ХИМИЯ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ПОЛИМЕРЫ

Статья поступила в редакцию: 26.09.2026
Статья принята к публикации: 02.10.2026
Статья опубликована: 07.10.2026

УДК 532.135:678.01

DOI: 10.32743/UniChem.2026.148.10.23497

Реологические свойства растворов натрий-карбоксиметилцеллюлозы в водно-этанольной среде и влияние биоактивных компонентов

Вахобжонов Анваржон Акрамжон угли
мл. науч. сотр
Института химии и физики полимеров АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: anvarvahobjanov1999@gmail.com

Шукуров Акобирхон Ибодулло угли
PhD
техн. наук Института химии и физики полимеров АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: shukuroov@gmail.com

Rheological properties of sodium carboxymethylcellulose solutions in water-ethanol media and the effect of bioactive components

Vahobjonov Anvarjon
Junior researcher of Institute of Polymer Chemistry and Physics ASc RUz
Uzbekistan, Tashkent

Shukurov Akobirkhon
PhD of Institute of Polymer Chemistry and Physics ASc RUz
Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Исследовано влияние состава водно-этанольной среды, прополиса и мометазона фуроата на реологические свойства 2 %-ных растворов натрий-карбоксиметилцеллюлозы (Na-КМЦ). Реологическое поведение исследуемых систем оценивали методом ротационной реометрии в режимах определения вязкости, амплитудного и частотного сканирования. Установлено, что все растворы Na-КМЦ проявляли псевдопластическое течение: с увеличением скорости сдвига вязкость снижалась. При повышении содержания этанола

Библиографическое описание: Вахобжонов А.А.У., Шукуров А.И.У. Реологические свойства растворов натрий-карбоксиметилцеллюлозы в водно-этанольной среде и влияние биоактивных компонентов // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2026. 10(148). URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23497

вязкость растворов возрастала, причём наиболее выраженные изменения наблюдались при высоких концентрациях этанола, что сопровождалось усилением структурированности полимерной системы. Амплитудное сканирование показало сохранение линейной вязкоупругой области при низких деформациях, что позволило определить условия для последующего частотного анализа. Во всём исследованном диапазоне частот модуль накопления (G′) превышал модуль потерь (G″), а значения tan δ оставались ниже единицы, указывая на преобладание упругой составляющей и выраженный вязкоупругий характер систем. Введение 10 % прополиса приводило к повышению G′ и G″ относительно исходной Na-КМЦ, тогда как добавление 80 мг мометазона фуроата сопровождалось снижением обоих модулей. В комбинированной системе совместное присутствие прополиса и мометазона фуроата изменяло соотношение вязкой и упругой составляющих по сравнению с системами, содержащими отдельные компоненты. Полученные результаты показывают, что изменение состава растворяющей среды и введение биоактивных компонентов позволяют существенно регулировать структурно-вязкоупругое состояние растворов Na-КМЦ.

Abstract

The effects of water–ethanol composition, propolis, and mometasone furoate on the rheological properties of 2 % sodium carboxymethylcellulose (Na-CMC) solutions were investigated. The rheological behavior of the systems was evaluated using rotational rheometry in viscosity, amplitude sweep, and frequency sweep modes. All Na-CMC solutions exhibited pseudoplastic flow, with viscosity decreasing as the shear rate increased. Increasing the ethanol content resulted in higher solution viscosity, with the most pronounced changes observed at higher ethanol concentrations, indicating increased structuring of the polymer system. Amplitude sweep measurements demonstrated the presence of a linear viscoelastic region at low deformation, which was used to establish the conditions for subsequent frequency analysis. Throughout the investigated frequency range, the storage modulus (G′) exceeded the loss modulus (G″), while tan δ values remained below unity, indicating the predominance of the elastic component and pronounced viscoelastic behavior. The incorporation of 10 % propolis increased both G′ and G″ compared with the initial Na-CMC system, whereas the addition of 80 mg mometasone furoate resulted in a decrease in both moduli. In the combined system, the simultaneous presence of propolis and mometasone furoate altered the balance between the viscous and elastic components compared with systems containing individual components. These results demonstrate that variation of the solvent composition and incorporation of bioactive components can substantially regulate the structural and viscoelastic state of Na-CMC solutions.

Ключевые слова: натрий-карбоксиметилцеллюлоза, реологические свойства, водно-этанольная среда, вязкость, вязкоупругость, прополис, мометазона фуроат, структурообразование.

Keywords: sodium carboxymethylcellulose, rheological properties, water–ethanol medium, viscosity, viscoelasticity, propolis, mometasone furoate, structure formation.

Введение

Аппликационные лекарственные формы, предназначенные для непосредственной доставки лекарственных веществ к слизистой оболочке полости рта, являются перспективным подходом к местной терапии. В этом контексте полимерные лекарственные плёнки привлекают внимание благодаря удобству применения, эластичности и возможности доставки активных веществ для местного или системного действия [2, 9, 11]. Функциональные характеристики таких плёнок, включая механическую прочность, эластичность, деформируемость и взаимодействие со слизистой оболочкой, во многом зависят от состава и структурного состояния полимерной матрицы [4]. Натрий-карбоксиметилцеллюлоза (Na-КМЦ) является перспективным полимером для получения лекарственных плёнок благодаря водорастворимости, способности формировать вязкие растворы и плёнкообразующей способности. Наряду с молекулярными характеристиками и концентрацией полимера, состав растворяющей среды может существенно влиять на текучесть и вязкоупругие свойства растворов Na-КМЦ [3, 5]. В частности, показано, что реологические свойства растворов Na-КМЦ в различных системах многоатомный спирт–вода зависят от природы растворителя и структурных параметров полимера [10]. Это имеет важное значение для установления взаимосвязи между исходным структурным состоянием раствора и процессом формирования плёнки.

Водно-этанольные смеси могут использоваться в качестве растворяющей среды в фармацевтических плёнкообразующих системах, при этом изменение содержания этанола способно влиять на взаимодействия полимер–растворитель и полимер–полимер. В результате могут изменяться состояние макромолекулярных цепей в растворе, его вязкость и вязкоупругие свойства. Такие изменения, в свою очередь, могут влиять на перестройку полимерных цепей в процессе высушивания и, следовательно, на механические свойства сформированной плёнки. Поэтому оценка реологического состояния раствора как исходного структурного показателя плёнкообразующей системы имеет важное значение [8,7].

Дополнительные компоненты, вводимые в состав плёнки, также играют важную роль в формировании её конечных свойств. Пластификаторы, такие как глицерин, могут изменять межмолекулярные взаимодействия между полимерными цепями и тем самым влиять на эластичность и деформируемость плёнки [1]. Введение прополиса как природного биоактивного компонента не только расширяет функциональный состав плёнки, но и может влиять на структурные характеристики полимерной матрицы. В свою очередь, содержание такого активного фармацевтического ингредиента, как мометазона фуроат, изменяет соотношение компонентов в полимерной матрице и может отражаться на механических свойствах плёнки.

Состав, механические и мукоадгезивные свойства лекарственных плёнок на основе Na-КМЦ и других гидрофильных полимеров достаточно широко исследованы [6,12]. Однако взаимосвязь между реологическим состоянием плёнкообразующего раствора Na-КМЦ и механическими свойствами сформированной плёнки, особенно влияние состава водно-этанольной среды на эту взаимосвязь, остаётся недостаточно систематически изученной. В связи с этим использование реологических параметров в качестве критерия оценки структурного состояния плёнкообразующей системы и выбора её состава представляет

научный и практический интерес. Целью настоящего исследования являлась оценка влияния состава водно-этанольной среды, а также глицерина, прополиса и мометазона фуроата на реологические свойства 2 %-ных растворов Na-КМЦ.

Материалы и методы

В качестве водорастворимого плёнкообразующего полимера использовали натриевую соль карбоксиметилцеллюлозы (Na-КМЦ), приобретённую у компании Aladdin Chemical (Китай). Используемая Na-КМЦ характеризовалась степенью замещения (DS) 1,2 и средней молекулярной массой (Mr) около 250 кДа. В качестве биологически активного компонента использовали экстракт прополиса (DENTAFIL PLYUS MChJ, Узбекистан). Мометазона фуроат был приобретён у компании AARTI INDUSTRIES LIMITED (Индия). Этанол и дистиллированную воду использовали в качестве компонентов растворяющей среды.

Для исследования реологических свойств Na-КМЦ готовили 2 %-ные растворы полимера в водно-этанольных средах с содержанием этанола 0 – 50 об.%. После 4 ч гидратации растворы центрифугировали при 12 000 об/мин в течение 15 мин, а для дальнейших исследований использовали надо садочную жидкость.

Для получения лекарственных плёнок прополис и мометазона фуроат предварительно растворяли в 94 %-ном этаноле и последовательно вводили в полимерную систему при перемешивании с дополнительной ультразвуковой обработкой. Содержание прополиса составляло 5 – 10 %, мометазона фуроата – 0,01 – 0,1 %. Реологические свойства растворов Na-КМЦ исследовали на ротационном реометре Anton Paar MCR 92 (Австрия) с использованием цилиндрической измерительной системы при контролируемой температуре (±0,1 °C). Исследования проводили в ротационном и осцилляционном режимах с регистрацией напряжения сдвига (τ) в зависимости от скорости сдвига (γ). Согласно спецификациям производителя, относительная погрешность измерения вязкости не превышает ±1 %, а точность определения напряжения сдвига составляет ±0,5–1 %. Повторные измерения отдельных экспериментальных точек не проводились, поэтому статистическая оценка экспериментальной погрешности не выполнялась.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследования с целью оценки поведения Na-КМЦ в водно-этанольных средах и его реологических характеристик были приготовлены 2 %-ные растворы полимера в водно-этанольных смесях различного состава. Для полученных растворов определяли изменение динамической вязкости в зависимости от скорости сдвига. Полученные результаты показали, что все исследованные системы обладают неньютоновским характером течения и характеризуются зависимостью вязкости от скорости сдвига. Результаты исследования представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, с увеличением скорости сдвига вязкость всех растворов Na-КМЦ снижается, что характерно для псевдопластического течения. Это связано с ориентацией макромолекулярных цепей и частичным разрушением межмолекулярных взаимодействий при повышении скорости сдвига.

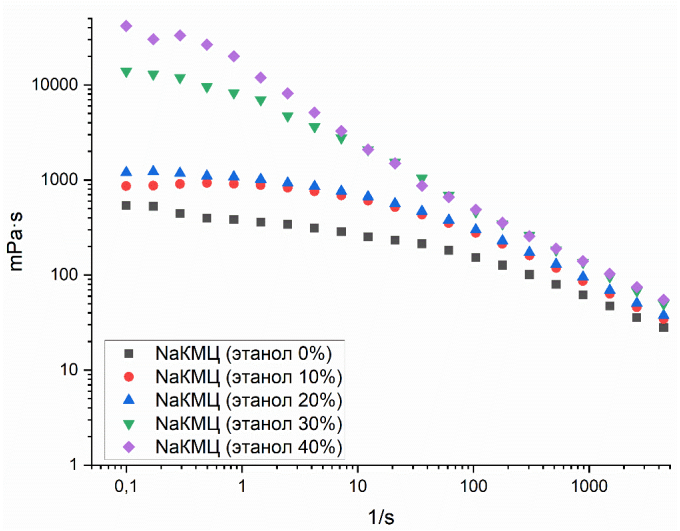


Рисунок 1. Изменение вязкости растворов Na-КМЦ в зависимости от скорости сдвига (растворитель: водно-этанольные смеси различного состава)

На основе области линейной вязкоупругости, установленной при амплитудном сканировании, проведён частотный анализ при постоянной деформации. Изменение модулей накопления (G′) и потерь (G″) в зависимости от частоты использовали для оценки динамических вязкоупругих свойств и структурной стабильности полимерных систем (рис. 2).

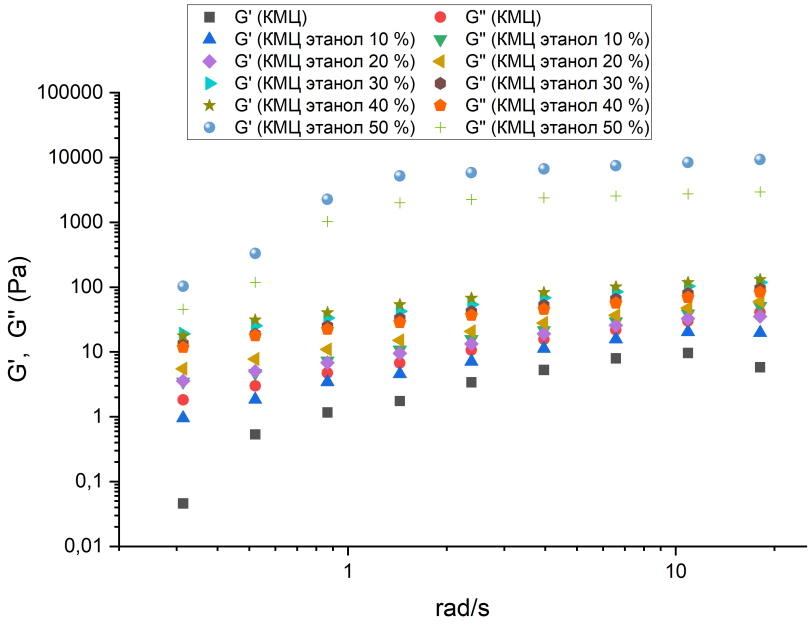


Рисунок 2. Реологические свойства 2 %-ных растворов Na-КМЦ в режиме частотного сканирования (растворитель - водно-этанольные смеси различного состава)

С увеличением содержания этанола значения G′ и G″ постепенно возрастали, особенно при 40–50 % этанола, что, вероятно, связано с усилением межцепочечных взаимодействий и формированием более плотной структуры Na-КМЦ. Максимальное значение G′ при 50 % этанола свидетельствовало об усилении упругой и гелеподобной составляющих системы. При 10–20 % этанола оба модуля оставались относительно низкими, указывая на менее выраженное структурирование.

Таким образом, содержание этанола существенно влияет на вязкоупругое состояние растворов Na-КМЦ. Для оценки влияния биоактивных компонентов были исследованы четыре состава: чистая Na-КМЦ, Na-КМЦ-П, Na-КМЦ-МФ и Na-КМЦ-МФ-П. Это позволило сравнить раздельное и совместное влияние прополиса и мометазона фуроата на реологическое поведение системы (рис. 4).

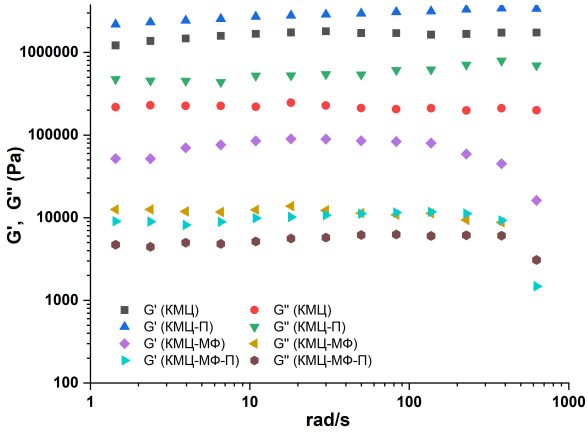


Рисунок 3. Реологические свойства растворов на основе Na-КМЦ (зависимость модулей накопления (G') и потерь (G'') от частоты): КМЦ-МФ (0,1 % МФ); КМЦ-П (10% П); КМЦ- МФ -П (0,1% МФ + 10% П)

На рис. 3 представлены результаты частотного сканирования растворов Na-КМЦ различного состава. Для всех систем G′ превышал G″ во всём исследованном диапазоне частот, что указывает на преобладание упругой и выраженную гелеподобную составляющую системы. Слабая зависимость модулей от частоты свидетельствует об устойчивой внутренней структуре, обусловленной переплетением макромолекул и межмолекулярными взаимодействиями. Введение прополиса приводило к увеличению G′ и G″, вероятно, вследствие усиления взаимодействий с макромолекулами Na-КМЦ. В присутствии мометазона фуроата значения модулей снижались, что может быть связано с его гидрофобным характером и ослаблением полимерных взаимодействий. В комбинированной системе Na-КМЦ-МФ-П наблюдалась более сложная динамика модулей, указывающая на перестройку внутренней структуры под совместным влиянием компонентов.

Для дальнейшего анализа зависимости G′, G″ и tan δ от угловой частоты (рис. 4) исследования проводили для систем с максимальным содержанием компонентов – 80 мг мометазона фуроата и 10 % прополиса.

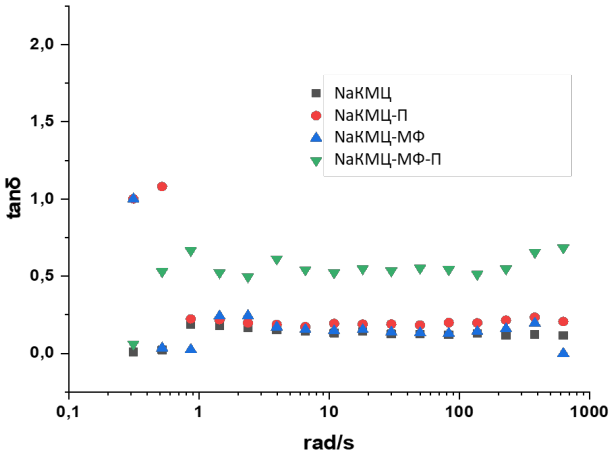


Рисунок 4. Реологические свойства растворов на основе Na-КМЦ (зависимость тангенса угла механических потерь (tan δ) от частоты) КМЦ-МФ (0,1 % МФ); КМЦ-П (10% П); КМЦ- МФ -П (0,1% МФ + 10% П)

На рис. 4 представлена зависимость tan δ от угловой частоты для исследованных систем на основе Na-КМЦ. Значения tan δ < 1 во всём диапазоне подтверждают преобладание упругой составляющей (G′ > G″), а их слабая зависимость от частоты указывает на сохранение характера вязкоупругого поведения системы.

Различия tan δ между составами отражают изменение соотношения упругой и вязкой составляющих под влиянием прополиса и мометазона фуроата. Анализ tan δ дополняет данные G′ и G″ и позволяет оценить вклад компонентов в формирование вязкоупругой структуры Na-КМЦ.

Выводы

Установлено, что содержание этанола существенно влияет на реологическое поведение растворов Na-КМЦ, повышая их вязкость и степень структурированности. Все системы характеризовались псевдопластическим течением, а G′ > G″ указывало на преобладание упругой составляющей. Прополис повышал значения G′ и G″, тогда как мометазона фуроат снижал их. Полученные результаты показывают, что реологические параметры позволяют оценивать влияние состава на структурно-вязкоупругое состояние систем на основе Na-КМЦ.

Список литературы

1. Chalah K., Benmounah A., Mahdad M., Kheribet R. Rheological study of sodium carboxymethylcellulose: Effect of concentration and molecular weight // Materials Today: Proceedings. – 2022. – T. 53. – P. 185–190. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.502.
2. Gilhotra R.M., Ikram M., Srivastava S., Gilhotra N. A clinical perspective on mucoadhesive buccal drug delivery systems // Journal of Biomedical Research. – 2014. – T. 28, № 2. – P. 81–97. – DOI: 10.7555/JBR.27.20120136.
3. Javanbakht S., Shaabani A. Carboxymethyl cellulose-based oral delivery systems // International Journal of Biological Macromolecules. – 2019. – DOI: 10.1016/j.ijbiomac. 2019.04.079.

4. Kallawala U., Patel S., Shah Y., Tinwala H., Patel Z., Patel R. Mucoadhesive buccal films: Enhancing drug delivery through mucosal surfaces // World Journal of Pharmaceutical Sciences and Research. – 2025. – T. 4, № 4. – P. 968–989. – DOI: 10.5281/zenodo.17122471.
5. Kallawala U., Patel S., Shah Y., Tinwala H., Patel Z., Patel R. Mucoadhesive buccal films: Enhancing drug delivery through mucosal surfaces // World Journal of Pharmaceutical Sciences and Research. – 2025. – T. 4, № 4. – P. 968–989. – DOI: 10.5281/zenodo.17122471.
6. Koldarova E.V., Sidikov A.A., Mukhamedov B.I., Mukhamedov I.M., Sarymsakov A.A., Shukurov A.I. et al. Development and application of a multicomponent film biocoating based on sodium carboxymethylcellulose to study the antibacterial activity of microflora in the oral fluid of patients with pemphigus vulgaris in vitro // Russian Journal of Skin and Venereal Diseases. – 2025. – T. 28, № 1. – P. 63–74. – DOI: 10.17816/dv640799.
7. Lopez C.G. et al. Structure of sodium carboxymethyl cellulose aqueous solutions: A SANS and rheology study // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. – 2015. – T. 53. – P. 492–501. – DOI: 10.1002/polb.23657.
8. Mattsson K.J.L. et al. Characterization of sodium carboxymethyl cellulose aqueous solutions to support complex product formulation: A rheology and light scattering study // ACS Applied Polymer Materials. – 2019. – T. 1, № 3. – P. 344–358. – DOI: 10.1021/acsapm.8b00110.
9. Mauceri M.E., Coppini M., De Caro V., Di Prima G., Mauceri R., Panzarella V. et al. Mucoadhesive drug delivery systems for oral chronic inflammatory mucosal diseases: The future is already present. A systematic review // Oral Diseases. – 2026. – T. 32, № 1. – P. 25–36. – DOI: 10.1111/odi.70042.
10. Mauceri M.E., Coppini M., De Caro V., Di Prima G., Mauceri R., Panzarella V. et al. Mucoadhesive drug delivery systems for oral chronic inflammatory mucosal diseases: The future is already present. A systematic review // Oral Diseases. – 2026. – T. 32, № 1. – P. 25–36. – DOI: 10.1111/odi.70042.
11. Shipp L., Liu F., Kerai-Varsani L., Okwuosa T.C. Buccal films: A review of therapeutic opportunities, formulations & relevant evaluation approaches // Journal of Controlled Release. – 2022. – T. 352. – P. 1071–1092. – DOI: 10.1016/j.jconrel.2022.10.058.
12. Yunusov K.E., Sarymsakov A.A., Shukurov A.I., Todjiyev J.N., Atakhanov A.A., Jiang G. et al. Sodium-carboxymethylcellulose/polyphenol-gossypol-carboxymethylcellulose copolymer films for ocular drug delivery: Preparation and physico-chemical properties // Asian Journal of Chemistry. – 2022. – T. 34, № 12. – P. 3085–3092. – DOI: 10.14233/ajchem.2022.23912.