

УДК 547.458.88+664.292

## СОРБЦИОННЫЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ СШИТЫХ РАСТВОРОВ НАТРИЕВОЙ СОЛИ КАРБОКСИМЕТИЛЦЕЛЛЮЗЫ

© А.В. Филатова\*, А.С. Тураев, Л.Б. Азимова

Институт биоорганической химии имени академика А.С. Садыкова АН РУз,  
ул. Мирзо Улугбека, 83, Ташкент, 100125, Узбекистан, [albfil@mail.ru](mailto:albfil@mail.ru)

Исследованы сорбционные и реологические свойства низкоконцентрированных растворов Na-КМЦ, спищих ионами алюминия и комплексными соединениями алюминия с лимонной кислотой. Установлено, что при увеличении значения pH структурированной системы с 2.4 до 4.9 происходит увеличение величины динамических вязкостей. Показано, что с увеличением концентрации исходной Na-КМЦ величина эффективной вязкости возрастает. С увеличением числа химических сшивок и концентрации в системе наблюдаются более высокие величины эффективных вязкостей и напряжения сдвига гидрогелей Na-КМЦ, что обусловлено повышением структурированности системы. Исследована сорбционная способность высущенных гелей и показано, что при увеличении размера сшивающего агента с помощью лимонной кислоты радиус пор спицей системы существенно возрастает, что способствует сшиванию более удаленных друг от друга в пространстве участков одной или различных цепей при одинаковой исходной конформации целлюлозной цепи. Вероятность межмакромолекулярного сшивания, ответственного за гелеобразование, возрастает с увеличением исходной концентрации и при дополнительном присутствии многоосновных кислот. При изменении значения pH среды целлюлозная цепь макромолекулы Na-КМЦ в растворе принимает различную конформацию. В зависимости от исходного конформационного состояния целлюлозной цепи и длины сшивающего агента можно получить гели Na-КМЦ с различной структурой.

*Ключевые слова:* Na-КМЦ, химическая сшивка, конформация, динамическая вязкость, реологические свойства.

**Для цитирования:** Филатова А.В., Тураев А.С., Азимова Л.Б. Сорбционные и реологические свойства низкоконцентрированных спищих растворов натриевой соли карбоксиметилцеллюзы // Химия растительного сырья. 2025. №2. С. 103–110. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250215031>.

### **Введение**

В настоящее время активно развивается область, посвященная получению гидрогелей на основе полисахаридов, обладающих собственной биологической активностью. Перспективным полимером является натриевая соль карбоксиметилцеллюзы (Na-КМЦ), которая сочетает ценные физико-химические свойства с полной биологической безвредностью, биосовместимостью, биодеградацией при контакте с живым организмом [1]. Также этот полимер обладает связующими, пленкообразующими свойствами и эффективно структурируется ионами поливалентных металлов с образованием в растворах координационных сеток. Наиболее важным свойством Na-КМЦ является ее способность образовывать при различных температурах низко- и высоковязкие растворы [2]. Водные растворы Na-КМЦ имеют способность к образованию ассоциатов. Однако эти ассоциаты легко разрушаются под действием сдвигового напряжения [3]. Водные растворы Na-КМЦ являются полиэлектролитами, в связи с чем физико-химические процессы, происходящие в системе полиэлектролит-растворитель, зависят от концентрации солей, т.е. от ионной силы раствора и межмолекулярного электростатического взаимодействия [4–9].

Перечисленные свойства позволяют разрабатывать на основе биополимеров широкий спектр новых материалов медицинского, фармакологического и биотехнологического назначения. Особое место занимают гидрогели, предназначенные для медицины. Они перспективны в качестве материалов для получения полупроницаемых мембранных, контактных линз, эндопротезирования, антиромбогенных покрытий,

\* Автор, с которым следует вести переписку.

носителей иммобилизованных ферментов, низкомолекулярных лекарственных веществ и др. [10–15]. Поэтому изучение процесса гелеобразования в растворах Na-КМЦ является актуальным.

Проблема исследования гелевых структур является одной из самых трудных из-за сложности трехмерных сетчатых структур. Для решений этой задачи необходимо привлечение большого количества физико-химических методов и различных подходов. В этом отношении изучение сорбционных свойств и реологического поведения пространственно спицовых структур могут быть весьма полезными и информативными.

Цель работы – исследование сорбционных и реологических свойств низкоконцентрированных растворов Na-КМЦ, спицовых ионами алюминия и комплексными соединениями алюминия с лимонной кислотой.

### **Экспериментальная часть**

Объектами исследования служили: Na-карбоксиметилцеллюлоза (Na-КМЦ) со СП 450–530 и СЗ по карбоксиметильным группам 70–80 (ТУ 6-55-39-90), лимонная кислота, ≥99.5% (CAS 5949-29-1, ООО «Asl kimo», кристаллогидрат  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 18\text{H}_2\text{O}$  (CAS 10043-01-3, ООО «Himreagent»).

Процесс химического спицования Na-КМЦ исследован в различных условиях: при помощи ионов алюминия, ионов алюминия в присутствии лимонной кислоты при различных соотношениях  $\text{Me}^{+n}/\text{COO}^-$ , pH среды. Отфильтрованный раствор 0.3% Na-КМЦ был оттитрован до необходимого pH 2N раствором HCl, затем к нему при комнатной температуре был прибавлен раствор 0.1%  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , комплексная соль 0.1%  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  и 0.06% раствор лимонной кислоты.

*Гидродинамические исследования* проводили с помощью вискозиметра типа Убеллоде при температуре 25 °C. В качестве растворителя использовали раствор 0.2 н NaCl для подавления полиэлектролитного эффекта при разбавлении. Время истечения растворителя  $\eta_0=102.0$  сек. Динамическую вязкость гелей определяли с помощью ротационного вискозиметра «Реотест-2».

*Реологические зависимости* снимали на ротационном вискозиметре марки Реотест-2, который позволяет производить измерения динамической вязкости, пластичности. Измерения велись при температуре 25 °C в широком интервале вязкости, области напряжения сдвига 2–280 Па, области скоростей сдвига от 1.5 до 1310  $\text{s}^{-1}$ , число оборотов 5/13 – 243  $\text{min}^{-1}$  и точности измерения 3–4%.

По измерениям сдвигающего напряжения и скорости сдвига вычисляли коэффициент динамической вязкости ( $\eta$ ) по следующей формуле:

$$\eta = \tau_2 / D_2,$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ),  $\tau_2$  – сдвигающее напряжение ( $10^{-1}$  Па),  $D_2$  – скорость сдвига ( $\text{C}^{-1}$ ).

Для определения водопоглощения (W, %) использовали гравиметрический метод. Расчеты проводили по формуле:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\%,$$

где  $m_1$  – масса набухшего геля, г;  $m_2$  – масса сухого геля, г.

Сорбцию паров воды определяли при 298 К на вакуумной сорбционной установке Мак-Бена с пружинными кварцевыми весами [16].

### **Обсуждение результатов**

Ранее нами исследован процесс студнеобразования водного концентрированного раствора Na-КМЦ ионами алюминия в присутствии лимонной кислоты (ЛК). Установлено, что переход раствора Na-КМЦ из текучего состояния в студнеобразное обусловлен образованием поперечных межмолекулярных связей за счет COOH-групп модифицированной КМЦ и OH-групп комплексных солей алюминия с лимонной кислотой [17].

Благодаря наличию сильнополярных гидроксильных и карбоксильных групп в макромолекуле карбоксиметилцеллюлозы и интенсивному взаимодействию этих групп как внутри, так и между макромолекулами, степень асимметрии целлюлозной цепи значительно выше, чем у полимеров, не содержащих

сильнополярных групп [18]. Поэтому макромолекулы Na-КМЦ относятся к так называемым жесткоцепным полимерам, характеризующимся высокой степенью асимметрии макромолекул. Однако степень асимметрии макромолекул Na-КМЦ не является постоянной и может существенно изменяться в зависимости от различных факторов, в частности, от pH водной среды. Относительные данные о степени асимметрии (конформации) макромолекулярной цепи могут быть получены на основании гидродинамических исследований. Так, на рисунке 1 представлена зависимость величины приведенной вязкости водного раствора Na-КМЦ от pH среды.

Из рисунка 1 следует, что при изменении pH от 2 до 10 приведенная вязкость раствора возрастает приблизительно в 4 раза. Из полученных данных следует, что в кислой области макромолекула Na-КМЦ обладает достаточно свернутой конформацией. Затем при увеличении pH среды происходит ионизация ионогенных функциональных групп Na-КМЦ, которая приводит к разворачиванию целлюлозной цепи в более вытянутую форму за счет электростатического отталкивания одноименных зарядов. Отметим, что наиболее сильное изменение конформации Na-КМЦ происходит с pH 2 до pH 5. С учетом того, что константа диссоциации ( $K_{дис}$ ) карбоксильных групп Na-КМЦ составляет  $5 \cdot 10^{-5}$  [19], наибольшее разворачивание целлюлозной цепи происходит при диссоциации половины от общего числа карбоксильных групп Na-КМЦ.

Исходя из полученных представлений о различном конформационном состоянии макромолекулярной цепи Na-КМЦ, нами получены образцы гелей Na-КМЦ, сшитые ионами алюминия и комплексными соединениями алюминия с лимонной кислотой. В таблице 1 представлены результаты сорбции паров гелями Na-КМЦ.

Как известно, пористость сетчатых структур количественно оценивается рядом параметров: удельной поверхностью ( $S_{уд}$ ), суммарным объемом пор ( $W_o$ ), радиусом пор ( $r$ ). В таблице 2 представлены результаты расчетов сорбционных характеристик для различных образцов гелей.

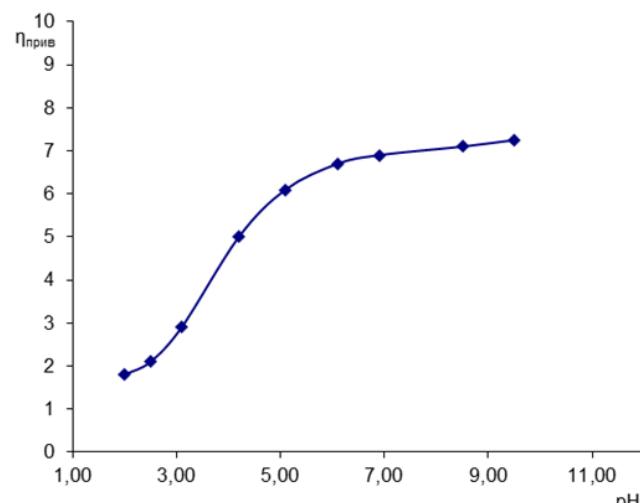


Рис. 1. Зависимость приведенной вязкости водного раствора Na-КМЦ от pH среды.

Концентрация Na-КМЦ 0.3%, температура 25 °C, время истечения воды 111.2 с

Таблица 1. Сорбция паров воды гелями Na-КМЦ (ммоль/г)

Относительная влажность, %	Na-КМЦ – Al <sup>3+</sup> pH=2.3	Na-КМЦ – Al <sup>3+</sup> pH=9.2	Na-КМЦ – ЛК – Al <sup>3+</sup> pH=2.5	Na-КМЦ – ЛК – Al <sup>3+</sup> pH=4.2
10	1.6	1.5	1.4	1.1
20	2.7	2.5	2.3	1.9
30	3.7	3.5	3.1	2.1
40	4.2	3.9	3.7	3.1
50	5.3	5.2	4.3	3.7
60	7.3	7.0	5.4	4.7
70	8.5	7.9	7.4	6.2
80	11.6	10.1	11.8	9.0
90	21.1	14.0	24.1	14.5
100	33.0	22.0	57.0	33.0

Гели, полученные без и в присутствии лимонной кислоты, предназначены для определения роли размера сшивателя, а сравнение результатов для гелей, приготовленных из растворов Na-КМЦ с различными исходными pH, дает возможность выяснить влияние исходной конформации целлюлозной цепи на структуру полимерной сетки. Как следует из таблицы 2, при увеличении размера сивающего агента с помощью лимонной кислоты (при всех прочих равных условиях) радиус пор существенно возрастает. Это свидетельствует о том, что увеличение длины сшивателя способствует сшиванию более удаленных друг от друга в пространстве участков одной или различных цепей при одинаковой исходной конформации целлюлозной цепи (pH 2.5). При этом наблюдается также соответственное увеличение суммарного объема пор. Что касается удельной поверхности, то в присутствии лимонной кислоты, т.е. сшивателя большего размера, происходит ее уменьшение. Подобное влияние длины молекулы сивающего агента отмечено в работе [20].

Влияние исходной конформации макромолекулы Na-КМЦ на структуру геля четко отражено в таблице 2 на примере образцов Na-КМЦ – Al<sup>3+</sup> при исходных pH раствора Na-КМЦ 2.3 и 9.2. Видно, что при свернутом конформационном состоянии целлюлозной цепи (в кислой среде) происходит сшивание между более удаленными участками цепей ( $r$  52.1 Å). При разворачивании исходной макромолекулярной цепи в щелочной среде (pH=9.24), очевидно, возрастает вероятность сшивания близлежащих участков макромолекул Na-КМЦ, что проявляется в уменьшении размера пор ( $r$  36.5 Å). Кроме того, данные таблицы 2 показывают, что исходная конформация целлюлозной цепи отражается также на величинах суммарного объема пор и удельной поверхности формирующейся трехмерной структуры. В гелях, полученных из кислой среды, значения этих величин больше по сравнению с гелями, полученными из щелочной среды. Такую роль конформационного состояния макромолекулярной цепи, вероятно, можно объяснить следующим образом: поскольку реакция связывания ионов металлов (сшивание) полимером, как правило, достаточно быстрая, то, очевидно, цепь Na-КМЦ не успевает отрелаксировать между отдельными актами сшивания и принять равновесную конформацию, соответствующую данному числу сшивок, подобно тому, как это было принято в моделях реакций «мгновенного сшивания» [21].

В случае большого размера (длины) сшивателя в гелях Na-КМЦ – ЛК – Al<sup>3+</sup> также наблюдается подобное влияние конформационного состояния Na-КМЦ, однако оно выражено в меньшей степени. Это, вероятно, объясняется тем, что большой размер комплекса лимонной кислоты с ионами алюминия (сшивателя) способствует сшиванию удаленных в пространстве участков цепей при любом исходном конформационном состоянии макромолекул Na-КМЦ.

Различные образцы гелей Na-КМЦ, высущенные лиофильно, использованы для определения степени водопоглощения (табл. 3).

Как видно из таблицы 3, процесс водопоглощения происходит достаточно медленно (несколько суток). Среднее водопоглощение исследованных образцов составляет порядка 80–100% сухого образца гелей Na-КМЦ.

Изучена зависимость реологических свойств сшитой системы Na-КМЦ – Al<sup>3+</sup> – ЛК от различных параметров.

На рисунке 2 приведены кривые течения разрушенных гидрогелевых структур на основе Na-КМЦ – Al<sup>3+</sup>, обладающих различными значениями pH.

Таблица 2. Сорбционные характеристики гелевых структур Na-КМЦ

Образец	Na-КМЦ – Al <sup>3+</sup> pH=2.3	Na-КМЦ – Al <sup>3+</sup> pH=9.2	Na-КМЦ – ЛК – Al <sup>3+</sup> pH=2.5	Na-КМЦ – ЛК – Al <sup>3+</sup> pH=4.2
S <sub>уд</sub> , м <sup>2</sup> /г	126.60	120.47	102.08	62.40
W <sub>о</sub> , см <sup>3</sup> /г	0.33	0.22	0.57	0.33
r, Å	52.10	36.50	111.70	105.70

Таблица 3. Водопоглощение гелями Na-КМЦ

Образец	Водопоглощение, %			
	2-е сутки	3-и сутки	6-е сутки	8-е сутки
Na-КМЦ – Al <sup>3+</sup> , pH=2.3	45.72	65.72	98.72	101.32
Na-КМЦ – Al <sup>3+</sup> , pH=9.2	50.83	61.25	8374	95.32
Na-КМЦ – ЛК – Al <sup>3+</sup> , pH=2.5	38.85	71.24	95.71	105.71
Na-КМЦ – ЛК – Al <sup>3+</sup> , pH=4.2	51.7	68.73	98.32	120.91

Из рисунка 2 следует, что процесс деструктурирования определяется условием существования гидрогеля, т.е. величиной pH. При увеличении значения pH с 2.4 до 4.9 происходит увеличение величины динамических эффективных вязкостей разрушенных структур при напряжениях сдвига в диапазоне от 0.42 до 2.3 Па, и наибольшими величинами динамических эффективных вязкостей обладает система 4 с pH 4.9, так как с увеличением pH в этом диапазоне возрастает эффективность межмолекулярного сшивания.

Физико-механические свойства сетчатых или гелевых структур зависят прежде всего от количества сшивок в системе и от концентрации полимерной матрицы. На рисунке 3 представлены кривые течения разрушенных гелевых структур на основе Na-KМЦ – ЛК –  $\text{Al}^{3+}$  при различном содержании сшивок, pH=4.9.

Можно заметить, что с увеличением числа химических сшивок в системе наблюдаются более высокие величины эффективных вязкостей и напряжения сдвига. Увеличение интенсивности межмолекулярных контактов в полимерных системах с повышением концентрации сивающего агента приводит к существенному увеличению структурирования гидрогелей Na-KМЦ.

Как указано выше, на пористость гелевых структур на основе Na-KМЦ и ионов алюминия существенное влияние оказывает исходная конформация макромолекул карбоксиметилцеллюлозы. Следует ожидать, что и реология этих гидрогелей также будет различаться. На рисунке 4 получены кривые течения разрушенных гелевых структур на основе Na-KМЦ – ЛК –  $\text{Al}^{3+}$ , полученных при исходных pH 9 и 2.

Видно, что гидрогель с кислым исходным pH характеризуется более высокими значениями эффективных вязкостей по сравнению с гелем из щелочной среды. Это согласуется с данными, указанными выше, полученными методом сорбции паров воды, где показано, что в кислых средах размер пор выше и вероятность межмолекулярных сшивок больше (рис. 4).

Исходя из вышесказанного, факторами, существенно влияющими на структуру и реологию гидрогелей Na-KМЦ, сшитых ионами металла, являются как условия получения, так и условия существования сеток.

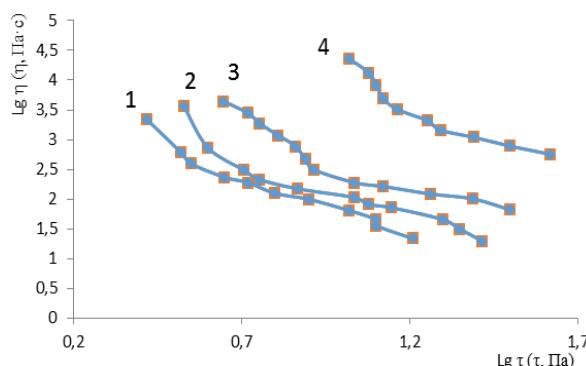


Рис. 2. Кривые течения гелевых систем на основе 0.3% раствора Na-KМЦ –  $\text{Al}^{3+}$  при различных pH: 1 – pH 2.4; 2 – pH 3.3; 3 – pH 4.2; 4 – pH 4.9; 5 – pH 5.8. Температура измерений 25 °C

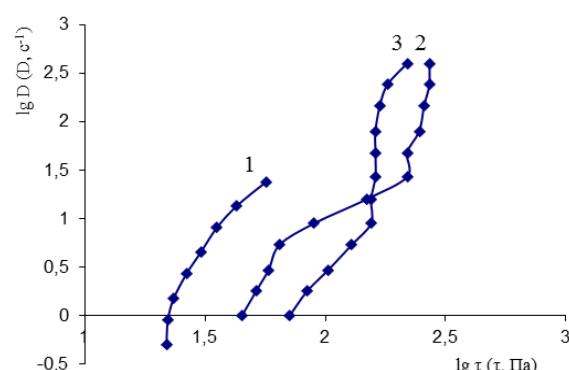


Рис. 3. Зависимость  $\lg D$  от  $\lg \tau$  для системы 0.3% Na-KМЦ – ЛК –  $\text{Al}^{3+}$  при различном соотношении Na-KМЦ :  $\text{Al}^{3+}$  (в молях): 1 – 3 : 1; 2 – 8 : 1; 3 – 5 : 1. Температура 25 °C, pH=4.9

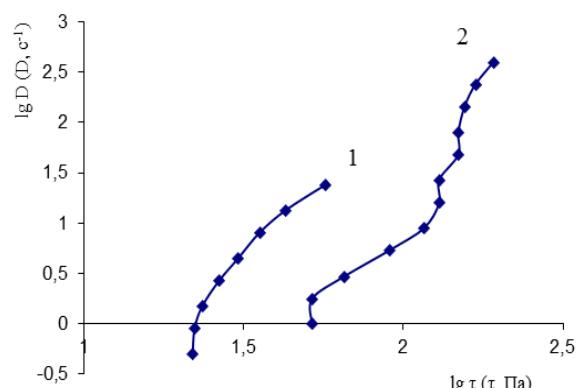


Рис. 4. Зависимость  $\lg D$  от  $\lg \tau$  системы Na-KМЦ – ЛК –  $\text{Al}^{3+}$  при различных исходных pH растворов Na-KМЦ: 1 – pH 9; 2 – pH 2. Температура 25 °C

## **Выходы**

Реологическими исследованиями установлено влияние pH, концентрации исходной Na-КМЦ, соотношения компонентов сшивающего раствора процесс структурирования Na-КМЦ. Изучением сорбционной способности низкоконцентрированных растворов Na-КМЦ, спитых ионами алюминия и комплексными соединениями алюминия с лимонной кислотой, установлено, что при увеличении размера сшивающего агента с помощью лимонной кислоты радиус пор существенно возрастает. Это свидетельствует о том, что увеличение длины сшивателя способствует сшиванию более удаленных друг от друга в пространстве участков одной или различных цепей при одинаковой исходной конформации целлюлозной цепи (pH 2.4). Вероятность межмакромолекулярного сшивания, ответственного за гелеобразование, возрастает с увеличением исходной концентрации и при дополнительном присутствии многоосновных кислот. В зависимости от исходного конформационного состояния целлюлозной цепи и длины сшивающего агента можно получить гели Na-КМЦ с различной структурой.

### **Финансирование**

*Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института биоорганической химии имени академика А.С. Садыкова. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.*

### **Конфликт интересов**

*Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.*

### **Открытый доступ**

*Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.*

## **Список литературы**

1. Lopez C.G., Colby R.H., Cabral J.T. Electrostatic and Hydrophobic Interactions in NaCMC Aqueous Solutions: Effect of Degree of Substitution // Macromolecules. 2018. Vol. 51(8). Pp. 3165–3175. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.8b00178>.
2. Lopez C.G., Rogers S.E., Colby R.H., Graham P., Cabral J.T. Structure of Sodium Carboxymethyl Cellulose Aqueous Solutions: A SANS and Rheology Study // Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics. 2015. Vol. 53, no. 7. Pp. 492–501. <https://doi.org/10.1002/polb.23657>.
3. Safi B., Zarouri R., Chabane Chaouache M., Saidi Benmounah A. Physico-chemical and rheological characterization of water-based mud in the presence of polymers // Journal of Petroleum and Gas Engineering. 2015. Pp. 1–6.
4. Блинова И.А., Вураско А.В., Шаповалова И.О., Стоянов О.В. Перспективы применения макулатуры в качестве сырья для получения натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20, №13. С. 26–36.
5. Gibis M., Schuh V., Allard K., Weiss J. Influence of molecular weight and degree of substitution of various carboxymethyl celluloses on unheated and heated emulsion-type sausage models // Carbohydrate Polymers. 2017. Vol. 159. Pp. 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.12.012>.
6. Akhmedov O.R., Shomurotov S.A., Turaev A.S. Features of Synthesis and Antimicrobial Properties of Guanidine-Containing Carboxymethylcellulose Derivatives // Russian Journal of Bioorganic Chemistry. 2022. Vol. 48(7). Pp. 1379–1386. <https://doi.org/10.1134/S1068162022070020>.
7. Pettignano A., Charlot A., Etienne F. Carboxyl-functionalized derivatives of carboxymethyl cellulose: towards advanced biomedical applications // Polymer Reviews. 2019. Vol. 59, no. 3. Pp. 510–560.
8. Стась И.Е., Батищева И.А. Относительная вязкость водных растворов Na-карбоксиметилцеллюлозы и ее изменение в зависимости от кислотности среды, температуры и воздействия электромагнитного поля // Химия растительного сырья. 2018. №3. С. 23–31. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018033695>.
9. Lakshmi D.S., Trivedi N., Reddy C.R.K. Synthesis and characterization of seaweed cellulose derived carboxymethyl cellulose // Carbohydrate Polymers. 2017. Vol. 157. Pp. 1604–1610. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.11.042>.
10. Hiltunen S., Xu Ch., Willför S., Backfolk K. Thermally induced degradation of NaCMC in water and effects of Na-HCO<sub>3</sub> on acid formation and charge // Food Hydrocolloids. 2018. Vol. 74. Pp. 32–36. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.07.028>.
11. Behra J.S., Mattsson J., Cayre O.J., Robles E.S.J., Tang H., Hunter T.N. Characterization of Sodium Carboxymethyl Cellulose Aqueous Solutions to Support Complex Product Formulation: A Rheology and Light Scattering Study // ACS Appl. Polym. Mater. 2019. Vol. 1, no. 3. Pp. 344–358. <https://doi.org/10.1021/acsapm.8b00110>.

12. Хмельницкий С.И., Лесовой Д.Е. Перспективы использования суперпористых гидрогелей и их композиций на основе поливинилового спирта в новых медицинских технологиях // Новости медицины и фармации. 2008. №3. С. 234.
13. Li H.-Y., Song X., Seville P.C. The use of sodium carboxymethylcellulose in the preparation of spray-dried proteins for pulmonary drug delivery // Eur. J. Pharm. Sci. 2010. Vol. 40(1). Pp. 56–61. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2010.02.007>.
14. Omidian H., Park K. Superporous Hydrogels for Drug Delivery Systems // Comprehensive Biomaterials II. 2017. Vol. 1. Pp. 688–704. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100691-7.00188-9>.
15. Zhang W., Liu Y., Xuan Y., Zhang S. Synthesis and applications of carboxymethyl cellulose hydrogels // Gels. 2022. Vol. 8(9). 529. <https://doi.org/10.3390/gels8090529>.
16. Цилипокина М.В. Современные физические методы исследования полимеров. М., 1982. 198 с.
17. Тураев А.С., Филатова А.В. Исследование процесса химического сшивания Na-КМЦ ионами алюминия в присутствии лимонной кислоты // Химия растительного сырья. 2020. №4. С. 93–100. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020046952>.
18. Роговин З.А., Шорыгина Н.Н. Химия целлюлозы и ее спутников. М.; Л., 1973.
19. Петропавловский Г.А. Гидрофильные частично замещенные эфиры целлюлозы и их модификация путем химического сшивания. Л., 1988. 254 с.
20. Тагер А.А., Цилипокина М.В., Колмакова Л.К., Морозов Э.В., Баллакин В.М. и др. Влияние длины молекулы сшивавшего агента и его природы на величину параметров пористой структуры полимерных сорбентов // Высокомолекулярные соединения А. 1990. Т. 32, №4. С. 727.
21. Тагер А.А., Малько Е.И., Думпис Ю.Я., Федорова Н.М. Влияние количества растворителя, присутствующего при синтезе, и его термодинамического качества на пористую структуру сетчатых катионитов Солова К // Высокомолекулярные соединения А. 1985. Т. 27, №11. С. 2367.

*Поступила в редакцию 8 апреля 2024 г.*

*После переработки 27 ноября 2024 г.*

*Принята к публикации 28 ноября 2024 г.*

Filatova A.V.\*, Turaev A.S., Azimova L.B. SORPTION AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF LOW-CONCENTRATED CROSS-LINKED SOLUTIONS OF SODIUM SALT OF CARBOXYMETHYLCELLULOSE

Institute of Bioorganic Chemistry named after Academician A.S. Sadykova Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Mirzo Ulugbeka st., 83, Tashkent, 100125, Uzbekistan, albfil@mail.ru

The sorption and rheological properties of low-concentration Na-CMC solutions cross-linked with aluminum ions and complex compounds of aluminum with citric acid were studied. It was found that when the pH value of the structured system increases from 2.4 to 4.9, the dynamic viscosity increases. It has been shown that with increasing concentration of the initial Na-CMC, the effective viscosity increases. With an increase in the number of chemical cross-links and concentration in the system, higher values of effective viscosity and shear stress of Na-CMC hydrogels are observed, which is due to an increase in the structure of the system. The sorption capacity of dried gels was studied and it was shown that with an increase in the size of the cross-linking agent using citric acid, the pore radius of the cross-linked system increases significantly, which promotes cross-linking of sections of one or different chains that are more distant from each other in space with the same initial conformation of the cellulose chain. The likelihood of intermacromolecular cross-linking responsible for gelation increases with increasing initial concentration and with the additional presence of polybasic acids. When the pH value of the medium changes, the cellulose chain of the Na-CMC macromolecule in solution takes on a different conformation. Depending on the initial conformational state of the cellulose chain and the length of the cross-linking agent, Na-CMC gels with different structures can be obtained.

*Keywords:* Na-CMC, chemical cross-linking, conformation, dynamic viscosity, rheological properties.

**For citing:** Filatova A.V., Turaev A.S., Azimova L.B. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 2, pp. 103–110. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250215031>.

\* Corresponding author.

**References**

1. Lopez C.G., Colby R.H., Cabral J.T. *Macromolecules*, 2018, vol. 51(8), pp. 3165–3175. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.8b00178>.
2. Lopez C.G., Rogers S.E., Colby R.H., Graham P., Cabral J.T. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 2015, vol. 53, no. 7, pp. 492–501. <https://doi.org/10.1002/polb.23657>.
3. Safi B., Zarouri R., Chabane Chaouache M., Saidi Benmounah A. *Journal of Petroleum and Gas Engineering*, 2015, pp. 1–6.
4. Blinova I.A., Vurasko A.V., Shapovalova I.O., Stoyanov O.V. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 13, pp. 26–36. (in Russ.).
5. Gibis M., Schuh V., Allard K., Weiss J. *Carbohydrate Polymers*, 2017, vol. 159, pp. 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.12.012>.
6. Akhmedov O.R., Shomurotov S.A., Turaev A.S. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 2022, vol. 48(7), pp. 1379–1386. <https://doi.org/10.1134/S1068162022070020>.
7. Pettignano A., Charlot A., Etienne F. *Polymer Reviews*, 2019, vol. 59, no. 3, pp. 510–560. <https://doi.org/10.1080/15583724.2019.1579226>.
8. Stas I.E., Batishcheva I.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2018, no. 3, pp. 23–31. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018033695>. (in Russ.).
9. Lakshmi D.S., Trivedi N., Reddy C.R.K. *Carbohydrate Polymers*, 2017, vol. 157, pp. 1604–1610. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.11.042>.
10. Hiltunen S., Xu Ch., Willför S., Backfolk K. *Food Hydrocolloids*, 2018, vol. 74, pp. 32–36. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.07.028>.
11. Behra J.S., Mattsson J., Cayre O.J., Robles E.S.J., Tang H., Hunter T.N. *ACS Appl. Polym. Mater.*, 2019, vol. 1, no. 3, pp. 344–358. <https://doi.org/10.1021/acsapm.8b00110>.
12. Khmel'nitskiy S.I., Lesovoy D.Ye. *Novosti meditsiny i farmatsii*, 2008, no. 3, p. 234. (in Russ.).
13. Li H.-Y., Song X., Seville P.C. *Eur. J. Pharm. Sci.*, 2010, vol. 40(1), pp. 56–61. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2010.02.007>.
14. Omidian H., Park K. *Comprehensive Biomaterials II*, 2017, vol. 1, pp. 688–704. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100691-7.00188-9>.
15. Zhang W., Liu Y., Xuan Y., Zhang S. *Gels*, 2022, vol. 8(9), 529. <https://doi.org/10.3390/gels8090529>.
16. Tsilipotkina M.V. *Sovremennyye fizicheskiye metody issledovaniya polimerov*. [Modern physical methods of polymer research]. Moscow, 1982, 198 p. (in Russ.).
17. Turayev A.S., Filatova A.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 93–100. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020046952>. (in Russ.).
18. Rogovin Z.A., Shorygina N.N. *Khimiya tsellyulozy i yeye sputnik*. [Chemistry of cellulose and its satellites]. Moscow; Leningrad, 1973. (in Russ.).
19. Petropavlovskiy G.A. *Gidrofil'nyye chastichno zameshchennyye efiry tsellyulozy i ikh modifikatsiya putem khimicheskogo sshivaniya*. [Hydrophilic partially substituted cellulose ethers and their modification by chemical crosslinking]. Leningrad, 1988, 254 p. (in Russ.).
20. Tager A.A., Tsilipotkina M.V., Kolmakova L.K., Morozov E.V., Ballakin V.M. i dr. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya A*, 1990, vol. 32, no. 4, p. 727. (in Russ.).
21. Tager A.A., Mal'ko Ye.I., Dumpis Yu.Ya., Fedorova N.M. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya A*, 1985, vol. 27, no. 11, p. 2367. (in Russ.).

*Received April 8, 2024**Revised November 27, 2024**Accepted November 28, 2024***Сведения об авторах**

*Филатова Альбина Васильевна* – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, albfil@mail.ru  
*Тураев Аббасхан Сабирханович* – доктор химических наук, академик, abbaskhan@mail.ru  
*Азимова Луиза Бахтияровна* – младший научный сотрудник, luiza8181@mail.ru

**Information about authors**

*Filatova Albina Vasilevna* – Doctor of Technical Sciences, leading researcher, albfil@mail.ru  
*Turaev Abbaskhan Sabirkhanovich* – Doctor of Chemical Sciences, Academician, abbaskhan@mail.ru  
*Azimova Luiza Bakhtiyorovna* – junior researcher, luiza8181@mail.ru