

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра оптики и биофотоники

**Исследование спектральной, концентрационной и температурной
зависимостей показателя преломления водных растворов сахаров**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 253 группы

направления 03.03.02 «Физика» физического факультета

Придачиной Ксении Игоревны

Научный руководитель

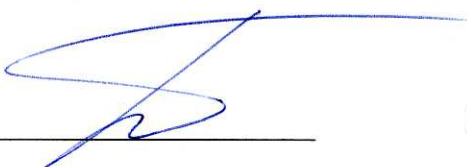
к.ф.-м.н., доцент



Э.А. Генина

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор



В.В. Тучин

Саратов – 2017

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

На протяжении века многие исследователи занимались нахождением показателя преломления воды. Причин для этого было много: вода является наиболее распространённой жидкостью на Земле; ее свойства аномальны, и поэтому распространение, отражение и поглощение света в воде приводили к сложным научным и практическим проблемам, для решения которых требовалось знание ее показателя преломления. Так же вода является отличным ориентиром для относительных измерений показателя преломления в других жидкостях.

Как было сказано ранее, вода является хорошо исследованной жидкостью, это видно в работах [1,2, 3]. Показатель преломления воды на разных длинах волн был также найден.

В настоящее время решение многих биофизических и технических задач требует знания спектральных зависимостей показателя преломления других жидкостей, в частности растворов сахаров.

Растворы сахаров (глюкоза, фруктоза, сахароза и др.) являются биосовместимыми жидкостями, которые часто используются в качестве оптических просветляющих агентов [4, 5, 6]. Оптическое просветление биотканей заключается во временном увеличении пропускания оптического излучения биотканью, которое может осуществляться различными способами. Один из наиболее эффективных и безопасных – оптическая иммерсия биоткани. В основе данного метода лежит согласование показателей преломления рассеивающих центров биоткани и внутритканевой жидкости за счет введения в ткань соответствующих препаратов – оптических просветляющих агентов [7, 8]. Однако процессы повышения оптического пропускания (просветления) биотканей под действием иммерсионных жидкостей, обладающих различными значениями показателей преломления, до настоящего времени остаются недостаточно изученными.

Для решения диффузионных задач по проницаемости сахаров в биологических тканях необходимо знание спектральной, концентрационной и температурной зависимостей показателя преломления.

В литературе можно найти показатели преломления растворов глюкозы и других сахаров [9], однако они измерены на одной или нескольких длинах волн, и чаще всего при комнатной температуре, что недостаточно для моделирования процессов просветления биотканей, особенно *in vivo*, или решения диффузионных задач.

Показатель преломления принадлежит к числу немногих констант, которые можно измерить с очень высокой точностью за небольшой промежуток времени, располагая лишь небольшим количеством вещества. Для этого используются приборы – рефрактометры.

Целью настоящей работы является исследование спектральных, концентрационных и температурных зависимостей показателя преломления глюкозы, фруктозы, сахарозы и рибозы.

Задачами данной работы являются:

1. Получение значений показателей преломления растворов глюкозы, фруктозы сахарозы и рибозы с концентрациями 10, 20, 30, 40 и 50% в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн;
2. Получение значений показателей преломления глюкозы, фруктозы, сахарозы и рибозы при комнатной и физиологической температурах.
3. Оценка коэффициентов функции Лорентц-Лоренца для исследуемых растворов глюкозы, фруктозы, сахарозы и рибозы.
4. Сравнение полученных результатов показателей преломления глюкозы, фруктозы, сахарозы и рибозы с литературными данными.

Научная новизна работы.

Впервые получены концентрационные зависимости значений показателя преломления растворов биологически важных сахаров (глюкоза, фруктоза, сахароза и рибоза) в диапазоне длин волн от 450 до 1550 нм. Впервые получен ряд значений показателей преломления данных растворов при физиологической температуре (37°C). Впервые получены значения коэффициентов функции Лорентц-Лоренца для исследуемых растворов глюкозы, фруктозы, сахарозы и рибозы для двух температур 22°C и 37°C.

Научная значимость работы.

Данные зависимости могут быть использованы при моделировании процессов диффузии оптических просветляющихся агентов, которыми являются исследуемые вещества в биоткани.

Структура и объём работы.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, 2 частей, заключения и списка литературы, состоящего из 19 наименований. Материалы изложены на 74 страницах, содержащих 45 рисунков.

Основное содержание работы

Во введении

В первой части выпускной квалификационной работы рассматривается теоретический материал по данной тематике.

Дисперсией света называются явления, обусловленные зависимостью показателя преломления вещества от длины световой волны. Эту зависимость можно охарактеризовать функцией

$$n = f(\lambda_0), \quad (1)$$

где λ_0 - длина световой волны в вакууме.

Дисперсией вещества называется производная n по λ_0 .

Для всех прозрачных бесцветных веществ функция (1) имеет в видимой части спектра характер, показанный на рисунке 1.

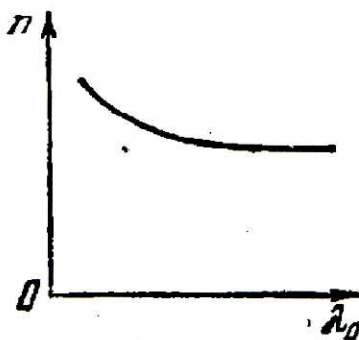


Рисунок 1- Функция n для всех прозрачных бесцветных веществ в видимой части спектра.

С уменьшением длины волны показатель преломления увеличивается с все возрастающей скоростью, так что дисперсия вещества $dn/d\lambda_0$ отрицательна и растёт по модулю с уменьшением λ_0 .

При падении пучка лучей на границу раздела двух прозрачных однородных сред 1 и 2, которые изображены на рисунке 5, одна его часть отражается под углом, другая же пересекает границу раздела и проходит через среду 2 в направлении, определяемом законом преломления.

Согласно этому закону отношение синусов углов падения i_1 и преломления i_2 есть величина постоянная:

$$\sin i_1 / \sin i_2 = n_{21}, \quad (2)$$

где n_{21} — относительный показатель (коэффициент) преломления второго вещества по отношению к первому.

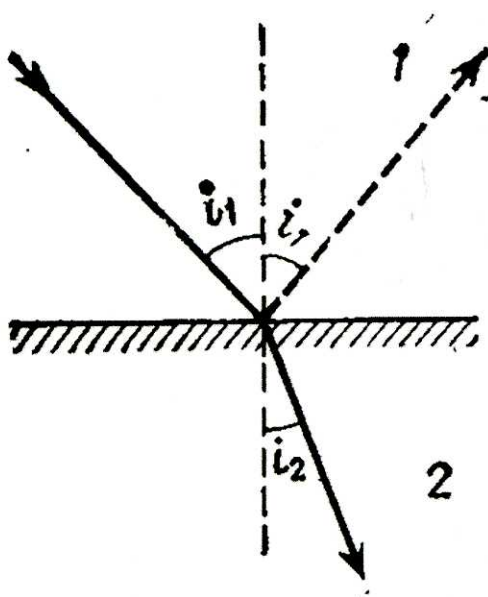


Рисунок 2 - Преломление луча на границе двух прозрачных сред.

Показатель преломления вещества по отношению к «пустоте» называется абсолютным показателем преломления.

Изменение плотности вещества всегда сопровождается изменением его показателя преломления. Следовательно, при увеличении плотности увеличивается и показатель преломления.

Опытные данные приводят к прямо пропорциональной зависимости некоторой функции показателя преломления $f(n)$ от плотности d :

$$f(n) = rd \quad (3)$$

где r — постоянный коэффициент, характерный для данного вещества, называется удельной рефракцией.

Благодаря закону преломления $\sin \psi = \sin \varphi / n$, легко видеть, что если $n < 1$, то возможно такое значение угла падения φ , при котором $\sin \psi > 1$, что не имеет смысла, ибо подобная формула не определяет никакого реального угла преломления. Подобный случай имеет место для всех значений угла φ , удовлетворяющих условию $\sin \varphi > n$, что возможно, когда $n < 1$, т.е. когда свет идет из более преломляющей среды в среду менее преломляющую. Соответствующий условию $\sin \varphi = n$, угол φ называется критическим или предельным.

Преломленной волны при этих условиях не наблюдается, а весь свет полностью отражается обратно в первую среду, в соответствии с этим явление носит название полного внутреннего отражения.

Далее в работе рассматривается зависимость показателя преломления воды от температуры.

Вода является основным компонентом интерстициальной жидкости, плазмы крови, межклеточной жидкости. Зависимость показателя преломления от длины волны определяет спектральную зависимость показателя преломления тканевой интерстициальной жидкости, которая в свою очередь определяет зависимость рассеивающих свойств тканей от длины волны. Кроме того, показатель преломления воды зависит от температуры.

В работе [10, 11] были получены зависимости показателя преломления воды от длины волны при температуре 20 °С. Зависимость длины волны воды в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра представлена в виде уравнения (4), где λ — длина волны в нм

$$n(\lambda) = 1.3199 + \frac{6878}{\lambda^2} - \frac{1.132 \cdot 10^9}{\lambda^4} + \frac{1.11 \cdot 10^{14}}{\lambda^6} \quad (4)$$

В ближнем ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах зависимость показателя преломления воды от длины волны может быть описана уравнением (5)

$$n(\lambda) = 1.31848 + \frac{6.662}{\lambda[nm] - 129.2} \quad (5)$$

В данной части также рассматриваются особенности конструкции и принцип работы рефрактометра Аббе.

Во второй части работы представлены экспериментальные результаты. В первом разделе описывается экспериментальная установка.

В данной работе применялся многоволновой рефрактометр Аббе DR-M2\1550 (Atago, Япония) и циркуляционный термостат серии LOIPLT – 100.

В качестве объектов исследования служили растворы глюкозы, фруктозы, сахарозы и рибозы с весообъемными концентрациями 10, 20, 30, 40 и 50%, приготовленными с помощью электронных весов Scientech (США) с диапазоном измерений 0 – 210 г и точностью ± 0.1 мг. Плотности растворов были рассчитаны исходя из измеренной массы определенного объема раствора. Объем измерялся с помощью лабораторного дозатора Pipette с диапазоном измерений 20-200 мкл и точностью $\pm 0.6-3$ мкл.

Для водных растворов исследуемых веществ в данной работе использовалось следующее представление волновой, температурной и плотностной зависимости функции Лорентц-Лоренца [7]:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 - 2} \frac{1}{\rho^*} = \alpha_0 + \alpha_1 \rho^* + \alpha_2 T^* + \alpha_3 \lambda^{*2} T^* + \alpha_4 / \lambda^{*2} + \frac{\alpha_5}{\lambda^{*2} - \lambda_{UV}^{*2}} + \frac{\alpha_6}{\lambda^{*2} - \lambda_{IR}^{*2}} + \alpha_7 \rho^{*2}, \quad (6)$$

где ρ – плотность вещества, г/мл;

T – абсолютная температура, К;

λ – длина волны, нм;

λ_{UV} и λ_{IR} – резонансные длины волн, нм.

Использовали формулу (6) для расчета коэффициентов $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_7$.

Эти коэффициенты были использованы для получения зависимости экспериментального значения коэффициента преломления от длины волны:

$$sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (n_{calc} - n_{exp_i})^2}{N \cdot (N - 1)}}, \quad (7)$$

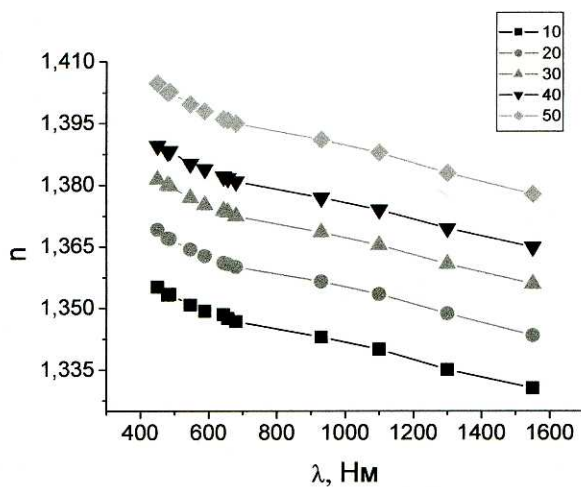
где n_{calc} — теоретическое значение коэффициента преломления;

n_{exp_i} — полученное в результате эксперимента, значение коэффициента преломления;

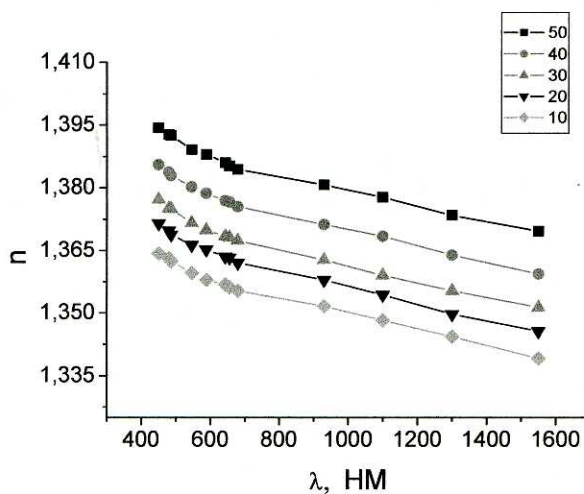
N — число точек.

Во втором разделе второй части представлены спектральные, концентрационные и температурные зависимости показателей преломления растворов глюкозы, фруктозы, сахарозы и рибозы при температурах 22 и 37 °С.

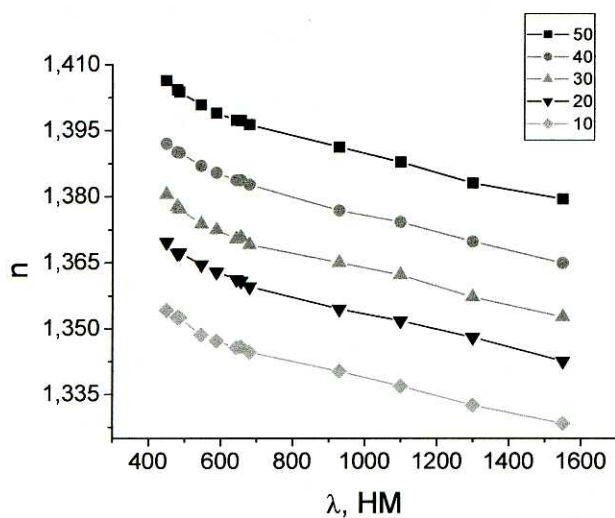
На рисунке 8 представлены зависимости показателя преломления глюкозы, фруктозы, сахарозы и рибозы от длины волны при температуре 22°С.



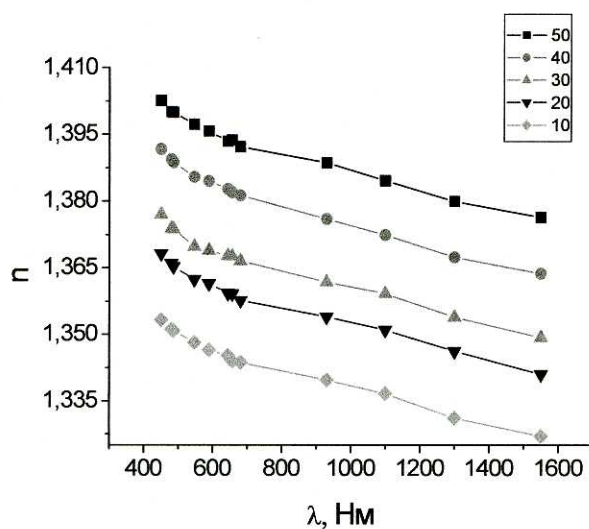
а



б



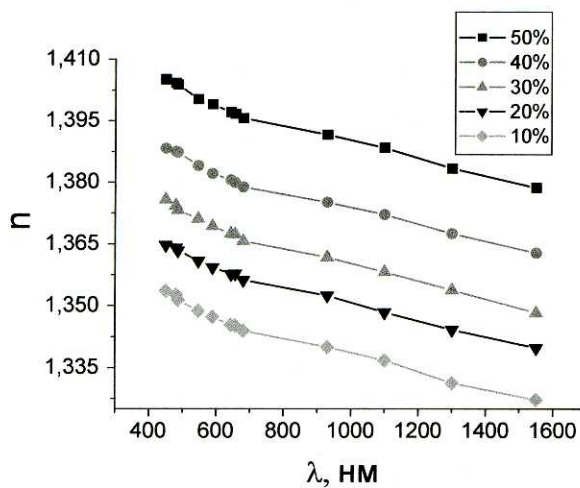
В



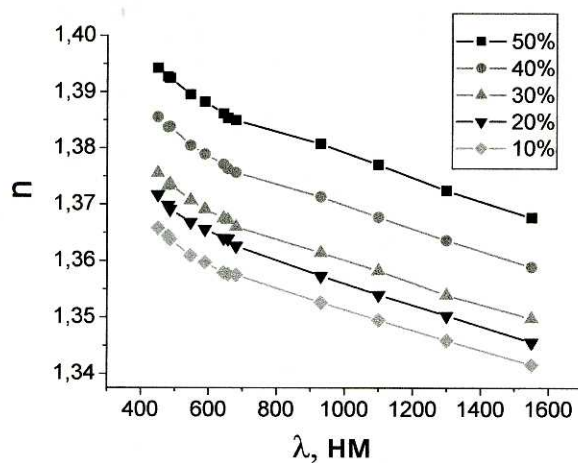
Г

Рисунок 8 - Спектральные зависимости показателя преломления водных растворов глюкозы (а), фруктозы (б), сахарозы (в) и рибозы (г) с концентрациями 10, 20, 30, 40 и 50% при температуре 22°C.

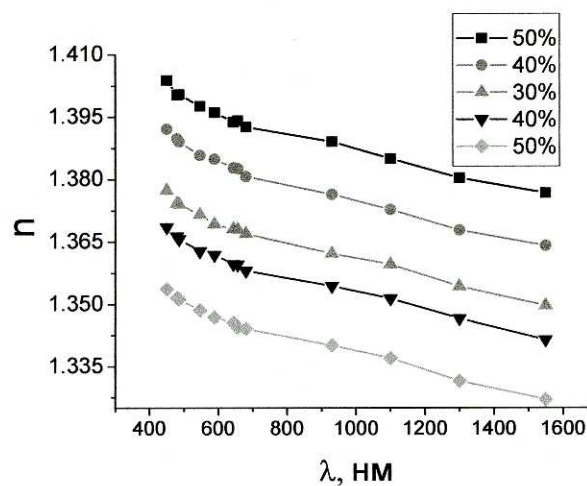
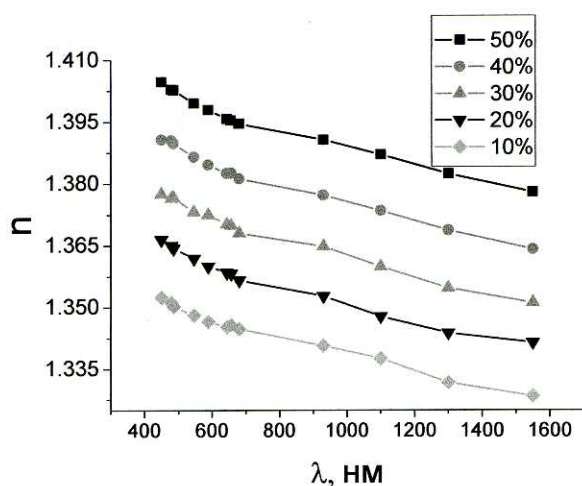
На рисунке 9 представлены зависимости показателя преломления глюкозы, фруктозы, сахарозы и рибозы от длины волны при температуре 37 °C.



а



б



В

Г

Рисунок 9 - Спектральные зависимости показателя преломления водных растворов глюкозы (а), фруктозы (б), сахарозы (в) и рибозы (г) с концентрациями 10, 20, 30, 40 и 50% при температуре 37°C.

В таблицах 2 - 9 представлены коэффициенты функции Лорентц-Лоренца для растворов глюкозы, фруктозы, сахарозы и рибозы при температурах 22°C и 37°C, рассчитанные с помощью формулы (6).

Таблица 2. Коэффициенты функции Лорентц-Лоренца для растворов глюкозы при температуре 22°C

Концентрация	α_0	α_1	α_2	α_3
10%	0.23371	0.02347	-6.8193×10^{-3}	-1.07116×10^{-3}
20%	0.23464	0.02429	-5.94932×10^{-3}	-1.04917×10^{-3}
30%	0.23448	0.02415	-6.09872×10^{-3}	-1.02996×10^{-3}
40%	0.23471	0.02435	-5.88888×10^{-3}	-9.80063×10^{-4}
50%	0.23512	0.02471	-5.50667×10^{-3}	-1.03485×10^{-3}

Продолжение таблицы 2.

Концентрация	α_4	α_5	α_6	α_7
10%	2.94543×10^{-3}	166.59103	9.44443×10^4	-0.04612
20%	3.16442×10^{-3}	118.74854	6.71964×10^4	-0.04485
30%	3.31795×10^{-3}	126.10695	7.18932×10^4	-0.03977
40%	3.28878×10^{-3}	115.69401	6.53588×10^4	-0.03757
50%	3.47692×10^{-3}	92.67269	5.31084×10^4	-0.03405

Таблица 3. Коэффициенты функции Лорентц-Лоренца для растворов глюкозы при температуре 37°C

Концентрация	α_0	α_1	α_2	α_3
10%	0.23241	0.02233	-8.03456×10^{-3}	-1.07015×10^{-3}
20%	0.23305	0.02289	-7.43724×10^{-3}	-1.08186×10^{-3}
30%	0.23425	0.02394	-6.31746×10^{-3}	-1.10216×10^{-3}
40%	0.23457	0.02423	-6.01296×10^{-3}	-9.63365×10^{-4}
50%	0.23457	0.02423	6.01296×10^{-3}	-9.63365×10^{-4}

Продолжение таблицы 3.

Концентрация	α_4	α_5	α_6	α_7
10%	3.70317×10^{-3}	235.19526	1.33397×10^5	-0.04252
20%	3.26385×10^{-3}	201.91697	1.14631×10^5	-0.04012
30%	3.59863×10^{-3}	139.34797	7.91674×10^4	-0.0413
40%	3.69154×10^{-3}	122.06744	6.95775×10^4	-0.03794
50%	3.69154×10^{-3}	122.06744	6.95775×10^4	-0.03794

Таблица 4. Коэффициенты функции Лорентц-Лоренца для растворов фруктозы при температуре 22°C

Концентрация	α_0	α_1	α_2	α_3
10%	0.23297	0.02282	-7.50862×10^{-3}	-9.95531×10^{-4}
20%	0.23394	0.02367	-6.60706×10^{-3}	-1.03325×10^{-3}
30%	0.23426	0.02395	-6.30671×10^{-3}	-8.99686×10^{-4}
40%	0.23446	0.02413	-6.11805×10^{-3}	-9.52335×10^{-4}
50%	0.23471	0.02435	-5.88397×10^{-3}	-8.38159×10^{-4}

Продолжение таблицы 4.

Концентрация	α_4	α_5	α_6	α_7
10%	3.39219×10^{-3}	205.90352	1.16595×10^5	-0.04039
20%	3.5186×10^{-3}	154.71759	8.79461×10^4	-0.04169
30%	4.07976×10^{-3}	138.77882	7.94569×10^4	-0.04154
40%	3.77488×10^{-3}	128.04873	7.28267×10^4	-0.03891
50%	3.89539×10^{-3}	115.00339	6.55249×10^4	-0.03675

Таблица 5. Коэффициенты функции Лорентц-Лоренца для растворов фруктозы при температуре 37°C

Концентрация	α_0	α_1	α_2	α_3
10%	0.233	0.02285	-7.48071×10^{-3}	-9.11087×10^{-4}
20%	0.23394	0.02368	-6.60116×10^{-3}	-1.05337×10^{-3}
30%	0.23431	0.024	-6.26254×10^{-3}	-9.88656×10^{-4}
40%	0.23442	0.02409	-6.16039×10^{-3}	-9.79677×10^{-4}
50%	0.2343	0.02399	-6.27248×10^{-3}	-1.05387×10^{-3}

Продолжение таблицы 5.

Концентрация	α_4	α_5	α_6	α_7
10%	3.55582×10^{-3}	204.31513	1.1608×10^5	-0.04018
20%	3.53044×10^{-3}	154.42078	8.79735×10^4	-0.04159
30%	3.68295×10^{-3}	135.42543	7.74551×10^4	-0.04179
40%	3.91016×10^{-3}	130.04651	7.35011×10^4	-0.0388
50%	3.54766×10^{-3}	136.29424	7.77936×10^4	-0.03463

Таблица 6. Коэффициенты функции Лорентц-Лоренца для растворов сахарозы при температуре 22°C

Концентрация	α_0	α_1	α_2	α_3
10%	0.2338	0.02355	-6.73681×10^{-3}	-1.01788×10^{-3}
20%	0.2338	0.02355	-6.73681×10^{-3}	-1.01788×10^{-3}
30%	0.23423	0.02393	-6.33052×10^{-3}	-9.40557×10^{-4}
40%	0.23414	0.02385	-6.41738×10^{-3}	-1.05112×10^{-3}
50%	0.23478	0.02441	-5.82068×10^{-3}	-9.64636×10^{-4}

Продолжение таблицы 6.

Концентрация	α_4	α_5	α_6	α_7
10%	3.83527×10^{-3}	163.43123	9.19305×10^4	-0.04222
20%	3.83527×10^{-3}	163.43123	9.19305×10^4	-0.04222
30%	4.16378×10^{-3}	140.40892	7.97378×10^4	-0.04056
40%	3.7445×10^{-3}	144.25007	8.23126×10^4	-0.03511
50%	4.00719×10^{-3}	110.65882	6.30967×10^4	-0.03286

Таблица 7. Коэффициенты функции Лорентц-Лоренца для растворов сахарозы при температуре 37°C

Концентрация	α_0	α_1	α_2	α_3
10%	0.23258	0.02248	-7.87231×10^{-3}	-1.10177×10^{-3}
20%	0.23438	0.02406	-6.19146×10^{-3}	-9.4321×10^{-4}
30%	0.23429	0.02398	-6.27631×10^{-3}	-1.15499×10^{-3}
40%	0.23409	0.0238	-6.46569×10^{-3}	-1.04174×10^{-3}
50%	0.23504	0.02464	5.57937×10^{-3}	-9.65349×10^{-4}

Продолжение таблицы 7.

Концентрация	α_4	α_5	α_6	α_7
10%	2.82023×10^{-3}	225.60628	1.28593×10^{-3}	-0.04257
20%	4.09287×10^{-3}	132.37688	7.59375×10^4	-0.04579
30%	3.52453×10^{-3}	137.00863	7.80313×10^4	-0.04043

40%	3.86401×10^{-3}	147.3731	8.42954×10^4	-0.03525
50%	3.88118×10^{-3}	96.49274	5.5271×10^4	-0.03425

Таблица 8. Коэффициенты функции Лорентц-Лоренца для растворов рибозы при температуре 22°C

Концентрация	α_0	α_1	α_2	α_3
10%	0.2324	0.02232	-8.04308×10^{-3}	-1.04551×10^{-3}
20%	0.23452	0.02419	-6.06139×10^{-3}	-1.03762×10^{-3}
30%	0.23427	0.02396	-6.30012×10^{-3}	-1.00775×10^{-3}
40%	0.23401	0.02374	-6.53787×10^{-3}	-1.03178×10^{-3}
50%	0.23482	0.02444	-5.78827×10^{-3}	-9.53905×10^{-4}

Продолжение таблицы 8.

Концентрация	α_4	α_5	α_6	α_7
10%	3.59728×10^{-3}	234.58217	1.33754×10^5	-0.04267
20%	3.64709×10^{-3}	124.91246	7.16533×10^4	-0.04541
30%	3.76239×10^{-3}	137.87024	7.86706×10^4	-0.04155
40%	4.11108×10^{-3}	150.54832	8.60586×10^4	-0.03536
50%	3.77983×10^{-3}	108.6265	6.19954×10^4	-0.03414

Таблица 9. Коэффициенты функции Лорентц-Лоренца для растворов рибозы при температуре 37°C

Концентрация	α_0	α_1	α_2	α_3
10%	0.23243	0.02235	-8.0085×10^{-3}	-1.07909×10^{-3}
20%	0.2338	0.02355	-6.73864×10^{-3}	-1.03733×10^{-3}
30%	0.23425	0.02395	-6.31548×10^{-3}	-1.02901×10^{-3}
40%	0.234	0.02372	-6.55287×10^{-3}	-9.93895×10^{-4}
50%	0.23477	0.02441	-5.82696×10^{-3}	-9.25882×10^{-4}

Продолжение таблицы 9.

Концентрация	α_4	α_5	α_6	α_7
10%	3.52844×10^{-3}	232.0858	1.33513×10^5	-0.04255
20%	3.64609×10^{-3}	162.38768	9.19807×10^4	-0.0425
30%	3.76666×10^{-3}	138.73463	7.84359×10^4	-0.04128
40%	4.25102×10^{-3}	152.24354	8.63646×10^4	-0.03533
50%	3.97376×10^{-3}	110.98221	6.34814×10^4	-0.03398

Экспериментальные результаты хорошо согласуются со справочными значениями показателя преломления растворов глюкозы, фруктозы и сахарозы, представленными для длины волны 589 нм и температуры 22°C [13].

В результате исследований получено, что с увеличением длины волны показатели преломления исследуемых растворов уменьшаются во всем спектральном исследуемом диапазоне, что хорошо согласуется с общим видом спектральной зависимости показателя преломления. С увеличением концентрации раствора, коэффициенты функции Лорентц-Лоренца линейно возрастают, либо линейно убывают. Значения коэффициентов функции Лорентц-Лоренца слабо зависят от плотности и температуры вещества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы были получены спектральные и концентрационные зависимости показателя преломления водных растворов глюкозы, фруктозы, сахарозы и рибозы для двух температур: 22°C (комнатная температура) и 37°C (физиологическая температура).

Получены значения коэффициентов функции Лорентц-Лоренца для исследуемых растворов при двух температурных режимах.

На основании проведенных в рамках данной работы исследований можно сделать следующие выводы:

1. С увеличением длины волны показатели преломления исследуемых растворов уменьшаются во всем спектральном исследуемом диапазоне, что хорошо согласуется с общим видом спектральной зависимости показателя преломления;
2. С увеличением концентрации раствора, зависимости коэффициентов функции Лорентц-Лоренца линейно возрастают, либо линейно убывают;
3. Значения коэффициентов функции Лорентц-Лоренца слабо зависят от плотности и температуры вещества;
4. Сравнение значений показателя преломления нескольких растворов глюкозы, фруктозы и сахарозы, измеренных на длине волны 589 нм при температуре

22°C, показало хорошее согласование с литературными данными. Расхождения связаны с различными методами приготовления растворов.

Данные зависимости могут быть использованы при моделировании процессов диффузии оптических просветляющихся агентов, которыми являются исследуемые вещества в биоткани.

Автор выражает благодарность доценту Башкатову А. Н. за предоставленную программу для расчета коэффициентов формулы Лорентц-Лоренца.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Bashkatov, A. Estimation of wavelength dependence of refractive index of collagen fibers of scleral tissue / A. N. Bashkatov, E. A. Genina, V. I. Kochubey, V. V. Tuchin // Proceedings of SPIE. 2000. Vol. 4162. P. 265-268.
- 2 Bashkatov, A. Water refractive index in dependence on temperature and wavelength: a simple approximation / A. N. Bashkatov, E. A. Genina // Proceedings of SPIE. 2003. Vol. 5068. P. 393-395.
- 3 Schiebener, P. Refractive Index of Water and Steam as Function of Wavelength, Temperature and Density / P. Schiebener, J. Straub, J. M. H. Levelt-Sengers, J. S. Gallagher // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1990. Vol. 19, No. 3. P. 677-717.
- 4 Genina, E. Optical clearing of the eye *in vivo* caused by glucose / E. A. Genina, A. N. Bashkatov, Yu. P. Sinichkin, V. V. Tuchin // Quantum Electronics 36(12). 2006. P. 1119-1124.
- 5 Hirshburg, J. Correlation between collagen solubility and skin optical clearing using sugar / J. Hirshburg, B. Choi, J. S. Nelson, A. T. Yeh // Lasers Surg. 2007. Med. 39. P. 140-144.
- 6 Wang, J. Sugar-induced skin optical clearing: from molecular dynamics simulation to experimental demonstration / J. Wang, N. Ma, R. Shi, Y. Zhang, T. Yu, D. Zhu // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics 20(2). 2014. 7101007.

- 7 Тучин, В. В. Оптическая биомедицинская диагностика / В. В. Тучин. В 2 т. Т. 1, 2 / под ред.: В. В. Тучина. М.: Физматлит, 2007.
- 8 Тучин, В. В. Оптика биологических тканей: методы рассеяния света в медицинской диагностике / В. В. Тучин. М.: Физматлит, 2011.
- 9 Краткий справочник физико-химических величин. Издание десятое, испр. и дополн. / под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой. СПб.: «Иван Федоров», 2003 г. С. 15.
- 10 Википедия [Электронный ресурс] : свободная энциклопедия / текст доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Share Alike ; Wikimedia Foundation, Inc, некоммерческой организации. Электрон .дан. (1 227 536 статей, 4 302 452 страниц, 178 769 загруженных файлов). Wikipedia®, 2001- 2015. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 8.06.2015). Загл. с экрана. Последнее изменение страницы: 13:36, 17 сентября 2014. Яз. рус.
- 11 Handbook of Chemistry and Physics / C. D. Hodgman, Ed. // Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland. 1958.
- 12 Aleksandra B. Modeling the temperature dependence of the index of refraction of liquid water in the visible / Aleksandra B. Djuris' ic' and Boz' idar V. Stanic // Optical Society of America, 1999. Vol. 38, P. 11-17.
- 13 Bashkatov, A. Water refractive index in dependence on temperature and wavelength: a simple approximation / A. N. Bashkatov , E. A. Genina // Proc. of SPIE. Vol. 5068. P. 393-395.