

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-393-400>

Поступила 03.06.2025

Поступила после рецензирования 15.09.2025

Принята в печать 18.09.2025

© Хворова Л. С., Андреев Н. Р., Бызов В. А., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Open access

ГЛЮКОЗА: ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ИХ ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Хворова Л. С., Андреев Н. Р.*, Бызов В. А.

Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья — филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха, Красково, Московская область, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

виды глюкозы,
метаболизм,
мутаротация,
растворимость,
кристаллизация,
сладость,
гигроскопичность,
стабильность

Глюкоза является одним из важнейших лекарственных средств и продуктов питания стратегического назначения. Рынок глюкозы является высококонкурентным на мировом уровне и активно развивающимся. По прогнозу Business research company, в период с 2025 по 2034 г объем рынка глюкозы будет стремительно расти с \$6,81 до \$9,2 млрд. Рост рынка глюкозы объясняется растущим спросом на производство кондитерских изделий, функциональных продуктов питания и напитков, кормов для животных, фармацевтических препаратов, биотоплива. За последнее десятилетие накоплены данные о физико-химических свойствах глюкозы, их роли в углеводном обмене человека, а также в разработке новых пищевых продуктов и медицинских препаратов. Цель данного обзора — проанализировать актуальные исследования, посвященные рынку глюкозы, multifunctionality ее свойств и сферам применения. Заслуживает внимания глюкостатическая теория ожирения, а также выявленная ранее неизвестная способность нейронов головного мозга к самостоятельному гликолизу. Открыт рецептор сладкого вкуса и изучен механизм его влияния на избыточное потребление пищи и здоровье человека. Особенно вредное воздействие при этом оказывают фруктоза и искусственные подсластители. Большое внимание исследователей направлено на повышение стабильности глюкозы. При анализе рынка глюкозы и ее физико-химических свойств выявлено актуальное направление развития производства, связанное с расширением сфер ее применения. Оно включает получение новых кристаллических форм, расширение производства ангидридной глюкозы, внедрение технологий распылительной сушки и лиофилизации, а также создание продуктов со-кристаллизации глюкозы с другими веществами для пищевой, фармацевтической, медицинской и ветеринарной отраслей.

Received 03.06.2024

Accepted in revised 15.09.2025

Accepted for publication 18.09.2025

© Khvorova L. S., Andreev N. R., Bysov V. A., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

GLUCOSE: BASIC PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES AND THEIR PRACTICAL SIGNIFICANCE

Ludmila S. Khvorova, Nikolay R. Andreev*, Vasily A. Bysov

All-Russian Research Institute of Starch and Starch — containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre, Kraskovo, Moscow region, Russia

KEY WORDS:

types of glucose,
metabolism,
mutarotation,
solubility,
crystallization,
sweetness,
hygroscopicity,
stability

ABSTRACT

Glucose is one of the most important medicines and strategic food products. The glucose market is highly competitive on a global level and is actively developing. According to the forecast of the Business research company, in the period from 2025 to 2034, the glucose market volume will grow rapidly from \$6.81 to \$9.2 billion. The growth of the glucose market is explained by the growing demand for the production of confectionery, functional food and beverages, animal feed, pharmaceuticals, and biofuel. Over the past decade, data have been accumulated regarding the physico-chemical properties of glucose, their role in human carbohydrate metabolism and the creation of new foods and medicines. The purpose of this review was to analyze current research reflecting the market, versatility of properties and uses of glucose. The glucostatic theory of obesity deserves attention, as well as the previously unknown ability of brain neurons to glycolysis. A sweetness receptor has been discovered and the mechanism of its influence on excessive food intake and human health has been investigated. Fructose and artificial sweeteners have a particularly harmful effect. Much of the researchers' attention is focused on increasing glucose stability. The analysis of the glucose market and its physico-chemical properties revealed the current direction of the development of glucose production linked with the expansion of the fields of its use. It includes obtaining new crystalline forms, expanding the production of anhydrous glucose, introducing spray drying and lyophilization technologies, creating products of the co-crystallization of glucose with other substances for the food, pharmaceutical, healthcare, veterinary and other industries.

1. Введение

Кристаллическая глюкоза является одним из важнейших лекарственных средств и продуктов питания стратегического назначения. Здоровоохранение населения ни в одной стране мира не может обходиться без глюкозы. Глюкозу пищевую и фармакопейную вырабатывают из крахмала на предприятиях крахмалопаточной промышленности.

С физиологической и питательной точек зрения это вещество имеет преимущества перед другими углеводами: глюкоза снабжает все органы и ткани необходимой биологической энергией. Другие

пищевые углеводы — крахмал, олигосахариды и моносахариды — действуют лишь после их превращения в глюкозу. Глюкозу широко применяют в медицинской практике как лекарственный препарат, при больших потерях крови, сердечной слабости и других заболеваниях. Она входит в состав кровезаменяющих и противошоковых жидкостей и других препаратов. В список основных лекарственных средств Всемирной организации здравоохранения, который включает самые безопасные и эффективные лекарства, необходимые в системе здравоохранения, входит глюкоза, глюкоза с хлоридом натрия в виде раствора для внутривенного введения [1]. Кристаллическая

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Хворова, Л. С., Андреев, Н. Р., Бызов, В. А. (2025). Глюкоза: основные физико-химические свойства и их практическая значимость. *Пищевые системы*, 8(3), 393–400. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-393-400>

FOR CITATION: Khvorova, L. S., Andreev, N. R., Bysov, V. A. (2025). Glucose: Basic physico-chemical properties and their practical significance. *Food Systems*, 8(3), 393–400. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-393-400>

глюкоза используется как наполнитель при изготовлении многих таблетированных лекарственных средств, является исходным сырьем для получения сорбита и аскорбиновой кислоты, а также для приготовления многих ветпрепаратов [2]. В пищевой промышленности при производстве мороженого, фруктовых консервов, конфет, безалкогольных напитков глюкоза отличается от сахарозы иным, приятным, менее сладким вкусом с ощущением прохлады и с более сильным бактериостатическим эффектом (при одинаковых концентрациях). Глюкоза также используется в кондитерских и консервных изделиях, чтобы подчеркнуть их (фруктовый) вкус, придать легкий охлаждающий эффект и сбалансировать их сладость. Глюкоза очень полезна в мороженом, леденцах, водяном льду и других замороженных десертах, где требуется умеренная сладость. Благодаря снижению температуры заморозки мороженого с глюкозой улучшаются его вкусовые качества и тающие свойства, позволяющие брать мороженое ложкой при температуре минус 18 °С. В спортивной медицине глюкозу используют в виде энергетического средства при дополнительном питании спортсменов [3].

Рынок глюкозы является высококонкурентным на мировом уровне и активно развивающимся [4]. По прогнозу Business Research Company [4], в ближайшие несколько лет объем рынка всех видов глюкозы будет стремительно расти. К 2034 году объем рынка вырастет с \$6,81 до \$9,2 млрд. Рост объемов производства глюкозы в натуральном выражении с 2025 по 2034 год составит от 14,2 млн т до 25 млн т со среднегодовым приростом 4,9%. Рост рынка глюкозы в прогнозируемом периоде можно объяснить растущим спросом в кондитерской промышленности, в сферах функциональных продуктов питания и напитков, кормов для животных, фармацевтических препаратов, производства биотоплива. По данным другой компании [5], ожидается, что к 2030 году объем мирового рынка только гидратной глюкозы достигнет \$5598,2 млн при среднегодовом темпе роста 3,4%. Гидратная и ангидридная глюкоза на рынке находятся в долевом соотношении 65:35. Наиболее быстрорастущим сегментом рынка является ангидридная глюкоза из-за возрастания потребности в ней в производстве фармацевтических препаратов. Использование глюкозы в секторе продуктов питания и напитков занимало самую большую долю рынка, более 40% от общего дохода, за которым следуют фармацевтические препараты и косметика. Ожидается, что фармацевтический сектор будет расти самым быстрым темпом в течение прогнозируемого периода с растущей потребностью в использовании глюкозы в новых лекарственных препаратах и энергетических добавках.

Анализ объема и динамики российского рынка глюкозы представлен по данным компании Discovery Research Group за 2020 год [6]. Согласно расчетам компании, объем рынка в 2020 году составил 42295,6 т. Большую долю рынка глюкозы в натуральном выражении 46,6% занял производитель АО «БиоТех Росва». Темп прироста — 8%. Объем в денежном выражении составил \$18301,0 тыс. Объем импорта глюкозы составил \$13905,0 тыс. В стоимостном выражении значительный объем импорта с долей 25,1% занимает Roquette Freres. Лидером импорта глюкозы в стоимостном выражении является Китай — 52,8%. Объем экспорта глюкозы из России составил 1195,4 т. Наибольший объем был экспортирован в Беларусь — 73,5%, большая часть экспорта глюкозы в страны Таможенного союза ЕАЭС принадлежит компании АО «БиоТех Росва».

Целью статьи является обзор научной информации в области исследований физико-химических свойств глюкозы и их практического использования.

2. Объекты и методы

Проанализированы научные исследования о структуре молекул глюкозы, о ее физико-химических свойствах и роли в углеводном обмене, а также в разработке новых кристаллических форм для применения в пищевой и медицинской продукции. Поиск данных осуществлялся в научных электронных библиотеках и поисковых системах: eLIBRARY.RU, Science Direct, БД Scopus, в медицинской базе данных PubMed, на портале ResearchGate. Поисковые запросы выполнялись по следующим ключевым словам на русском, английском и других языках: теоретические вопросы, виды глюкозы, физико-химические свойства, метаболизм, мутаротация, растворимость, сладость, гигроскопичность, стабильность, сферы использования: медицина, пищевая промышленность, спортивное питание.

3. Виды глюкозы

Глюкозу кристаллическую в промышленном масштабе вырабатывают в трех видах: гидратной α -D-глюкозы, ангидридной α -D-глюкозы и ангидридной β -D-глюкозы, отличающихся формой кри-

сталлов, растворимостью, температурой кристаллизации и другими свойствами. Гидратная α -глюкоза кристаллизуется при температуре ниже 50 °С, ангидридная α -глюкоза кристаллизуется при температуре выше 50 °С, ангидридная β -глюкоза образует кристаллы при температуре выше 100 °С.

4. Основные физико-химические свойства глюкозы

4.1. Метаболизм глюкозы

Глюкоза — это основной углеводный источник энергии для позвоночных. Содержание сахара в крови от 80 до 100 мг на 100 мл крови человека является решающим фактором в снабжении всех клеток необходимой энергией и поддерживается в организме за счет приема пищи. Избыток глюкозы в виде гликогена откладывается в печени и мышцах (около 500 г) и расходуется организмом по мере необходимости, расщепляясь на глюкозу посредством гликогенолиза. Кроме того, при недостаточности глюкозы организм может продуцировать глюкозу из глюконеогенных аминокислот лактата, глицерина и пировата в результате глюконеогенолиза. Мозгу требуется 140 г глюкозы в день. В рационе человека углеводы должны составлять от 45% до 65% от общего количества потребляемых калорий [1,7]. Глюкоза содержится во фруктах и овощах, вместе с фруктозой и сахарозой отвечая за их сладкий вкус.

В живых организмах глюкоза превращается в несколько других соединений, которые являются исходными продуктами для различных метаболических путей. Вопросу метаболизма глюкозы во всем мире уделяется большое внимание, т. к. растет количество людей с ожирением, с заболеваниями сердечно-сосудистой системы, с диабетом. Представляет интерес глюкостатическая теория, начало которой положил Жан Майер, обнаружив, что увеличение концентрации глюкозы в крови приводит к усилению чувства сытости, тогда как ее падение имеет противоположный эффект. Исследования, посвященные развитию теории глюкостаза [8] показали, что факторы, способствующие гипогликемии и/или нестабильности глюкозы, могут вызывать избыточное потребление энергии, избыточный вес и нарушение толерантности к глюкозе. При этом наибольший вред для организма, приводящий к избыточному весу, наносят сильные колебания глюкозы в крови, происходящие в результате длительных перерывов между приемами пищи.

Чрезмерное или несбалансированное потребление углеводов связывают с риском развития диабета. Исследования с использованием математического моделирования [9] показали, что на уровень глюкозы в плазме крови натошак наибольшее влияние оказывает диета (60%), тогда как физическая активность — ходьба 16 тыс. шагов (11 км) — обеспечивает лишь 40% снижения этого показателя.

В области аппаратного мониторинга глюкозы в организме предложено оригинальное решение, позволяющее одновременно удалять избыток глюкозы и преобразовывать его в энергию для питания прибора [10]. Для этого с использованием медьсодержащего композита из 3D-углеродных нанотрубок разработан имплантируемый метаболический топливный элемент, использующий глюкозу крови в качестве источника энергии. Прибор непрерывно контролирует уровень глюкозы в крови, преобразует избыток глюкозы в электроэнергию во время гипергликемии и вырабатывает достаточно энергии (0,7 мВт см⁻², 0,9 В) для опто- и электрогенетической регуляции выделения инсулина из сконструированных бета-клеток. Способ в эксперименте позволяет восстанавливать гомеостаз глюкозы в крови автоматическим, самодостаточным и замкнутым способом.

Новые данные получены при сравнении влияния на печень трех углеводов: сахарозы, фруктозы, глюкозы [11]. Регулярное употребление как фруктозы, так и сахарозо-подслащенных напитков в умеренных дозах (с одинаковой калорийностью) увеличивает синтез жирных кислот в печени даже в базальном состоянии; такой эффект не наблюдается после потребления глюкозы. Эти результаты свидетельствуют об адаптивном ответе на регулярное воздействие фруктозы в печени.

Долгое время между учеными продолжались дискуссии о метаболизме глюкозы в мозге. Многие предполагали, что большую часть глюкозы потребляют глиальные клетки, которые затем метаболическим продуктом глюкозы (лактатом) питают нейроны [12]. Новые данные о механизме потребления глюкозы человеческим мозгом, представленные в статье ученых Института Гладстона и Калифорнийского университета [13], свидетельствуют о том, что нейроны сами способны метаболизировать глюкозу посредством гликолиза для нормального функционирования мозга, в том числе при выполнении процессов обучения и запоминания. Было также показано, что в случаях заболеваний мозга, связанных с невозможностью получать энергию посредством гликолиза, нейроны в качестве

источника энергии используют галактозу. Однако получаемая от нее энергия не может полностью компенсировать потерю метаболизма глюкозы. Представленные в статье результаты могут способствовать разработке новых подходов к лечению нейродегенеративных заболеваний на ранних стадиях, таких как болезнь Альцгеймера и Паркинсона (сопровождающихся снижением поглощения глюкозы мозгом), а также к более глубокому пониманию проблем сохранения здоровья мозга по мере старения человека.

4.2. Мутаротация

Мутаротация является важнейшим свойством глюкозы. Величина ее показателя «удельное вращение», равная $+52,5^\circ$, служит основным параметром идентификации глюкозы. Две кристаллические формы: α -D-глюкоза и β -D-глюкоза имеют разную начальную оптическую активность в растворе, измеряемую величиной удельного вращения $+112^\circ$ у α -D-глюкозы и $+18^\circ$ у β -D-глюкозы. При растворении любой из них сразу включается реакция таутомерии (взаимного превращения α -D-глюкозы в β -D-глюкозу и наоборот), проявляющаяся мутаротацией — изменением угла вращения плоскости поляризации от начального до равновесного $+52,5^\circ$, что для наглядности изображено на Рисунке 1 [14].

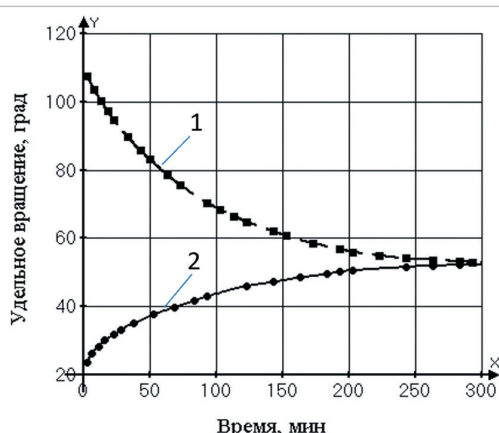


Рисунок 1. Мутаротация α - и β -глюкозы с течением времени от момента растворения: 1- α -глюкоза, 2 — β -глюкоза
Figure 1. Mutarotation of α - and β -glucose over time from the moment of dissolution: 1- α -glucose, 2 — β -glucose

При достижении постоянного значения удельного вращения $+52,5^\circ$ в растворе устанавливается состояние равновесия, соответствующее содержанию 36 % α -глюкозы и 64 % β -глюкозы. Смесь состоит из 36 % альфа-D-глюкозы, 64 % бета-D-глюкозы и 0,02 % глюкозы с открытой цепью.

Скорость мутаротации зависит от температуры и при комнатной температуре (до достижения равновесного состояния таутомеров) продолжается от 20 мин до 15–20 ч.

Явление мутаротации открыто в 1844 году и с тех пор по мере расширения знаний о строении молекулы глюкозы схематическое изображение механизма мутаротации глюкозы приобрело ряд видоизменений.

В кристаллах все моносахариды (пентозы, гексозы, гептозы и т. д.) существуют только в циклических, главным образом пиранозных, структурах. Одна из схем механизма мутаротации представлена на Рисунке 2 [15].

При добавлении циклической молекулы глюкозы к воде происходит обратимая таутомеризация одной формы глюкозы в другую через линейную (альдегидную) форму с открытой цепью. Взаимо-

превращение пиранозной формы глюкозы в альдегидную включает три стадии: протонирование O5, разрыв связи O1-H (внутримолекулярный перенос), разрыв связи O5-C1. Открытая цепь может снова замкнуться, образуя α - или β -глюкозу. Раскрытие, таутомеризация, сдвиг гидроксила на C1 и повторное закрытие обеспечивают взаимопревращение между α - и β -формами до достижения равновесия. Кислотные или щелочные условия облегчают стадию раскрытия кольца. Специфический кислотно-щелочной катализ ускоряет мутаротацию, катализируя образование разомкнутой цепи. Повышение температуры, низкий уровень pH, полярные растворители типа воды ускоряют мутаротацию.

Мутаротация глюкозы играет важную роль в биологии, оказывая влияние на физические и химические свойства сахаров, такие как растворимость, сладость и реактивность. Мутаротация участвует в метаболизме углеводов. Изомеразы катализируют мутаротацию для быстрого достижения равновесия, что обеспечивает участие необходимого аномера в последующих ферментативных реакциях. Мутаротация производит циклические конформации, необходимые для переноса через мембраны, что облегчает чередование циклических и открытых переходов во время гликолиза. В целом, мутаротация позволяет аномерным формам изменять баланс с течением времени, что важно для сложного химического состава углеводов в живых организмах.

Мутаротация находит практическое применение при контроле качества, сладости и срока годности в пищевой промышленности. Изменение величины оптического вращения используется для определения фальсификации меда. Мониторинг мутаротации позволяет выявить изменения в процессе созревания плодов, которое важно для оптимизации условий промышленного брожения. Мутаротация используется в контроле производства глюкозно-фруктозного сиропа.

В вопросе реакции мутаротации до сих пор нет однозначного решения по механизму переноса протона между кислородом альдегида и соседней гидроксильной группой. В статьях [16,17] рассматриваются два варианта: внутримолекулярный перенос протона и перенос протона с участием одной или более молекул воды. В работе [16] оба механизма изучались в газовой среде и в водном растворе с использованием специальной модели поляризуемого континуума. Установлено, что значения коэффициентов скорости лучше всего согласуются с механизмом переноса протона с участием воды. При изучении зависимости между α - и β -глюкозой во времени с помощью ближней инфракрасной спектроскопии [17] показано, что в механизме мутаротации участвуют более одной молекулы воды.

Мутаротация играет важную роль в процессе кристаллизации, так как при ее участии решаются два вопроса. Во-первых, при кристаллизации любого из аномеров второй выступает примесью для кристаллизующего аномера и тормозит его скорость кристаллизации. Во-вторых, вследствие кристаллизации глюкозы в условиях равновесного состояния аномеров происходит постоянное нарушение равновесия и его восстановление. Время, затрачиваемое на восстановление равновесного состояния, снижает общую скорость кристаллизации кристаллизующего аномера [18,19]. В процессе кристаллизации глюкозы замедляющее действие мутаротации начинает сказываться при содержании кристаллов в утфеле свыше 10 масс. %. Влияние мутаротации усиливается с увеличением пересыщения, с возрастанием содержания кристаллов в утфеле и с понижением температуры. Авторы исследований влияния концентрации раствора на константу скорости мутаротации глюкозы высказали предположение [20], что прочная структура воды вокруг β -D-глюкозы препятствует её дегидратации при кристаллизации и, следовательно, медленную скорость роста кристаллов моногидрата α -D-глюкозы можно объяснить преобладанием сильно гидратированных гидроксильных групп β -D-глюкозы в растворе.

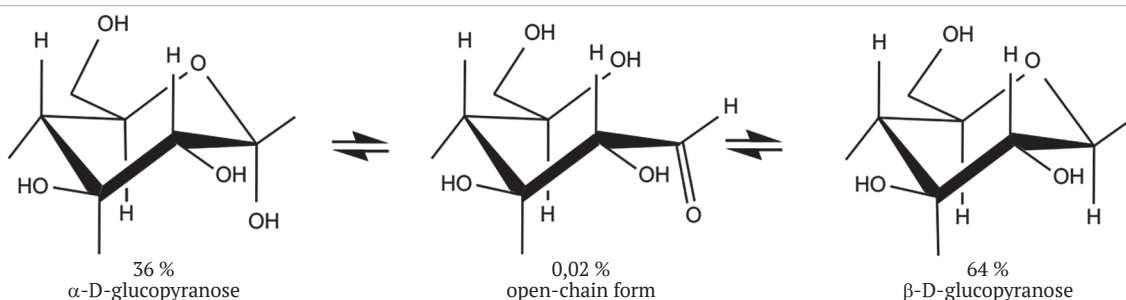


Рисунок 2. Механизм мутаротации молекул глюкозы
Figure 2. Mechanism of mutarotation of glucose molecules

При поиске ускорителей мутаротации глюкозы найдены реагенты в виде хлоридов: глюкозы [21] и ксилозы [22]. Показано, что SnCl_4 способствует ускорению процесса мутаротации глюкозы с образованием β -аномера, в то время как CrCl_3 способствует образованию α -аномера. В исследованиях с ксилозой выявлено влияние NaCl на мутаротацию в виде продления времени равновесия между α - и β -аномерами. Доля α -ксилопиранозы была немного выше в растворе $\text{NaCl-H}_2\text{O}$, чем в H_2O , и влияние NaCl на α - и β -ксилопиранозу было различным: NaCl был более благоприятен для стабилизации структуры α -ксилопиранозы. Результаты могут быть ценной информацией для эффективного использования гемицеллюлозы.

Влияние высокочастотного электромагнитного поля диапазона 30–200 МГц на замедление мутаротации глюкозы показано в испытаниях [23]. Значение равновесного удельного вращения в растворе глюкозы не меняется, в то время как у фруктозы смещается в сторону отрицательных величин. Полученные результаты авторы объясняют структурной перестройкой растворителя — воды под действием электромагнитного поля.

4.3. Растворимость

Растворимость — одна из важнейших индивидуальных характеристик веществ и продуктов. На Рисунке 3 представлена растворимость трех кристаллических видов глюкозы при температуре 20 °C. Из Рисунка 3 следует, что самой низкой растворимостью обладает гидратная α -глюкоза, а самой высокой — ангидридная β -глюкоза [24]. Ангидридная глюкоза быстрее растворяется и ее насыщенные растворы имеют более высокую концентрацию сухих веществ.

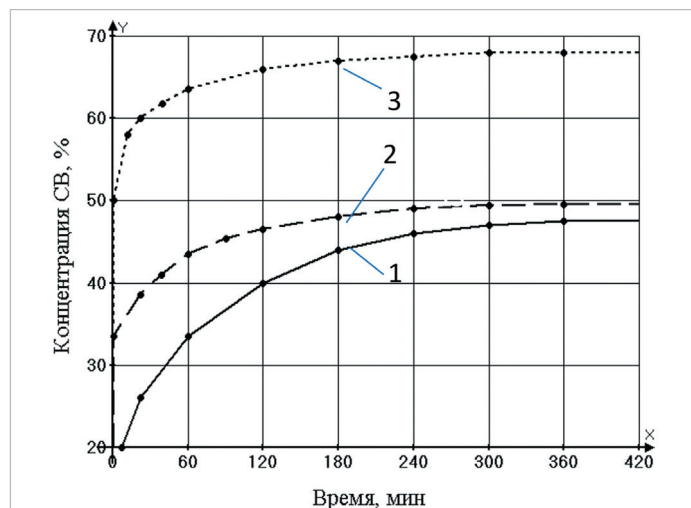


Рисунок 3. Растворимость глюкозы с течением времени: 1 — гидратная глюкоза, 2 — ангидридная α -глюкоза, 3 — ангидридная β -глюкоза

Figure 3. Solubility of glucose over time: 1 — hydrated glucose, 2 — anhydrous α -glucose, 3 — anhydrous β -glucose

На основании исследований [25] свойств водородных связей между молекулами сахаров и воды выявлена природа высокой растворимости β -глюкозы. Установлено, что β -глюкоза образует наибольшее количество гидрофильных водородных связей с молекулами воды, а α -глюкоза — одно из наименьших; β -глюкоза также имеет наименьшее число гидрофобно связанных молекул воды. Средняя длина водородной связи с группой OH^- была самой короткой/длинной для β -глюкозы/ α -глюкозы соответственно. Эти результаты согласуются с фактом, что β -глюкоза наиболее, а α -глюкоза наименее растворима в воде.

4.4. Кристаллизация

Глюкоза способна образовывать кристаллы, хотя в природе распространена в растворенном виде. Процесс ее кристаллизации сложный, длительный и для каждого вида (гидратной и ангидридной α -глюкозы и ангидридной β -глюкозы) имеет индивидуальный технологический режим и форму кристаллов. Процесс кристаллизации является основным при получении глюкозы, как и для других кристаллических веществ, позволяет не только получать продукт в кристаллическом виде, но и способствует очистке его от примесей, оставляя их в маточном растворе. Глюкозу гидратную получают в политермических условиях при снижении температуры с 45–50 °C до 25 °C в течение 30–70 ч в зависимости от глюкозного эквивалента (ГЭ) раствора. При этом требуется большое количество затравочных кристаллов, 10–15 % по массе сиропа. Для ангидридной α -глюкозы

разработаны два технологических режима при температуре выше 50 °C: изотермический и политермический. Наиболее совершенный изотермический режим кристаллизации практически не требует затравки и продолжается 7 ч [26].

Управление режимом снижения температуры при кристаллизации гидратной глюкозы является сложным и трудоемким. Для его совершенствования разрабатываются многочисленные модели. Модель [27] без затравочной кристаллизации гидратной глюкозы учитывает сложные явления: дисперсию скорости роста кристаллов и эффект реакции мутаротации. Модель способна предсказывать содержание кристаллов в утфеле как функцию размера частиц и времени, а также баланс глюкозы в маточном растворе и кристаллической форме в каждой точке модели. Важным отличием модели кристаллизации от известных является учет конкурентного вклада реакции мутаротации в кинетику кристаллизации, который позволяет более точно предсказывать значение реакции мутаротации для роста кристаллов.

Большинство активных компонентов лекарств имеют проблемы с растворимостью, биодоступностью, химической стабильностью и влагопоглощением [28]. Разработка лекарственных препаратов с превосходными физико-химическими характеристиками, такими как температура плавления, таблетуемость, растворимость, стабильность, биодоступность и проницаемость, при сохранении фармакологических свойств активного фармацевтического ингредиента значительно облегчается совместной кристаллизацией (со-кристаллизацией) лекарственных веществ. Все компоненты со-кристалла, представляющего собой кристаллическую гомогенную многокомпонентную систему, связанную нековалентными взаимодействиями, являются стабильно твердыми в условиях окружающей среды. Аналогичные проблемы наблюдаются и в пищевой промышленности.

Глюкоза обладает способностью к со-кристаллизации с галогенами и с некоторыми сахарами. В статье [29] представлен кристаллический глюкозный продукт, полученный со-кристаллизацией глюкозы с хлоридом натрия с единой кристаллической решеткой. Продукт легко и быстро кристаллизуется и обладает повышенной по сравнению с глюкозой растворимостью, имеет одинаковый химический состав с препаратом «Раствор глюкозы 5 % + NaCl 0,9 %» и идеально подходит для его получения с целью применения в фармацевтике, пищевой промышленности, ветеринарии. Не менее полезным является глюкозный продукт с хлоридом калия [30]. Со-кристаллизация глюкозы с сахарозой, фруктозой позволяет создавать новые более термостабильные продукты [31,32].

4.5. Сладость

Сладость является важнейшим свойством пищевых продуктов. Сладость — это сложный сенсорный опыт, включающий химические взаимодействия, биологические рецепторы и нейронную обработку. Восприятие сладости играет решающую роль в выборе продуктов питания и в диетических привычках [33]. Главным пищевым продуктом, обладающим сладким вкусом, является сахар, сахароза. Потребление сахара населением земного шара постоянно растет. В США наблюдается самый высокий уровень потребления сахара — в среднем 57 фунтов добавленного сахара в год, что составляет около 70 г в день, тогда как Американская кардиологическая ассоциация рекомендует не превышать 25 г в день для женщин и 38 г для мужчин [34].

Исследования показывают, что высокое потребление добавленного сахара создает многочисленные проблемы, включая повышенный риск дисбактериоза кишечника, снижение иммунной функции, рак и нейродегенерацию, а также увеличивают риск когнитивных нарушений, уменьшения объема мозга и снижения когнитивных способностей из-за развития резистентности мозга к инсулину. Женщины, употребляющие пищу с высоким гликемическим индексом и высокой гликемической нагрузкой страдают от бессонницы [35], имеют повышенный риск бесплодия [36], колоректального рака [37], хотя по вопросу связывания колоректального рака с употреблением пищи с высоким гликемическим индексом и высокой гликемической нагрузкой существуют противоречивые мнения, а именно: степень ожирения прямо пропорционально увеличивает риск прогрессирования колоректального рака и ухудшает прогноз заболевания, тогда как нарушения углеводного обмена не имеют прямой связи с прогрессированием колоректального рака [38].

Важным шагом в разработке новых стратегий для профилактики ожирения и связанных с ним заболеваний является открытие в 2001 году рецептора сладкого вкуса [39]. Рецептор сладкого вкуса — это белковые структуры T1R2 и T1R3, расположенные на вкусовых сосочках языка и работающие вместе, чтобы обнаруживать сладкие молекулы. Этот рецептор распознает все химически разнообраз-

ные соединения, воспринимаемые людьми как сладкие, включая натуральные сахара и искусственные подсластители. Когда сладкие вещества связываются с этими рецепторами, они запускают каскад химических сигналов. Этот процесс приводит к отправлению нервных импульсов в мозг, где и формируется восприятие сладкого вкуса. Важно отметить, что экспрессия функционального рецептора сладкого вкуса была зарегистрирована и в многочисленных внеротовых экстра-вкусовых тканях, где, как предполагается, он регулирует метаболические процессы [39]. Эта недавно признанная роль рецептора сладкого вкуса делает его потенциально новой терапевтической целью для лечения ожирения и связанных с ним метаболических дисфункций, таких как диабет и гиперлипидемия. Механизм формирования сладкого вкуса весьма сложный и до сих пор не до конца изучен.

Поиски причины высокого потребления сахара с проведением исследований на животных [40] показали значительное совпадение между потреблением добавленных сахаров и возникновением эффектов, схожих с наркотическими — переедание, тяга, толерантность, абстиненция, перекрестная сенсibilизация, перекрестная толерантность, перекрестная зависимость, а также эффекты вознаграждения и опиоидные реакции. Зависимость от сахара, по-видимому, является зависимостью от естественных эндогенных опиоидов, которые высвобождаются при приеме сахара. Литературные данные [40,41] демонстрируют значительные совпадения между наркотиками, вызывающими привыкание, и сахаром с точки зрения нейробиологии мозга и поведенческих проявлений животных и людей.

Ожирение — серьезная проблема, затрагивающая более 650 миллионов взрослых людей по всему миру. Потребление сахара смещает границу голода-сытости, способствуя перееданию при отсутствии потребности в энергии [41]. Потребление сладкой пищи запускает в мозге насекомых и млекопитающих выработку сигнала вознаграждения — дофамина. Этот нейромедиатор усиливает желание потреблять сахар, инициирует поведение предвкушения и поиска сладкой пищи, при этом снижая чувствительность мозга к сладким вкусам, что приводит к перееданию и увеличению веса. Установленное в результате исследований совпадение факторов риска, нейробиологических субстратов и поведенческих эффектов наркомании и переедания сахара позволяет предположить, что добавленный сахар является опасным веществом, которое может спровоцировать поведение, сходное с наркотической зависимостью [40,41].

Добавленная фруктоза особенно вредна, поскольку она не сразу становится доступным источником энергии для мозга, обеспечивая сладкий вкус без каких-либо побочных эффектов, сопутствующих полезному и своевременному приему питательных веществ. Если рассматривать глюкозу и фруктозу по отдельности, то оказывается, что добавление фруктозы связано с гораздо большим риском для здоровья, чем глюкозы. Фруктоза может увеличить потребление в еде и привести к образованию жира. В ответ на растущие доказательства вредного воздействия потребления сахаросодержащих напитков (СНН), связанных с детским ожирением и с риском ожирения, диабета и сердечно-сосудистых заболеваний у взрослых, в США введены «налоги на газировку», чтобы сократить потребление СНН.

Особые метаболические риски представляет высокофруктозный кукурузный сироп (ВФС) [42], используемый в СНН и в бесчисленном количестве других обработанных пищевых продуктов. Исследования показывают, что потребление безалкогольных напитков, подслащенных ВФС, усиливает голод, снижает сытость и изменяет вкус на более сладкий, формируя пищевые предпочтения. Избыточное потребление ВФС способствует развитию резистентности к инсулину, повышению уровня триглицеридов и накоплению висцерального жира, что является критическими признаками метаболического синдрома, увеличивая риск жировой болезни печени, развития астмы, поликистоза яичников у женщин.

Для борьбы с переизбытком сахара было приложено много усилий для поиска заменителей сахара, таких как искусственные некалорийные подсластители (ИНП) [43]. ИНП включают аспартам, ацесульфам-К, сукралозу, цикламат, неогесперидин дигидрохалкон (неогесперидин DC), неотам, тауматин и адвантам. Большинство исследований показали, что потребление продуктов, подслащенных ИНП, не вызывают тягу к сладкому и неоправданное чувство голода.

Хотя ИНП сохраняют ту же вкусовую привлекательность, что и натуральные сахара, их метаболические пути различны [44]. Они влияют на вес тела и гомеостаз глюкозы иначе, чем натуральные сахара, через базовые физиологические процессы, включающие микробиоту кишечника, систему вознаграждения, адипогенез, секреторную способность инсулина, абсорбцию глюкозы в кишечнике и рези-

стентность к инсулину. Хотя их безопасность была клинически оценена (FDA/EFSA), недавние исследования показывают, что они могут повышать риск рака, ожирения и диабета.

Испытания напитков, подслащенных сахарозой или искусственными подсластителями (ИП), показали, что, несмотря на пониженную калорийность напитков с ИП по сравнению с подслащенными сахарозой, потребление ИП не снижает риск ожирения и связанных с ним заболеваний. Это связано с неспособностью ИП эффективно снижать аппетит и, следовательно, общее потребление калорий [45].

Цикламат официально запрещен в США и Канаде из-за его канцерогенной активности; аспартам и сахарин изменяют микробиоту кишечника, ухудшают переносимость глюкозы [46]. Непереносимость глюкозы, в свою очередь, увеличивает риск метаболического синдрома, диабета 2 типа и сердечно-сосудистых заболеваний; сукралоза и ацесульфам-К увеличивают выброс инсулина, активируя рецепторы сладкого вкуса и рецепторы, чувствительные к кальцию. Искусственные подсластители не снижают уровень грелина, гормона, стимулирующего аппетит, уровень которого снижается после приема пищи. Это значит, что потребление искусственных подсластителей может инициировать более высокое потребление калорий, тем самым повышая риск ожирения. Употребление искусственно подслащенных напитков связано с повышенным риском инсульта и слабоумия. Аспартам известен также тем, что вызывает неврологические симптомы, такие как головные боли, судороги и мигрени.

Полезными натуральными некалорийными подсластителями считают стевию, архат, сахарные спирты и натуральные продукты. Однако противоречивые исследования показывают, что нет никакой разницы в гликемических и инсулиновых реакциях между стевией и глюкозой. Стевия может оказывать пагубное воздействие на микробиоту кишечника и гормональный баланс. При исследовании широко используемого в качестве заменителя сахара эритрита обнаружено, что после потребления напитка с эритритом значительно снизился уровень грелина по сравнению с аспартамом и увеличилось различные показатели сытости у добровольцев. Это свидетельствует о возможности контроля аппетита и о снижении риска ожирения при потреблении эритрита.

Интересные исследования [47] по воздействию сладких и несладких углеводов на работоспособность спортсменов-велосипедистов в условиях высокой температуры окружающей среды 35 °C показали практически одинаковое (независимо от сладости) увеличение физической работоспособности (на 15,8% и 11,8% соответственно) по сравнению с водой.

Для глюкозы сладость оценивается в 70% от уровня сахарозы. Различия во вкусах изомеров глюкозы и маннозы объясняется их разным сродством к рецептору сладкого вкуса [48]. Хотя структура рецептора до конца не определена, существуют несколько моделей для механизма его связывания. Исследование гидратации глюкозы и маннозы показывает, что α - и β -глюкоза образуют сильные водородные связи с водой, соответствующие геометрической модели рецептора. α -Аномер маннозы (слабо сладкого вкуса) имеет похожую гидратную оболочку, но с меньшим количеством и более слабыми водородными связями по сравнению с глюкозой. Гидратная оболочка β -маннозы (горького вкуса) не соответствует модели рецептора. Эти результаты предполагают прямую зависимость степени сладости от степени гидратации сахаров.

Несмотря на явный вред избыточного употребления сахаров, в пищевой промышленности продолжают создавать новые углеводные продукты с различной сладостью путем со-кристаллизации сахарозы с глюкозой или фруктозой, или смесью глюкозы и фруктозы, обладающими разной сладостью.

4.6. Гигроскопичность

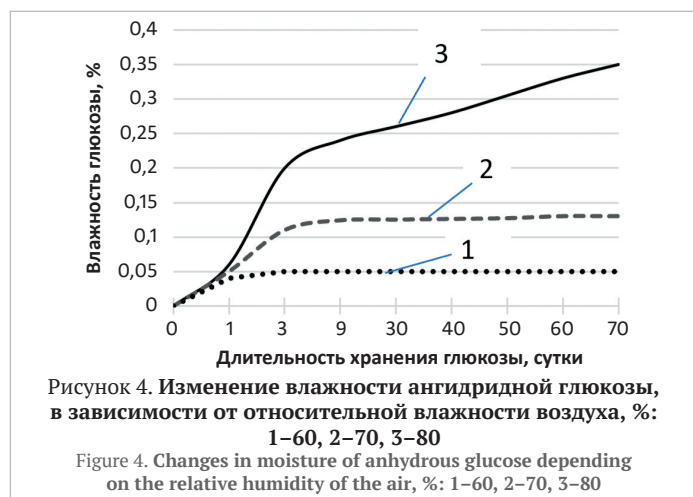
Гигроскопичность фармацевтического средства или пищевого продукта влияет на его поведение на различных этапах процесса, производства, упаковки, хранения и транспортировки. Учитывая жизненно важное значение того, что гигроскопичность оказывает прямое и косвенное влияние на стабильность, внешний вид и эффективность, в обзоре [49] дано общее представление о классификации, определении гигроскопичности материалов, влиянии содержания влаги на материалы и приведены методы для устранения этого эффекта. Эти сведения очень полезны при принятии необходимых решений во избежание нежелательной реактивности и для повышения стабильности и эффективности получения желаемых конечных продуктов.

Поглощение влаги фармацевтическими и пищевыми продуктами приводит к их чрезмерному увлажнению и изменению физико-химических свойств, снижающих их качество и срок годности.

В исследованиях [50] образование гидратов в ангидридной α -глюкозе (α -АГ) и потеря гидратов в моногидрате глюкозы (МГ) изучались при различных значениях относительной влажности (ОВ) при хранении при температуре 25 °С с использованием насыщенных солевых суспензий в течение 1 года. Механизм образования гидратов и потери гидратов определялся с помощью математического моделирования данных динамической сорбции паров, а для подтверждения механизмов использовалась спектроскопия Рамана. Образование гидрата наблюдалось при > 68 % ОВ при 25 °С, и превращение α -АГ в МГ происходило вслед за процессом зародышеобразования. Потеря гидрата наблюдалась при < 11 % ОВ при 25 °С во время хранения и при 70 °С во время ТГА. Превращение МГ в α -АГ следует за механизмами зародышеобразования и диффузии.

Наши исследования гигроскопичности ангидридной глюкозы (α -АГ) [51] проводились в условиях различной относительной влажности, создаваемой в эксикаторе с использованием растворов серной кислоты, при комнатной температуре $20 \pm 1,2$ °С. Образцы глюкозы хранились на протяжении 70 суток в открытых бюксах с известной массой. Влажность образцов контролировали по изменению массы бюкса с глюкозой взвешиванием. Из Рисунка 4 следует, что исходные образцы α -АГ, имевшие влажность 0,05 %, при хранении в течение 70 дней в условиях ОВ 60% оставались стабильными, с неизменной влажностью 0,05 %; образцы, хранившиеся при более высокой ОВ, за этот период заметно увлажнялись: до 0,13 % (при ОВ 70 %) и до 0,35 % (при ОВ 80 %). При влажности ОВ 90 % ангидридная глюкоза в течение 8 дней увлажнялась до 9 %, характерных для гидратной глюкозы, затем до конца опытов медленно адсорбировала влагу до 9,5 % с превращением в гидратную глюкозу.

Для защиты от влаги при хранении и транспортировке, как ангидридной, так и гидратной глюкозы, необходимо предусматривать соответствующую упаковку в многослойные крафт-мешки с полиэтиленовыми вкладышами.



4.7. Стабильность

Вопросы стабильности для каждого продукта решаются по-разному, в зависимости от необходимости сохранения его свойств. Глюкоза используется в качестве ингредиента в разных пищевых и фармацевтических продуктах. Однако ее гигроскопичность, пониженная термостабильность и способность легко реагировать с несколькими веществами (например, аминокислотами, пептидами и белками), приобретаемая коричневую окраску, создают определенные проблемы в логистике и производстве пищевых продуктов и лекарств. Для решения проблем гигроскопичности лекарственных препаратов/нутрицевтиков предлагаются четыре варианта: пленочное покрытие, инкапсуляция путем распылительной сушки или коацервации, совместная обработка со вспомогательными веществами и со-кристаллизация с другими веществами [52]. Для гигроскопичных фармацевтических препаратов предпочтительны покрытие и со-кристаллизация, тогда как для нутрицевтиков (например, лекарственных трав и гидролизатов белков) чаще применяются покрытие и инкапсуляция.

По сообщениям авторов статьи [53] со-кристаллизация глюкозы с сахарозой позволяет избежать нежелательных реакций для глюкозы, понизить влажность гранул сахарозы/глюкозы до 0,1–1,5 мас.% и активность воды до 0,4–0,7. Кроме того, угол откоса гранул составил 40–45°, необходимых для сыпучих порошков при таблетировании. В опытах после смешивания гранул с бикарбонатом натрия (5:1)

и выдерживания смесей в течение 12 дней при температуре 20 °С и влажности 75 % изменения их окраски не наблюдалось.

Также для улучшения сыпучести и таблетуемости глюкозы испытана непрерывная двухшнековая установка грануляции, которая может быть интегрирована в непрерывное производство кристаллической глюкозы [54]. Разработана полностью непрерывная производственная линия (включая сушку и измельчение), а также изучены и синхронизированы различные этапы производства. Линия дополнена встроенным спектроскопическим датчиком ближнего инфракрасного диапазона для контроля содержания влаги в измельченных гранулах в режиме реального времени. Сыпучесть и таблетуемость порошка значительно улучшились, и из гранул можно получать таблетки с приемлемым усилием разламывания. Разработанную линию грануляции можно легко внедрить в производство кристаллической глюкозы.

Одним из наиболее эффективных методов обеспечения долгосрочной стабильности различных фармацевтических и пищевых продуктов признана лиофилизация, или сублимационная сушка [55]. Лيوфилизация — это метод дегидратации (высушивания) в пищевой, химической, фармацевтической и биотехнологической отраслях. Используется для консервирования пищевых продуктов, фармацевтических препаратов и широкого спектра других продуктов. Этот процесс требует времени и различных условий замораживания и сушки. Обзор дает четкое представление о каждом этапе сублимационной сушки, а также о достоинствах, недостатках и ограничениях этого процесса.

Нарушение стабильности в молекулах глюкозы вызывает ионизирующее излучение. В исследованиях украинских ученых рассматривались спектры фотолюминесценции и изменения, происходящие в молекулах глюкозы под действием фотонов [56]. Описаны методика измерений и результаты, полученные с помощью оптической спектроскопии при возбуждении молекул глюкозы фотонами. Впервые были изучены спектры фотолюминесценции глюкозы в диапазоне длин волн 400–700 нм при возбуждении фотонами различной энергии 3,26–4,51 eV. В спектрах люминесценции были обнаружены особенности (интенсивность излучения, положение максимумов), указывающие на возбуждение гидроксильного радикала OH и карбонильной группы COH в виде фрагментов молекулы глюкозы при воздействии фотонов. Были измерены спектры рентгеновской дифракции, которые подтвердили наличие гидрата глюкозы в исследуемых образцах и определенные структурные изменения после взаимодействия с фотонами. Показано, что фотонное облучение приводит к модификации молекулярных кристаллов глюкозы как на макро-, так и на микроуровне. Исследования моносахаридов с помощью фотонного воздействия дает обширную информацию об их уникальных свойствах, позволяет определить степень модификации кристаллической структуры и оценить параметры межмолекулярных связей. Такие исследования особенно важны для понимания процессов, происходящих при радиационном повреждении биологических систем.

5. Заключение

Глюкоза, обладая полифункциональными свойствами, широко используется в здравоохранении, фармацевтической и пищевой промышленности, в ветеринарии.

Рынок глюкозы на мировом уровне является высококонкурентным и активно развивающимся. Объем рынка глюкозы до 2034 года будет стремительно расти и достигнет \$9,2 млрд благодаря увеличению спроса в кондитерской промышленности, расширению производства функциональных продуктов питания и напитков, а также за счет роста использования глюкозы в производстве кормов для животных и фармацевтике.

Установлена природа повышенной растворимости β -глюкозы, что является ее преимуществом в инстантных продуктах. При определении коэффициентов скорости мутаротации циклических конформаций α -D-глюкозы и β -D-глюкозы установлено, что механизм переноса протона между кислородом альдегида и соседней гидроксильной группой происходит с участием молекул воды.

В ходе исследований метаболизма глюкозы выявлена ранее неизвестная способность нейронов головного мозга к самостоятельному гликолизу для собственного обеспечения энергией. Исследования глостатической теории ожирения показали, что резкие отклонения уровня глюкозы в крови от нормы (> или <) в период гипогликемии вызывают избыточное потребление пищи, избыточный вес и нарушение толерантности к глюкозе. Открыт рецептор сладости и исследован механизм влияния сладости на избыточное потребление пищи и здоровье человека. Особенно вредное влияние при этом оказывают фруктоза и искусственные подсластители.

Новые данные о физико-химических свойствах глюкозы по мутаротации, растворимости, кристаллизации, сладости, гигроскопичности, стабильности и их практическому использованию способствуют дальнейшему развитию глюкозного производства и сопредельных с ней сфер ее применения. Представляются перспективными актуальные направления: получение новых кристал-

лических форм, расширение производства ангидридной глюкозы, создание технологий распылительной сушки и лиофилизации, создание и внедрение новых продуктов со-кристаллизации глюкозы с другими веществами для расширения сфер использования в пищевой и фармацевтической промышленности, здравоохранении, ветеринарии и др.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Singh, P. (2021). Glucose: A review. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 2(12), 431–451.
- Толмачева Е. А. (2018). Справочник Видаль Ветеринар 2019. Лекарственные средства для ветеринарного применения в России. М.: АстраФармСервис, 2018. [Tolmacheva, E. A. (2018). Reference book Bidal Veterinar 2019. Medicines for veterinary use in Russia. Moscow: AstraFarmServis, 2018. (In Russian)]
- Хребтова, А. Ю., Быков, Е. В., Кузин, А. И., Камерер, О. В. (2022). Методологические подходы гликемического контроля в практике спорта по данным непрерывного мониторингирования глюкозы. *Российский журнал спортивной науки: медицина, физиология, тренировки*, 1(1(1)), Статья 8. [Khrebtova, A. Yu., Bykov, E. V., Kuzin, A. I., Kamerer, O. V. (2022). Methodological approaches of glyemic control in sports practice based on continuous glucose monitoring data. *Russian Journal of Sports Science: Medicine, Physiology, Training*, 2022, 1(1(1)), Article 8. (In Russian)] https://doi.org/10.51871/2782-6570_2022_01_01_8
- Business Research Company (2025). Dextrose Global Market Report 2025. Retrieved from <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/dextrose-global-market-report> Accessed March 17, 2025.
- Global Info Research. (2024). Global Dextrose Monohydrate Supply, Demand and Key Producers, 2024–2030. Retrieved from <https://www.globalinfosearch.com/reports/2227730/dextrose-monohydrate> Accessed March 12, 2025.
- DISCOVERY Research Group (2021). Анализ рынка глюкозы в России (с базой импорта-экспорта) (Демо версия). Электронный ресурс <https://drgroup.ru/Analiz-rynka-glyukozy-v-Rossii.html> Дата доступа 12.03.2025. [DISCOVERY Research Group (2021). Analysis of glucose market in Russia (with the base of import-export) (Demo version). Retrieved from <https://drgroup.ru/Analiz-rynka-glyukozy-v-Rossii.html> Accessed March 12, 2025. (In Russian)]
- Лысиков, Ю. А. (2013). Углеводы в клиническом питании. *Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология*, 2, 089–110. [Lysikov Yu. A. (2013). Carbohydrates in clinical nutrition. *Experimental and Clinical Gastroenterology Journal*, 2, 089–110. (In Russian)]
- Chaput, J.-P., Tremblay, A. (2009). The glucostatic theory of appetite control and the risk of obesity and diabetes. *International Journal of Obesity*, 35(1), 46–53. <https://doi.org/10.1038/ijo.2008.221>
- Hsu, G. C. (2022). Viscoelastic or Viscoplastic glucose theory (VGT #67): A study of postprandial plasma glucose versus carbohydrates and sugar intake grams and daily walking steps using a customized software program and VGT energy tool from physics and engineering based on GH-method: Math-physical medicine (No. 657). *Journal of Applied Material Science and Engineering Research*, 6(2), 01–06.
- Maity, D., Guha Ray, P., Buchmann, P., Mansouri, M., Fussenegeer, M. (2023). Blood-glucose-powered metabolic fuel cell for self-sufficient bioelectronics. *Advanced Materials*, 35(21), Article 2300890. <https://doi.org/10.1002/adma.202300890>
- Geidl-Flueck, B., Hochuli, M., Németh, Á., Eberl, A., Derron, N., Köfeler, H. C. et al. (2021). Fructose- and sucrose- but not glucose-sweetened beverages promote hepatic de novo lipogenesis: A randomized controlled trial. *Journal of Hepatology*, 75(1), 46–54.
- Williams, S. C. R. (2023). Sugar rush: Scientists discover key role of glucose in brain activity. Retrieved from <https://gladstone.org/news/sugar-rush-scientists-discover-key-role-glucose-brain-activity> Accessed April 16, 2025.
- Li, H., Guglielmetti, C., Sei, Y. J., Zilberter, M., Le Page, L. M., Shields, L. et al. (2023). Neurons require glucose uptake and glycolysis in vivo. *Cell Reports*, 42(4), Article 112335. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2023.112335>
- Хворова Л. С. (2013). Научно-практические основы получения кристаллической глюкозы. М.: Россельхозакадемия, 2013. [Khvorova, L. S. (2013). Scientific practical foundations of production of crystalline glucose. Moscow: Russian Academy of Agricultural Sciences, 2013. (In Russian)]
- Pan, S. (2024). Mutarotation — Definition, Mechanism, Measurement, Example. Retrieved from <https://biologynotesonline.com/mutarotation/> Accessed March 12, 2025.
- Silva, A. M., da Silva, E. C., da Silva, C. O. (2006). A theoretical study of glucose mutarotation in aqueous solution. *Carbohydrate Research*, 341(8), 1029–1040. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2006.02.035>
- Hossain, M., Chowdhury, N., Atahar, A., Susan, Md. A. B. H. (2023). Water structure modification by D-(+)-glucose at different concentrations and temperatures-effect of mutarotation. *RSC Advances*, 13(28), 19195–19206. <https://doi.org/10.1039/d3ra03081d>
- Srisa-nga, S., Flood, A., White, E. T. (September 7–9, 2005). *Analysis of effect of mutarotation reaction on the crystallization of alpha-glucose monohydrate*. Processing of the 12th International Workshop on Industrial Crystallization. Martin-Luther-University Halle – Wittenberg, 2005.
- Перельгин, В. М., Крыльский, Д. В., Гулюк, Н. Г. (1991). Влияние мутаротации на кинетику массовой кристаллизации глюкозы. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 4–6(203–205), 36–39. [Perelygin, V. M., Krylskiy, D. V., Gulyuk, N. G. (1991). Effect of mutarotation on kinetics of mass crystallization of glucose. *Izvestiya VUZOV. Food Technology*, 4–6(203–205), 36–39. (In Russian)]
- Le Barc'h, N., Gossel, J. M., Looten, P., Mathlouthi, M. (2001). Kinetic study of the mutarotation of d-glucose in concentrated aqueous solution by gas-liquid chromatography. *Food Chemistry*, 74(1), 119–124. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(01\)00139-X](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00139-X)
- Ramesh, P., Kritikos, A., Tsilomelekis, G. (2019). Effect of metal chlorides on glucose mutarotation and possible implications on humin formation. *Reaction Chemistry and Engineering*, 4(2), 273–277.
- Li, Z., Luo, Y., Wang, X., Jiang, Z., Xu, S., Hu, C. (2020). The effect of sodium chloride concentration on the mutarotation and structure of d-xylose in water: Experimental and theoretical investigation. *Carbohydrate Research*, 489, Article 107941. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.107941>
- Шипунов, В. П., Рябых, А. В. (2019). Влияние высокочастотного электромагнитного поля на мутаротацию водных растворов глюкозы и фруктозы. *Химия растительного сырья*, 3, 235–240. [Shipunov, B. P., Ryabykh, A. V. (2019). Effect of high-frequency electromagnetic field on the mutarotation of aqueous solutions of glucose and fructose. *Chemistry of Plant Raw Material*, 3, 235–240. (In Russian)] <https://doi.org/10.14258/jcpr.2019034456s>
- Хворова, Л. С. (2019). Особенности технологии получения кристаллической бета-глюкозы. *Пищевая промышленность*, 6, 54–57. [Khvorova, L. S. (2019). Features of technology for crystalline beta-glucose. *Food Industry*, 6, 54–57. (In Russian)] <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10089>
- Bakó, I., Pusztai, L., Pothoczki, S. (2024). Outstanding properties of the hydration shell around β-d-glucose: A computational study. *ACS Omega*, 9(18), 20331–20337. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00798>
- Андреев, Н. Р., Хворова, Л. С., Золотухина, Н. И. (2010). Кинетика зародышеобразования при изотермической кристаллизации ангидридной глюкозы. *Сахар*, 12, 55–58. [Andreev, N. R., Khvorova, L. S., Zolotukhina, N. I. (2010). Kinetics of nucleation during isothermal crystallization of anhydride glucose. *Sugar*, 12, 55–58. (In Russian)]
- Flood, A. E., Srisanga, S. (2012). An improved model of the seeded batch crystallization of glucose monohydrate from aqueous solutions. *Journal of Food Engineering*, 109(2), 209–217. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.09.035>
- Jit, T., Shil, D., Kumari Dasgupta, R., Mallick, S., Mukherjee, S. (2023). Cocrysal: A review on the design and preparation of pharmaceutical cocrystals. *Asian Journal of Research in Pharmaceutical Sciences*, 13(4), 296–302. <https://doi.org/10.52711/2231-5659.2023.00050>
- Хворова, Л. С. (2021). Кристаллическая субстанция глюкозы с хлоридом натрия, физико-химические свойства. *Достижения науки и техники АПК*, 35(8), 51–56. [Khvorova, L. S. (2021). Physico-chemical properties of the crystalline substance of glucose with sodium chloride. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*, 35(8), 51–56. (In Russian)] https://doi.org/10.53859/02352451_2021_35_8_51
- Kang, X.-Y., Chang, Y.-D., Wang, J.-D., Yang, L.-M., Xu, Y.-Z., Zhao, G.-Z. et al. (2020). Sugar-metal ion interaction: Crystal structure and spectroscopic study of potassium chloride complex with d-glucose, KCl·2C₆H₁₂O₆. *Journal of Molecular Structure*, 1206, Article 127671. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127671>
- López-Córdoba, A., Navarro, A. (2018). Physicochemical properties and stability of sucrose/glucose agglomerates obtained by cocrystallization. *Journal Food Process Engineering*, 41(8), Article e12901. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12901>
- Bhandari, B. R., Hartel, R. W. (2006). Co-crystallization of sucrose at high concentration in the presence of glucose and fructose. *Food Science*, 67(5), 1797–1802. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb08725.x>
- Von Molitor, E., Riedel, K., Krohn, M., Hafner, M., Rudolf, R., Cesetti, T. (2021). Sweet taste is complex: Signaling cascades and circuits involved in sweet sensation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, Article 667709. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.667709>
- Kresser, C. (2019). Here's the research on sugar and health. Retrieved from <https://chriskresser.com/heres-the-research-on-sugar-and-health/> Accessed April 18, 2025.
- Gangwisch, J. E., Hale L., St-Onge, M.-P., Choi L., LeBlanc, E. S., Malaspina, D. et al. (2020). High glycemic index and glycemic load diets as risk factors for insomnia: Analyses from the Women's Health Initiative. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 111(2), 429–439. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqz275>
- Aghaee, B., Moradi, F., Soleimani, D., Moradinazar, M., Khosravi, T., Samadi, M. (2023). Glycemic index, glycemic load, dietary inflammatory index, and risk of infertility in women. *Food Science and Nutrition*, 11(10), 6413–6424. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3584>
- Higginbotham, S., Zhang, Z.-F., Lee, I.-M., Cook, N. R., Giovannucci, E., Buring, J. E. et al. (2004). Dietary glycemic load and risk of colorectal cancer in the women's health study. *Journal of the National Cancer Institute*, 96(3), 229–233. <https://doi.org/10.1093/jnci/djh020>
- Дехисси, Е. И., Станоевич, У. С., Гребёнкин, Е. Н., Чкиквдзе, В. Д. (2013). Патогенетические особенности колоректального рака на фоне нарушений жирового и углеводного обмена. *Вестник российского научного центра рентгенодиагностики*, 13–2, Статья 5. [Dehissi, E. I., Stanoevich, U. S., Grebyonkin, E. N., Chkhikvadze, V. D. (2013). The pathophysiologic characteristics of colorectal cancer in association with the lipid and carbohydrate metabolism disorders. *Vestnik of the Russian Scientific Center of Roentgenoradiology*, 13–2, Article 5. (In Russian)]
- Laffitte, A., Neiers, F., Briand, L. (2014). Functional roles of the sweet taste receptor in oral and extraoral tissues. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 17(4), 379–385. <https://doi.org/10.1097/mco.0000000000000058>

40. DiNicolantonio, J. J., O'Keefe, J. H., Wilson, W. L. (2018). Sugar addiction: Is it real? A narrative review. *British Journal of Sports Medicine*, 52(14), 910–913. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-097971>
41. May, C. E., Rosander, J., Gottfried, J., Dennis, E., Dus, M. (2020). Dietary sugar inhibits satiation by decreasing the central processing of sweet taste. *ELife*, 16(9), Article e54530. <https://doi.org/10.7554/eLife.54530>
42. Carvalho, C., de Souza, M., Arbex, N., Sá, D., de Souza Rodrigues, L., de Sá, D. et al. (2018). The role of fructose in public health and obesity. *Health*, 10(04), 434–441. <https://doi.org/10.4236/health.2018.104035>
43. Wilk, K., Korytek, W., Pelczyńska, M., Moszak, M., Bogdański, P. (2022). The effect of artificial sweeteners use on sweet taste perception and weight loss efficacy: A review. *Nutrients*, 14(6), Article 1261. <https://doi.org/10.3390/nu14061261>
44. Pang, M. D., Goossens, G. H., Blaak, E. E. (2021). The impact of artificial sweeteners on body weight control and glucose homeostasis. *Frontiers in Nutrition*, 7, Article 598340. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.598340>
45. Sorrentino, Z. A., Smith, G., Palm, L., Motwani, K., Butterfield, J., Archer, C. et al. (2020). An erythritol-sweetened beverage induces satiety and suppresses ghrelin compared to aspartame in healthy non-obese subjects: A pilot study. *Cureus*, 12(11), Article e11409. <https://doi.org/10.7759/cureus.11409>
46. Cabral, T. M., Pereira, M. G. B., Falchione, A. E. Z., Sá, D. A. R. de, Correa, L., Fernandes, D. da M. et al. (2018). Artificial sweeteners as a cause of obesity: Weight gain mechanisms and current evidence. *Health*, 10, 700–717. <https://doi.org/10.4236/health.2018.105054>
47. Carter, J., Jeukendrup, A. E., Jones, D. A. (2005). The effect of sweetness on the efficacy of carbohydrate supplementation during exercise in the heat. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 30(4), 379–391. <https://doi.org/10.1139/h05-128>
48. Rhys, N. H., Bruni, F., Imberti, S., McLain, S. E., Ricci, M. A. (2017). Glucose and mannose: A link between hydration and sweetness. *The Journal of Physical Chemistry B*, 121(33), 7771–7776. <https://doi.org/10.1021/acs.jpbc.7b03919>
49. Anbarasan, A., Nataraj, J., Shanmukhan, N., Radhakrishnan, A. (2018). Effect of hygroscopicity on pharmaceutical ingredients, methods to determine and overcome: An overview. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 10(3), 61–67.
50. Scholl, S. K., Schmidt, S. J. (2014). Determining the mechanism and parameters of hydrate formation and loss in glucose. *Journal of Food Science*, 79(11), E2232–E2244. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12671>
51. Хворова, Л. С. (2020). Виды кристаллической глюкозы для получения растворов и таблетированных форм. *Фармация*, 69(5), 24–29. [Khvorova, L. S. (2020). Types of crystalline glucose for the preparation of solutions and tablet dosage forms. *Farmatsiya*, 69(5), 24–29. (In Russian)] <https://doi.org/10.29296/25419218-2020-05-04>
52. Ng, L. H., Ling, J. K. U., Hadinoto, K. (2022). Formulation strategies to improve the stability and handling of oral solid dosage forms of highly hygroscopic pharmaceuticals and nutraceuticals. *Pharmaceutics*, 14(10), Article 2015. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14102015>
53. Dhondale, M. R., Thakor, P., Nambiar, A. G., Singh, M., Agrawal, A. K., Shastri, N. R. et al. (2023). Co-crystallization approach to enhance the stability of moisture-sensitive drugs. *Pharmaceutics*, 15(1), Article 189. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15010189>
54. Záhonyi, P., Szabó, E., Domokos, A., Haraszti, A., Gyürkés, M., Moharos, E. et al. (2022). Continuous integrated production of glucose granules with enhanced flowability and tabletability. *International Journal of Pharmaceutics*, 626, Article 122197. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2022.122197>
55. Tajir, H., Parab, I. (2022). Theory and practice of freeze drying in pharmaceuticals. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Research*, 25(3), 225–240.
56. Bandurin, Y. A., Zaviropulo, A. N., Popik, T. Yu., Molnar, Sh. B., Solomon, A. M., Bulhakova, A. I. (2023). Fluorescence excitation spectroscopy of glucose molecules. *Journal of Physics and Optics Sciences*, 5(1), 1–7. [https://doi.org/10.47363/JPSOS/2023\(5\)177](https://doi.org/10.47363/JPSOS/2023(5)177)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Хворова Людмила Степановна — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией технологии глюкозы, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья — филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха 140051, Московская область, Люберцы, п. Красково, ул. Некрасова, 11 E-mail: dektrosa@rambler.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2441-4681 Андреев Николай Руфеевич — доктор технических наук, член-корреспондент РАН, научный руководитель, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья — филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха 140051, Московская область, Люберцы, п. Красково, ул. Некрасова, 11 E-mail: andreev@arrisp.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8312-8135 * автор для контактов Бызов Василий Аркадьевич — кандидат сельскохозяйственных наук, директор, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья — филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха 140051, Московская область, Люберцы, п. Красково, ул. Некрасова, 11 E-mail: byzov1966@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1918-4455	Ludmila S. Khvorova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Head of Laboratory of Glucose, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre 11, Nekrasov str., 140051, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russia E-mail: dektrosa@rambler.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2441-4681 Nikolay R Andreev, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Scientific Supervisor, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre 11, Nekrasov Str., 140051, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russia E-mail: andreev@arrisp.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8312-8135 * corresponding author Vasily A Byzov, Candidate of Agricultural Sciences, Director, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre 11, Nekrasov Str., 140051, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russia E-mail: byzov1966@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7288-8569
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.