w = 0,583, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 53), фруктозном сиропе (A_w = 0,499, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 61,5). Значения показателя $\omega_{об}(U_1, U_2)$ фруктозного сиропа в 4,7…1,2 раза выше, чем в остальных продуктах.
Методика, предложенная проф. В. М. Араповым, позволяет не только качественно, но и количественно оценить состояние влаги в пищевом продукте. Для предотвращения процесса намокания кондитерских изделий лучше использовать сахарный и/или сахаро-паточный сироп, и/или низкоосахаренную патоку с низким значением показателя $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 16,5…13. Для продления свежести изделий в рецептуру можно добавлять фруктозный и/или глюкозно-фруктозный, и/или глюкозный сироп, и/или патоку высокоосахаренную с высоким значением показателя $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 61,5…46. Предлагаемый метод может быть использован на предприятиях пищевой промышленности.

Ключевые слова. Кондитерское производство, сахара, патока крахмальная, влагосвязывающая способность, активность воды

Для цитирования: Применение методики среднеинтегральной оценки водоудерживающей способности сахаросодержащих продуктов в кондитерском производстве / В. М. Арапов [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 3. С. 436–451. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2518

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2518
https://elibrary.ru/QHPVCO

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

Average Integral Assessment of Water Binding Capacity in Sugar-Containing Confectionery Products

Vladimir M. Arapov[1], Inessa V. Plotnikova[1,*], Dmitry A. Kazartsev[2], Konstantin K. Polansky[3], Gazibeg O. Magomedov[1], Maxim V. Kopylov[1], Viktor E. Plotnikov[1]

[1] *Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia*

[2] *K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University), Moscow, Russia*

[3] *Plekhanov Russian University of Economics, Voronezh Branch, Voronezh, Russia*

Received: 09.01.2024
Revised: 16.04.2024
Accepted: 07.05.2024

**Inessa V. Plotnikova: plotnikova_2506@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5959-6652*
Vladimir M. Arapov: https://orcid.org/0009-0007-9611-5142
Dmitry A. Kazartsev: https://orcid.org/0000-0001-6597-2327
Konstantin K. Polansky: https://orcid.org/0000-0002-8817-1466
Gazibeg O. Magomedov: https://orcid.org/0000-0002-7201-8387
Maxim V. Kopylov: https://orcid.org/0000-0003-2678-2613
Viktor E. Plotnikov: https://orcid.org/0000-0001-6707-8337

© V.M. Arapov, I.V. Plotnikova, D.A. Kazartsev, K.K. Polansky, G.O. Magomedov, M.V. Kopylov, V.E. Plotnikov, 2024

Abstract.
Confectionary products must retain their freshness during the entire shelf-life period, and this quality should be considered at the stage of formulation design. As a result, moisture binding capacity of food products is an important research area. This research featured the average integral moisture binding capacity of sugar-containing materials to be used in confectionery products.
The research featured two groups of products. The first included thick syrups of sugar, molasse, glucose, fructose, glucose+fructose, and isomalt with a moisture content of 17.2–19.8%. The second included starch hydrolysates, i.e., various starch molasses and glucose+fructose syrup with a humidity of 17.0–22.4%. To assess the water binding capacity, the authors appealed to the method developed by Prof. V.M. Arapov.
A higher total relative equivalent of free water $\omega_{total}(U_1, U_2)$ increased the water retention capacity. A lower value of $\omega_{total}(U_1, U_2)$ correlated with a higher water activity A_w. In sugar syrup, A_w was 0.830 a $\omega_{total}(U_1, U_2) = 13$; in sugar+molasse syrup, A_w was 0.701 at $\omega_{total}(U_1, U_2) = 14.5$; in low-sugar molasse, A_w was 0.745 at $\omega_{total}(U_1, U_2) = 16.5$; in caramel acid molasse, A_w equaled 0.727 at $\omega_{total}(U_1, U_2) = 27.5$; in isomalt syrup, A_w was 0.623 at $(U_1, U_2) = 44.5$; in high-sugar molasse, A_w was 0.680 at $\omega_{total}(U_1, U_2) = 46$; in glucose syrup, A_w reached 0.548 at $\omega_{total}(U_1, U_2) = 48.5$; in glucose+fructose syrup, A_w was 0.583 at $\omega_{total}(U_1, U_2) = 53$; in fructose syrup, A_w was 0.499 at $\omega_{total}(U_1, U_2) = 61.5$. The values of $\omega_{total}(U_1, U_2)$ of fructose syrup were 4.7...1.2 times higher than in other products.
Prof. V.M. Arapov's method rendered both qualitative and quantitative analysis of moisture in a food product. Sugar, sugar+molasse, and low-sugar molasse syrups with $\omega_{total}(U_1, U_2)$ as low as 16.5…13 had the best results in protecting confectionery products from water absorption. Fructose, glucose+fructose, glucose, and high-sugar molasse syrups with the value of $\omega_{total}(U_1, U_2)$ as high as 61.5…46 could prolong the shelf-life of the finished product. The method demonstrated a good industrial and commercial potential.

Keywords. Sugar, starch molasse, moisture binding capacity, water activity, confectionery production

For citation: Arapov VM, Plotnikova IV, Kazartsev DA, Polyanskiy KK, Magomedov GO, Kopylov MV, *et. al.* Average Integral Assessment of Water Binding Capacity in Sugar-Containing Confectionery Products. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(3):436–451. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2518

Введение

Одной из главных задач при разработке нового ассортимента кондитерских изделий является сохранение их свежести и минимизация изменения влаги в течение всего срока годности, что во многом зависит от прочности связи влаги в продукте.

В настоящее время широко используются новые сахаросодержащие продукты с различными свойствами и химическим составом. Для производителей немаловажным является информация о прогнозировании изменения качества продукта с использованием тех или иных ингредиентов различного состава [1]. Данные

изменения в большей степени, как правило, связаны с протеканием массообменных процессов (сорбции и десорбции влаги), что приводит к модификации органолептических, структурно-механических и микробиологических показателей и играет доминирующую роль при установлении гарантийного срока годности изделий [2]. При хранении одних кондитерских изделий сорбция может играть отрицательную роль, при хранении других – положительную, то же самое относится и к десорбции влаги. Так, например, при внесении в рецептуру кондитерских изделий аморфной структуры (карамели, козинаков, халвы, литого ириса и др.) сахаросодержащих продуктов с повышенным содержанием редуцирующих сахаров (фруктозы, глюкозы, мальтозы, лактозы и др.), а также продуктов их распада и реверсии (ангидридов, гуминовых веществ, оксиметилфурфурола и др.), которые образуются при длительном тепловом воздействии, повышаются гигроскопичные свойства изделий, при этом на их поверхности адсорбируется влага, что приводит к намоканию и липкости корпуса к заверточным или упаковочным материалам [3–5]. Внесение этих же сахаросодержащих продуктов в рецептуру других кондитерских изделий (помадных, молочных, желейных, ликерных конфет, мармелада, зефира, ириса тираженного, щербета, нуги, жидких начинок, пряничных изделий, кексов и др.), которые при хранении высыхают из-за потери влаги в процессе кристаллизации сахарозы или ретроградации крахмала, способствует продлению их свежести и сохранению потребительских свойств в течение всего срока годности. Следовательно, качество и влагоудерживающая способность пищевых веществ кондитерских изделий во многом зависят от химического состава и количества вносимых сахаросодержащих продуктов.

Во многих рецептурах сахаристых кондитерских изделий основную долю составляют сахар белый, количество которого варьируется от 20 до 75 %, и патока крахмальная – от 10 до 60 %, которая используется как антикристаллизатор. На сегодняшний день активно внедряются и используются вместо сахара белого, как кристаллические сахара в чистом виде (фруктоза, глюкоза, мальтоза, лактоза, лактулоза и др.), так и подсластители (изомальтит, мальтит, лактит, сорбит, ксилит, эритрит, маннит, трегалоза, тагатоза, и др.). В качестве антикристаллизаторов широко применяют сахаристые гидролизаты крахмала (патоку крахмальную и/или высококонцентрированные сахаросодержащие сиропы – глюкозно-фруктозный, глюкозный, фруктозный и др.), а также сиропы различной концентрации из растительного сырья. В состав некоторых сахаристых гидролизатов крахмала и сиропов помимо моно- и дисахаридов, содержатся высокомолекулярные полисахариды (декстрины, амилопектины, инулы и олигосахариды и др.), которые повышают пищевую ценность продуктов и из-за различной степени связывания влаги могут по-разному влиять на изменение прочности связи влаги в готовых изделиях [6].

Изучение влагосвязывающей способности используемых и новых сахаров, подсластителей и антикристаллизаторов различных видов является актуальным и востребованным направлением дальнейшего развития кондитерского производства, что позволит оценить и спрогнозировать изменение качества того или иного изделия, а следовательно, сделать правильный выбор при их использовании.

В действующих ГОСТах и ТУ на кондитерские изделия содержание влаги оценивают по показателю «массовая доля влаги (W, %)». Долю свободной влаги, под которой понимают отношение количества влаги в продукте к общей массе продукта, оценивают по показателю «активность воды (A_w)» [7, 8]. Показатель A_w является основным критерием, характеризующим состояние воды в пищевых продуктах, он широко применяется во всем мире как для прогнозирования технологических свойств пищевых продуктов, так и является мощным инструментом для регулирования их качества и сроков хранения. Данный показатель включен в систему стандартов ISO 9000, его контролируют при анализе рисков по критическим контрольным точкам, предусматривающих системой ХАССП. В странах Евросоюза и США при экспертизе ряда продуктов определение показателя A_w является обязательным [9]. При совместном контроле показателей W и A_w в продуктах можно прогнозировать интенсивность протекания различных физико-химических, биохимических и микробиологических процессов при производстве и хранении изделий, что позволяет улучшить качество продукции и определить оптимальные сроки ее хранения.

Из литературных источников известно, что значение показателя A_w для сахаристых кондитерских изделий в большей степени зависит от влажности, количества и химического состава используемого рецептурного сырья, в том числе сахара и сахаросодержащих продуктов, а также от влажности готового продукта, что предопределяет физико-химические, структурно-механические свойства и влагоперенос при его хранении [10, 11].

Для сохранения свежести изделий и снижения показателя A_w используют различные влагоудерживающие сахароподобные или сахаросодержащие ингредиенты, например, глицерин, пропиленгликоль, полидекстрозу, инвертный сахар, сорбит, мальтит, мальтодекстрин, полисахариды и др. [12]. Моносахариды обладают высокой способностью связывать влагу и снижать показатель A_w, дисахариды и полисахариды оказывают меньшее влияние. Способность снижения показателя A_w некоторыми сахаридами и сахароподобными продуктами можно изобразить схематично (по нарастающей) [13]:

Амилопектин → Мальтогексоза → Мальтотриоза → Сорбит → Сахароза → Мальтоза → Лактулоза → Глюкоза → Фруктоза → Ксилоза → Глицерин

Для объективной оценки состояния влаги и прогнозирования её изменения со временем наиболее важной является информация о прочности связи влаги с пищевыми веществами в продукте [14]. Изучение форм связи влаги, разработка точных и ускоренных методов определения физического состояния и свойств воды в пищевых продуктах имеет теоретическое и практическое значение и на сегодня является актуальным и востребованным направлением [15].

Соотношение «свободной» и «связанной» влаги в продукте, прочность связи влаги с пищевыми веществами можно определить по изменению термодинамических, теплофизических, массообменных и структурно-механических характеристик продукта [16].

Известны различные способы определения количественного и качественного состава водных фракций, отличающихся энергией связи влаги с веществом: ЯМР-спектроскопия, хроматографические методы, основанные на анализе сорбционных свойств, методы термического анализа и др. [17]. Распространенным из них является метод, основанный на анализе изотерм сорбции и десорбции, получаемых путем помещения вещества в эксикатор с газообразной средой с заданной относительной влажностью и температурой и выдерживания образца в этой среде до наступления состояния равновесия [17]. Данный метод применяется для нахождения соответствия между фактической влажностью исследуемого вещества и относительной влажностью воздуха. Принцип десорбции состоит в том, что равновесное давление в газообразной среде, в которую помещен образец ниже, чем парциальное давление водяного пара над образцом, что обеспечивает переход влаги из вещества в газообразную среду. Длительность проведения эксперимента по получению изотерм сорбции и десорбции в отдельных случаях может составлять более 30 дней [18]. Существуют варианты данного метода, позволяющие более ускоренно проводить процесс сорбции-десорбции. Например, в работе Н. Б. Кондратьева для проведения экспериментальных исследований получения изотерм сорбции и десорбции используется специально созданная установка [35]. Принцип работы установки основан на прохождении сжатого воздуха с различной относительной влажностью через слой сыпучего материала, создавая при этом псевдоожиженное состояние сыпучего продукта. Проведение исследования сорбционных свойств вещества в псевдоожиженом слое позволяет ускорить процесс сорбции и десорбции влаги с веществом в 3–4 раза по сравнению с использованием эксикаторов, однако длительность метода даже в этом случае составляет до 7 дней. Экспериментальные данные аппроксимируются в виде уравнения зависимости равновесной влажности вещества от относительной влажности окружающего воздуха и температуры. Применяя при анализе изотерм десорбции метод А. В. Лыкова, можно дать качественную оценку формам связи влаги, а энергию связи влаги с материалом можно определить по уравнению А. Ребиндера:

$$E_{\text{св}} = -RT\ln\left[\varphi\left(U_{\text{р}}, T\right)\right] \quad (1)$$

где $\varphi(U_{\text{р}}, T)$ – относительная влажность воздуха, находящегося в равновесном состоянии с веществом, имеющим влагосодержание при температуре T.

Применение данного анализа и расчета энергии связи влаги с кондитерскими изделиями поможет обосновать применение в них тех или иных влагоудерживающих сахароподобных или сахаросодержащих ингредиентов.

Однако, отметим, что методы, основанные на анализе изотерм сорбции и десорбции, независимо от условий проведения опытов и скорости процесса, позволяют получить информацию о качественном составе водных фракций и затруднительны для точного определения ее количественного состава, а также характеризуются значительной длительностью проведения эксперимента.

Для изучения количественного и качественного состава водных фракций и свойств воды в материале применяются методы, основанные на нагревании образца при высушивании в термографическом устройстве с построением термограммы в виде кривых дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [19–21], дифференциального термического анализа (ДТА) или термогравиграммы в печи дериватографа [22].

Методика, представленная в работах Н. С. Родионовой, Е. А. Пожидаевой и др. позволяет определить количество водных фракций по количеству экзотермических пиков на кривых дифференциальной сканирующей калориметрии и дифференциальной термического анализа или по количеству ступеней (изломов) на термогравиграмме [22–24, 35]. В работах В. А. Каминского и С. В. Шахова представлена методика изучения форм связи влаги на основе дифференциально-термического анализа [25, 26]. Для этого кривую термогравиграммы преобразовывают в зависимость степени изменения массы (α) от температуры (T) и в дальнейшем перестраивают в координатах ($-l\text{g}\alpha$) – ($10^3/T$). Анализ построенных кривых позволяет определить температурные зоны удаления влаги из материала с различной формой и энергией связи, а также массовую долю влаги, десорбированную с одинаковой скоростью.

Общим недостатком всех описанных методик с получением термограмм в виде кривых термогравиграммы, дифференциальной сканирующей калориметрии и дифференциальной термического анализа является необходимость применения дорогостоящего лабораторного оборудования (дериватографа).

Рассмотренные методы, основанные на дифференциально-термическом анализе вещества, дают хорошую оценку качественного и количественного состава водных фракций в исследуемом материале, однако не позволяют дать интегральную оценку прочности связи влаги в материале, которая является обобщенным и более важным показателем при исследовании влагосвязывающей способности кондитерских продуктов и выборе влагоудерживающих сахароподобных или сахаросодержащих ингредиентов [27, 28, 35].

Разработанный и запатентованный способ по определению прочности связи влаги с веществом не дает произвести интегральную оценку прочности связи влаги в веществе в любом диапазоне влагосодержаний, так как многие вещества не содержат свободной влаги, особенно кондитерские изделия, и поэтому на их графических кривых не имеется начального линейного участка, что значительно затрудняет определение максимальной скорости сушки и вносит погрешность в результаты измерений, в том числе и для всего диапазона удаляемой при сушке влаги, а выбранный критерий величины относительного эквивалентного влагосодержания дает сравнительную оценку летучести не «свободной» влаги, а летучести влаги, удаляемой в начальный период сушки, в сравнении с летучестью прочносвязанной влаги [29].

При разработке рецептуры кондитерских изделий встает задача выбора сахаросодержащего ингредиента из числа разных видов сиропов и патоки, обладающего наибольшей водоудерживающей способностью, чтобы обеспечить наибольший выход продукта и обеспечить минимальную усушку готовых изделий при их хранении. С этой целью необходимо сравнение среднеинтегральной оценки прочности связи влаги в кондитерских изделиях с различными сахаросодержащими продуктами.

Следовательно, для пищевой промышленности, в том числе и кондитерской, актуальным является разработка новой методики определения среднеинтегральной оценки прочности связи влаги с веществом в любом диапазоне влагосодержаний и использование ее в исследовании влагосвязывающей способности различных продуктов.

Цель работы – исследование среднеинтегральной влагосвязывающей способности сахаросодержащих продуктов для дальнейшего их использования в рецептуре кондитерских изделий.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны часто используемые в кондитерском производстве сахаросодержащие продукты: кристаллические сахара (сахар белый, глюкоза, фруктоза, изомальт), на основе которых готовились высококонцентрированные сиропы с массовой долей влаги 17,2…19,8 %; сахаристые гидролизаты крахмала фирмы «Cargill» (патока крахмальная различных видов (низкоосахаренная, карамельная кислотная, высокоосахаренная), глюкозно-фруктозный сироп) с массовой долей влаги 17,0…22,4 %. Для сравнения готовили сахарный и сахаро-паточный сиропы с содержанием влаги 19,4 % и 19,8 % (соответственно), причем сахаро-паточный сироп готовили на основе сахара белого и патоки карамельной кислотной (при соотношении 1:0,5).

В опытных образцах определяли: массовую долю влаги рефрактометрическим методом по коэффициенту преломления раствора продукта в соответствии с ГОСТ 5900 «Изделия кондитерские. Методы определения влаги и сухих веществ»; массовую долю редуцирующих веществ и сахарозы в высококонцентрированных сиропах йодометрическим методом в соответствии с ГОСТ 5903 «Изделия кондитерские. Методы определения сахара»; массовую долю редуцирующих веществ в патоке методом Лейна-Эйнона в соответствии с ГОСТ 33917 «Патока крахмальная. Общие технические условия». Содержание глюкозы, фруктозы, мальтозы, полисахаридов определяли с помощью метода высокоэффективной жидкостной хроматографии со статистической обработкой результатов. Содержание изомальта определяли по содержанию сухих веществ в изомальтном сиропе.

Полученные высококонцентрированные сиропы (сахарный, сахаро-паточный, глюкозный, фруктозный, глюкозно-фруктозный и изомальтный) и патока крахмальная различных видов существенно отличаются по показателям качества и углеводному составу (табл. 1) [30].

В сахарном и сахаро-паточном сиропах больше всего содержится сахарозы – 79,8 и 50,6 % (соответственно). В глюкозном, фруктозном и глюкозно-фруктозном сиропах количество редуцирующих сахаров (глюкозы и/или фруктозы) наибольшее – 80,7, 80,1, 77,6 % (соответственно). Во всех видах патоки сахароза и фруктоза отсутствуют, но в зависимости от вида содержание редуцирующих сахаров (глюкоза и мальтоза) колеблется от 32,9…60,2 %, полисахаридов (декстрины, тетра- и трисахариды) – от 19,7…46,8 %, причем последние по своей химической природе представляют собой разветвленные высокомолекулярные соединения [31, 32]. В высокоосахаренной патоке больше чем в остальных видах патоки содержится редуцирующих сахаров – 60,2 % и меньше полисахаридов – 19,7 %, в низкоосахаренной патоке наоборот – меньше всего содержится редуцирующих сахаров – 32,9 % и больше всего полисахаридов – 46,8 %.

Для оценки влагосвязывающей способности вещества использовали методику, разработанную под руководством проф. В. М. Арапова, по определению среднеинтегральной оценки прочности связи влаги с веществом в любом диапазоне влагосодержаний, на основе сравнительной оценки летучести свободной воды (скорости сушки) и среднеинтегральной летучести (среднеинтегральной скорости сушки) влаги исследуемого вещества при равных постоянных термодинамических параметрах сушки образцов вещества [33].

Среднеинтегральную оценку прочности связи влаги в указанных продуктах в диапазоне влагосодержаний U_1 и U_2 проводили в следующей последовательности. Для каждого сахаросодержащего продукта определяли его начальную влажность и соответствующее ей значение влагосодержания $U_н$. (табл. 1). За верхнее значение диапазона влагосодержаний принимали влагосодержание образца исходного продукта, соответствующее концу периода прогрева U_1 на кривой сушки

Таблица 1. Показатели качества и углеводный состав опытных образцов сахаросодержащих высококонцентрированных сиропов и патоки крахмальной различных видов

Table 1. Quality indicators and carbohydrate composition of thick sugar-containing syrups and various starch molasses

Показатели качества, углеводный состав	Сиропы высококонцентрированные						Патока крахмальная		
	Сахарный	Сахаро-паточный	Глюкозный	Фруктозный	Глюкоз-но-фруктозный	Изомальтный	Низкоосахаренная	Карамельная кислотная	Высокоосахаренная
Массовая доля влаги, %	19,4	19,8	19,3	19,9	22,4	19,2	20,2	19,1	20,0
Влагосодержание, %	24,1	24,7	23,9	24,8	28,9	23,8	25,3	23,6	25,0
Массовая доля редуцирующих сахаров (декстрозный эквивалент (DE)), %	0,8	14,5	80,7	80,1	77,6	–	32,9	42,4	60,2
Содержание углеводов, %, из них:	80,6	80,1	80,7	80,1	77,6	–	79,7	80,7	79,9
сахароза	79,8	50,6	–	–	–	–	–	–	–
глюкоза	0,3	6,3	80,7	–	44,5	–	15,1	22,8	30,9
фруктоза	0,5	2,5	–	80,1	31,7	–	–	–	–
мальтоза	–	5,7	–	–	1,4	–	17,8	19,6	29,3
полисахариды (декстрины)	–	15,0	–	–	–	–	46,8	38,3	19,7
Содержание изомальта, %	–	–	–	–	–	80,8	–	–	–

(рис. 1а–9а). На основании этого приняли U_1 = 22 %. За нижнее значение диапазона влагосодержаний принимали U_2 = 4 %, что соответствует, как известно, минимальному значению влагосодержания ряда многих видов готовых сахаристых кондитерских изделий. Применение показателя «влагосодержание продукта, U, %)», а не показателя «массовая доля влаги (W, %)», как количественной характеристики влаги в продукте, объясняется необходимостью графического изображения сушки в координатах «влагосодержание продукта (U, %) – продолжительность процесса сушки (τ_c, мин)», так как в этих координатах достаточно просто можно определить период удаления свободной (не связанной с продуктом) воды. Влагосодержание продукта определяли как отношение содержащейся в нем воды к массе сухих веществ продукта. Для определения летучести свободной воды и среднеинтегральной летучести влаги исследуемого продукта проводили при равных и одинаковых условиях сушку двух образцов продукта, отличающихся начальным влагосодержанием. В качестве лабораторной сушильной установки использовали термогравиметрический инфракрасный влагомер марки FD-610, позволяющий проводить сушку при постоянных заданных термодинамических параметрах с фиксированием убыли массы навески во времени. Во всех опытах с целью поддержания высокой скорости процесса, температура сушки была на уровне 150 ± 1 °С, что значительно ниже температуры карамелизации многих сахаросодержащих продуктов, для которых она составляет от 160 до 180 °С [34].

В качестве первых образцов брали исходные сахаросодержащие продукты (табл. 1), в качестве вторых образцов – эти же продукты, но разбавленные дистиллированной водой из такого расчета, чтобы содержание сухих веществ в сахарном растворе не превышало 40 ± 1,0 %. При такой концентрации влаги в продукте коллоидные частицы не оказывают значительного воздействия на периферические молекулы воды, находящиеся на границе раздела фаз продукт – воздух. Поэтому теплота испарения этих молекул практически равна теплоте парообразования свободной влаги. Чтобы обеспечить равную поверхность сушки первых и вторых образцов, их массу помещали в алюминиевые кюветы диаметром 15 мм, а не наносили слоем на фольгу.

Масса, г, и начальное влагосодержание, %, первых образцов в кювете были следующими: 5,060/25,7 (сироп сахарный); 5,045/22,1 (сироп сахаро-паточный); 5,005/25,1 (сироп глюкозный); 5,005/25,6 (сироп фруктозный); 5,090/26,4 (сироп глюкозно-фруктозный); 5,030/25,2 (сироп изомальтный); 5,060/27,8 (патока низкоосахаренная); 5,085/24,9 (патока карамельная кислотная); 5,000/21,9 (патока высокоосахаренная). Вторые образцы разбавленных сиропов и патоки имели следующую массу (г) и влагосодержание (%): 5,260/149,7 (сироп сахарный); 5,390/150,0 (сироп сахаро-паточный); 5,310/150,2 (сироп глюкозный); 5,215/149,2 (сироп фруктозный); 5,370/149,3 (сироп глюкозно-фруктозный); 5,330/150,0 (сироп изомальтный); 5,390/149,5 (патока низкоосахаренная); 5,285/149,9 (патока карамельная); 5,300/149,6 (патока высокоосахаренная). Кювета с образцом устанавливалась на тарелку прибора, дно которой было покрыто огнеупорной тканью из керамического волокна, после чего образец подвергался сушке.

В ходе эксперимента для первых и вторых образцов через небольшие интервалы времени (каждые 60 с) регистрировали изменение массы исследуемых образцов. Длительность процесса сушки первых образцов проводили с таким расчетом, чтобы влага из продукта была удалена в полном объеме в рассматриваемом диапазоне $U_1 \div U_2$ влагосодержаний. Первоначальные результаты экспериментов получали в виде таблиц, в которых отражались изменения массы (удаление влаги) образца во времени. В качестве примеров приведены таблицы 2 и 3. На основании экспериментальных результатов вычисляли влагосодержание вещества в определённые моменты времени и строили графические кривые изменения влагосодержания вещества от времени сушки (рис. 1а–9а). Длительность сушки вторых образцов проводили с таким расчетом, чтобы из образца была полностью удалена свободная влага. Обработку результатов второго эксперимента проводили аналогично первому, после чего отдельно строили вторую кривую зависимости влагосодержания продукта от времени (рис. 1б–9б).

Поскольку энергозатраты на испарение свободной влаги являются самыми минимальными в сравнении с затратами на испарение влаги, содержащейся в исходном продукте, то при сушке вторых образцов из них в начальный момент прогрева и в последующие за прогревом моменты времени удаляется свободная влага. Поэтому на кривой сушки вторых образцов после прогрева наблюдается прямолинейный участок, соответствующий удалению из вещества свободной влаги. Наличие прямолинейного участка объясняется постоянством энергозатрат на испарение свободной влаги при постоянстве параметров сушки. Тангенс угла наклона этого прямолинейного участка к оси времени определяет скорость сушки свободной влаги при заданных термодинамических параметрах процесса, который рассчитывали как отношение размерных катетов прямоугольного треугольника (рис. 1б–9б) по следующей формуле:

$$N_{в} = \frac{\Delta U}{\Delta \tau} = \frac{U_{в1} - U_{в2}}{\tau_{в2} - \tau_{в1}} \qquad (2)$$

где $N_{в}$ – скорость сушки свободной влаги, c^{-1}; $U_{в1}$, $U_{в2}$ – влагосодержания второго образца, соответствующие началу и окончанию выбранного на кривой сушки прямолинейного участка, кг влаги/кг сухого вещества; $\tau_{в1}$, $\tau_{в2}$ – длительности сушки, соответствующие началу и окончанию прямолинейного участка, с.

На кривых сушки первых образцов определяли окончание периода прогрева продукта как небольшой участок кривой, обращенной выпуклостью вверх, и соответствующее ему влагосодержание U_1 (рис. 1а–9а). Поскольку прогрев характеризуется неустановившимся температурным режимом сушки, то его в дальнейшем из расчетов исключали. Также на этих кривых определяли продолжительность сушки исходных продук-

Таблица 2. Результаты эксперимента при сушке исходного (первого) образца сахарного сиропа

Table 2. Initial (first) vs. dried samples of sugar-containing syrups

Время сушки τ_c, мин	Температура сушки T, °С	Изменение массы образца (удаление влаги) m, %	Влагосодержание U, %
0	94	0,00	25,70
5	133	1,30	24,31
10	142	9,00	14,61
15	149	14,80	7,30
20	150	18,30	2,90
25	151	20,00	0,76
30	151	20,50	0,13
33	151	20,60	0,00

Таблица 3. Результаты эксперимента при сушке второго образца сахарного сиропа (с добавлением дистиллированной воды)

Table 3. Second vs. dried samples of sugar-containing syrups with distilled water

Время сушки τ_c, мин	Температура сушки T, °С	Изменение массы образца (удаление влаги) m, %	Влагосодержание U, %
0	93	0,00	149,70
5	128	25,00	87,50
10	141	50,00	25,00
15	150	56,80	8,00
20	150	57,80	5,50
25	151	58,40	4,00
30	151	58,70	3,25
33	151	59,00	2,50

тов (τ_c), соответствующую снижению влагосодержания от U_1 до U_2 (рис. 1а–9а).

Физическая сущность рассматриваемого метода среднеинтегральной оценки прочности связи влаги в сахаросодержащих продуктах заключается в следующем. Если бы в течение времени τ_c из первого образца удалялась свободная, а не реальная связанная влага, то скорость ее удаления равнялась бы свободной влаге $N_в$, так как условия сушки первого и второго образцов идентичны. Тогда расчетное количество свободной влаги $W_{св}(U_1, U_2)$, которое могло бы испариться со скоростью $N_в$ за время τ_c, равно:

$$W_{св}(U_1, U_2) = N_в \times \tau_c \quad (3)$$

Продолжительность сушки первого образца при снижении его влагосодержания от U_1 до U_2 также можно рассчитать аналитически:

$$\tau_c = \int_{U_1}^{U_2} \frac{dU}{N(U)} = \frac{U_1 - U_2}{N_{ср}} \quad (4)$$

где $N(U)$ – действительная скорость сушки первого образца, как функция влагосодержания, c^{-1}; $N_{ср}$ – среднеинтегральная скорость сушки первого образца при снижении его влагосодержания от U_1 до U_2, кг влаги/кг сухих веществ.

Из уравнения (4) следует:

$$U_1 - U_2 = \tau_c \times N_{ср} \quad (5)$$

Величину $W_{св}(U_1, U_2)$ в уравнении (3) профессор В. М. Арапов предложил называть общим эквивалентным влагосодержанием. Общее эквивалентное влагосодержание – это количество свободной воды, отнесенное к сухой массе вещества, для удаления которой требуется такое же время сушки, что и для удаления из вещества действительного полифракционного состава влаги при снижении его влагосодержания от U_1 до U_2 при идентичных условиях процесса. Каждая фракция в веществе характеризуется энергией связи с сухой частью. Поэтому энергозатраты на испарение связанной влаги всегда больше энергозатрат на испарение свободной влаги. Вследствие этого $N_{ср} \leq N_в$. Очевидно, что чем больше энергия связи влаги с продуктом, тем меньше среднеинтегральная скорость удаления из него воды. Следовательно, в инженерной практике среднеинтегральную прочность связи влаги с продуктом можно характеризовать величиной, определяющей отношение скорости сушки свободной воды к среднеинтегральной скорости сушки связанной воды в продукте при одинаковых условиях ведения процесса. Предполагается эту величину называть общим относительным эквивалентом свободной влаги $\omega_{об}(U_1, U_2)$ в диапазоне влагосодержаний $U_1 \div U_2$ и рассчитывать следующим образом:

$$\omega_{об}(U_1, U_2) = \frac{W_{св}(U_1, U_2)}{U_1 - U_2} = \frac{N_в \times \tau_c}{U_1 - U_2} = \frac{N_в \times \tau_c}{N_{ср} \times \tau_c} = \frac{N_в}{N_{ср}} \quad (6)$$

Поскольку по результатам испытаний продукта можно определить величины $N_в$, τ_c, U_1 и U_2, то общий относительный эквивалент свободной влаги в диапазоне влагосодержаний $U_1 \div U_2$ следует определять по формуле

$$\omega_{об}(U_1, U_2) = \frac{N_в \times \tau_c}{U_1 - U_2} \quad (7)$$

О прочности связи влаги в материале можно также косвенно судить по показателю A_w, который характеризует «соотношение свободной и связанной влаги» в продукте. Поэтому нами для сравнения результатов, полученных по вышеописанной методике, проведены измерения показателя A_w с помощью гигрометра Rotronic модификации HygroPalm с абсолютной погрешностью ± 0,008. Для этого анализируемый образец продукта помещали в специальный стаканчик и устанавливали в специальную камеру, а сверху камеры размещали измерительный зонд влажности и температуры. При измерении на дисплее прибора отображаются значения показателя A_w и температуры в камере. После стабилизации данных показателей на дисплее прибора по сигналу фиксировали результаты измерений.

Результаты и их обсуждение

Как видно из графиков сушки исходных образцов концентрированных сиропов и патоки различных видов (рис. 1а–9а), вся содержащаяся в исследуемых продуктах влага более или менее прочно связана с их сухой частью, о чем свидетельствует изгиб кривых сушки к оси времени после периода прогрева, об этом свидетельствует также и показатель A_w, который у всех продуктов меньше единицы.

Следует заметить, что у низкоосахаренной патоки, сахарного и сахаро-паточного сиропов по мере снижения влагосодержания наблюдается непрерывный рост энергии связи оставшейся в продукте влаги, о чем свидетельствует вогнутый к оси времени характер кривых сушки во всем диапазоне влагосодержаний после периода прогрева. На кривых сушки других сахаросодержащих продуктов можно выделить линейные участки, которые свидетельствуют о наличии в продукте водной фракции, молекулы которой обладают равной энергией связи. В карамельной патоке практически вся влага представлена одной фракцией. Однако определение границ интервалов различных водных фракций, а также их количественного значения на основании кривых сушки затруднительно из-за плавного перехода одного участка кривой сушки к другому. Определенная по кривым сушки (рис. 1а–9а) продолжительность процесса τ_c при снижении влагосодержания продуктов от 22 до 4 %, занесена в таблицу 4.

Для определения скорости сушки свободной воды на всех кривых сушки вторых образцов (рис. 1б–9б) выделили прямолинейный участок, в котором влагосодержание снижается от 120 до 60 %. Соответствующее этим точкам время сушки занесли также в таблицу 4. Расчет

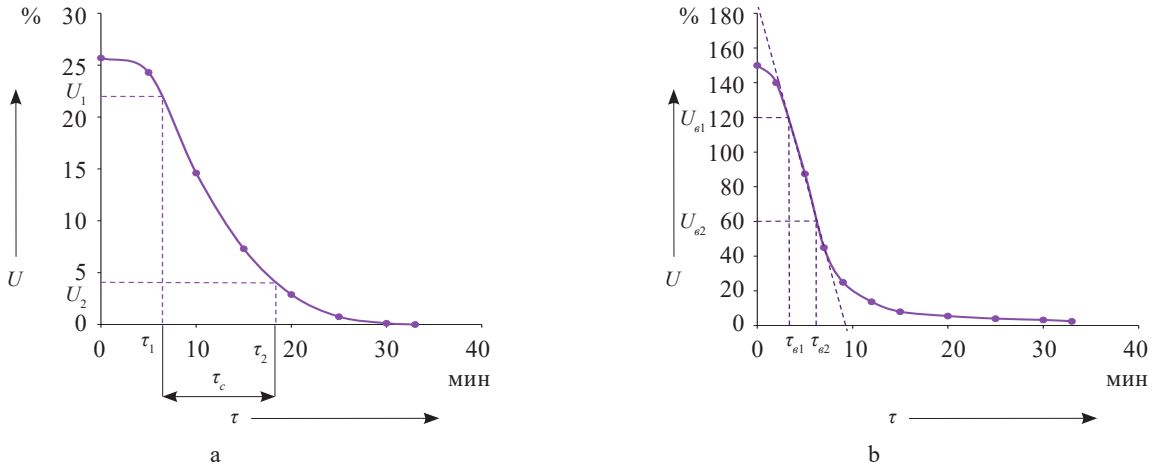

Рисунок 1. Зависимость изменения влагосодержания от времени при сушке сахарного сиропа в инфракрасном влагомере: а) исходный образец; б) образец с добавлением дистиллированной воды

Figure 1. Effect of drying time on water retaining capacity in sugar syrup samples: a) initial sample; b) sample with distilled water

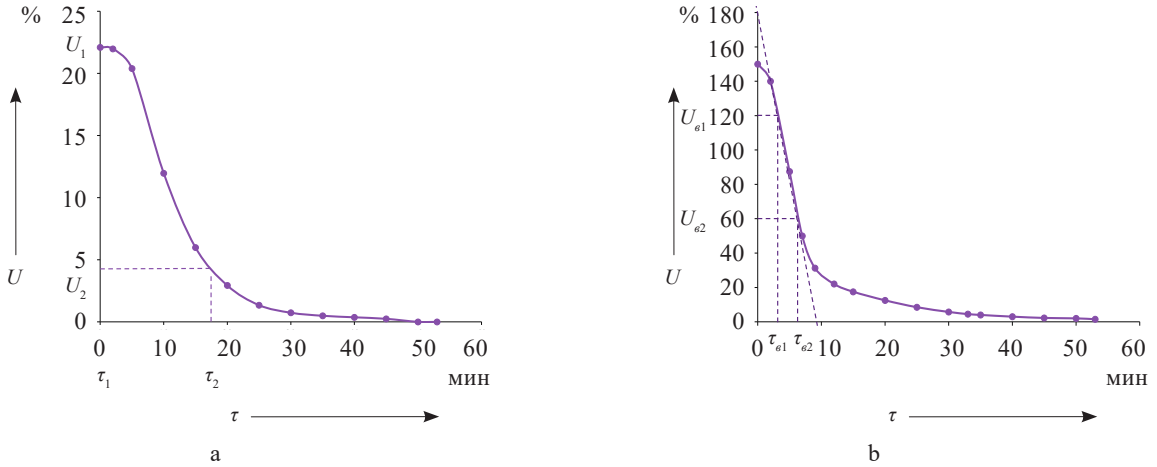

Рисунок 2. Зависимость изменения влагосодержания от времени при сушке сахаро-паточного сиропа в инфракрасном влагомере: а) исходный образец; б) образец с добавлением дистиллированной воды

Figure 2. Effect of drying time on water retaining capacity in sugar+molasse syrup: a) initial sample; b) sample with distilled water

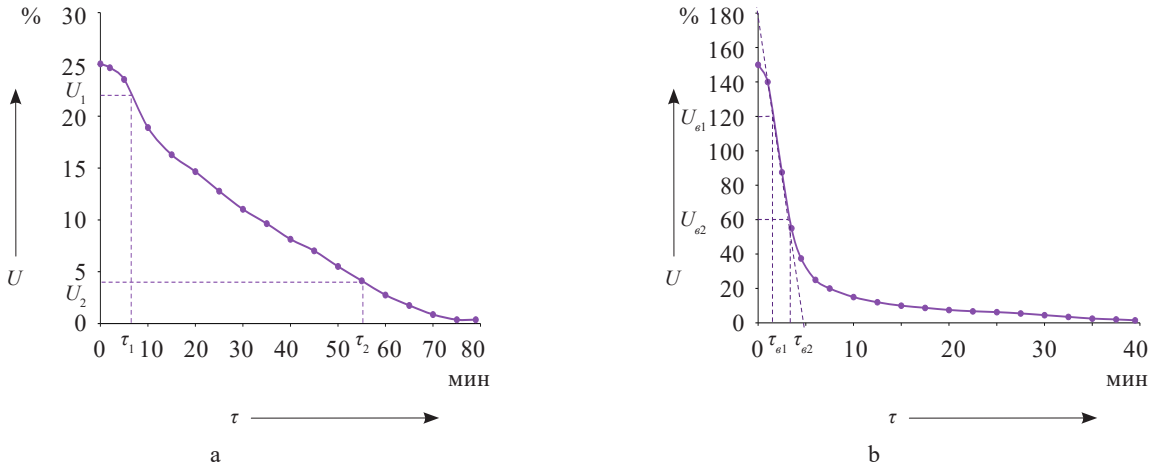

Рисунок 3. Зависимость изменения влагосодержания от времени при сушке глюкозного сиропа в инфракрасном влагомере: а) исходный образец; б) образец с добавлением дистиллированной воды

Figure 3. Effect of drying time on water retaining capacity in glucose syrup: a) initial sample; b) sample with distilled water

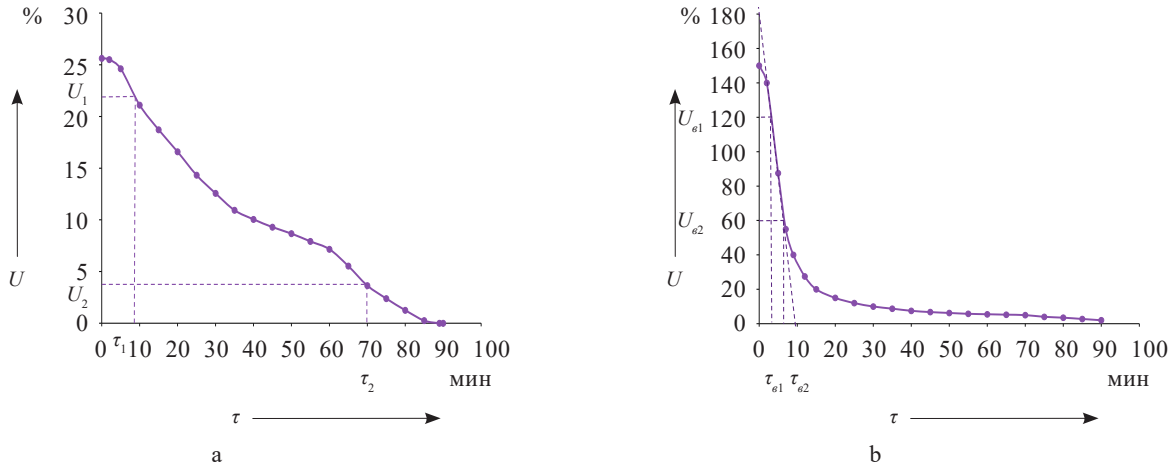

Рисунок 4. Зависимость изменения влагосодержания от времени при сушке фруктозного сиропа в инфракрасном влагомере: а) исходный образец; б) образец с добавлением дистиллированной воды

Figure 4. Effect of drying time on water retaining capacity in fructose syrup: a) initial sample; b) sample with distilled water

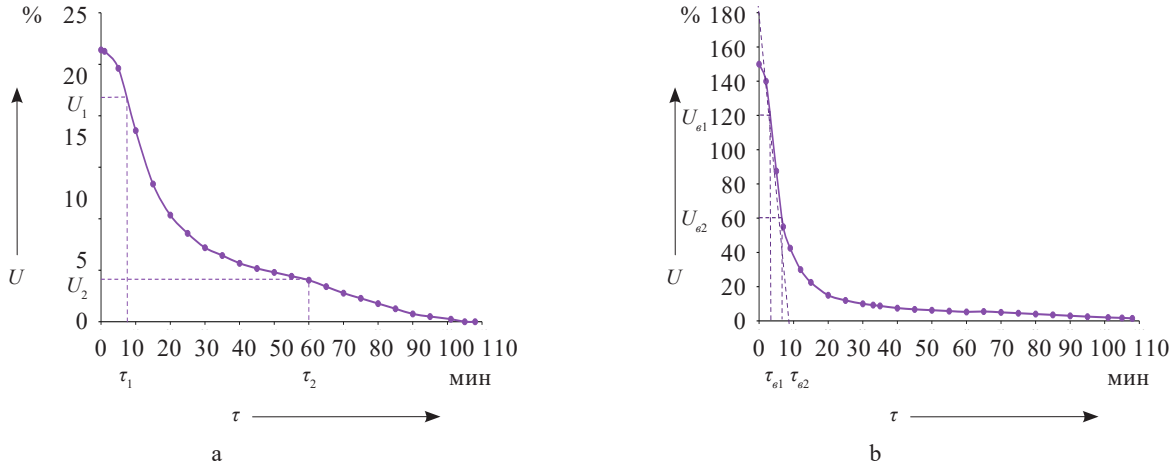

Рисунок 5. Зависимость изменения влагосодержания от времени при сушке глюкозно-фруктозного сиропа в инфракрасном влагомере: а) исходный образец; б) образец с добавлением дистиллированной воды

Figure 5. Effect of drying time on water retaining capacity in glucose+fructose syrup: a) initial sample; b) sample with distilled water

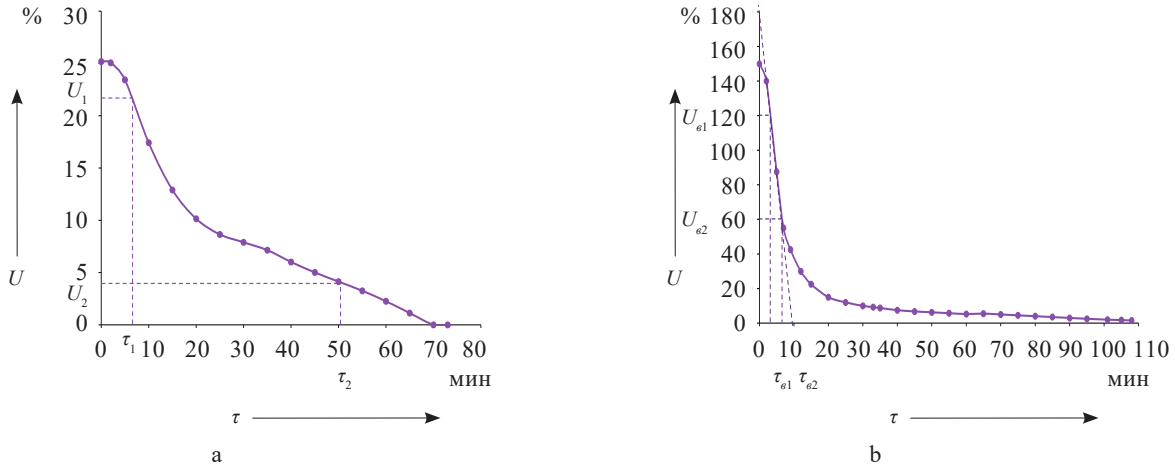

Рисунок 6. Зависимость изменения влагосодержания от времени при сушке изомальтного сиропа в инфракрасном влагомере: а) исходный образец; б) образец с добавлением дистиллированной воды

Figure 6. Effect of drying time on water retaining capacity in isomalt syrup: a) initial sample; b) sample with distilled water

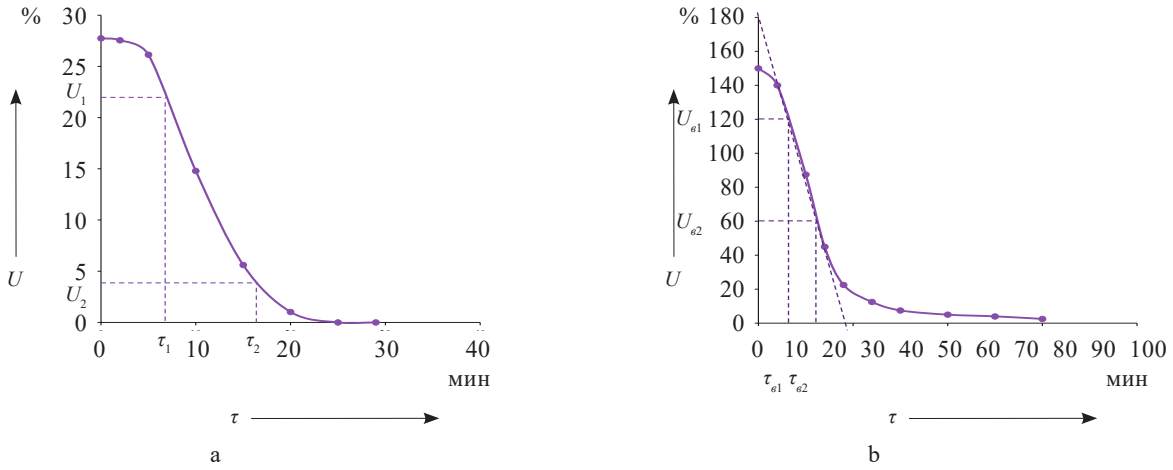

Рисунок 7. Зависимость изменения влагосодержания от времени при сушке низкоосахаренной патоки в инфракрасном влагомере: а) исходный образец; б) образец с добавлением дистиллированной воды

Figure 7. Effect of drying time on water retaining capacity in low-sugar molasse: a) initial sample; b) sample with distilled water

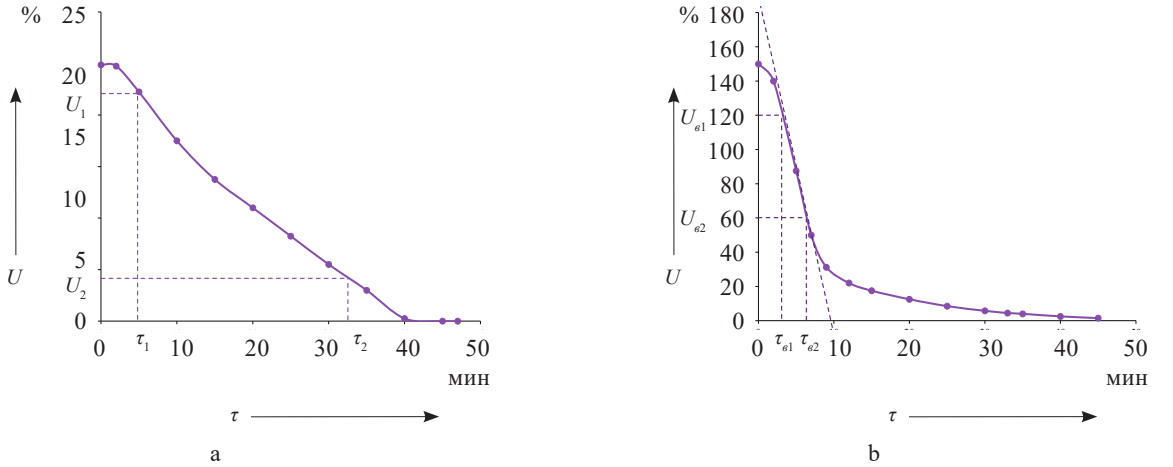

Рисунок 8. Зависимость изменения влагосодержания от времени при сушке карамельной патоки в инфракрасном влагомере: а) исходный образец; б) образец с добавлением дистиллированной воды

Figure 8. Effect of drying time on water retaining capacity in caramel molasse: a) initial sample; b) sample with distilled water

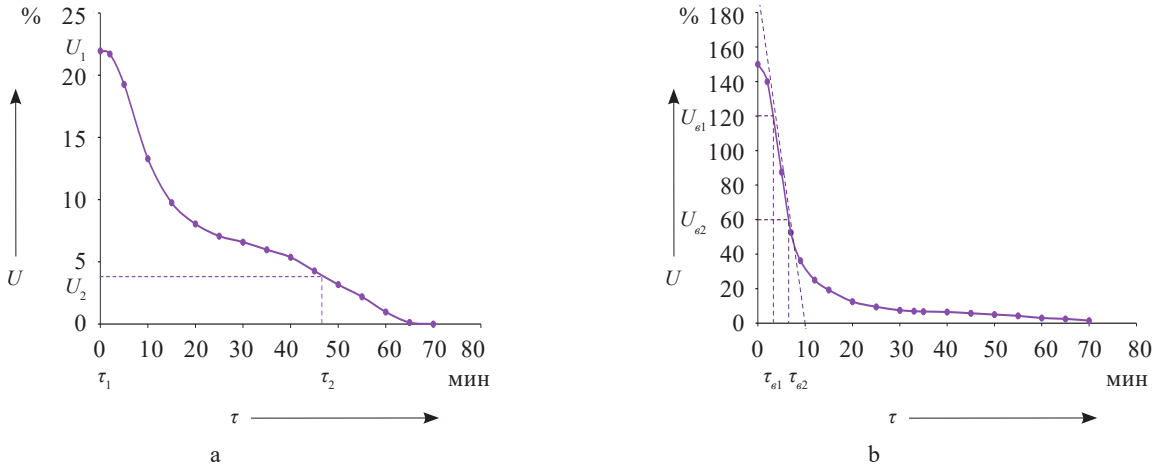

Рисунок 9. Зависимость изменения влагосодержания от времени при сушке высокоосахаренной патоки в инфракрасном влагомере: а) исходный образец; б) образец с добавлением дистиллированной воды

Figure 9. Effect of drying time on water retaining capacity in high-sugar molasse: a) initial sample; b) sample with distilled water

Таблица 4. Результаты сушки опытных образцов сахаросодержащих высококонцентрированных сиропов и патоки крахмальной различных видов на термогравиметрическом влагомере FD-610

Table 4. Thick sugar-containing syrups and various starch molasses dried on a FD-610 thermogravimetric moisture meter

Название образца	Время сушки 1-го образца $\tau_с$, с	Влагосодержание 2-го образца, %		Время сушки 2-го образца, с		Скорость сушки свободной воды $N_в \cdot 10^3$, %/с	Общий относительный эквивалент свободной воды $\omega_{об}(U_1, U_2)$
		$U_{в1}$	$U_{в2}$	$\tau_{в1}$	$\tau_{в2}$		
Сиропы высококонцентрированные:							
сахарный	780	120	60	190	390	300	13,0
сахаро-паточный	870	120	60	190	390	300	14,5
глюкозный	2910	120	60	190	390	300	48,5
фруктозный	3690	120	60	190	390	300	61,5
глюкозно-фруктозный	3180	120	60	190	390	300	53,0
изомальтный	2670	120	60	190	390	300	44,5
Патока крахмальная различных видов:							
низкоосахаренная	990	120	60	190	390	300	16,5
карамельная кислотная	1650	120	60	190	390	300	27,5
высокоосахаренная	2760	120	60	190	390	300	46,0

Таблица 5. Сравнение прочности связи влаги в высококонцентрированных сиропах и патоки крахмальной различных видов на основе показателя A_w и общего относительного эквивалента свободной влаги

Table 5. Moisture binding capacity in thick syrups and various starch molasses based on A_w index and total relative free moisture

Наименование продукта	Данные показателей при определении $\omega_{об}(U_1, U_2)$		Данные показателей при определении активности воды			
	Влагосодержание U, %	Показатель $\omega_{об}(U_1, U_2)$	Массовая доля влаги W, %	Влагосодержание образца U, %	Показатель A_w	Температура, °С
Сиропы высококонцентрированные:						
сахарный	25,7	13,0	19,4	24,1	0,830 ± 0,014	24,53 ± 0,60
сахаро-паточный	22,1	14,5	19,8	24,7	0,701 ± 0,017	22,82 ± 0,38
глюкозный	25,1	48,5	19,3	23,9	0,548 ± 0,005	22,19 ± 0,52
фруктозный	25,6	61,5	19,9	24,8	0,499 ± 0,016	22,55 ± 0,94
глюкозно-фруктозный	26,4	53,0	19,6	24,4	0,583 ± 0,008	25,06 ± 0,47
изомальтный	25,2	44,5	19,2	23,8	0,623 ± 0,003	21,95 ± 0,44
Патока крахмальная:						
низкоосахаренная	27,8	16,5	20,2	25,3	0,745 ± 0,015	26,02 ± 0,44
карамельная кислотная	24,9	27,5	19,1	23,6	0,727 ± 0,019	26,43 ± 0,42
высокоосахаренная	21,9	46,0	20,0	25,0	0,680 ± 0,013	26,44 ± 0,38

по формуле (2) показал, что для всех вторых образцов скорость сушки свободной воды составляет 0,3 %/с.

Результаты определения среднеинтегральной прочности связи влаги в исследуемых сахаросодержащих продуктах показали, что чем выше показатель $\omega_{об}(U_1, U_2)$, тем выше влагосвязывающая способность продукта. По представленным значениям видно (табл. 4), что наибольшую прочность связи влаги имеет образец фруктозного сиропа ($\omega_{об}(U_1, U_2) = 61,5$), наименьшую – сахарный сироп ($\omega_{об}(U_1, U_2) = 13,0$). В образцах фруктозного, глюкозно-фруктозного и глюкозного сиропов, высокоосахаренной патоке прочность связывания влаги высокая (61,5…46,0), в изомальтном сиропе и патоке карамельной несколько меньше (44,5…27,5), в сахарном и сахаро-паточном сиропах, патоке низкоосахаренной самая низкая (16,5…13,0).

Следовательно, с целью предотвращения высыхания кондитерских изделий в процессе хранения и продления их срока годности в их рецептуру следует включать фруктозный или глюкозно-фруктозный, или глюкозный сиропы, либо патоку высокоосахаренную, которые в сравнении с другими сахаросодержащими продуктами имеют более высокую водосвязывающую способность. Для снижения гигроскопичных свойств изделий и предотвращения их намокания при хранении, а также если необходимо чтобы кондитерский полуфабрикат быстро высыхал в процессе сушки на заключительном этапе производства, то в качестве

сахаросодержащих продуктов лучше использовать сахарный или сахаро-паточный сиропы, либо низкоосахаренную патоку.

Результаты измерения показателя A_w приведены в таблице 5, в которой также для сравнения прочности связи влаги в исследуемых продуктах представлены результаты измерения прочности связи влаги на основе показателя общего относительного эквивалента свободной влаги $\omega_{об}(U_1, U_2)$.

Исследуемые образцы концентрированных сиропов и патоки различных видов относятся к продуктам с промежуточной влажностью 19,1…20,2 %, их значения показателя A_w составляют 0,499…0,830 [35]. Известно, что при A_w 0,4…0,6 развитие и рост микроорганизмов не происходит, в диапазон данных значений попадают фруктозный, глюкозно-фруктозый и глюкозный сиропы. При A_w 0,65…0,87 в результате нарушения условий хранения в патоке или сиропах могут образовываться некоторые виды микроорганизмов – ксерофильные виды плесеней (грибов) (*Asp. chevalieri; Asp. canidus; Wallemia sebi; Saccharomyces bisporus*). Данные значения характерны для всех видов патоки, изомальтного, сахаро-паточного и сахарного сиропов. Самое высокое значение A_w в сахарном сиропе – 0,830, самое низкое – во фруктозном – 0,499.

Полученные результаты значений показателя A_w и прочности связи влаги в исследуемых образцах показали, что чем ниже величина показателя $\omega_{об}(U_1, U_2)$, тем выше показатель A_w. Так, например, в сахарном сиропе (A_w = 0,830,$\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 13,0), сахаро-паточном сиропе (A_w = 0,701, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 14,5), патоке низкоосахаренной (A_w = 0,745, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 16,5), патоке карамельной кислотной (A_w = 0,727, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 27,5), изомальтном сиропе (A_w = 0,623, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 44,5), патоке высокоосахаренной (A_w = 0,680, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 46), глюкозном сиропе (A_w = 0,548, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 48,5), глюкозно-фруктозном сиропе (A_w = 0,583, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 53), фруктозном сиропе (A_w = 0,499, $\omega_{об}(U_1, U_2)$ = 61,5). Причем, значения показателя $\omega_{об}(U_1, U_2)$ фруктозного сиропа в 4,7…1,2 раза выше, чем в остальных исследуемых продуктах.

Как видно из таблицы 5, оба показателя – A_w и $\omega_{об}(U_1, U_2)$, могут быть характеристиками связи влаги с продуктом. Следует отметить, что при проведении измерений по одной и другой методикам значения влагосодержаний продуктов несколько отличаются. С одной стороны, это связано с различием влагосодержания у образцов продукта при определении A_w и $\omega_{об}(U_1, U_2)$, так как образцы были приготовлены из различных партий, что негативно влияет на корректность этих показателей. Например, значения $\omega_{об}(U_1, U_2)$ и показателя A_w соответственно равны у низкоосахаренной патоки – 16,5 (U = 27,8 %) и 0,745 (U = 25,3 %), а у карамельной кислотной патоки – 27,5 (U = 24,9 %) и 0,727 (U = 23,6 %). Считаем, что эта некорректность объясняется не только различием влагосодержания у образцов продукта, но различием физических законов, на которых основаны данные показатели. Согласно ГОСТ ISO 21807-2015 под «свободной влагой» в данном случае понимается некоторая часть воды в пищевом продукте, которая пригодна для метаболической активности микроорганизмов. Считается, что эта влага не является прочносвязанной. Показатель A_w определяется как отношение парциального давления водяного пара в системе пищевой продукции к давлению пара чистой воды при одной и той же температуре. Поэтому показатель A_w в большей степени характеризует соотношение свободной для метаболической активности микроорганизмов влаги и связанной влаги. Следовательно, по этому соотношению косвенно можно судить о прочности связи влаги в пищевом продукте. Но он, таким образом, не дает среднеинтегральную оценку связи влаги различным водным фракциям, отличающихся величиной энергии связи. В отличие от показателя A_w показатель $\omega_{об}(U_1, U_2)$ характеризует среднеинтегральную летучесть (способность испаряться) всей содержащейся в продукте влаги. Поэтому для оценки усушки продукта при хранении, по-нашему мнению, показатель $\omega_{об}(U_1, U_2)$ обладает большей надежностью и достоверностью в сравнении с показателем A_w.

Полученные ранее авторами кондитерские изделия длительного срока хранения с использованием рассмотренных сахаросодержащих продуктов, например, карамель без сахара белого на основе патоки низкоосахаренной, зефир без сахара белого на основе патоки высокоосахаренной, мармелад без сахара белого на основе патоки высокоосахаренной или глюкозно-фруктозного сиропа, подтверждают правильность выбора рецептурных компонентов в соответствии с полученными результатами по разработанной методике среднеинтегральной оценки водоудерживающей способности продуктов.

Выводы

Таким образом, на примере исследованных видов сахаросодержащих продуктов показана эффективность нового подхода к определению в них прочности связи влаги, основанного на соотношении скорости сушки свободной воды к среднеинтегральной скорости сушки связанной в продукте воды при одинаковых условиях ведения процесса. Для оценки усушки продукта при хранении показатель $\omega_{об}(U_1, U_2)$ обладает большей надежностью и достоверностью в сравнении с показателем A_w.

Предложенная авторами методика позволяет не только качественно, но и количественно оценить состояние влаги в пищевом продукте. Результаты изучения влагосвязывающей способности сахаросодержащих продуктов показали, что чем больше в них содержится редуцирующих (гигроскопичных) сахаров (в большей степени фруктозы и глюкозы), тем ниже показатель A_w и меньше «свободной влаги» в продукте. Для предотвращения процесса намокания кондитерских изделий лучше использовать сахарный и/или сахаро-паточный сироп, и/или

низкоосахаренную патоку с низким значением показателя $\omega_{об}(U_1, U_2) = 16,5...13,0$. Для продления свежести кондитерских изделий, которые при хранении быстро теряют влагу и высыхают, в рецептуру можно добавлять фруктозный и/или глюкозно-фруктозный, и/или глюкозный сироп, и/или патоку высокоосахаренную с высоким значением показателя $\omega_{об}(U_1, U_2) = 61,5...46,0$.

Разработанная методика определения среднеинтегральной оценки прочности связи влаги с веществом в любом диапазоне влагосодержаний может быть использована в различных пищевых предприятиях и смежных отраслях. По критерию показателя среднеинтегральной влагосвязывающей способности можно создавать новый рецептурный состав изделий длительного срока хранения. Предлагаемый подход позволит также сократить время, затрачиваемое на лабораторные исследования по изучению связи влаги с материалом.

Рекомендации

Результаты проведенных исследований влагосвязывающей способности сахаросодержащих продуктов различного углеводного состава можно использовать в качестве примера при исследовании и внедрении новых видов различных сырьевых ингредиентов с целью разработки новой продукции длительного срока хранения, что на сегодня является актуальным, перспективным и востребованным.

Критерии авторства

В. М. Арапов – предложил методику проведения эксперимента, руководил и консультировал в ходе проведения научного эксперимента. И. В. Плотникова – разработала концепцию исследований, проводила научный эксперимент, корректировала рукопись до ее подачи в редакцию. Д. А. Казарцев – обработал экспериментальные данные, выполнил расчеты, корректировал рукопись до ее подачи в редакцию. К. К. Полянский – организовал производственные испытания, консультировал в ходе научного эксперимента. Г. О. Магомедов – консультировал в ходе научного эксперимента. М. В. Копылов – обработал экспериментальные данные, консультировал в ходе научного эксперимента. В. Е. Плотников – провел обзор литературных источников по исследуемой проблеме, участвовал в проведении научного эксперимента. Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Выражаем благодарность руководству центра коллективного пользования «Контроль и управление энергоэффективных проектов» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» за представленную возможность проведения исследований на лабораторной сушильной установке – термогравиметрическом инфракрасном влагомере марки FD-610.

Recommendations

The data obtained on water retaining capacity of sugar-containing products with various carbohydrate compositions can be used to develop and implement new raw ingredients for novel products with a long shelf-life, which is a relevant and promising direction.

Contribution

V.M. Arapov developed the methodology and supervised the research. I.V. Plotnikova developed the research concept, conducted the experiment, and proofread the manuscript. D.A. Kazartsev processed the experimental data, performed the calculations, and proofread the manuscript. K.K. Polyansky arranged the production tests and provided scientific advice. G.O. Magomedov provided scientific advice. M.V. Kopylov processed the experimental data and provided scientific advice. V.E. Plotnikov reviewed scientific publications and performed the research. All authors contributed equally to the writing of the manuscript and are responsible for any potential plagiarism.

Conflict of interest

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

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the management of the Core Facility Center for Monitoring and Management of Energy Efficient Projects, Voronezh State University of Engineering Technologies, for the opportunity to use the FD-610 thermogravimetric infrared moisture meter.

References/Список литературы

1. Kondratiev NB, Rudenko OS, Osipov MV, Bazhenova AE. Forecasting the shelf life of confectionery products under accelerated storage conditions: scoping review. Storage and processing of agricultural raw materials. Storage and Processing of Farm Products. 2022;4:22–39. (In Russ.). https://doi.org/10.36107/spfp.2022.354; https://elibrary.ru/VBCFQB

2. Kondratiev NB, Osipov MV, Petrova NA. Management of fat and moisture migration processes during confectionery storage. Food Products Commodity Expert. 2022;5:352–354. (In Russ.). https://doi.org/10.33920/igt-01-2205-17; https://elibrary.ru/DEEICV

3. Plotnikova IV, Zharkova IM, Roslyakov YuF, Fetisova ES. Study of the possibility of application of the indicator water activity for assessing the quality of caramel News of higher educational institutions. Izvestiya vuzov. Food Technology. 2023;1(391):89–93. (In Russ.). https://doi.org/10.26297/0579-3009.2023.1.14; https://elibrary.ru/VWXFWX

4. Schab D, Zahn S, Rohm H. Development of a Caramel-Based Viscoelastic Reference Material for Cutting Tests at Different Rates. Materials (Basel). 2021;14(14):3798. https://doi.org/10.3390/ma14143798

5. Soldatova EA, Misteneva SIu, Savenkova TV. Conditions and criteria for ensuring the storage ability of confectionery. Food Industry. 2019;5:82–85. (In Russ.). https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10078

6. Dorohovich A, Dorohovich V, Kambulova Ju. The effect of mono- and disaccharides on structural-mechanical properties of pectin gels. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016;5(11):16–24. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81347

7. Rubio-Arraez S, Benavent C, Ortolá M, Castelló ML. Influence of low glycaemic index sweeteners on antioxidant, sensory, mechanical, and physicochemical properties of a watermelon jelly. Journal of Food Quality. 2018;2018(1):8412017. https://doi.org/10.1155/2018/8412017

8. Belokurova ES, Pankina IA, Sevastianova AD, Asfondiarova IV, Katkova NM. The effect of functional additives on the indicator "water activity" of biscuit semi-finished products. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021;2(640). https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/2/022022

9. Barbosa-Cánovas GV, Fontana AJ, Schmidt SJ, Labuza TP. Water Activity in Foods: Fundamentals and applications. 2020. 616 p.

10. Plotnikova IV, Zharkova IM, Magomedov GO, Magomedov MG, Khvostov AA, Miroshnichenko EN. Forecasting and quality control of confectionery products with the use of "water activity" indicator. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021;640(6):062003. https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/6/062003

11. Plotnikova IV, Magomedov GO, Kazartsev DA, Magomedov MG, Polansky KK, Plotnikov VE. Differential thermal analysis of moisture binding in zephyr with different contents of glucose syrup. Foods and Raw Materials. 2024;12(2):207–219. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-2-600

12. Caballero-Cerón C, Guerrero-Beltrán JA, Mújica-Paz H, Torres JA, Welti-Chanes J. Moisture Sorption Isotherms of Foods: Experimental Methodology, Mathematical Analysis, and Practical Applications. In: Gutiérrez-López GF, Alamilla-Beltrán L, del Pilar Buera M, Welti-Chanes J, Parada-Arias E, Barbosa-Cánovas GV, editors. Water Stress in Biological, Chemical, Pharmaceutical and Food Systems. New York: Springer; 2015. pp. 187–214. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2578-0_15

13. Plotnikova IV, Magomedov GO, Zharkova IM, Miroshnichenko EN, Plotnikov VE. Jelly formulated with different carbohydrate profiles: quality evaluation. Foods and Raw Materials. 2022;10(2):262–273. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-2-535

14. Danilchenko AS, Siyukhov KhR, Korotkova TG, Siyukhova BB. Determination of the content of free and attached moisture in spent grain. New technologies. 2020;15(4):41–52. (In Russ.). https://doi.org/10.47370/2072-0920-2020-15-4-41-52; https://elibrary.ru/HHDKTD

15. Ketel EC, de Wijk RA, de Graaf C, Stieger M. Effect of cross-cultural differences on thickness, firmness and sweetness sensitivity. Food Research International. 2020;152.109890. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109890

16. Nirav S. Thermal Methods of Analysis. Mod Appl Pharm Pharmacol. MAPP.000509. 2017;1(2):1–8. https://doi.org/10.31031/MAPP.2017.01.000509

17. Korotkov EG, Ponomarev AN, Melnikova EI, Kuznetsova IV, Stanislavskaya EB. Study of the moisture links forms in curds with whey proteins microparticulate. Dairy industry. 2016;(8):31–33. (In Russ.). [Исследование форм связи влаги в творогe с микропартикулятом сывороточных белков / Е. Г. Коротков [и др.] // Молочная промышленность. 2016. № 8. С. 31–33.]. https://www.elibrary.ru/WFGGLJ

18. Rodionova NS, Popov ES, Matveev DI, Pevtsova ES, Sokolova AV, Diakov AA. Vegetable biocorrectors influence on the moisture state in functional purpose flour products. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2019;81(1):190–195. (In Russ.). https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-1-190-195; https://elibrary.ru/UPMGAP

19. Rodionova NS, Popov ES, Klimova EA, D'yakov AA. The influence of natural biocorrectors on the forms of communication of moisture and storage of confectionery with honey. Food Industry. 2019;(11):16–19. (In Russ.). https://elibrary.ru/YCUACV

20. Rodionova NS, Razinkova TA, Popov ES, Polyansky KK, Rodionova NA, Zarubina KYu, *et al.* Exopolysaccharide activity of probiotic microorganisms under different fermentation conditions. Dairy industry. 2020;4:28–30. (In Russ.). https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-04-28-30; https://elibrary.ru/ORYXJJ

21. Pozhidaeva EA, Popov ES, Ilyushina AV, Bolotova NV, Ivanova EV. Study of the forms of moisture binding in curd products by differential scanning calorimetry and thermogravimetry. Food Industry. 2018;(11):73–77. (In Russ.). [Исследование форм связи влаги в творожных продуктах методом дифференциально-сканирующей калориметрии и термогравиметрии / Е. А. Пожидаева [и др.] // Пищевая промышленность. 2018. № 11. С. 73–77]. https://elibrary.ru/YQIENF

22. Brown ME. Differential thermal analysis (DTA) and differential scanning calorimetry (DSC). In: Brown ME, editor. Introduction to Thermal Analysis. Dordrecht: Springer; 1988. pp. 23–49. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1219-9_4

23. Kazantseva IL. Research of forms of a moisture communication in the raw materials and the finished confectionery by thermal analysis method. Storage and Processing of Farm Products. 2015;(7):36–40. (In Russ.). [Исследование форм связывания влаги в сырье и готовой кондитерской продукции методом термического анализа / И. Л. Казанцева [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. 2015. № 7. С. 36–40.]. https://elibrary.ru/UNXXSH

24. Rodionova NS, Popov ES, Rodionov AA, Razinkova TA. Assessment of the exopolysaccharide activity of probiotic consortia using differential thermal analysis. Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2018;8(4):95–105. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-4-95-105; https://elibrary.ru/VQTQFC

25. Kaminskii VA, Epshtein SA, Shirochin DL, Timashev SF. The determination of kinetic parameters for the decomposition of complex substances from thermogravimetry data. Russian Journal Of Physical Chemistry A. 2011;85(4):637–643. (In Russ.). [Определение параметров кинетики разложения сложных веществ по данным термогравиметрии / В. А. Каминский [и др.] // Журнал физической химии. 2011. Т. 85. № 4. С. 637–643.]. https://elibrary.ru/NSYNHJ

26. Shakhov SV, Saranov IA, Sadibaev AK, Malibekov AA, Litvinov EV, Gruzdov PV. The research of moisture forms in the rape by the thermogravimetric analysis method. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2019;81(1):27–31. (In Russ.). https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-1-27-31; https://elibrary.ru/GDDUJA

27. Antipov ST, Emelyanov AB, Baturina EV, Kazartsev DA, Babenko DS, Posnova GV. Application of drying acceleration to study the forms of moisture bond in currant fruits. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2023;85(1):17–23. https://doi.org/10.20914/2310-1202-2023-1-17-23; https://elibrary.ru/CNBVUG

28. Antipov ST, Kazartsev DA, Davydov AM, Emelyanov AB. Study of the forms of moisture bond in coriander seeds based on analysis of drying kinetics. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2020;3(85): 24–31. (In Russ.). https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-3-24-31; https://elibrary.ru/HPKRJQ

29. Arapov VM, Kazartsev DA, Arapov MV. Procedure establishing strength of bonding between moisture and substance. Russia patent RU 2230311C1 Рос. Федерация. №2003103805/28. 2004. [Способ определения прочности связи влаги с веществом: пат. 2230311C1/ Арапов В. М., Казарцев Д. А., Арапов М.В.; заявл. 10.02.2003; опубл. 10.06.2004. 12 с.].

30. Kuzmina EI, Egorova OS, Akbulatova DR, Sviridov DA, Ganin MYu, Shilkin AA. New types of sugar-containing raw materials for food production. Food systems. 2022;5(2):145–156. (In Russ.). https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-2-145-156; https://elibrary.ru/JLQULI

31. Saiko DS, Titov SA, Saranov IA, Andreev DG, Lobacheva NN. Moisture Transfer During its Evapo-ration from Sugar Solutions. Eurasian Journal of Chemistry. 2023;109(1):41–50. https://doi.org/10.31489/2959-0663/1-23-4

32. Papakhin AA, Lukin ND, Ananskikh VV, Borodina ZM. Modern trends in starch hydrolysis technology. Dostizheniya nauki i tekhniki. 2020;34(12):84–89. (In Russ.). https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-11214 ; https://elibrary.ru/RBZPME

33. Arapov VM, Akenchenko MA, Kazartsev DA, Plotnikova IV, Polyansky KK. A method for the average integral assessment of the bond strength of moisture in a substance in any given range of moisture contents. A patent for an invention 2758198 S1, 26.10.2021. Application No 2021107728: 24.03.2021 [Способ среднеинтегральной оценки прочности связи влаги в веществе в любом заданном диапазоне влагосодержаний / В. М. Арапов [и др.] Патент на изобретение 2758198 C1, 26.10.2021. Заявка № 2021107728 от 24.03.2021.].

34. Cherepanov IS, Krasnoperova OS. To the problem of quantitative estimation of carbohydrate caramelization product's structure using infrared-fourier transform spectroscopy. Technology and the study of merchandise of innovative foodsuffs. 2019;(3):3–8. (In Russ.). [Черепанов И. С., Красноперова О. С. О возможности количественной оценки структуры продуктов карамелизации сахаров методом ИК-Фурье спектроскопии // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2019. № 3. С. 3–8.]. https://elibrary.ru/XNPFDN

35. Kondratev NB, Fedorko KV, Krylova EN, Pesterev MA, Osipov MV. Gingerbread with fruit filling: preservation factor assessment. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(3):397–405. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-3-397-405; https://elibrary.ru/ATZYRT