

Куланова Дарья Владимировна

студентка

ФГБОУ ВО «Чувашский государственный
университет им. И.Н. Ульянова»

г. Чебоксары, Чувашская Республика

Полтаева Дарья Михайловна

студентка

ФГБОУ ВО «Чувашский государственный
университет им. И.Н. Ульянова»

г. Чебоксары, Чувашская Республика

Фролова Мария Александровна

канд. хим. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Чувашский государственный
университет им. И.Н. Ульянова»

г. Чебоксары, Чувашская Республика

Санёрова Елена Владимировна

канд. биол. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Чувашский государственный
педагогический университет им. И.Я. Яковлева»

г. Чебоксары, Чувашская Республика

Добросмыслов Светослав Анатольевич

учащийся

МАОУ «СОШ №3»

г. Канаш, Чувашская Республика

Журавлев Анатолий Петрович

магистрант

ФГБОУ ВО «Чувашский государственный
аграрный университет»

г. Чебоксары, Чувашская Республика

DOI 10.31483/r-168453

ФИЗИКО-БИОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ВОДЫ И ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ САХАРОЗЫ

Аннотация: в статье представлены результаты сравнительного анализа влияния концентрации сахарозы ($C_{12}H_{22}O_{11}$) на плотность водных растворов с углублённой интерпретацией данных в терминах биохимии и физической химии. Изысканием исследования являлась оценка зависимости плотности раствора от массовой доли растворённого вещества с учётом механизмов гидратации, перестройки водородной сети воды и осмотических эффектов. Экспериментально подтверждена прямая корреляция между концентрацией сахарозы и плотностью раствора, обусловленная встраиванием полярных гидроксильных групп сахарозы в водную матрицу и формированием гидратных оболочек. Наибольший прирост плотности зафиксирован при массовой доле сахарозы 44,4% ($1,280 \text{ г/см}^3$), что согласуется с выдвинутой гипотезой и отражает уплотнение структуры раствора за счёт межмолекулярных взаимодействий. Полученные данные позволяют обосновать применение ареометрического метода для экспресс-оценки концентрации углеводов в технологических и биохимических системах, а также интерпретировать результаты с позиций водно-солевого гомеостаза и осморегуляции [1–3; 5; 8].

Ключевые слова: вода, сахароза, плотность раствора, концентрация, гидратация, водородные связи, осмотическое давление, биохимические взаимодействия, ареометрический метод, гидратная оболочка.

Вода – ключевой компонент живых систем, определяющий структурную организацию биомолекул, кинетику ферментативных реакций и поддержание осмотического равновесия. Её уникальные свойства обусловлены полярностью молекулы H_2O и способностью образовывать динамическую сеть водородных связей: каждая молекула воды способна участвовать в формировании до четырёх водородных связей, создавая лабильную, но плотную структурную матрицу. В организме человека вода распределена по компартментам: около 60% массы тела приходится на воду, из которых примерно $2/3$ – внутриклеточная жидкость,

примерно $1/3$ – внеклеточная (включая плазму крови и интерстициальную жидкость). Регуляция объёма и осмоляльности этих компартментов осуществляется через сложные механизмы осморегуляции, в которых существенную роль играют растворённые вещества – электролиты и неэлектролиты (в том числе углеводы) [9].

С биохимической точки зрения добавление сахарозы в воду меняет не только физические параметры среды, но и её функциональную роль в биологических системах. Сахароза – полярный неэлектролит и дисахарид, состоящий из глюкозы и фруктозы, соединённых α -1,2-гликозидной связью. Наличие множества гидроксильных (-ОН) групп делает молекулу сахарозы высоко гидрофильной: эти группы способны образовывать водородные связи с молекулами воды, формируя гидратную оболочку. В результате происходит локальное упорядочивание водной матрицы и уплотнение раствора, что проявляется в увеличении его плотности [5; 8].

Актуальность исследования определяется необходимостью понимания фундаментальных принципов взаимодействия воды с биомолекулами и разработки простых методов контроля концентрации растворённых веществ. В биохимии и клинической лабораторной диагностике важно быстро оценивать содержание углеводов в растворах – это востребовано в пищевой промышленности (контроль сиропов, напитков), в биотехнологиях (подбор сред для культивирования клеток) и в медицине (оценка осмолярности инфузионных растворов). Ареометрический метод даёт возможность экспресс-анализа без сложного оборудования, опираясь на установленную зависимость «плотность – концентрация» [1; 2; 4; 6].

Цель работы: сравнительный анализ зависимости плотности водных растворов от концентрации сахарозы с интерпретацией результатов в терминах биохимических взаимодействий (гидратация, водородные связи, осмотические эффекты) и оценкой практической применимости установленной корреляции для биохимических и технологических задач.

Задачи работы.

1. Проанализировать научную литературу по физико-химическим и биохимическим свойствам воды, механизмам гидратации полярных молекул, особенностям поведения сахарозы в водных растворах, а также по методам контроля концентрации веществ в биологических и технологических системах.

2. Определить ключевые параметры (массовая доля, температура, чистота реактивов), влияющие на плотность раствора, и обосновать выбор ареометрического метода как оптимального для экспресс-анализа с учётом биохимической интерпретации результатов.

3. Провести эмпирическое исследование: приготовить серию водных растворов сахарозы с варьируемой концентрацией, измерить их плотность при постоянной температуре, зафиксировать количественные показатели, оценить воспроизводимость результатов и сопоставить их с биохимическими представлениями о гидратации сахарозы [3].

4. Сформулировать практические рекомендации по использованию зависимости «плотность – концентрация» для контроля содержания сахарозы в различных средах, включая биохимические и медицинские приложения [1; 2; 4].

Эксперимент выполнен на базе лаборатории Чувашского государственного университета имени И. Н. Ульянова. Объектом исследования служили водные растворы сахарозы ($C_{12}H_{22}O_{11}$) с различной массовой долей растворённого вещества. Для минимизации внешних влияний все процедуры проводились в стандартизированных условиях: постоянная температура 20 °С, дистиллированная вода, аналитические весы для точного дозирования, калиброванный ареометр для измерения плотности.

Методы исследования.

Гравиметрическое приготовление растворов: навески сахарозы взвешивали на аналитических весах, растворяли в дистиллированной воде и доводили объём до заданного значения.

Ареометрический метод определения плотности: плотность растворов измеряли при 20 °С с использованием калиброванного ареометра, что позволило исключить влияние термического расширения на результаты.

Расчёт массовой доли сахарозы: концентрацию выражали в процентах по массе, что обеспечило сопоставимость данных и возможность построения зависимости «плотность – концентрация».

Оценка цветности воды как показателя качества среды: для исключения влияния примесей на физико-химические свойства растворов проводили визуальное сравнение пробы с дистиллированной водой в пробирках из бесцветного стекла на фоне белой бумаги при дневном освещении.

Дизайн исследования предусматривал последовательное приготовление и анализ пяти растворов с возрастающей концентрацией сахарозы, что позволило построить градуировочную зависимость и оценить характер изменения плотности в исследуемом диапазоне.

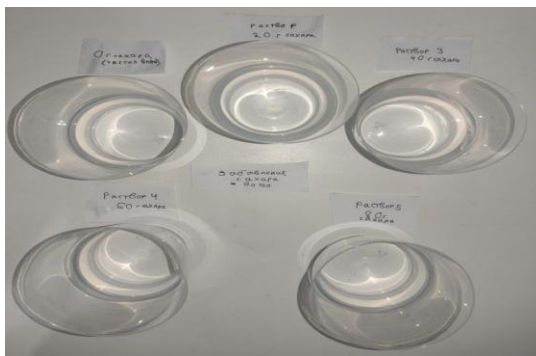


Рис. 1. Экспериментальные образцы до внесения растворимого вещества

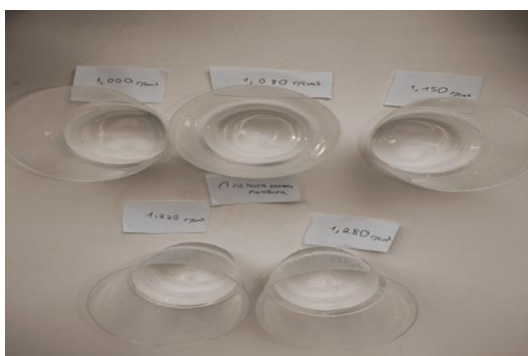


Рис. 2. Экспериментальные образцы
после внесения растворимого вещества

Расчёт относительного прироста плотности проводили по формуле:

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{\text{опыт}} - \rho_{\text{контроль}}}{\rho_{\text{контроль}}} \times 100\%,$$

где, $\rho_{\text{контроль}}$ – плотность контрольного образца (дистиллированная вода),

$\rho_{\text{опыт}}$ – плотность раствора с сахарозой.

Дополнительно рассчитывали ориентировочную осмоляльность растворов, исходя из молярной массы сахарозы равной 342,3 г/моль и количества растворённого вещества, что позволило соотнести изменения плотности с потенциальным осмотическим эффектом [1; 2; 5; 8].

Эксперимент 1 («Оценка плотности раствора с массовой долей сахарозы 16,7%») показал увеличение плотности до 1,080 г/см³, что соответствует приросту на 8% относительно контроля (1,000 г/см³). Биохимически это объясняется формированием гидратной оболочки вокруг молекулы сахарозы: каждая гидроксильная группа способна удерживать несколько молекул воды за счёт водородных связей, что уплотняет структуру раствора [3; 5].

Эксперимент 2 («Оценка плотности раствора с массовой долей сахарозы 28,6%») выявил дальнейшее увеличение плотности до 1,150 г/см³ (прирост 15%). При этом рост плотности оставался пропорциональным увеличению концентрации, что свидетельствует о сохранении линейности зависимости в данном диапазоне и об отсутствии насыщения гидратационных процессов.

Эксперимент 3 («Оценка плотности раствора с массовой долей сахарозы 37,5%») продемонстрировал плотность 1,220 г/см³ (прирост 22%). Визуально раствор оставался прозрачным, без признаков насыщения или выпадения осадка, что подтверждает растворимость сахарозы в исследованном интервале концентраций и сохранение динамической структуры водородной сети.

Эксперимент 4 («Оценка плотности раствора с массовой долей сахарозы 44,4%») зафиксировал максимальную в рамках исследования плотность – 1,280 г/см³ (прирост 28%). Дальнейшее увеличение концентрации не проводилось, поскольку в прикладных задачах такие высокие значения встречаются редко, а риск кристаллизации сахарозы возрастает [4].

Оценка цветности воды подтвердила отсутствие значимых примесей: проба не имела видимой окраски и соответствовала нормативам (цветность менее 35 градусов по платиново-кобальтовой шкале). Это позволило исключить влия-

ние посторонних факторов на результаты измерений плотности. Результаты экспериментов систематизированы в таблице 1.

Таблица 1

*Зависимость плотности водных растворов сахарозы
от массовой доли растворённого вещества*

№ раствора	Масса сахарозы, г	Масса воды, г	Массовая доля сахарозы, %	Плотность, г/см ³	Прирост плотности, %	Ориентировочная осмоляльность, МОсм/кг
1 контроль	0	100	0	1,000	0	0
2	20	100	16,7	1,080	8	~485
3	40	100	28,6	1,150	15	~830
4	60	100	37,5	1,220	22	~1 080
5	80	100	44,4	1,280	28	~1 270

Примечание. Все измерения выполнены при температуре 20 °С; осмоляльность рассчитана ориентировочно на основе молярной массы сахарозы 342,3 г/моль.

Полученные данные позволяют интерпретировать рост плотности не только как физико-химический эффект, но и как следствие биохимических взаимодействий в системе «вода – сахароза».

Гидратация и водородные связи. Молекула сахарозы содержит восемь гидроксильных групп, каждая из которых способна участвовать в образовании водородных связей с молекулами воды. В результате вокруг молекулы формируется гидратная оболочка, которая упорядочивает локальную структуру воды и уплотняет раствор. Это проявляется в увеличении плотности при росте концентрации сахарозы. При этом объём раствора меняется незначительно, а масса возрастает пропорционально количеству добавленной сахарозы – отсюда и рост плотности.

Перестройка водородной сети. Добавление сахарозы нарушает исходную динамическую структуру водородной сети воды: молекулы воды «перераспределяются» вокруг полярных групп сахарозы, формируя более упорядоченные локальные кластеры. Этот процесс энергетически выгоден и лежит в основе термодинамической стабильности растворов сахарозы.

Осмотические эффекты. Сахароза, будучи неэлектролитом, вносит вклад в осмоляльность раствора: каждая молекула сахарозы создаёт одну осмотическую частицу. Ориентировочные значения осмоляльности, приведённые в таблице 1, показывают, что даже при умеренных концентрациях растворы могут оказывать заметное осмотическое действие. Например, раствор с массовой долей 37,5% имеет осмоляльность порядка 1 080 мОсм/кг, что существенно выше физиологических значений (около 280–300 мОсм/кг для плазмы крови) [8; 9]. Это важно учитывать при использовании подобных растворов в биохимических и медицинских приложениях.

Биологическая значимость. В живых системах осмотическое равновесие строго регулируется: избыток растворённых веществ может приводить к дегидратации клеток или, наоборот, к их набуханию. Понимание того, как концентрация сахарозы влияет на плотность и осмоляльность среды, позволяет прогнозировать поведение клеток в таких растворах и подбирать оптимальные условия для биохимических экспериментов и культивирования тканей [1; 2; 9].

Анализ результатов позволяет сделать вывод о наличии выраженной зависимости плотности водных растворов от концентрации сахарозы. Все исследованные растворы продемонстрировали монотонный рост плотности с увеличением массовой доли растворённого вещества, при этом зависимость носила близкий к линейному характер в диапазоне 0–44,4% [3; 4; 7]. Ранжирование по степени увеличения плотности:

Раствор 1 (0%) < Раствор 2 (16,7%) < Раствор 3 (28,6%) < Раствор 4 (37,5%) < Раствор 5 (44,4%).

Выявленные закономерности согласуются с биохимическими представлениями о гидратации сахарозы: полярные гидроксильные группы молекулы активно взаимодействуют с водой, формируя водородные связи и уплотняя структуру раствора. При этом объём системы меняется незначительно, а масса растёт пропорционально количеству добавленной сахарозы, что и определяет увеличение плотности.

Сопоставление плотности и ориентировочной осмоляльности показывает, что рост концентрации сахарозы приводит не только к увеличению плотности, но и к существенному повышению осмотического потенциала раствора. Это имеет значение для биохимических приложений: растворы с высокой концентрацией сахарозы могут использоваться для создания контролируемых осмотических условий, например, при изучении плазмолиза растительных клеток или при стабилизации белков.

Проведённое исследование наглядно демонстрирует, как добавление сахарозы изменяет физико-химические и биохимические параметры водной среды, прежде всего её плотность и осмотический потенциал. Установленная зависимость «плотность – концентрация» представляет собой простой и надёжный способ оценки содержания сахарозы без применения сложного оборудования. Это имеет практическое значение для пищевой промышленности, биохимических исследований и лабораторной диагностики, где требуется оперативный контроль концентрации углеводов [4; 6; 7]. Перспективным направлением дальнейших исследований является расширение диапазона изучаемых сахаров и олигосахаридов, оценка влияния температуры на плотность растворов, а также прямое измерение осмоляльности для построения более точных калибровочных моделей.

Список литературы

1. Влияние агрономической биофортификации на биохимические показатели гороха / И.А. Добросмыслова, Т.Г. Константинова, Ю.Р. Максимова, А.П. Журавлёв // Вестник Чувашского государственного аграрного университета. – 2024. – №1 (28). – С. 18–23. – EDN: RMLRHY. – DOI: 10.48612/vch/4pbu-pzat-xfbt. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65506793> (дата обращения: 05.07.2026).

2. Журавлёв А.П. Оценка качества мягкого сыра «Студенческий» с красным перцем / А.П. Журавлёв, М.Г. Терентьева // Научно-образовательные и прикладные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции: сборник материалов Международной научно-практической конференции,

посвящённой 95-летию со дня рождения А. И. Кузнецова (1930–2015). – Чебоксары, 2025. – С. 307–312. – EDN RVXPYP. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=88771407> (дата обращения: 05.07.2026).

3. Зацепина Г.Н. Физические свойства и структура воды: монография / Г.Н. Зацепина. – М.: Изд-во Московского университета, 2010. – 320 с. – ISBN 978-5-211-05767-1.

4. Зависимость плотности водных растворов от концентрации сахара при нормальном атмосферном давлении и температуре. – URL: <https://base.garant.ru/70651308/c9c989f1e999992b41b30686f0032f7d/> (дата обращения: 05.07.2026).

5. Ленинджер А. Основы биохимии / А. Ленинджер. – В 3 т. – М.: Мир, 1985.

6. Парецкая А. Вода для пользы тела: роль воды в жизнедеятельности человека / А. Парецкая. – URL: <https://zdravcity.ru/blog-o-zdorovie/voda-dlya-polzytelam> (дата обращения: 05.07.2026).

7. Биохимия / Дж.М. Берг, Дж.Л. Тимочко, Г.Дж. Гатто, Л. Страйер; пер. с англ. – 9-е изд. – Нью-Йорк: W.H. Freeman, 2019.

8. Нельсон Д.Л. Принципы биохимии Ленинджера / Д.Л. Нельсон, М.М. Кокс; пер. с англ. – Нью-Йорк: W. H. Freeman, 2017.

9. Тортора Г.Дж. Принципы анатомии и физиологии / Г.Дж. Тортора, Б.Х. Дерриксон; пер. с англ. – 16-е изд. – Хобокен: Wiley, 2020.