

УДК 532.135

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТВОРОВ И ГЕЛЕЙ АГАРА, ПРИГОТОВЛЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОДЫ, ПОДВЕРГНУТОЙ ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ*

© *Б.П. Шипунов***, *В.И. Маркин*

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

В работе представлены результаты, продолжающие цикл исследований о влиянии высокочастотного поля на воду, которая использовалась в дальнейшем для приготовления растворов агара. Были изучены прочность агарового геля (желе) в зависимости от условий полевого воздействия на воду. Показано, что прочность геля сложным образом зависит от частоты полевой предобработки и времени выдержки воды после полевого воздействия. Анализ реологических свойств проводился с использованием аппроксимационного уравнения Оствальда-де Виля. Проанализирована зависимость реологической константы (коэффициента консистенции) от частоты полевого воздействия и времени выдержки после него. Зависимости, как и наблюдалось ранее, представляют несистемные ломаные кривые. Проведено сопоставление реологических свойств и прочности геля, приготовленных не в воде, прошедшей идентичную полевою обработку. Результаты можно условно разделить на три группы: синбатное изменение, антибатное изменение и смена зависимостей после 9 суток выдержки воды. Показано, что прочность и вязкость агарового геля в основном уменьшается. Сложные зависимости прочности и вязкости от факторов воздействия на воду объясняются на основе предположения о сложной и многоуровневой исходной структуре воды и ее изменением как под действием электромагнитного поля, так и со временем в результате теплового движения.

Ключевые слова: вязкость, прочность, агар, гель, уравнение Оствальда-де Виля, взаимосвязь вязкости и прочности агаровых гелей, электромагнитное поле, вода.

Введение

Гели широко распространены в нашей повседневной жизни и используются в самых разных областях, от пищевых продуктов до фармацевтической и биомедицинской промышленности. В частности, в настоящее время широко исследуются гидрогели на основе природных полисахаридов, выделенных из различных видов водорослей и бактерий: альгинаты, агар, желатиновая камедь, гиалуроновая кислота и каррагинан [1]. Во многих публикациях отмечается, что гидрогели, полученные на основе этих полисахаридов, обладают широким спектром свойств, позволяющим рекомендовать их к использованию в различных областях жизнедеятельности человека [1–4]. Особый интерес представляют гидрогели на основе агара. Композиции на основе агара нашли широкое применение в фармацевтической отрасли, пищевой промышленности и др. Несмотря на то, что гели на основе агара давно и успешно применяются, данных о корреляции между реологическими, прочностными свойствами и химическим составом полимера в научной литературе явно недостаточно [1, 5–7]. Агароза и агаропектин, входящие в состав агара, за счет гидроксильных групп обладают высоким сродством к воде и способностью образовывать водородные связи, что позволяет образовывать высокоструктурированные системы,

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

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

состоящие из полисахаридов и воды. Эти системы (гели) могут иметь свойства твердых тел: способность сохранять форму, прочность, способность к деформации. Вода как компонент такой системы может оказывать существенное влияние на свойства

* Данная статья имеет электронный дополнительный материал (приложение), который доступен читателям на сайте журнала. DOI: 10.14258/jcprpm.20230313430s

** Автор, с которым следует вести переписку.

гелей. Растворы на основе агара обладают уникальными реологическими свойствами, а при концентрациях выше 1% могут образовывать гели [8]. Ранее было показано, что вода как растворитель может менять свойства растворов, после воздействия на нее электромагнитного поля (ЭМП) [9–17].

Так, в работе [18] изучены реологические свойства растворов агара, приготовленных с использованием воды, подвергшейся воздействию ЭМП частотой от 30 до 170 МГц. Установлено влияние воздействия ЭМП на реологические свойства растворов агара. В подавляющем большинстве случаев наблюдается уменьшение вязкости растворов в результате воздействия электромагнитного поля. При этом количественная корреляция изменения вязкости с частотой практически отсутствует. Отсутствуют и данные об изменении прочности агарового геля (желе), приготовленного с использованием воды, подвергшейся воздействию электромагнитного поля. Хотя предпосылки к такому изменению очевидны.

Цель настоящей работы – поиск взаимосвязи между механическими свойствами агаровых систем: растворов и геля (желе), полученных с использованием воды, подвергшейся воздействию электромагнитным полем.

Экспериментальная часть

Подготовка воды (воздействие ЭМП) проводилась по той же методике, что и в предшествующих работах [15, 17, 18]. Воздействие электромагнитным полем осуществляли на частотах 30, 60, 90, 110, 140, 170 и 200 МГц. Под действием поля каждый образец находился в течение 2 ч. В течение одного дня воздействию ВЧ поля одной частоты подвергались все пробы воды. После этого вода переливалась в герметичные колбы и выдерживалась в течение определенного времени. Подвергшаяся полемому воздействию вода выдерживалась разное время: 0, 1, 3, 6, 9, 11 и 21 суток. После этого готовились растворы агара.

Приготовление растворов агара для механических испытаний. Растворы агара готовили на основе воды, подвергнутой воздействию электромагнитного поля. При приготовлении растворов для механических испытаний пришлось идти на компромиссное решение: растворы для реологии, чтобы контакт ротора был неразрывным, должны быть текучими, т.е. не создавшими гелевую структуру. А системы для измерения прочности должны быть не текучими, т.е. образовывать гель (желе). В связи с этим для реологии готовили растворы концентрацией 0,5%, для измерения прочности – 1%. Такое допущение, по нашему мнению, вполне обосновано, поскольку главный действующий компонент – вода с измененными свойствами свою концентрацию меняет незначительно.

Измерение прочности геля агара проводилось по модифицированному методу Вайлента [19]. Для этого был изготовлен специальный индентор, который совпадал по геометрическим характеристикам с используемым в методе Вайлента. Индентор закреплялся в универсальной испытательной машине УТС 110М-100 и со скоростью 5 мм/мин погружался в готовый гель. Изменение нагрузки фиксировалось в автоматическом режиме. За значение прочности геля принималось максимальное значение динамической нагрузки на гель.

Реологические свойства гелей агара проводили с помощью ротационного вискозиметра Haake VT550. Измерительная система – ротор – стакан SV-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} . Измерения проводились для раствора с концентрацией 0,5% при температуре 25 °С.

Обсуждение результатов

На рисунке 1 представлены зависимости прочности геля от частоты ЭМП и продолжительности выдержки после воздействия ЭМП. Для удобства зависимости разбиты на две группы. Практически все точки лежат ниже прочности геля без воздействия ЭМП. Только при нулевом времени выдержки для частот 140 и 200 МГц и для частоты 30 МГц и времени 1, 6 и 21 сутки наблюдается значительное увеличение прочности. Релаксация прочности к значению, соответствующему «без воздействия ЭМП», более менее происходит за наблюдаемые интервалы времени только для частоты 110 МГц что иллюстрируют данные, приведенные на рисунке 2.

Можно констатировать, что гладкой зависимости от частоты не наблюдается для любого из изученных периодов выдержки после полевого воздействия. Аналогичная (негладкая) зависимость вязкости и напряжения сдвига наблюдалась в работе [18].

Поскольку вязкость растворов агара ранее нами уже исследовалась, методика оценки реологических характеристик была существенно изменена. В предыдущих экспериментах анализ вязкости проводился путем среза зависимостей вязкости и напряжения сдвига от угловой скорости при разных значениях скорости сдвига. Однако подобный подход не давал возможности провести количественную оценку реологического поведения раствора. Гораздо более отчетливую информацию могла бы дать аппроксимационная зависимость вязкости и напряжения сдвига от скорости сдвига. В литературе для разных растворов приводится порядка 11 разных моделей [20]. Примером такой жидкости и является гель, состоящий из агар-агара, который описывается законом Оствальда – де Виля:

$$\tau = K \cdot \gamma^n$$

где τ – напряжение сдвига, Па; K – реологическая константа, коэффициент консистенции; n – реологическая константа, индекс течения; γ – скорость сдвига.

Экспериментальная проверка показала, что данная формула удовлетворительно описывает реальную зависимость в пределах скоростей сдвига от 0 до 400–500 с^{-1} . Для определения констант формулу преобразовывали в полулогарифмический вид и по экстраполяции γ до нуля (точнее, до 1) определяли K , а по наклону – n .

Для корректности эксперимента при изучении частотной и временной зависимости были взяты те же частоты облучения и дни выдержки, что и для прочности геля.

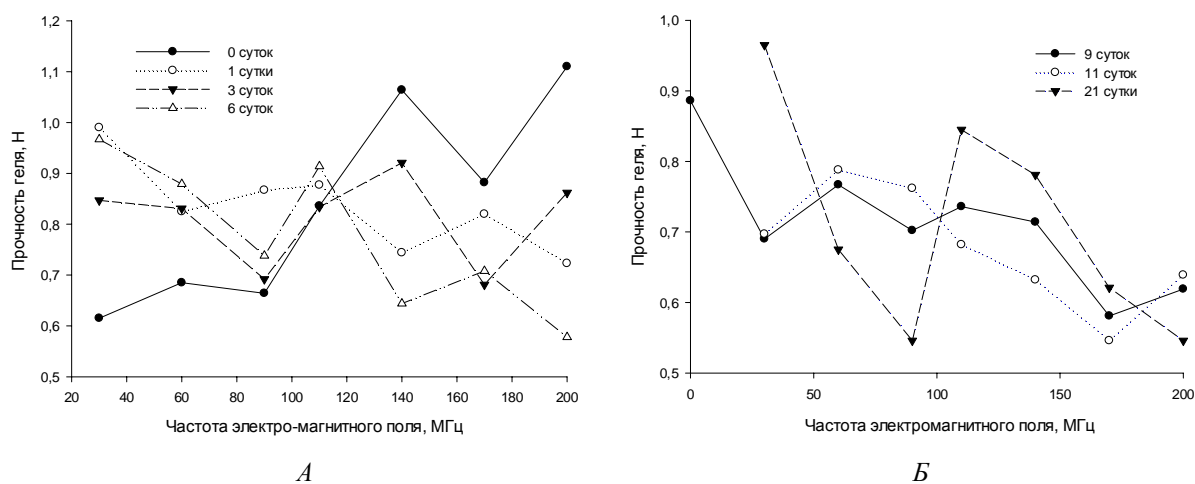


Рис. 1. Зависимость прочности геля от частоты электромагнитного поля и продолжительности выдержки (А – 0–6 сут.; Б – 9–21 сут.).

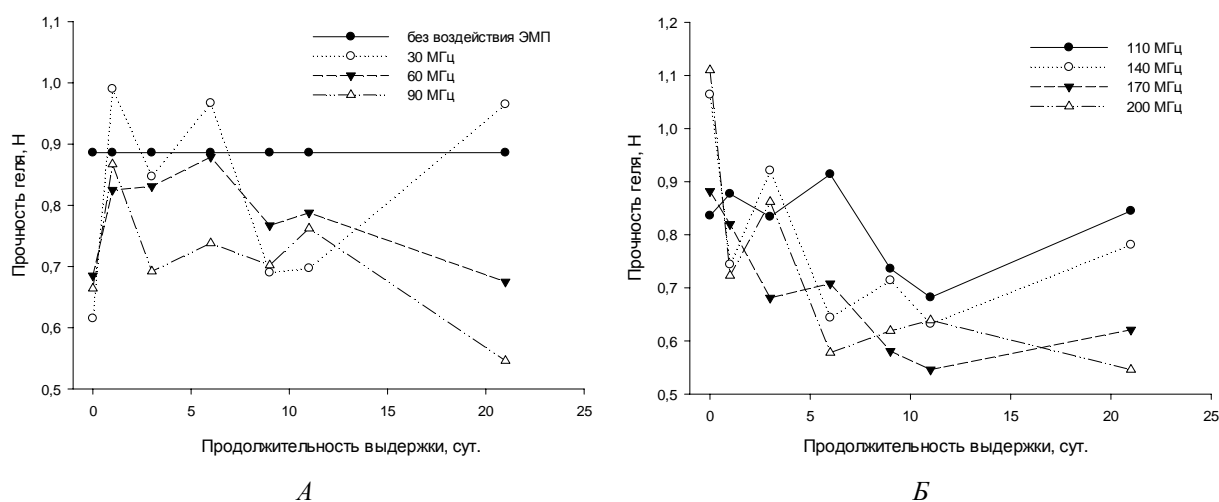


Рис. 2. Зависимость прочности геля от продолжительности выдержки при разных частотах электромагнитного поля (А – 0–90 МГц; Б – 110–200 МГц)

Кривые течения были обработаны в соответствии с уравнением Оствальда-де Виля. Были определены численные значения коэффициентов K и n , которых представлены в таблице электронного приложения. На основании этих данных были построены зависимости, отражающие изменение этих коэффициентов от частоты воздействия ЭМП и продолжительности выдержки после полевого воздействия.

На рисунке 3 приведены зависимости коэффициента консистенции K от продолжительности выдержки воды для приготовления геля после ее обработки ЭМП при различных частотах.

Исходя из того, что индекс течения $n < 1$, можно сделать выводы о том, что растворы агара относятся к псевдопластическим (неньютоновским) жидкостям.

Поскольку коэффициент K в уравнении Оствальда-де Виля пропорционален напряжению сдвига, а она, в свою очередь, вязкости, можно однозначно описывать изменение коэффициента K как изменение вязкости. На рисунке 3 не наблюдается никакой постоянной тенденции изменения вязкости геля от времени выдержки воды после обработки ЭМП, так как вязкость то увеличивается, то остается неизменной, то уменьшается. При частотах 110–200 МГц можно заметить, что в первые сутки наблюдается резкое уменьшение вязкости, затем в период выдержки от 6 до 9 дней – увеличение вязкости, после 9 дней для частоты 140 МГц мы наблюдаем снижение, а для остальных частот – увеличение коэффициента K .

При анализе влияния частоты на реологические характеристики гелей на основе агара, приготовленных на воде после ее обработки электромагнитным полем при разных частотах, следует отметить, что данные системы обладают высокой чувствительностью к частоте воздействия ЭМП. В большинстве случаев происходит существенное снижение коэффициента консистенции.

Изучение корреляции между прочностью и вязкостью агарового геля. Учитывая тот факт, что эксперименты по изменению реологических характеристик и прочности агаровых систем как результат воздействия электромагнитного поля на воду проводились в одинаковых условиях, была изучена корреляция количественных показателей вязкости с прочностью агарового геля. В качестве корреляционных параметров в данном случае был выбран, с одной стороны коэффициент n – индекс течения, с другой – прочность геля. Индекс течения n наиболее отчетливо и сильно связан со скоростью сдвига в степенной функции и чувствителен к малым изменениям зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига и может отражать вовлечение в вязкостные процессы надструктурных элементов, возникших после полевого воздействия. Тогда как коэффициент K просто пропорционален напряжению сдвига. Анализировалось изменение указанных характеристик от частоты воздействия ЭМП и времени выдержки после этого воздействия. Полученные зависимости представлены на рисунке 4, а также на рисунках 1–4 электронного приложения.

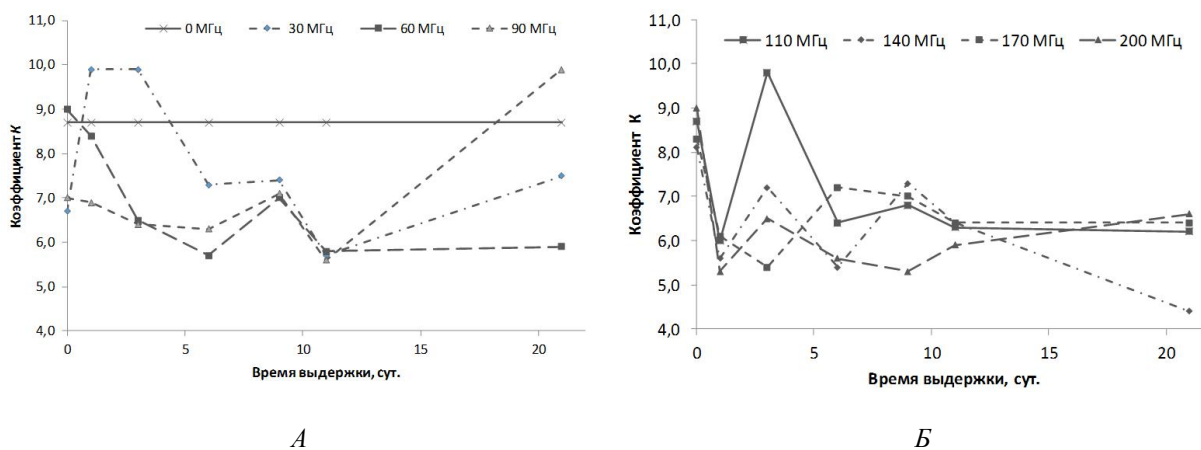


Рис. 3. Зависимость коэффициента консистенции K от продолжительности выдержки воды при разных частотах электромагнитного поля (А – 0–90 МГц; Б – 110–200 МГц)

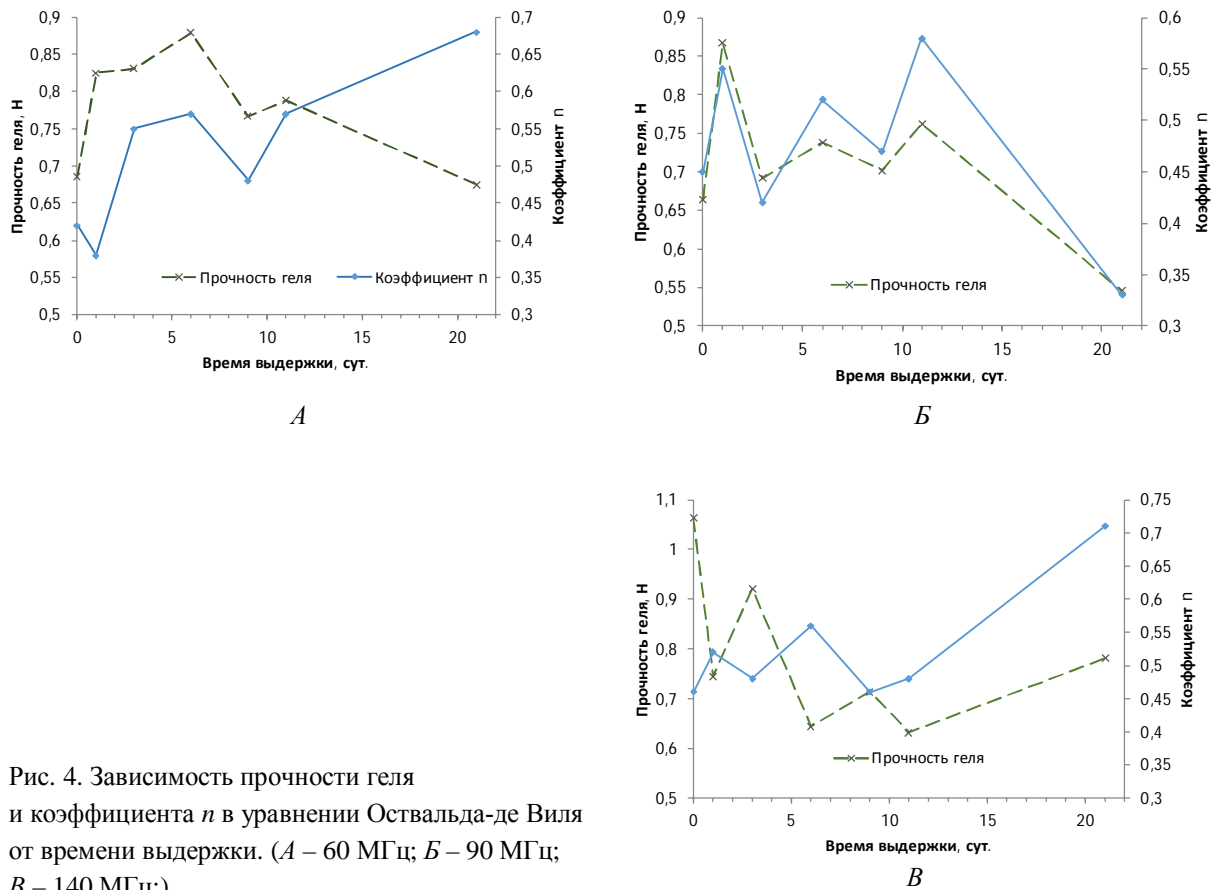


Рис. 4. Зависимость прочности геля и коэффициента n в уравнении Оствальда-де Виля от времени выдержки. (А – 60 МГц; Б – 90 МГц; В – 140 МГц;)

Приведенные данные демонстрируют вполне отчетливую корреляцию между прочностью и вязкостью геля. Однако, в некоторых случаях имеется синбатная зависимость (рис. 4Б), в некоторых – антибатная (рис. 4А). На остальных наблюдается смена зависимости от времени выдержки для прочности и напряжении сдвига для пограничного времени, примерно 9 сут. Конечно, говорить о строгой корреляции нет основания, но коэффициент n в уравнении Оствальда-де Виля достаточно наглядно определяет парную взаимозависимость вязкости и прочности геля. Это может служить основанием для утверждения об определяющей роли водной сетки, создающей вязкий и желеобразный каркас с молекулами агары. Различный частотный и временной отклик напряжения сдвига и прочности геля, по-видимому, связаны с тем какие структурные элементы воды прошли наибольшее преобразование на момент приготовления растворов агары. В работах [21–23] отмечалось, что структурная организация воды может иметь несколько уровней, время преобразования которых внутри кластера и между кластерами может существенно отличаться.

Это и отражается на специфичности зависимостей вязкости и прочности геля от частоты и времени выдержки. Таким образом есть основания утверждать, что метод измерения и вязкости и прочности агарового геля могут использоваться для количественной оценки изменения структурной организации воды в результате воздействия электромагнитного поля.

Выводы

1. Изучено влияние обработки воды электромагнитным полем на прочность приготовленного на её основе геля агар-агары. Установлено, что прочность геля изменяется по сравнению с гелем на необработанной воде как в зависимости от частоты, так и от времени выдержки воды после полевого воздействия.

2. С использованием аппроксимационного уравнения Оствальда-де Виля изучены зависимость вычисленных параметров уравнения: K – коэффициент консистенции и n – индекс течения от условий предобработки воды. Показано, что коэффициенты K и n , в зависимости от условий меняется более чем в два раза: от 0,9 до 0,44 и от 0,68 до 0,33, соответственно. При этом, минимальному значению n соответствует максимальное значение коэффициента K .

3. Сопоставление изменений индекса течения n с зависимостью прочности от условий предобработки воды демонстрирует три группы зависимостей: синбатное изменение прочности и индекса течения, антибатное и смешанное, при котором происходит качественное изменение хода кривых для ряда частот примерно на 9 сутки выдержки воды после воздействия на нее ЭМП.

Такие сложные зависимости служат доказательством неодинаковых структурных изменений в водной сетке как в результате полевого воздействия, так и после него в результате теплового движения.

4. Таким образом, с помощью полевой предобработки воды электромагнитным полем частотой 30–200 МГц и последующей выдержкой воды можно существенным образом менять механические свойства агаровых структур. Данный метод может быть использован для качественных и количественных оценок структурной перестройки водной сетки в результате воздействия физических полей.

Список литературы

1. Bertasa M., Dodero A., Alloisio M., Vicini S., Riedo C., Sansonetti A., Scalarone D., Castellano M. Agar gel strength: A correlation study between chemical composition and rheological properties // *European Polymer Journal*. 2020. Vol. 123, 109442. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2019.109442.
2. Dodero A., Vicini S., Alloisio M., Castellano M. Sodium alginate solutions: correlation between rheological properties and spinnability // *J. Mater. Sci.* 2019. Vol. 54. Pp. 8034–8046. DOI: 10.1007/s10853-019-03446-3.
3. Jakubczyk E., Gondek E., Kamińska-Dwórznička A., Samborska K., Wiktor A., Królikowski K. A complex approach to assessing properties of aerated agar-fructose gels: application of acoustic emission technique // *Food Hydrocoll.* 2019. Vol. 91. Pp. 66–75. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2019.01.013.
4. Dodero A., Williams R., Gagliardi S., Vicini S., Alloisio M., Castellano M. A microrheological and rheological study of biopolymers solutions: hyaluronic acid // *Carbohydr. Polym.* 2019. Vol. 203. Pp. 349–355. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.09.072.
5. Nishinari K., Watase M. Effect of alkali pretreatment on the rheological properties of concentrated agar-agar gels // *Carbohydr. Polym.* 1983. Vol. 3. Pp. 39–52. DOI: 10.1016/0144-8617(83)90011-5.
6. Rhein-Knudsen N., Ale M.T., Ajallouei F., Yu L., Meyer A.S. Rheological properties of agar and carrageenan from Ghanaian red seaweeds // *Food Hydrocoll.* 2017. Vol. 63. Pp. 50–58. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.08.023.
7. Labropoulos K.C., Niesz D.E., Danforth S.C., Kevrekidis P.G. Dynamic rheology of agar gels: Theory and experiments. Part I. Development of a rheological model // *Carbohydr. Polym.* 2002. Vol. 50. Pp. 393–406. DOI: 10.1016/S0144-8617(02)00084-X
8. 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/jcrpm.2018013720.
9. Стехин А.А., Яковлева Г.В. Структурированная вода: Нелинейные эффекты. М., 2008. 320 с.
10. Field A.D., Ulyanov S.S., Ilyukhina N.S. Monitoring of changes in cluster structures in water under AC magnetic field // *Optics and Spectroscopy*. 2016. Vol. 120, no. 1. Pp. 82–85. DOI: 10.1134/S0030400X16010239.
11. Esmailnezhad E., Choi H.J., Schaffie M., Gholizadeh M., Ranjbar M. Characteristics and applications of magnetized water as a green technology // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 161. Pp. 908–921. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.166.
12. Veselinovic D., Velikic Z. The pH measurement with glass electrode in an electromagnetic field // *Journal of the Serbian Chemical Society*. 2016. Vol. 81, issue 12. Pp. 1407–1414. DOI: 10.2298/JSC160407082V.
13. Chirkova V.Yu., Sharlayeva Ye.A., Stas I.Ye. Boiling temperature and the enthalpy of water vaporization exposed to high frequency electromagnetic field // *Bulletin of the University of Karaganda-Chemistry*. 2019. N94. Pp. 51–55. DOI: 10.31489/2019Ch2/51-55.
14. Calabro E., Magazu S. Methyl and methylene vibrations response in amino acids of typical proteins in water solution under high-frequency electromagnetic field // *Electromagnetic Biology and Medicine*. 2019. Vol. 38, no. 4. Pp. 271–278. DOI: 10.1080/15368378.2019.1641720.
15. 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 ацетоуксусного эфира // *Бутлеровские сообщения*. 2011. Т. 24, №1. С. 105–109.
16. Wang G., Yan Y.-J., Zhang Y., Zhou H., Cao S.-X., Wang J.-G. Effects of high-frequency electric field on microbial mass transfer in static state // *Huaxue Gongcheng // Chemical Engineering (China)*. 2014. Vol. 42, no. 12. Pp. 6–10. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9954.2014.12.002.
17. Шипунов Б.П., Рябых А.В. Влияние высокочастотного электромагнитного поля на мутаротацию водных растворов глюкозы и фруктозы // *Химия растительного сырья*. 2019. №3. Pp. 235–240. DOI: 10.14258/jcrpm.2019034456.
18. Шипунов Б.П., Маркин В.И. Аномальная реология растворов агар-агара, приготовленных с использованием воды, подвергнутой воздействию электромагнитного поля // *Химия растительного сырья*. 2020. №1. С. 73–80. DOI: 10.14258/jcrpm.2020017373.
19. Дроздова В.А., Насонова В.В., Семёнова А.А., Горбунова Н.А. Проблематика определения прочностных характеристик гелей // *Всё о мясе*. 2016. №6, С. 15–17.

20. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. М., 1977. 215 с.
21. Мельченко Н.А. Структура и динамические свойства жидкой воды // Вестник ДВО РАН. 2010. № 1. С. 65–74
22. Маленков Г.Г. Структурные модели воды // Журн. структур. химии. 2006. Т. 47, № 6. С. 5–35.
23. Чураков С.В., Калинин А.Г. Размер и структура молекулярных кластеров в сверхкритической воде // Журн. структур. химии. 1999. Т. 40. № 4. С. 673–680.

Поступила в редакцию 17 июня 2022 г.

После переработки 16 августа 2023 г.

Принята к публикации 28 августа 2023 г.

Для цитирования: Шипунов Б.П., Маркин В.И. Механические свойства растворов и гелей агара, приготовленных с использованием воды, подвергнутой воздействию электромагнитного поля // Химия растительного сырья. 2023. №3. С. 101–108. DOI: 10.14258/jcrpm.20230313430.

*Shipunov B.P.**, *Markin V.I.* MECHANICAL PROPERTIES OF AGAR SOLUTIONS AND GELS PREPARED USING WATER EXPOSED TO ELECTROMAGNETIC FIELD

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

The paper presents the results that continue the cycle of studies on the effect of a high-frequency field on water, which was later used to prepare agar solutions. The strength of agar gel (jelly) was studied depending on the conditions of field exposure to water. It is shown that the strength of the gel in a complex way depends on the frequency of field pretreatment and the time of water exposure after field exposure. The rheological properties were analyzed using the Ostwald-de Ville approximation equation. The dependence of the rheological constant (consistency coefficient) on the frequency of the field exposure and the exposure time after it is analyzed. Dependencies, as observed earlier, are non-systemic broken curves. The rheological properties and strength of the gel prepared in water that has undergone identical field treatment has been compared. The results can be conditionally divided into three groups: synbate change, antibate change and change of dependencies after 9 days of water exposure. It is shown that the strength and viscosity of the agar gel generally decreases. The complex dependences of strength and viscosity on factors affecting water are explained on the basis of the assumption of a complex and multilevel initial structure of water and its change both under the action of an electromagnetic field and over time as a result of thermal motion.

Key words: viscosity and strength of agar gel, coefficients of the Ostwald-de Wiel equation, relationship between viscosity and strength of agar gels, electromagnetic field effect on water.

* Corresponding author.

References

1. Bertasa M., Dodero A., Alloisio M., Vicini S., Riedo C., Sansonetti A., Scalalone D., Castellano M. *European Polymer Journal*, 2020, vol. 123, 109442. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2019.109442.
2. Dodero A., Vicini S., Alloisio M., Castellano M. *J. Mater. Sci.*, 2019, vol. 54, pp. 8034–8046. DOI: 10.1007/s10853-019-03446-3.
3. Jakubczyk E., Gondek E., Kamińska-Dwórznicza A., Samborska K., Wiktor A., Królikowski K. *Food Hydrocoll.*, 2019, vol. 91, pp. 66–75. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2019.01.013.
4. Dodero A., Williams R., Gagliardi S., Vicini S., Alloisio M., Castellano M. *Carbohydr. Polym.*, 2019, vol. 203, pp. 349–355. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.09.072.
5. Nishinari K., Watase M. *Carbohydr. Polym.*, 1983, vol. 3, pp. 39–52. DOI: 10.1016/0144-8617(83)90011-5.
6. Rhein-Knudsen N., Ale M.T., Ajallouei F., Yu L., Meyer A.S. *Food Hydrocoll.*, 2017, vol. 63, pp. 50–58. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.08.023.
7. Labropoulos K.C., Niesz D.E., Danforth S.C., Kevrekidis P.G. *Carbohydr. Polym.*, 2002, vol. 50, pp. 393–406. DOI: 10.1016/S0144-8617(02)00084-X
8. 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.).
9. Stekhin A.A., Yakovleva G.V. *Strukturirovannaya voda: Nelineynnye efekty*. [Structured Water: Nonlinear Effects]. Moscow, 2008, 320 p. (in Russ.).
10. Usanov A.D., Ulyanov S.S., Ilyukhina N.S. *Optics and Spectroscopy*, 2016, vol. 120, no. 1, pp. 82–85. DOI: 10.1134/S0030400X16010239.
11. Esmailnezhad E., Choi H.J., Schaffie M., Gholizadeh M., Ranjbar M. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 161, pp. 908–921. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.166.
12. Veselinovic D., Velikic Z. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2016, vol. 81, issue 12, pp. 1407–1414. DOI: 10.2298/JSC160407082V.
13. Chirkova V.Yu., Sharlayeva Ye.A., Stas I.Ye. *Bulletin of the University of Karaganda-Chemistry*, 2019, no. 94, pp. 51–55. DOI: 10.31489/2019Ch2/51-55.
14. Calabro E., Magazu S. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 2019, vol. 38, no. 4, pp. 271–278. DOI: 10.1080/15368378.2019.1641720.
15. Shipunov B.P., Timiryazev A.V., Kondratova Ye.V. *Butlerovskiye soobshcheniya*, 2011, vol. 24, no. 1, pp. 105–109. (in Russ.).
16. Wang G., Yan Y.-J., Zhang Y., Zhou H., Cao S.-X., Wang J.-G. *Chemical Engineering (China)*, 2014, vol. 42, no. 12, pp. 6–10. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9954.2014.12.002.
17. Shipunov B.P., Ryabykh A.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2019, no. 3, pp. 235–240. DOI: 10.14258/jcprm.2019034456. (in Russ.).
18. Shipunov B.P., Markin V.I. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, no. 1, pp. 73–80. DOI: 10.14258/jcprm.2020017373. (in Russ.).
19. Drozdova V.A., Nasonova V.V., Semonova A.A., Gorbunova N.A. *Vso o myase*, 2016, no. 6, pp. 15–17. (in Russ.).
20. Vinogradov G.V., Malkin A.YA. *Reologiya polimerov*, Moscow, 1977, 215 p. (in Russ.).
21. Mel'chenko N.A. *Vestnik DVO RAN*, 2010, no. 1, pp. 65–74. (in Russ.).
22. Malenkov G.G. *Zhurnal strukturnoy khimii*, 2006, vol. 47, no. 6, pp. 5–35. (in Russ.).
23. Churakov S.V., Kalinichev A.G. *Zhurnal strukturnoy khimii*, 1999, vol. 40, no. 4, pp. 673–680. (in Russ.).

Received June 17, 2022

Revised August 16, 2023

Accepted August 28, 2023

For citing: Shipunov B.P., Markin V.I. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2023, no. 3, pp. 101–108. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20230313430.