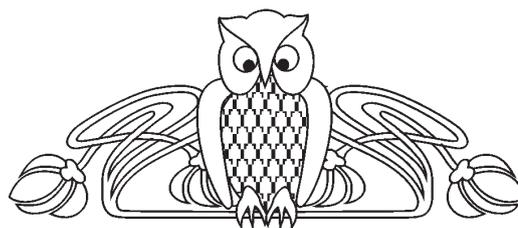




УДК 541(64+127)

## Изучение реологических свойств растворов натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы

В. В. Чернова, М. С. Котяшов, Р. Ю. Лаздин, Е. И. Кулиш



Чернова Валентина Витальевна, кандидат химических наук, доцент кафедры высокомолекулярных соединений и общей химической технологии, Башкирский государственный университет, Уфа, my\_life82@mail.ru

Котяшов Михаил Сергеевич, студент, Уфимский государственный нефтяной технический университет, mkhlook@gmail.com

Лаздин Роман Юльевич, аспирант кафедры высокомолекулярных соединений и общей химической технологии, Башкирский государственный университет, Уфа, ejvq@bk.ru

Кулиш Елена Ивановна, доктор химических наук, заведующий кафедрой высокомолекулярных соединений и общей химической технологии, Башкирский государственный университет, Уфа, onlyalena@mail.ru

Реологические характеристики растворов полимеров сказываются не только на процессе их переработки, но и могут оказывать влияние на структуру и свойства получаемых из растворов изделий. Данная работа посвящена изучению реологических свойств водных растворов натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы в воде. Показано, что для изучаемых растворов характерно наличие концентрационной области неструктурированных полуразбавленных растворов без образования сетки зацеплений. Установлено, что формирование флуктуационной сетки зацеплений, сопровождающееся сменой механизма переноса с трансляционного на репационный, а также появление излома на кривой зависимости вязкости и энергии активации вязкого течения от концентрации, происходит при превышении содержания полимера в растворе выше 0,3 г/дл. Проявление эффекта Вайсенберга и переход системы от поведения, характерного для вязко-упругой жидкости к поведению, типичному для упруго-вязких тел, наблюдаются в растворах с концентрацией выше 5 г/дл. Выявленные в данной работе особенности реологического поведения водных растворов натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы необходимо учитывать при получении материалов на ее основе.

**Ключевые слова:** карбоксиметилцеллюлоза, реология, вязкоупругие свойства, структурообразование.

Поступила в редакцию: 02.12.2019 / Принята: 26.12.2019 / Опубликовано: 01.06.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-2-163-169>

Известно, что характер структурообразования полимеров в растворе оказывает существенное влияние на свойства получаемых из

растворов волокон, пленок или иных материалов [1–2]. Несмотря на то что связь между структурой полимера в растворе и свойствами формируемых из раствора изделий была понята давно, и даже был написан ряд уже ставших классическими работ [3–5], тем не менее, комплексное изучение взаимосвязи структура – свойства на протяжении многих лет остается актуальной научно-технической задачей.

Очевидным является также существенное влияние реологических (вязкостных) характеристик растворов полимеров на процесс их переработки, что, в свою очередь, также может оказать влияние на структуру и свойства получаемых из растворов изделий [6]. При этом следует учитывать, что процесс переработки полимеров происходит в широком диапазоне скоростей сдвига, а растворы и расплавы полимеров в общем случае представляют собой неньютоновские жидкости. Таким образом, для них не существует возможности измерить вязкость при одной скорости сдвига, а затем экстраполировать ее на другие значения. В связи с этим возникает необходимость в исследовании вязкостных характеристик полимерного раствора в широком диапазоне значений скорости сдвига.

Целью данной работы стало изучение реологических свойств водных растворов натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы в воде. Выбор объекта исследований был обусловлен спектром свойств полимера [7–8] и его широким применением [9].

### Материалы и методы

В работе использовали натриевую соль карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) со степенью замещения  $\gamma = 70\%$  и с молекулярной массой 260 000 а.е.м, рН = 7,2.

Характеристическую вязкость полимеров определяли с помощью вискозиметра Убеллоде при температуре  $T = 25 \pm 1^\circ \text{C}$  и рассчитывали, используя метод Баранова [10], позволяющий исключить влияние эффекта полиэлектролитного набухания на значение характеристической вязкости.



Согласно данному подходу значение  $\frac{\partial \ln(\eta_{\text{отн}})}{\partial c}$  в каждой точке зависимости  $\ln \eta_{\text{отн}}$  от  $c$  может рассматриваться как текущее значение характеристической вязкости:

$$[\eta]^* = \frac{\partial \ln(\eta_{\text{отн}})}{\partial c}, \quad (1)$$

где  $\eta_{\text{отн}}$  – значение относительной вязкости раствора полимера,  $c$  – концентрация полимера в растворе.

Очевидно, что при  $c \rightarrow 0$  величина  $[\eta]^*$  соответствует начальному наклону зависимости  $\ln \eta_{\text{отн}}$  от  $c$  и совпадает с величиной характеристической вязкости  $[\eta]$ , описывающей поведение изолированной макромолекулы.

Реологические измерения водных растворов КМЦ проводили на модульном динамическом реометре Haake Mars III при 25° С в двух режимах – непрерывного сдвигового деформирования в диапазоне скоростей сдвига от 0,1 до 100 с<sup>-1</sup> и в осцилляционном режиме. Поскольку испытания в осцилляционном режиме должны выполняться в области линейной вязкоупругости, первоначально на основе зависимостей модулей накопления и потерь от амплитуды напряжений, полученных при постоянной частоте осцилляции, определяют оптимальные значения амплитуды, соответствующие неизменным значениям модулей (область линейной вязкоупругости). Для растворов КМЦ

в интервале концентраций от 0,01 до 10% мас. в диапазоне амплитуд от 0,1 до 10 Па и частот осцилляции от 0,1 до 10 Гц раствор соответствовал области линейной вязкоупругости, так как значения модулей не зависели от амплитуды напряжения. Энергии активации вязкого течения исследуемых систем  $\Delta E_a$  в диапазоне температур от 15 до 45° С оценивали по уравнению Аррениуса–Френкеля–Эйринга (2) и обсчитывали методом наименьших квадратов:

$$\eta = A e^{\Delta E_a/RT}, \quad (2)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $A$  – константа.

### Результаты и их обсуждение

В режиме установившегося течения в соответствии с законом Ньютона напряжение сдвига  $\tau$  должно линейно возрастать с ростом скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  (рис. 1, а, кривая 1). При этом вязкость  $\eta$  не должна зависеть от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  (см. рис. 1, б, кривая 1).

Однако зачастую течение жидкостей не подчиняется закону Ньютона. Например, при течении дилатантных жидкостей вязкость растет с ростом скорости сдвига (см. рис. 1, б, кривая 2), а напряжение сдвига может быть представлено зависимостью вида  $\tau \sim \dot{\gamma}^n$ , где  $n > 1$  (см. рис. 1, а, кривая 2). Для псевдопластичных жидкостей, напротив, характерно уменьшение вязкости с уве-

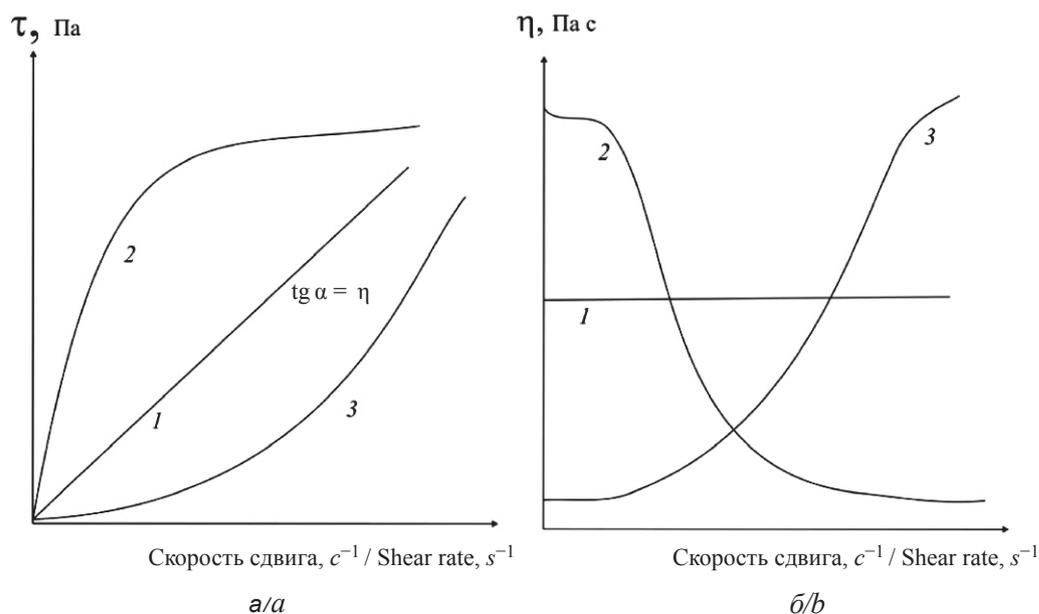


Рис. 1. Схематическое изображение зависимости напряжения (а) и вязкости (б) от скорости сдвига для ньютоновских (1), псевдопластичных (2) и дилатантных (3) жидкостей

Fig. 1. Schematic representation of the dependence of stress (a) and viscosity (b) on shear rate for Newtonian (1), pseudoplastic (2) and dilatant (3) liquids



личением скорости сдвига, а значение показателя  $n$  в степенной зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига имеет значения  $n < 1$  (см. рис. 1, кривые 3), т.е. в случае псевдопластичных жидкостей напряжение сдвига растет медленнее, чем скорость сдвига. Свойствами псевдопластичных жидкостей обладает большинство растворов и расплавов полимеров.

На рис. 2 изображена зависимость напряжения от скорости сдвига для растворов КМЦ в воде различной концентрации. Обращает на себя внимание ряд фактов. Во-первых, вид кривых «напряжение от скорости сдвига» типичен для псевдопластичных жидкостей – напряжение растет с увеличением скорости сдвига, но не по линейному закону, а по степенному:  $\tau = \gamma^n$ , где  $n$  меньше 1. Во-вторых, с увеличением концентрации КМЦ в растворе напряжение сдвига возрастает, а значение показателя  $n$ , величина которого может быть определена путем логарифмирования зависимости напряжения от скорости сдвига, напротив, уменьшается (таблица). В-третьих, начиная с концентрации КМЦ в растворе 5 г/дл и более в зависимости напряжения от скорости сдвига наблюдаются аномалии, свидетельствующие о проявлении эффекта Вайсенберга, обусловленного появлением в системе не только сдвиговых, но и нормальных (т.е. направленных по нормали к поверхности) напряжений.

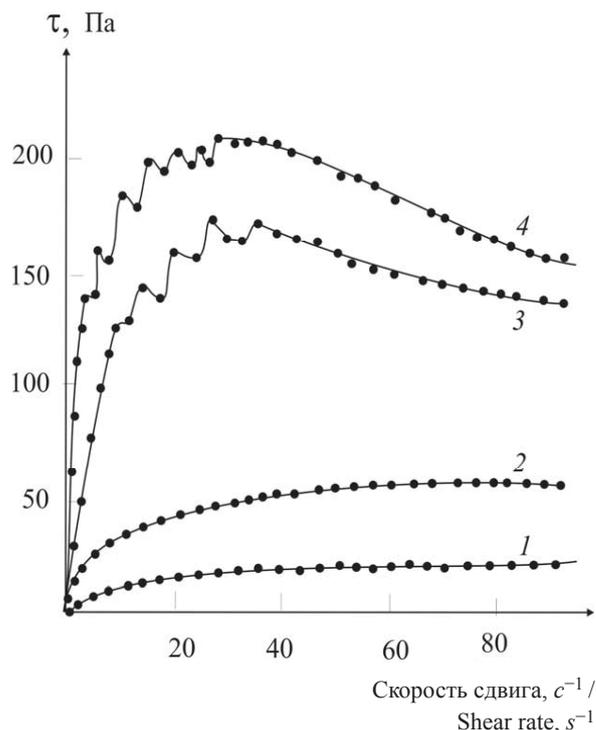


Рис. 2. Зависимость напряжения от скорости сдвига для раствора КМЦ в воде с концентрацией, г/дл: 1,0 (1), 3 (2) 5,0 (3) и 7 (4)

Fig. 2. Dependence of stress on shear rate for a carboxymethyl cellulose solution in water with the concentration, g/dl: 1.0 (1), 3 (2), 5.0 (3) and 7 (4)

**Некоторые характеристики растворов КМЦ, определенные из реологических данных**  
**Some characteristics of carboxymethyl cellulose solutions, determined using rheological data**

Концентрация КМЦ в растворе, г/дл / СМС concentration in solution, g/dl	Показатель $n$ в зависимости $\tau \sim n$ / Indicator $n$ depending on $\tau \sim n$	$E_a$ , кДж/моль / $E_a$ , kJ/mol	$f^*$ , Гц / $f^*$ , Hz	$\tau$ , с
0,2	0,82	16,0	6,9	0,02
0,3	0,78	16,0	6,9	0,02
0,5	0,71	16,1	6,8	0,02
1,0	0,62	18,6	4,5	0,03
2,0	0,47	25,5	2,1	0,07
3,0	0,23	34,7	1,0	0,18

Поскольку при проявлении эффекта Вайсенберга к полученным в режиме непрерывного сдвигового деформирования данным следует относиться с осторожностью, растворы КМЦ были исследованы также в осцилляционном режиме.

В режиме осцилляции изучается зависимость вязкости (которая в этом случае носит название комплексной) от угловой скорости (частоты осцилляции). Можно отметить, что растворы КМЦ небольшой концентрации ведут себя практически как ньютоновские жидкости, т.е. их вязкость в определенном диапазоне частот

не зависит от частоты осцилляции. Повышение концентрации КМЦ в растворе приводит к типичному (для псевдопластичных жидкостей) изменению вязкости с частотой осцилляции, а именно, падению вязкости с частотой осцилляции (рис. 3). При этом повышение концентрации КМЦ в растворе сопровождается значительным повышением вязкости. Более того, в соответствии с общепринятыми подходами [11, 12] зависимость вязкости от концентрации КМЦ в растворе в логарифмических координатах может быть описана степенной функцией  $\eta \sim c^n$ . В области



небольших концентраций полимера вязкость должна быть пропорциональна концентрации  $c$ , что соответствует области разбавленных растворов неперекрывающихся клубков. По мере увеличения концентрации макромолекулы начинают взаимодействовать друг с другом, вызывая рост вязкости, вследствие повышения сопротивления их движению. При последующем увеличении концентрации полимера в растворе происходит формирование флуктуационной сетки зацеплений и переход в полуразбавленный режим со сменной механизма переноса с трансляционного на рептационный. Данный факт сопровождается увеличением показателя степени  $n$  и появлением излома на кривой зависимости вязкости от концентрации в логарифмических координатах.

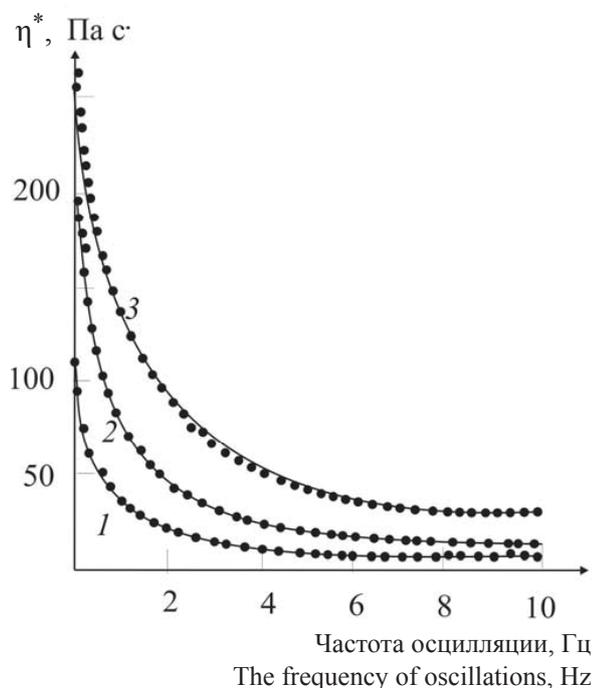


Рис. 3. Зависимость комплексной вязкости от частоты осцилляции для раствора КМЦ в воде с концентрацией, г/дл: 3,0 (1), 5 (2) и 7 (3)

Fig. 3. Dependence of complex viscosity on the oscillation frequency for a carboxymethyl cellulose solution in water with the concentration, g/dl: 3.0 (1), 5 (2), and 7 (3)

Как видно из данных рис. 4, зависимость  $\lg \eta^* - \lg c$  разбивается на два участка. На первом участке в области небольших концентраций полимера тангенс угла наклона (т.е. значение показателя  $n$ ) приблизительно равен 1, а на втором – 5. При этом концентрация формирования сетки зацеплений  $c_e$  соответствует раствору с концентрацией 0,3 г/дл.

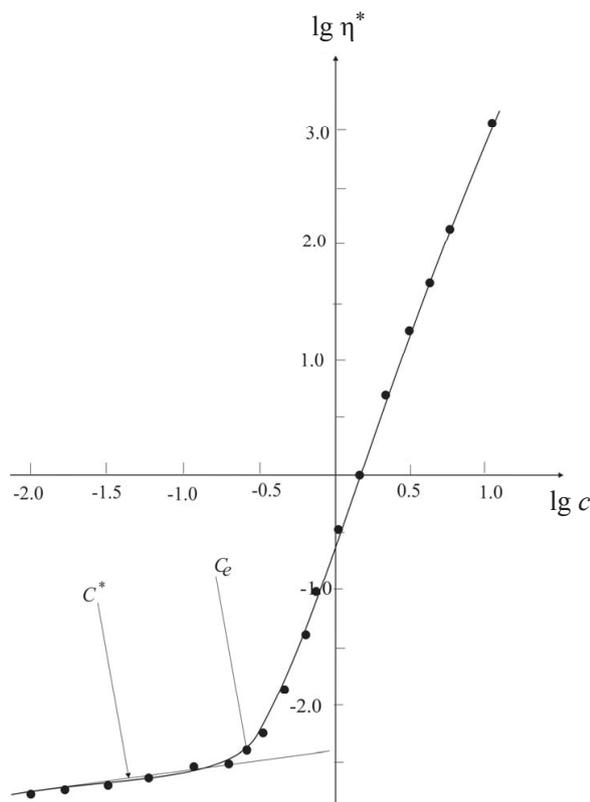


Рис. 4. Зависимость комплексной вязкости КМЦ в воде, определенной при частоте осцилляции 1 Гц, от содержания КМЦ в растворе

Fig. 4. Dependence of complex viscosity of carboxymethyl cellulose in water, determined at the oscillation frequency of 1 Hz, on the content of carboxymethyl cellulose in the solution

Учитывая, что определенное методом Баранова значение характеристической вязкости  $[\eta]$  для КМЦ составило 30,10 дл/г, точка кроссовера  $c^* = 1/[\eta]$  соответствует концентрации  $1/30,10 = 0,033$  г/дл. При этом достижение точки кроссовера никак не сказывается на механизме течения раствора полимеров. В связи с этим можно говорить о наличии переходной области от участка 1 к участку 2, в которой макромолекулы уже соприкасаются друг с другом, но сетки зацеплений еще не образуют. Наличие такой области в случае растворов полиэлектролитов в работе [13] связывают с разбуханием полимерного клубка в области низких концентраций вследствие электростатического отталкивания одноименно заряженных групп, расположенных вдоль цепи. Очевидно, в переходной зоне с ростом концентрации происходит постепенное сжатие макромолекулярных клубков из-за их контакта и преодоления сил электростатического отталкивания. Только после этого в системе на-



чинает формироваться сетка зацеплений. Ранее наличие такой области нами было обнаружено для растворов хитозана в уксусной кислоте [14] и водных растворов натриевой соли сукцинилата хитозана [15]. Именно структурообразование полимеров в полуразбавленной области, вследствие образования сетки зацеплений, и приводит к проявлению аномалий вязкости.

Формирование флуктуационной сетки зацеплений отражается также и на концентрационной зависимости энергии активации вязкого течения, определенной из зависимости комплексной вязкости от температуры. Излом на концентрационной зависимости энергии активации вязкого течения, свидетельствующий об изменении механизма массопереноса в растворе, происходит при концентрации, соответствующей  $c_c$ . Отметим, что значения энергии активации невысоки, и в случае разбавленных растворов по порядку величины совпадают с энергией активации вязкого течения растворителя (см. таблицу).

Рассмотрение зависимости модулей накопления и потерь от угловой скорости (частоты осцилляции) в логарифмических координатах, проведенное в области линейной вязкоупругости, позволяет констатировать, что в диапазоне концентраций КМЦ в растворе, соответствующей области начала формирования сетки зацеплений, тангенс угла частотной зависимости модуля накопления в логарифмических координатах равен 2, а модуля потерь – 1. Это свидетельствует о том, что поведение системы хорошо описывается простой моделью Максвелла для вязкоупругой жидкости с одним временем релаксации  $\tau$ , определяемым как величина, обратная угловой скорости, при которой величина  $G' = G''$ . Значение времени релаксации и частоты осцилляции  $f^*$ , при которой модуль накопления имеет такие же значения, как и модуль потерь, приведены в таблице.

Дальнейшее увеличение содержания полимера в растворе сопровождается уменьшением значения степенного показателя в частотных зависимостях модуля упругости от 2, характерного для вязких жидкостей ( $G' \sim \omega^2$ ), до 0,2 ( $G' \sim \omega^{0,2}$ ), свидетельствующего о приближении значения модуля упругости к равновесному, характерному для твердых тел. Частотная зависимость модуля потерь также изменяется по мере концентрирования раствора полимера от  $G'' \sim \omega^1$  до  $G'' \sim \omega^{0,1}$ .

Изучение концентрационной зависимостей модулей накопления и потерь (рис. 5) позволяет говорить о том, что при концентрациях КМЦ в растворе менее 5 г/дл модуль потерь превышает модуль накопления, что свидетельствует о том,

что исследованные растворы являются вязкоупругими жидкостями. Однако при превышении содержания КМЦ в растворе более 5 г/дл ситуация изменяется. Растворы полимеров начинают вести себя как упруго-вязкие тела. Таким образом, при концентрации  $c = 5$  г/дл происходит переход системы от поведения, характерного для вязкоупругой жидкости ( $G' < G''$ ), к поведению, типичному для упруго-вязких тел ( $G' > G''$ ).

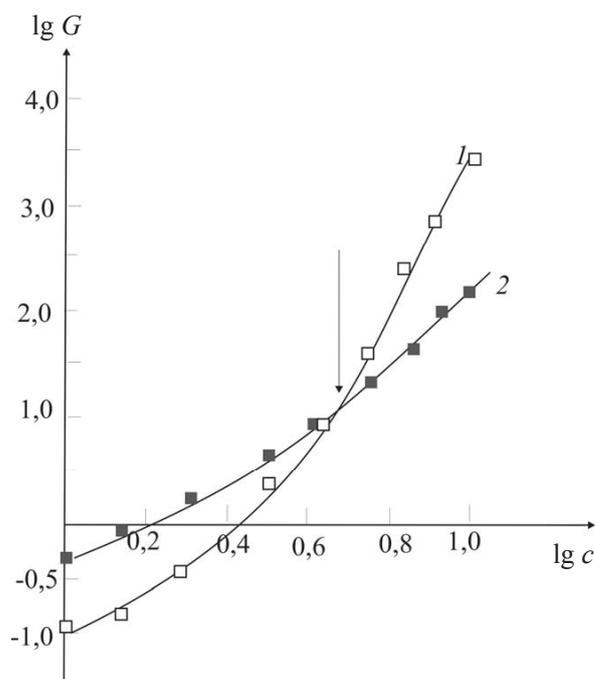


Рис. 5. Зависимость модуля накопления (1) и потерь (2) для растворов КМЦ в воде

Fig. 5. Dependence of the modulus of storage (1) and loss (2) for carboxymethyl cellulose solutions in water

Таким образом, выявленные в данной работе особенности реологического поведения водных растворов натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы необходимо учитывать при получении материалов на ее основе.

### Выводы

1. Установлено, что для водных растворов натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы характерно наличие концентрационной области (от 0,03 до 0,3 г/дл) неструктурированных полуразбавленных растворов без образования сетки зацеплений.

2. Показано, что превышение концентрации КМЦ в растворе 0,3 г/дл приводит к формированию флуктуационной сетки зацеплений со сменой механизма переноса с трансляционного на репационный. Данный факт сопровождается увеличением показателя степени  $n$  в зависимости



$\tau \sim \dot{\gamma}^n$  и появлением излома на кривой зависимости вязкости и энергии активации вязкого течения от концентрации.

3. Установлено, что начиная с содержания КМЦ в растворе 5г/дл и более в зависимости напряжения от скорости сдвига наблюдаются аномалии, свидетельствующие о проявлении эффекта Вайсенберга, обусловленного появлением в системе не только сдвиговых, но и нормальных (т.е. направленных по нормали к поверхности) напряжений, и переход системы от поведения, характерного для вязко-упругой жидкости, к поведению, типичному для упруго-вязких тел.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-33-90093).

### Список литературы

1. Тагер А. А. Физико-химия полимеров. М. : Научный мир, 2007. 576 с.
2. Ilyin S. O., Makarova V. V., Anokhina T. S., Volkov A. V., Antonov S. V. Effect of coagulating agent viscosity on the kinetics of formation, morphology, and transport properties of cellulose nanofiltration membranes // Polymer Science. Ser. A. 2017. Vol. 59, iss. 5. P. 676–684. DOI: 10.1134/S0965545X17050054
3. Панков С. П. Физико-химические основы переработки растворов полимеров. М. : Химия, 1971. 362 с.
4. Ageev E. P., Matushkina N. N., Vikhoreva G. A., Pchelko O. M., Gal'braikh L. S., Gal'braikh L. S. Dependence of some structural and transport properties of chitosan films on the preparation conditions and the polymer characteristics // Polymer Science. Ser. A. 2000. Vol. 42, iss. 2. P. 236–241.
5. Udra S. A., Kazarin L. A., Mashchenko V. I., Gerasimov V. I. Kinetic and structural aspects of gelation in polyacrylonitrile-propylene carbonate system // Polymer Science. Ser. A. 2006. Vol. 48, iss. 10. P. 1105–1109. DOI: 10.1134/S0965545X06100129
6. Торнер П. В. Теоретические основы переработки полимеров. М. : Химия, 1977. 464 с.
7. Tkacheva N. I., Morozov S. V., Grigor'ev I. A., Mogonov D. M., Kolchanov N. A. Modification of Cellulose as a Promising Direction in the Design of New Materials // Polymer Science. Ser. B. 2013. Vol. 55, iss. 7–8. P. 409–429. DOI: 10.1134/S1560090413070063
8. Кувшинова С. А., Голубев А. Е., Бурмистров В. А., Койфман О. И. Современные подходы к химической модификации целлюлозы и ее производных // Рос. хим. журн. 2016. Т. 60, № 1. С. 69–84.
9. Drioli E., Giorno L. Encyclopedia of Membranes. Berlin : Springer, 2016. 2090 p.
10. Баранов В. Г., Бресткин Ю. В., Агранова С. А., Пинкевич В. Н. Поведение макромолекул полистирола в «загущенном» хорошем растворителе // Высокомолек. соед. Б. 1986. Т. 28. С. 841–846.
11. Виноградов Г. В., Малкин А. Я. Реология полимеров. М. : Химия, 1977. 440 с.
12. Ferry J. D. Viscoelastic Properties of Polymers. N. Y. : Wiley, 1980. 672 p.
13. Dreval' V. E., Vasil'ev G. B., Litmanovich E. A., Kulichikhin V. G. Rheological properties of concentrated aqueous solutions of anionic and cationic polyelectrolyte mixtures // Polymer Science. Ser. A. 2008. Vol. 50, № 7. P. 751–756. DOI: 10.1134/S0965545X08070043
14. Bazunova M. V., Valiev D. R., Chernova V. V., Kulish E. I. Rheological properties of solutions of chitosan and its complexes with colloid particles of a silver iodide sol // Polymer Science. Ser. A. 2015. Vol. 57, iss. 5. P. 675–679. DOI: 10.1134/S0965545X15050041
15. Bazunova M. V., Shurshina A. S., Chernova V. V., Kulish E. I. A rheological study of molecular and supramolecular organization of chitosan succinamide in a mixed water–ethanol solvent // Russian Journal of Physical Chemistry. Ser. B. 2016. Vol. 10, iss. 6. P. 1014–1021. DOI: 10.1134/S1990793116060178

### Образец для цитирования:

Чернова В. В., Котышов М. С., Лаздин Р. Ю., Кулиш Е. И. Изучение реологических свойств растворов натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 163–169. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-2-163-169>

### Study of Rheological Properties of Sodium Salt Solutions of Carboxymethyl Cellulose

V. V. Chernova, M. S. Kotyashov, R. Yu. Lazdin, E. I. Kulish

Valentina V. Chernova, <https://orcid.org/0000-0002-3443-8911>, Bashkir State University, 32 Zaki Validi St., Ufa 450076, Russia, my\_life82@mail.ru

Mikhail S. Kotyashov, Ufa State Petroleum Technological University, 1 Kosmonavtov St., Ufa 450062, Russia, mkhlook@gmail.com

Roman Yu. Lazdin, Bashkir State University, 32 Zaki Validi St., Ufa 450076, Russia, ejvq@bk.ru

Elena I. Kulish, <https://orcid.org/0000-0002-6240-0718>, Bashkir State University, 32 Zaki Validi St., Ufa 450076, Russia, onlyalena@mail.ru

Rheological characteristics of polymer solutions not only affect their processing, but can also influence on the structure and properties of products obtained from the solutions. This work is devoted to the study of rheological properties of sodium salt aqueous solutions of carboxymethyl cellulose in water. It is shown that the studied solutions are characterized by the presence of concentration area



of unstructured semi-separated solutions without network formation. It is established that the formation of a fluctuation network, accompanied by the change of the transfer mechanism from translation to reposition, as well as the appearance of a break on the curve of viscosity and energy of activation of viscous flow from concentration, occurs when the content of polymer in the solution exceeds 0.3 g/dl. The occurrence of Weissenberg effect and the transition of the system from a behavior characteristic of a viscous-elastic liquid to the one typical of elastic-viscous bodies are observed in solutions with the concentration more than 5 g/dl. The features of rheological behavior of sodium salt aqueous solutions of carboxymethyl cellulose revealed in this work should be taken into account when producing materials based on it.

**Keywords:** carboxymethyl cellulose, rheology, viscoelastic properties, structure formation.

Received: 02.12.2019 / Accepted: 26.12.2019 / Published: 01.06.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No.19-33-90093).

## References

1. Tager A. A. *Physico-khimiya polimerov* [Physical Chemistry of Polymers]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2007. 576 p. (in Russian).
2. Ilyin S. O., Makarova V. V., Anokhina T. S., Volkov A. V., Antonov S. V. Effect of coagulating agent viscosity on the kinetics of formation, morphology, and transport properties of cellulose nanofiltration membranes. *Polymer Science. Series A*, 2017, vol. 59, iss. 5, pp. 676–684. DOI: 10.1134/S0965545X17050054
3. Papkov S. P. *Physico-khimicheskie osnovy pererabotki polimerov* [Physical and chemical bases of polymer solution processing]. Moscow, Khimiya Publ., 1972. 362 p. (in Russian).
4. Ageev E. P., Matushkina N. N., Vikhoreva G. A., Pchelko O. M., Gal'braikh L. S. Dependence of some structural and transport properties of chitosan films on the preparation conditions and the polymer characteristics. *Polymer Science. Series A*, 2000, vol. 42, iss. 2, pp. 236–241.
5. Udra S. A., Kazarin L. A., Mashchenko V. I., Gerasimov V. I. Kinetic and structural aspects of gelation in polyacrylonitrile-propylene carbonate system. *Polymer Science. Series A*, 2006, vol. 48, iss. 10, pp. 1105–1109. DOI: 10.1134/S0965545X06100129
6. Torner R. V. *Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov* [Theoretical Bases of Polymer Processing]. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 464 p. (in Russian).
7. Tkacheva N. I., Morozov S. V., Grigor'ev I. A., Mogonov D. M., Kolchanov N. A. Modification of Cellulose as a Promising Direction in the Design of New Materials. *Polymer Science. Series B*, 2013, vol. 55, iss. 7–8, pp. 409–429. DOI: 10.1134/S1560090413070063
8. Kuvshinova S. A., Golubev A. E., Burmistrov V. A., Koifman O. I. Modern approaches to chemical modification of cellulose and its derivatives. *Ros. Chem. J.*, 2016, vol. 60, iss. 1, pp. 69–84 (in Russian).
9. Drioli E., Giorno L. *Encyclopedia of Membranes*. Berlin, Springer, 2016. 2090 p.
10. Baranov V. G., Brestkin Yu. V., Agranova S. A., Pinkevich V. N. The behavior of polystyrene macromolecules in a “thickened” good solvent. *Polymer Science. Series B*, 1986, vol. 28, iss. 10, pp. 841–846 (in Russian).
11. Vinogradov G. V., Malkin A. Ya. *Reologiya polimerov* [Rheology of Polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 440 p. (in Russian).
12. Ferry J. D. *Viscoelastic Propertis of Polymers*. New York, Wiley, 1980. 672 p.
13. Dreval' V. E., Vasil'ev G. B., Litmanovich E. A., Kulichikhin V. G. Rheological properties of concentrated aqueous solutions of anionic and cationic polyelectrolyte mixtures. *Polymer Science. Series A*, 2008, vol. 50, no. 7, pp. 751–756. DOI: 10.1134/S0965545X08070043
14. Bazunova M. V., Valiev D. R., Chernova V. V., Kulish E. I. Rheological properties of solutions of chitosan and its complexes with colloid particles of a silver iodide sol. *Polymer Science. Series A*, 2015, vol. 57, iss. 5, pp. 675–679. DOI: 10.1134/S0965545X15050041
15. Bazunova M. V., Shurshina A. S., Chernova V. V., Kulish E. I. A rheological study of molecular and supra-molecular organization of chitosan succinamide in a mixed water–ethanol solvent. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2016, vol. 10, iss. 6, pp. 1014–1021. DOI: 10.1134/S1990793116060178

## Cite this article as:

Chernova V. V., Kotyashov M. S., Lazdin R. Yu., Kulish E. I. Study of Rheological Properties of Sodium Salt Solutions of Carboxymethyl Cellulose. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 163–169 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-2-163-169>