

УДК 532.135

ВЯЗКОСТЬ РАСТВОРОВ ГЛЮКОЗЫ, ПРИГОТОВЛЕННЫХ НА ВОДЕ, ПОДВЕРГНУТОЙ ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

© *Б.П. Шипунов**, *К.В. Колесова*, *В.И. Маркин*

*Алтайский государственный университет, пр. Ленина, 61, 656049 Барнаул
(Россия), e-mail: sbp@mc.asu.ru*

В работе представлены результаты исследования реологических свойств растворов глюкозы, приготовленных с использованием воды, подвергшейся воздействию электромагнитного поля частотой от 30 до 200 МГц. Исследования проводились с растворами концентрацией 20%, скорость сдвига изменялась в интервале 100–1000 с⁻¹. В результате исследования обнаружено отчетливое влияние воздействия электромагнитного поля, при этом количественный отклик зависит от скорости сдвига, частоты электромагнитного поля и времени выдержки воды от момента воздействия электромагнитным излучением до приготовления раствора. В подавляющем большинстве случаев наблюдается уменьшение вязкости растворов при скорости сдвига 1000 с⁻¹ в результате воздействия электромагнитного поля. Количественная корреляция изменения вязкости с частотой и временем послеполевой выдержки не обнаружено. В некоторых случаях (скорость сдвига 200 и 500 с⁻¹) наблюдается разнонаправленное изменение вязкости от времени выдержки. Проведено сопоставление результатов с ранее полученными для растворов агары. Обнаружено однонаправленное изменение вязкости растворов глюкозы и агары в результате воздействия электромагнитного поля на растворитель, что может служить доказательством его структурной реорганизации.

Предложено объяснение наблюдаемым зависимостям, которое основывается на изменении гидратационных взаимодействий молекул глюкозы в растворе и, как следствие, изменение силовых и энергетических характеристик при сдвиговых напряжениях.

Ключевые слова: глюкоза, раствор, реология, электромагнитное поле, структурная организация раствора.

Введение

Глюкоза, пожалуй, один из наиболее известных и изученных природных веществ. Это обусловлено не только ее естественными природными источниками, но и широким применением в самых разных сферах деятельности человека. Открытие структуры и природы оптической активности добавило интереса к глюкозе как к объекту модельных химических исследований. Несмотря на то, что свойства углеводов и глюкозы, в частности, хорошо изучены [1, 2], тем не менее многие ученые продолжают проявлять интерес к изучению поведения глюкозы в растворе. Одной из распространенных областей использования растворов глюкозы являются медицина и пищевая промышленность, которые сталкиваются с вопросами перекачки растворов глюкозы различной концентрации. В связи с чем вопросы гидродинамического сопротивления, в частности, вязкости и закономерности ее изменения в зависимости от различных факторов остается актуальным. Глюкоза относится к веществам со средним значением молекулярной массы, поэтому ее растворы, даже при высокой концентрации, не проявляя высокой вязкости, тем не менее относятся к сиропам (тягучим растворам). Ряд авторов, изучая это свойство [3], отмечает линейную зависимость вязкости от концентрации, но нелинейную зависимость энтропийного фактора вязкости – от концентрации и температуры. Объяснение высокой вязкости растворов глюкозы основывается на известном представлении о сольватной оболочке, образующейся

Шипунов Борис Павлович – доцент кафедры физической и неорганической химии, кандидат химических наук,
e-mail: sbp@mc.asu.ru

Колесова Ксения Вячеславовна – студентка,
e-mail: nice.kseshka@mail.ru

Маркин Вадим Иванович – доцент кафедры органической химии, кандидат химических наук,
e-mail: markin@chemwood.asu.ru

вследствие взаимодействия растворенных молекул с молекулами растворителя – в первую очередь с водой. Гидратация глюкозы на основе современных представлений о ее структуре обусловлена взаимодействием гидроксильных групп с молекулами воды по типу водородной связи. В работе [4] изучена кинематическая вязкость водных растворов глюкозы.

* Автор, с которым следует вести переписку.

Установлено, что гидродинамический радиус молекул моносахаридов в водном растворе зависит от температуры в интервале 290–355 К. С использованием двухуровневой модели энергетических состояний объема, в котором находится молекула глюкозы и устанавливается локальное равновесие, показано, что упомянутая зависимость есть результат нарушения равновесия изомерных переходов, порождаемого изменением температуры. Рассчитаны параметры изомерных переходов для молекулы глюкозы в водном растворителе, а также вероятность нахождения молекулы глюкозы в конфигурациях «кресло» и «лодка», количество молекул воды в гидратных оболочках этих конфигураций и оценено напряжение химических связей конфигурации «кресло» молекулы глюкозы. Авторы работы [5] развивают идею межмолекулярных взаимодействий растворенного вещества и растворителя. Полярные растворенные вещества в воде проявляют тенденцию к агрегированию, известному как «гидрофобное взаимодействие», в котором растворенное вещество наводит порядок (или формирует упорядоченную вокруг себя структуру), известное как промотор структуры и уменьшает порядок в растворителе, известный как структурный разрыв. В работе [6] анализируются модели, описывающие механизм вязкости растворов глюкозы. Обнаружено, что зависимость текучести от концентрации является линейной в случае, когда концентрация превышает некоторое значение – разное для разных температур. Наличие такой зависимости позволило авторам сделать допущение о независимости подвижностей молекул растворителя и молекул растворенного вещества от концентрации растворов. На основании этого допущения построена теоретическая модель, в которой структура водного раствора глюкозы представлена как совокупность двух слабозаимодействующих сеток, образованных водородными связями между молекулами воды и водородными связями между молекулами глюкозы. О том, каков размер агрегированных структур, подробно описано в работе [7]. С помощью динамического рассеяния света авторами обнаружено существование в водных растворах глюкозы крупномасштабных кластеров размером более 100 нм. Предполагается, что эти кластеры представляют собой упорядоченные области, в которых молекулы α -глюкозы, разделенные молекулами воды, имеют одну и ту же преимущественную ориентацию. Для растворов полиолов (в том числе глюкозы) при низкой температуре были изучены зависимости вязкости от концентрации и температуры [8] с целью нахождения простых и точных корреляционных уравнений для описания этого транспортного свойства.

Во всех публикациях отмечается существенное влияние взаимосвязи вода – глюкоза как в процессах движения (вязкости), так и в случае теоретического обоснования в форме модельных представлений. Взаимодействие глюкозы с водой приводит не только к увеличению вязкости, но и к известному процессу мутаротации. Следовательно, роль воды становится достаточно важной и значимой. Авторы некоторых исследований считают, что растворы углеводов являются хорошей моделью для исследования сольватационных процессов и состояний [9]. При этом взаимодействии важнейшее влияние оказывает растворитель – вода. Вода и так обладает рядом уникальных свойств, но изменяет их в результате действия физических полей, таких как магнитные и электромагнитные [10, 11]. Интерес представляет воздействие электромагнитного поля различного частотного диапазона. Так, в результате действия высокочастотного электромагнитного поля на воду изменялась скорость реакции с участием сахарозы [12], скорость реакции мутаротации глюкозы [13], теплота растворения глюкозы [14], вязкость растворов агар-агара [15]. В ряде работ было обнаружено, что эффект воздействия электромагнитным полем зависит не только от частоты, но и от продолжительности после его воздействия.

В связи этим основная цель работы – проведение исследований влияния частоты высокочастотного электромагнитного поля и времени после воздействия на вязкость растворов глюкозы.

Экспериментальная часть

В целом методика эксперимента мало отличалась от описанной в публикации [15]. Основное отличие заключалось в методике воздействия электромагнитным полем. Выбор частот полевого воздействия был обусловлен имеющимся для этого высокочастотным (ВЧ) генератором Г4-119А с необходимыми электрическими характеристиками: диапазоном частот, выходным напряжением и возможностью согласования с ячейкой. Для проведения экспериментов были выбраны частоты: 30, 60, 90, 110, 120, 140, 170 и 200 МГц. Воду облучали при выбранной частоте, оставляли в изолированной стеклянной емкости и использовали для приготовления раствора глюкозы, отбирая пробы через определенные промежутки времени. Первый раствор готовили непосредственно сразу после воздействия электромагнитным полем. Таким образом, периоды после облучения воды составляли от 0 до 21 суток. В работе использовалась глюкоза квалификации ч.д.а.

Выбор концентрации раствора был проведен предварительно и основывался на отчетливом проявлении вязкостных характеристик. Во всех экспериментах концентрация составляла 20% масс.

Изучение реологических характеристик проводили с помощью ротационного вискозиметра Хааке VT550. Измерительная система – ротор – стакан MV-DIN. Измерения проводились в режиме CS/CR-временная кривая (временная кривая при постоянной скорости сдвига) при скоростях 200, 500, 1000 см^{-1} ; в режиме CS/CR-стационарная кривая течения при скоростях сдвига в диапазоне от 100 до 1000 с^{-1} . Оценку вязкости проводили для трех скоростей сдвига 200, 500 и 1000 с^{-1} , которые были выбраны на основании данных полученных в работе [16], где были обнаружены эффекты влияния многоуровневого строения растворов агара. Все измерения проводились при одной температуре 25 °С.

Обсуждение результатов

На рисунках 1–3 приведено изменение вязкости растворов глюкозы от времени выдержки воды с момента облучения ее электромагнитным полем при частоте 30 МГц до момента приготовления раствора.

Можно отметить, что при скорости сдвига 1000 с^{-1} большинство значений вязкости растворов глюкозы приготовленных на воде, подвергнутой воздействию электромагнитного излучения при частоте 30 МГц, находится ниже значения вязкости для растворов, приготовленных на воде без воздействия электромагнитным полем. Для скоростей сдвига 200 и 500 с^{-1} наблюдается более симметричное расположение значений вязкости относительно «нулевой» частоты. Аналогичные зависимости наблюдаются и для других частот.

На рисунках 4–6 представлены зависимости вязкости растворов глюкозы от времени выдержки воды с момента облучения ее электромагнитным полем при частоте 200 МГц до момента приготовления раствора.

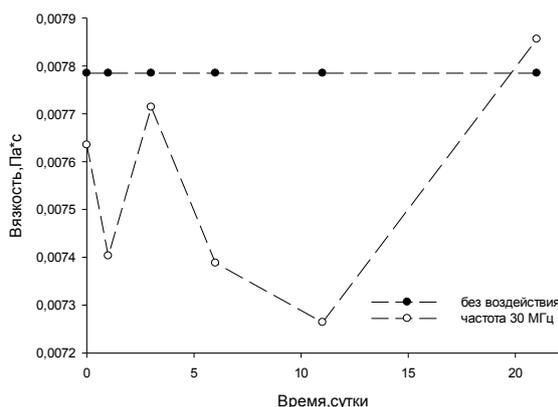


Рис. 1. Зависимость вязкости от времени выдержки воды после воздействия поля. Частота 30 МГц. Скорость сдвига 1000 с^{-1}

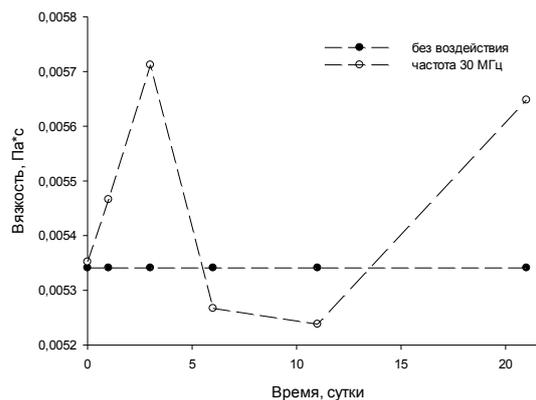


Рис. 2. Зависимость вязкости от времени выдержки воды после воздействия поля. Частота 30 МГц. Скорость сдвига 500 с^{-1}

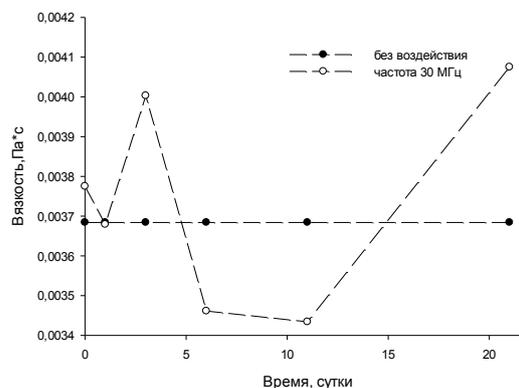


Рис. 3. Зависимость вязкости от времени выдержки воды после воздействия поля. Частота 30 МГц. Скорость сдвига 200 с^{-1}

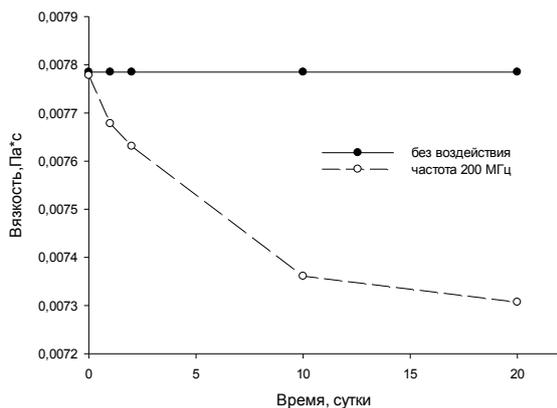


Рис. 4. Зависимость вязкости от времени выдержки воды после воздействия поля. Частота 200 МГц. Скорость сдвига 1000 с^{-1}

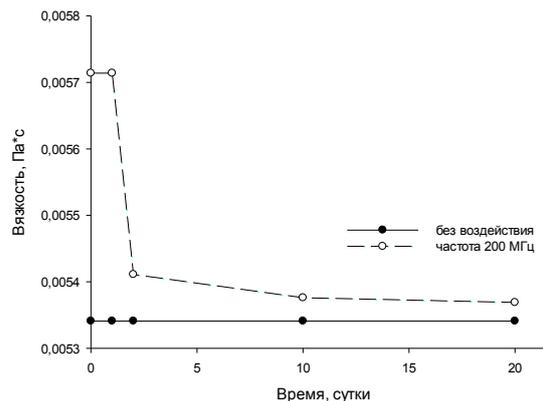
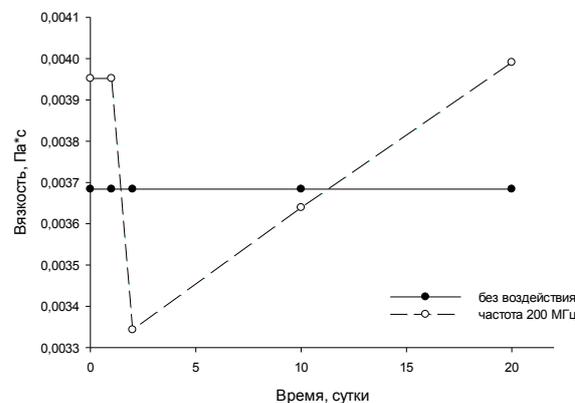


Рис. 5. Зависимость вязкости от времени выдержки воды после воздействия поля. Частота 200 МГц. Скорость сдвига 500 с^{-1}

Рис. 6. Зависимость вязкости от времени выдержки воды после воздействия поля. Частота 200 МГц. Скорость сдвига 200 с^{-1}



Обработка воды для приготовления растворов глюкозы при частоте 200 МГц приводит к изменению вязкости растворов как для разных скоростей сдвига, так и значительно изменяется от времени выдержки воды при разных скоростях сдвига. При скорости сдвига 1000 с^{-1} наблюдается уменьшение вязкости во всем изученном диапазоне. При скорости сдвига 500 с^{-1} также наблюдается снижение, за исключением небольшого начального участка. При скорости сдвига 200 с^{-1} наблюдаются как резкое снижение вязкости (на начальном участке кривой), так и увеличение. Для максимального (исследованного) времени выдержки ни для одной частоты при всех значениях скорости сдвига система не релаксирует к исходному состоянию. Исключение составляет частота 140 МГц, для которой наблюдается почти полная релаксация к исходному значению вязкости для скорости сдвига 200 с^{-1} , для других скоростей сдвига релаксация не наблюдается.

Если анализировать поведение растворов в зависимости от частоты полевого воздействия и времени выдержки, то наблюдается разнонаправленное изменение вязкости. В электронном приложении к статье приведены зависимости для всех исследованных частот.

Практически для всех случаев наблюдается уменьшение вязкости и разнонаправленные изменения при различных временах выдержки. Двухпараметровая зависимость вязкости от частоты полевого воздействия и времени выдержки после него достаточно иллюстративно представлена на диаграмме. На рисунке 7 приведена 3D диаграмма зависимости вязкости при скорости сдвига 1000 с^{-1} для всех изученных частот при десятидневной выдержке, которая иллюстрирует отсутствие гладкой взаимосвязи между вязкостью, частотой и временем выдержки после воздействия электромагнитным полем.

Для объяснения опосредованного влияния электромагнитного ВЧ поля на вязкость растворов глюкозы следует привлечь ряд известных фактов. В первую очередь – известное явление мутаротации, при котором

образуется равновесная смесь оптических изомеров: α -D-глюкопираноза и β -D-глюкопираноза. Их соотношение в растворе при 25 °C составляет 38.8 и 60.9% соответственно [17]. В работе [13] было отмечено изменение равновесного соотношения α -D-глюкопиранозы и β -D-глюкопиранозы в результате действия ВЧ поля на воду при приготовлении растворов глюкозы в сторону увеличения содержания α -D-глюкопиранозы. В работе [14] отмечалось значительное изменение теплоты гидратации глюкозы при растворении в воде, подвергшейся электромагнитному излучению при некоторых частотах. Для частот воздействия 90, 110 и 170 МГц теплота растворения после выдержки воды для приготовления раствора в течение 20 сут. возрастала. Эти данные свидетельствуют об усилении взаимодействия воды с молекулами глюкозы. Однако количество изменяющихся параметров очевидно больше: изменение структурной организации воды, изменение соотношения аномеров глюкозы и, вероятно, изменения силы взаимодействия разных структурных организаций воды с каждым из аномеров. То, что структура углевода значительно влияет на вязкость водных растворов, говорит тот факт, что вязкость растворов фруктозы почти в полтора раза меньше растворов глюкозы при одной концентрации, почти идентичной молекулярной массе [2]. Следовательно, изменение структурной организации в воде, изменение соотношения аномеров глюкозы приводит к либо к усилению взаимодействия глюкоза – глюкоза, либо к ослаблению. То, что растворы глюкозы сложно организованы, исследуется и приводится в работе [18]. Авторами подтверждено наличие как минимум двух подсистем: одна размером порядка 10 нм – мелкомасштабная, другая с размером порядка 100 нм – крупномасштабная. С увеличением концентрации раствора концентрация крупномасштабной фракции заметно уменьшается. В то же время авторы более ранней работы [19] сообщают, что спектры деполяризованного рэлеевского рассеяния (DRS) водных растворов глюкозы, измеренные от 0.01 до 1000 см⁻¹, выявляют присутствие двух различных релаксационных процессов в дополнение к межмолекулярным модам комбинационного рассеяния водной сети. По мнению авторов, деструктурирующий эффект на тетраэдрические водородные связи воды, индуцированный глюкозой, также четко проявляется при сравнении спектров межмолекулярного комбинационного рассеяния при различных молярных соотношениях. То есть разные методы обнаруживают разноразмерные структурные элементы в водных растворах глюкозы. Авторы работы [20] предполагают, что основной вклад в изменение вязкости в широком интервале концентраций вносит вода, которая участвует в образовании агрегатов с глюкозой различного уровня сложности. Следовательно, разноразмерные образования в растворах глюкозы генерируются в том числе и структурной организацией воды, которая изменяется при воздействии ВЧ электромагнитного поля.

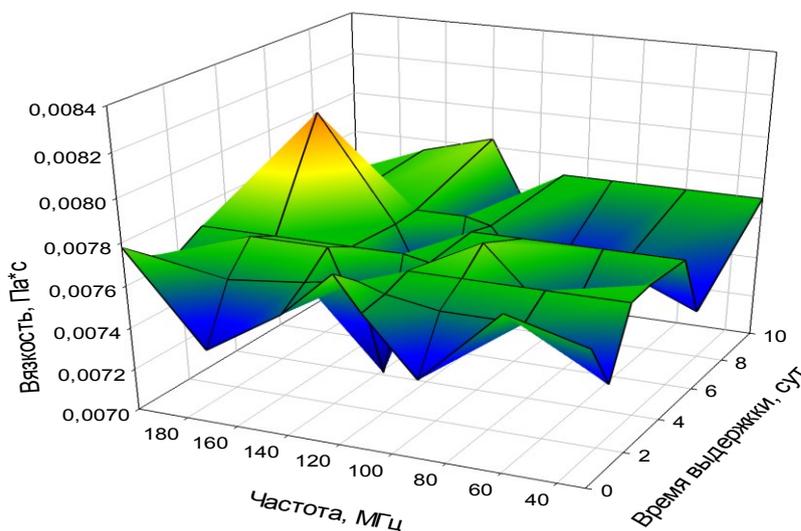


Рис. 7. 3D диаграмма изменения вязкости для всех частот за 10 сут. выдержки. Скорость сдвига 1000 с⁻¹.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено:

Воздействие электромагнитного поля малой мощности на воду при частоте от 30 до 200 МГц вызывает изменение вязкости растворов глюкозы, приготовленных с использованием такой воды.

Установлено, что на изменение вязкости частота полевого воздействия влияет неодинаковым образом.

Время выдержки воды после воздействия электромагнитным излучением до момента приготовления растворов оказывает существенное влияние на вязкость.

Численные значения вязкости для разных скоростей сдвига иллюстрируют неодинаковые зависимости вязкости как от частоты, так и времени выдержки после полевого воздействия.

Установлено, что при больших (1000 с^{-1}) скоростях сдвига вязкость в основном уменьшается после воздействия электромагнитным излучением. Для меньших скоростей сдвига (200 и 500 с^{-1}) изменения носят разнонаправленный характер.

Наблюдаемые эффекты с наибольшей вероятностью связаны с изменением структурной организации растворителя после воздействия электромагнитным излучением и изменением силовых гидратационных взаимодействий глюкоза – вода.

Список литературы

1. Кочетков Н.К., Бочков А.Ф., Дмитриев А.Б., Усов А.И., Чижов О.С., Шibaев В.Н. Химия углеводов. М., 1966. 672 с.
2. Miljković M. Carbohydrates. Springer-Verlag New York, 2009. 543 p. DOI 10.1007/978-0-387-92265-2_4.
3. Мишук Р.Ц., Грабова Л.С., Петрушевский В.В., Ивчук Н.П. Термодинамические свойства растворов глюкозы и фруктозы // Сахарная промышленность. 1987. №7. С. 48–50.
4. Алексеев А.Н., Булавин Л.А., Забашта Ю.Ф., Ткачев С.Ю. Модели гидратации и изомерных переходов молекул глюкозы в водных растворах // Журнал физической химии. 2014. Т. 88, №5. С. 811–814. DOI: 10.7868/S0044453714050033.
5. Khanuja P., Chourey V.R., Ansari A.A. Apparent molar volume and viscometric study of glucose in aqueous solution // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. 2012. Vol. 4, no. 6. Pp. 3047–3050.
6. Булавин Л.А., Забашта Ю.Ф., Хлопов А.М., Хорольский А.В. Молекулярный механизм вязкости водных растворов глюкозы // Журнал физической химии. 2017. Т. 91, №1. С. 88–92. DOI: 10.7868/S0044453716120062.
7. Булавин Л.А., Вэргун Л.Ю., Забашта Ю.Ф., Телиман Е.О. Крупномасштабные кластеры в водных растворах глюкозы // Коллоидный журнал. 2015. Т. 77, №3. С. 278–283. DOI: 10.7868/S0023291215030040.
8. Longinotti M.P., Trejo González J.A., Corti H.R. Concentration and temperature dependence of the viscosity of polyol aqueous solutions // Cryobiology. 2014. Vol. 69, N1. Pp. 84–90. DOI: 10.1016/j.cryobiol.2014.05.008.
9. Абросимов В.К., Агафонов А.В., Антини Е.В. и др. Биологически активные вещества в растворе. Структура. Термодинамика. Реакционная способность. М., 2001. 408 с.
10. Духанин В.С. Исследование влияния магнитного поля на гидратацию ионов в растворах электролитов и на скорость некоторых химических реакций: автореф. дис. ... канд. хим. наук. М., 1973. 21 с.
11. Селиков К.В., Шипунов Б.П. Исследование воздействия постоянного магнитного поля на некоторые свойства воды и водных растворов // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2005. Т. 48, вып. 9. С. 50–54.
12. Шипунов Б.П., Тимирязев А.В., Кондратова Е.В. Влияние маломощного высокочастотного электромагнитного поля на скорость химических реакций и константу равновесия реакции мутаротации сахарозы и гидролиза ацетоксиэфира // Бултеровские сообщения. 2011. Т. 24, №1. С. 105–109.
13. Рябых А.В., Шипунов Б.П. Влияние высокочастотного электромагнитного поля на мутаротацию водных растворов глюкозы и фруктозы // Химия растительного сырья. 2019. №3. С. 335–240. DOI: 10.14258/jcprm.2019034456.
14. Ryabykh A.V., Shipunov B.P. Change in the heat of D-glucose dissolution in water exposed to electromagnetic field // Вестник Карагандинского университета. Серия «Химия». 2020. №1. С. 83–89. DOI: 10.31489/2020Ch1/83-89.
15. Маркин В.И., Шипунов Б.П. Аномальная реология растворов агар-агара, приготовленных с использованием воды, подвергнутой воздействию электромагнитного поля // Химия растительного сырья. 2020. №1. С. 73–80. DOI: 10.14258/jcprm.2020017373.
16. Шипунов Б.П., Маркин В.И., Коптев В.И. Особенности реологии растворов агар-агара // Химия растительного сырья. 2018. №1. С. 53–60. DOI: 10.14258/jcprm.2018013720.
17. Свитцов А.А. Введение в мембранную технологию. М., 2006. 170 с.
18. Власенко Т.С., Забашта Ю.Ф., Сысоев В.М. Надмолекулярная структура водных растворов глюкозы по данным динамического рассеяния света // Журнал физической химии. 2014. Т. 88, №7–8. С. 1180–1182. DOI: 10.7868/S0044453714080330.
19. Paolantoni M., Comes L., Fioretto D., Gallina M.E., Morresi A., Sassi P., Scarponi F. Structural and dynamical properties of glucose aqueous solutions by depolarized Rayleigh scattering // Journal of Raman Spectroscopy. 2008. Vol. 39. Pp. 238–243. DOI: 10.1002/jrs.1909.
20. Fioretto D., Comez L., Corezzi S., Paolantoni M., Sassi P., Morresi A. Solvent Sharing Models for Non-Interacting Solute Molecules: The Case of Glucose and Trehalose Water Solutions // Food Biophysics. 2013. Vol. 8, no. 3. Pp. 177–182. DOI: 10.1007/s11483-013-9306-3.

Поступила в редакцию 9 августа 2020 г.

После переработки 25 декабря 2020 г.

Принята к публикации 27 декабря 2020 г.

Для цитирования: Шипунов Б.П., Колесова К.В., Маркин В.И. Вязкость растворов глюкозы, приготовленных на воде, подвергнутой воздействию электромагнитного поля // Химия растительного сырья. 2021. №1. С. 259–265. DOI: 10.14258/jcprm.2021019261.

Shipunov B.P.*, Kolesova K.V., Markin V.I. VISCOSITY OF GLUCOSE SOLUTIONS PREPARED IN WATER SUBJECTED TO AN ELECTROMAGNETIC FIELD

Altai State University, 61 Lenin Ave., 656049 Barnaul (Russia), e-mail: sbp@mc.asu.ru

The paper presents the results of a study of the rheological properties of glucose solutions prepared using water exposed to an electromagnetic field with a frequency of 30 to 200 MHz. The studies were carried out with solutions with a concentration of 20%, the shear rate varied in the range of 100–1000 s⁻¹. As a result of the study, a distinct influence of the influence of the electromagnetic field was found, while the quantitative response depends on the shear rate, frequency of the electromagnetic field and the time of exposure of water from the moment of field exposure to preparation of the solution. In the overwhelming majority of cases, there is a decrease in the viscosity of solutions at a shear rate of 1000 s⁻¹ as a result of exposure to an electromagnetic field. A quantitative correlation between the change in viscosity and the frequency and time of post-field exposure was not found. In some cases (shear rate 200 and 500 s⁻¹), there is a multidirectional change in viscosity versus exposure time. The results are compared with those previously obtained for agar solutions. A unidirectional change in the viscosity of glucose and agar solutions was found as a result of the action of an electromagnetic field on the solvent, which can serve as evidence of its structural reorganization.

An explanation for the observed dependences is proposed, which is based on a change in the hydration interactions of glucose molecules in solution and, as a consequence, a change in the force and energy characteristics under shear stresses.

Key words: glucose, solution, rheology, electromagnetic field, structural organization of the solution.

References

1. Kochetkov N.K., Bochkov A.F., Dmitriev A.B., Usov A.I., Chizhov O.S., Shibaev V.N. *Chemistry of carbohydrates*. [Chemistry of carbohydrates.]. Moscow, 1966, 672 p. (in Russ.).
2. Miljković M. *Carbohydrates*. Springer-Verlag New York, 2009. 543 p. DOI 10.1007/978-0-387-92265-2_4.
3. Mishchuk R.T.S., Grabova L.S., Petrushevskiy V.V., Ivchuk N.P. *Sakharnaya promyshlennost*, 1987, no. 7, pp. 48–50. (in Russ.).
4. Alekseyev A.N., Bulavin L.A., Zabashta YU.F., Tkachev S.YU. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 2014, vol. 88, no. 5, pp. 811–814. DOI: 10.7868/S0044453714050033. (in Russ.).
5. Khanuja P., Chourey V.R., Ansari A.A. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2012, vol. 4, no. 6, pp. 3047–3050.
6. Bulavin L.A., Zabashta YU.F., Khlopov A.M., Khorol'skiy A.V. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 2017, vol. 91, no. 1, pp. 88–92. DOI: 10.7868/S0044453716120062. (in Russ.).
7. Bulavin L.A., Vergun L.YU., Zabashta YU.F., Teliman Ye.O. *Kolloidnyy zhurnal*, 2015, vol. 77, no. 3, pp. 278–283. DOI: 10.7868/S0023291215030040. (in Russ.).
8. Longinotti M.P., Trejo González J.A., Corti H.R. *Cryobiology*, 2014, vol. 69, no. 1, pp. 84–90. DOI: 10.1016/j.cryobiol.2014.05.008.
9. Abrosimov V.K., Agafonov A.V., Antini Ye.V. and other. *Biologicheski aktivnyye veshchestva v rastvore. Struktura. Termodinamika. Reaktsionnaya sposobnost*. [Biologically active substances in solution. Structure. Thermodynamics. Reactivity]. Moscow, 2001, 408 p. (in Russ.).
10. Dukhanin V.S. *Issledovaniye vliyaniya magnitnogo polya na gidratsiyu ionov v rastvorakh elektrolitov i na sko-rost' nekotorykh khimicheskikh reaktsiy. Avtoreferat dissertatsii kandidat khimicheskikh nauk*. [Study of the effect of a magnetic field on the hydration of ions in electrolyte solutions and on the rate of some chemical reactions. Abstract of dissertation candidate of chemical sciences]. Moscow, 1973, 21 p. (in Russ.).
11. Selikov K.V., Shipunov B.P. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2005, vol. 48, no. 9, pp. 50–54. (in Russ.).
12. Shipunov B.P., Timiryazev A.V., Kondratova Ye.V. *Butlerovskiyee soobshcheniya*, 2011, vol. 24, no. 1, pp. 105–109. (in Russ.).
13. Ryabykh A.V., Shipunov B.P. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2019, no. 3, pp. 335–240. DOI: 10.14258/jcprm.2019034456.
14. Ryabykh A.V., Shipunov B.P. *Vestnik Karagandinskogo universiteta. Seriya «Khimiya»*, 2020, no. 1, pp. 83–89. DOI: 10.31489/2020Ch1/83-89.
15. Markin V.I., Shipunov B.P. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, no. 1, pp. 73–80. DOI: 10.14258/jcprm.2020017373. (in Russ.).
16. Shipunov B.P., Markin V.I., Koptev V.I. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2018, no. 1, pp. 53–60. DOI: 10.14258/jcprm.2018013720. (in Russ.).
17. Svitsov A.A. *Vvedeniye v membrannuyu tekhnologiyu*. [Introduction to membrane technology]. Moscow, 2006, 170 p. (in Russ.).
18. Vlasenko T.S., Zabashta YU.F., Sysoyev V.M. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 2014, vol. 88, no. 7–8, pp. 1180–1182. DOI: 10.7868/S0044453714080330. (in Russ.).
19. Paolantoni M., Comes L., Fioretto D., Gallina M.E., Morresi A., Sassi P., Scarponi F. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2008, vol. 39, pp. 238–243. DOI: 10.1002/jrs.1909.
20. Fioretto D., Comez L., Corezzi S., Paolantoni M., Sassi P., Morresi A. *Food Biophysics*, 2013, vol. 8, no. 3, pp. 177–182. DOI: 10.1007/s11483-013-9306-3.

Received August 9, 2020

Revised December 25, 2020

Accepted December 27, 2020

For citing: Shipunov B.P., Kolesova K.V., Markin V.I. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2021, no. 1, pp. 259–265. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2021019261.

* Corresponding author.

