

Оптические методы определения связи биофизической константы осмолярности с праметрами водных биологических растворов

Ю.А. Гусева^{1,*}, В.В. Давыдов^{2,†}, Д.С. Проводин^{2,‡}, Д.В. Давыдова^{2,§}

¹Санкт-Петербургский Академический университет,
кафедра биоинформатики и математической биологии
Россия, 194021, Санкт-Петербург, улица Хлопина, дом 8, корпус 3, литер А

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(Поступила в редакцию 10.06.2026; подписана в печать 20.06.2026)

Актуальность ранней диагностики хронической болезни почек (ХБП) обусловлена их высокой распространённостью и бессимптомным течением заболевания на начальных стадиях. Предложен оригинальный метод, основанный на рефрактометрическом измерении показателя преломления мочи, позволяющий количественно оценивать её физико-химические свойства. Установлены новые зависимости между показателем преломления, осмолярностью, плотностью и температурой мочи. Предложенный метод демонстрирует высокую точность (погрешность измерения показателя преломления ± 0.0001 , погрешность измерения температуры $T \pm 0.1$ К в широком диапазоне изменения температур. Разработаны уравнения регрессии: для расчёта осмолярности по плотности и плотности по показателю преломления. Полученные результаты подтверждают возможность применения рефрактометрии в качестве инструмента для экспресс-оценки состояния почек для раннего выявления их поражения без необходимости использования инвазивных процедур и дорогостоящего оборудования.

PACS: 87.19.U-

УДК: 681.7

Ключевые слова: хроническая болезнь почек, поражение на ранней стадии, рефрактометрия, осмолярность, плотность, моча, экспресс-диагностика.

ВВЕДЕНИЕ

Хронические болезни почек (ХБП) представляют собой серьёзную медико-социальную проблему современного здравоохранения [1–4]. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, распространённость ХБП среди взрослого населения достигает 16 и более процентов, причем заболевание характеризуется длительным бессимптомным течением и поздней диагностикой [4–7]. В большинстве случаев патология выявляется лишь на 3–4 стадиях, когда терапевтические возможности лечения существенно ограничены, а лечение требует значительных материальных затрат [7–10]. Такая ситуация обусловлена отсутствием надежных, доступных и простых в использовании методов ранней диагностики, что делает разработку новых подходов к скринингу почечной патологии чрезвычайно актуальной задачей.

Особое значение в диагностике почечных заболеваний имеет определение осмолярности биологических жидкостей. Этот параметр служит важным индикатором функционального состояния почек и водно-электролитного баланса организма [11]. Однако существующие методы определения этого показателя, в частности осмометрия, требуют использования слож-

ного лабораторного оборудования, значительных временных затрат и специальных условий проведения анализа, что ограничивает их применение в рутинной клинической практике [11, 12].

Современные методы экспресс-диагностики состояния почек, применяемые в клинической практике, имеют ряд существенных ограничений. Урометрия, несмотря на свою распространённость, характеризуется значительной погрешностью измерений (± 0.005 г/мл) и выраженной зависимостью результатов от температуры окружающей среды [13, 14]. Кроме того, визуальная оценка положения мениска жидкости в урометре вносит существенный субъективный компонент в процесс измерения. Тест-полоски, хотя и удобны в использовании, обладают ограниченной точностью из-за цветовой интерпретации результатов и высокой чувствительностью к присутствию в моче белка, глюкозы и лекарственных препаратов [15–18]. Важным недостатком является также их ограниченный срок хранения и требовательность к условиям окружающей среды.

Альтернативным решением является рефрактометрия — метод, основанный на измерении показателя преломления мочи. Его преимущества включают простоту, высокую точность и отсутствие необходимости в химических реактивах [19–22]. Однако отсутствие достоверных соотношений между показателем преломления n , плотностью ρ , осмолярностью Os и температурой T ограничивало его применение. В данной работе установлены аналитические зависимости между этими параметрами, что открывает новые возможности для ранней диагностики поражения почек

* julia.gusefi@yandex.ru

† davydov_vadim66@mail.ru

‡ provodindanya@gmail.com

§ dasha_davydova217@mail.ru

1. ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В целях комплексного изучения взаимосвязи между осмолярностью, плотностью и показателем преломления водных биологических растворов был реализован интегрированный подход, сочетающий современные методы оптического анализа и высокоточные лабораторные методы физико-химических измерений [2, 3, 6, 11, 17]. Такой подход позволил не только получить репрезентативные количественные характеристики исследуемых параметров, но и провести их межпараметрическое сопоставление с высокой степенью достоверности. В качестве объектов исследования были использованы образцы мочи. Образцы были отобраны у пациентов, находящихся в различных физиологических состояниях, включая нормогидратацию, дегидратацию, а также состояния, сопровождающиеся нарушением водно-солевого баланса. Такое разнообразие условий позволило охватить широкий спектр значений осмолярности, плотности и показателя преломления, что, в свою очередь, обеспечило высокую вариативность данных и возможность выявления устойчивых закономерностей. Проведение измерений в стандартизованных температурных условиях и использование сертифицированного оборудования позволили свести к минимуму влияние внешних факторов и повысить надежность полученных результатов. В совокупности, это обеспечило возможность установления количественных зависимостей между изучаемыми параметрами и позволило сделать обоснованные выводы о характере их взаимосвязи в контексте изменения физиологического состояния организма.

1.1. Рефрактометрический анализ

Рефрактометрический анализ Измерение показателя преломления биологических жидкостей осуществлялось с использованием стандартного мобильного рефрактометра с точностью измерений 0.0001 [19, 20]. Выбор данного прибора был обусловлен его высокой чувствительностью к изменениям плотности растворов, удобством эксплуатации в условиях лабораторных и полевых исследований, а также возможностью быстрого получения результатов без необходимости проведения сложной пробоподготовки. Рефрактометр позволял проводить экспресс-анализ образцов, что особенно важно при работе с нестабильными или ограниченными по объему биологическими материалами. Все измерения проводились при контролируемых температурных условиях, варьирующихся в диапазоне, соответствующем типичным режимам функционирования медицинского оборудования (288–303 K), что обеспечивало воспроизводимость результатов и их релевантность клинической практике.

1.2. Ультразвуковая плотнометрия



Рис. 1. Измеритель плотности DSA 5000 M

Определение плотности исследуемых водных биологических растворов проводилось с использованием высокоточного ультразвукового плотнометра (рис. 1), сертифицированного для применения в медицинских и клиничко-диагностических лабораториях. Данный прибор обеспечивает высокую точность и воспроизводимость результатов за счёт применения ультразвуковых волн для измерения скорости их распространения в растворе, что позволяет косвенно определить плотность с минимальной зависимостью от внешних факторов. Для обеспечения сопоставимости и корректности полученных данных, измерения проводились при тех же температурных значениях, что и рефрактометрические исследования (288–303 K). Такой подход позволил минимизировать температурные артефакты и обеспечить согласованность параметров, необходимых для последующего анализа взаимосвязей между плотностью, осмолярностью и показателем преломления.

1.3. Осмометрия

Осмолярность исследуемых растворов определялась с использованием осмометра ОСКР-1М, функционирующего на основе криоскопического метода, заключающегося в измерении температуры замерзания раствора по сравнению с чистым растворителем. Криоскопия признана одним из наиболее точных и воспроизводимых методов количественного определения осмолярности, что делает её эталонным подходом в клинической и экспериментальной практике. Несмотря на необходимость соблюдения строгих температурных условий и более длительную подготовку по сравнению с экспресс-методами, данный способ был выбран ввиду его высокой чувствительности и надежности, что особенно важно при исследовании физиологических жидкостей с близкими по значению

характеристиками.

Для анализа взаимосвязей между физико-химическими параметрами растворов были построены экспериментальные графики зависимости плотности от показателя преломления $\rho(n)$ (рис. 2) и осмолярности от плотности $Os(\rho)$ (рис. 3). С использованием метода наименьших квадратов по экспериментальным данным были получены линейные аппроксимационные модели, описывающие установленные зависимости:

$$\rho = 2.4322n - 2.2444 \quad (1)$$

$$Os = 33.128\rho - 33.107 \quad (2)$$

Достоверность полученных аппроксимаций была подтверждена статистической обработкой результатов: рассчитывались коэффициенты корреляции, а также выполнялась оценка значимости регрессионных зависимостей. Для повышения надежности и воспроизводимости экспериментальных данных каждое измерение проводилось в трехкратной повторности, после чего полученные значения усреднялись. Такой подход обеспечил устойчивость результатов к случайным отклонениям и позволил сформировать обоснованные выводы о характере взаимосвязей между осмолярностью, плотностью и показателем преломления водных биологических растворов.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа взаимосвязей между физико-химическими параметрами растворов были построены экспериментальные графики зависимости плотности от показателя преломления (рис. 2) и осмолярности от плотности (рис. 3).

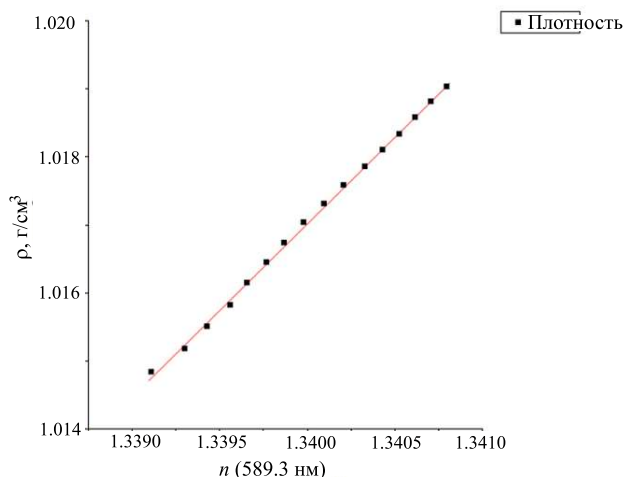


Рис. 2. Зависимость плотности от показателя преломления

С использованием метода наименьших квадратов по экспериментальным данным (рис. 2) была выявлена

линейная корреляция между плотностью и показателем преломления, описываемая уравнением регрессии:

$$\rho = 2.4322n - 2.2444. \quad (3)$$

Высокое значение коэффициента детерминации $R^2 = 0.98$ указывает на высокую степень соответствия экспериментальных данных предложенной модели, что свидетельствует о возможности надежного прогнозирования плотности раствора на основании оптического измерения его показателя преломления.

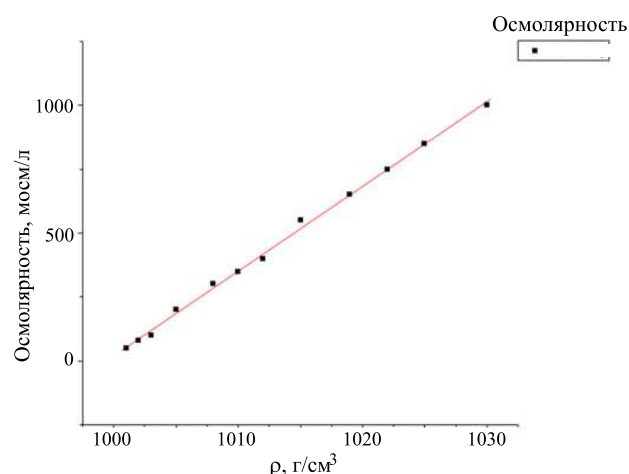


Рис. 3. Зависимость осмолярности от плотности

Аналогично с использованием экспериментальных данных (рис. 3), была установлена линейная зависимость между осмолярностью и плотностью исследуемого раствора: $Os = 33.128\rho - 33.107$.

Полученные результаты подтверждают, что осмолярность может быть косвенно оценена через измерение плотности, а также через показатель преломления, что значительно упрощает процедуру анализа и делает её более доступной в условиях ограниченных лабораторных ресурсов. Достоверность полученных аппроксимаций была подтверждена статистической обработкой результатов: рассчитывались коэффициенты корреляции, а также выполнялась оценка значимости регрессионных зависимостей. Для повышения надежности и воспроизводимости экспериментальных данных каждое измерение проводилось в пятикратной повторяемости, после чего полученные значения усреднялись. Такой подход обеспечил устойчивость результатов к случайным отклонениям и позволил сформировать обоснованные выводы о характере взаимосвязей между осмолярностью, плотностью и показателем преломления водных биологических растворов

2.1. Клиническая значимость полученных результатов и преимущества использования нового подхода к экспресс-диагностики

Выявленные аналитические зависимости между показателем преломления, плотностью и осмолярностью позволяют оптимизировать процесс анализа биологических жидкостей по следующим направлениям:

1. Существенное сокращение времени анализа: традиционная процедура осмометрии занимает 20–30 минут, в то время как измерения с использованием рефрактометра и плотнометра требуют не более 1–2 минут. Это особенно важно при необходимости быстрого клинического реагирования или при массовом скрининге.
2. Простота выполнения измерений: метод не требует сложной пробоподготовки и может быть реализован с помощью компактного портативного оборудования, что расширяет возможности его использования вне стационарных лабораторных условий — например, в условиях амбулаторного наблюдения или полевых исследований.
3. Мониторинг в реальном времени: высокая скорость получения результатов открывает перспективы для непрерывного отслеживания динамики физиологических изменений, что критически важно при ведении пациентов с риском развития или прогрессирования ХБП.

2.2. Ограничения по использованию нового подхода при исследованиях

Предложенный метод имеет определённые ограничения, которые необходимо учитывать при его применении:

1. Необходимость предварительной калибровки: для обеспечения точности и воспроизводимости результатов требуется определенная калибровка под различные типы исследуемых биологических

жидкостей (например, моча, плазма, слюна), что связано с различиями в их химическом составе.

2. Влияние белковых компонентов: наличие и концентрация белков в растворе мочи могут оказывать влияние на показатели преломления и плотности. Этот фактор требует дополнительного изучения и возможной коррекции моделей расчёта, особенно в условиях патологии.
3. Выход при хранении пробы мочи за пределы диапазона температуры T в 303 К может снижать достоверность измерений. Предлагаемый метод не позволяет определить нарушение условий хранения пробы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого исследования экспериментально подтверждена наличие корреляционной взаимосвязи между тремя ключевыми физико-химическими параметрами водных биологических растворов: показателем преломления n , плотностью ρ и осмолярностью Os . Статистическая обработка данных показала, что изменения каждого из этих параметров происходят синхронно и они линейно взаимосвязаны, что позволяет использовать один параметр в качестве прогностического индикатора для оценки другого.

На основе полученных экспериментальных данных были установлены аналитические соотношения, описываемые линейными регрессионными моделями, которые обеспечивают возможность взаимного пересчёта значений между показателем преломления, плотностью и осмолярностью с высокой степенью достоверности. В частности, были получены формулы пересчёта плотности по показателю преломления и осмолярности по плотности, что расширяет прикладные возможности метода в клинической и лабораторной практике.

Полученные результаты также подтверждают принципиальную возможность замещения традиционного метода измерения осмолярности — осмометрии, основанной на криоскопии, более простым и технологически доступным методом рефрактометрии. Это особенно актуально в условиях, требующих высокой скорости анализа, мобильности оборудования, а также при ограниченных ресурсах.

-
- [1] Верлов Н.А., Бурдаков В.С., Иванова Л.А. и др. // Нефрология. **28**, № 2. 85 (2024).
 - [2] Vakorina V.D., Stepanenkov G.V. // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. **17**, N S3.2. 321 (2024).
 - [3] Верлов Н.А., Бурдаков В.С., Кулаков И.А. и др. // Клиническая лабораторная диагностика. **68**, № 12. 728 (2023).
 - [4] Biggeri A., Stoppa G., Facciolo L. et al. // Environmental Health: A Global Access Science Source. **23**, N 1. 42

- (2024)..
- [5] Iakovleva A.V., Verlov N.A., Zaleskiy M.G. et al. // Biophysics (Russian Federation). **68**, N 3. 489 (2023).
- [6] Chen T.K., Knicely D.H., Grams M. . // JAMA - Journal of the American Medical Association. **322**, N 13. 1294 (2019).
- [7] Gogoi P., Valan J. A. // Network Modeling Analysis in Health Informatics and Bioinformatics. **13**, N 1. 16 (2024).
- [8] Jaioun A.A., Al-Hemyari S.S., Shahwan M. et al. //

- Scientific Reports. **14**, N 1. 7284 (2024).
- [9] Guzenko M.M., Mazing M.S., Zaitseva A.Y. // Biophysics. (Russian Federation). **68**, N 2. 306 (2023).
- [10] Davydov R., Zaitseva A., Davydov V. et al. // Journal of Personalized Medicine. **13**, N 3. 443 (2023).
- [11] Нестеров В.П., Бурдыгин А.И., Иванов К.Б. и др. // Биофизика. **68**, № 6. 1280 (2023).
- [12] Noroozi Z., Orooji A., Erfannia L. // Scientific Reports. **13**, N 1. 22588 (2023).
- [13] Vestergaard A.H.S., Jensen S.K., Heide-Jorgensen U. et al. // Nephrology Dialysis Transplantation. **39**, N 7. 1150 (2024).
- [14] ElHafeez S.A., Bolignano D., D'Arrigo G. et al. // BMJ Open. **8**. e015069 (2018).
- [15] Binesh A.R., Kamali R. // Biophysical Chemistry. **207**. 107 (2015).
- [16] Reinhart W.H., Piety N.Z., Goede J.S., Shevkoptyas S.S. // Microvascular Research. **98**. 102 (2015).
- [17] Kazanskiy N.L., Butt M.A., Degtyarev S.A., Khonina S.N. // Computer Optics. **44**, N 3. 295 (2020).
- [18] Давыдов В.В., Гребеникова Н.М., Смирнов К.Я. // Измерительная техника. № 6. 37 (2019).
- [19] Karabegov M.A. // Measurement Techniques. **54**, N 10. 1203 (2012).
- [20] Давыдов В. В., Вакорина Д. В., Степаненков Г. В. // Компьютерная оптика. 2024. **48**, № 1. С. 93–101.
- [21] Khmelinskii I., Makarov V. // Biophysical Chemistry. **278**. 106668 (2021).
- [22] Давыдов В.В., Проводин Д.С., Гольдберг А.А., Кочетков И.Д. // Компьютерная оптика. **48**, № 2. 217 (2024).

Optical methods for determining the relationship between the biophysical constant of osmolality and the parameters of aqueous biological solutions

Y. A. Guseva^{1,a}, V. V. Davydov^{2,b}, D. S. Provodin^{2,c}, D. V. Davydova^{2,d}

¹St. Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences
St. Petersburg, 194021, Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
St. Petersburg, 195251, Russia

E-mail: ^ajulia.guseff@yandex.ru, ^bdavydov_vadim66@mail.ru, ^cprovodindanya@gmail.com, ^ddasha_davydova217@mail.ru

The early diagnosis of chronic kidney disease is critically important due to the asymptomatic progression of the condition in its initial stages and its increasing prevalence. This study substantiates the need to develop novel, accessible, and non-invasive diagnostic approaches based on optical technologies. A method based on refractometric measurement of urine refractive index is proposed, enabling the quantitative evaluation of key physicochemical parameters. Reliable linear relationships between urine osmolality, density, and temperature were established. The method demonstrates high measurement accuracy (± 0.0001) and stability over a wide temperature range (288–303 K), making it a competitive and cost-effective alternative to traditional diagnostic techniques such as urinalysis strips, urinometry, and osmometry. Regression equations were developed to estimate osmolality based on density ($O_s = 33.128\rho - 33.107$) and density based on refractive index ($\rho = 2.4322n - 2.2444$). The results confirm the feasibility of using refractometry as a tool for rapid, non-invasive assessment of kidney function and early detection of CKD. The proposed approach simplifies routine clinical analysis and has the potential for implementation in both laboratory and point-of-care settings.

PACS: 87.19.U-

Keywords: chronic kidney disease, refractometry, osmolality, urine density, rapid diagnosis, optical methods.

Received 10 June 2026.

Сведения об авторах

- Гусева Юлия Андреевна — студент магистратуры 2 курса; e-mail: julia.guseff@yandex.ru.
- Давыдов Вадим Владимирович — профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого; e-mail: davydov_vadim66@mail.ru.
- Проводин Даниил Сергеевич — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого; e-mail: provodindanya@gmail.com.
- Давыдова Дарья Вадимовна — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого; e-mail: dasha_davydova217@mail.ru.