

Научная статья

УДК 541. 182. 022: 532. 135

DOI: 10.18384/2949-5067-2025-2-6-18

ВЯЗКОУПРУГОСТЬ ПОЛИМЕРНОГО ГИДРОГЕЛЯ В РАМКАХ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ

Вековищев М. П.* , Кирсанов Е. А.

*Государственный социально-гуманитарный университет, Московская обл., г. Коломна,
Российская Федерация*

**Корреспондирующий автор, e-mail: mpv.71@mail.ru*

Поступила в редакцию 17.06.2025

Принята к публикации 18.06.2025

Аннотация

Цель: рассмотреть вязкоупругие характеристики полимерного гидрогеля, а именно гидрогеля поливинилпирролидона и карбоксиметилцеллюлозы, которые были получены для двух значений амплитуды деформации в свежем образце и в набухшем образце гидрогеля.

Процедура и методы. Проведена аппроксимация экспериментальных данных динамических измерений уравнениями структурной реологической модели на отдельных интервалах циклической частоты сдвиговых колебаний.

Результаты. Показана возможность применения уравнений структурной модели для описания частотных зависимостей динамических модулей. Величина коэффициентов реологических уравнений зависит как от амплитуды деформации, так и от исходного состояния гидрогеля.

Теоретическая и/или практическая значимость. Показано, что уравнения структурной реологической модели способны аппроксимировать экспериментальные данные динамических измерений, полученные для образцов гидрогеля при разных амплитудах деформации.

Ключевые слова: полимерный гидрогель, вязкоупругость, модули потерь, модули накопления, структурная реологическая модель

Для цитирования:

Вековищев М. П., Кирсанов Е. А. Вязкоупругость полимерного гидрогеля в рамках структурной модели // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-математика. 2025. № 2. С.6–18.<https://doi.org/10.18384/2949-5067-2025-2-6-18>

Original research article

VISCOELASTICITY OF POLYMER HYDROGEL WITHIN THE FRAMEWORK OF THE STRUCTURAL MODEL

M. Vekovishchev, E. Kirsanov.*

State University of Humanities and Social Studies, Kolomna, Moscow region, Russian Federation

**Corresponding author, e-mail: mpv.71@mail.ru*

Received by the editorial office 17.06.2025

Accepted for publication 18.06.2025

Abstract

Aim: to consider the viscoelastic characteristics of a polymer hydrogel, namely, a polyvinylpyrrolidone and carboxymethylcellulose hydrogel, which were obtained for two values of the deformation amplitude in a fresh sample and in a swelled hydrogel sample.

Methodology. An approximation of the experimental data of dynamic measurements by the equations of the structural rheological model was carried out at individual intervals of the cyclic frequency of shear oscillations.

Results. The possibility of using the equations of the structural model to describe the frequency dependences of dynamic moduli is shown. The value of the coefficients of the rheological equations depends on both the deformation amplitude and the initial state of the hydrogel.

Research implications. It is shown that the equations of the structural rheological model are capable of approximating the experimental data of dynamic measurements obtained for hydrogel samples at different deformation amplitudes.

Keywords: polymer hydrogel, viscoelasticity, loss moduli, storage moduli, structural rheological model

For citation.

Vekovishchev, M. P. & Kirsanov, E. A. (2025). Viscoelasticity of polymer hydrogel within the framework of the structural model. In: *Bulletin of Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 2, pp.6–18. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2025-2-6-18>

Введение

В коллоидной химии [1] гелями называют дисперсные системы со сплошной пространственной сеткой, которая полностью заполнена жидкостью. Если жидкостью является вода, то систему называют гидрогелем, если роль частиц играют макромолекулы полимеров, то можно говорить о полимерных гидрогелях с коагуляционной структурой или химической сшивкой. Такое вещество в состоянии покоя ведёт себя как упругое твёрдое тело, при значительном внешнем воздействии гель деформируется и течёт.

Гелеобразование может осуществляться либо с использованием физического (нековалентного), либо химического (ковалентного) сшивания. Гидрогели представляют собой трёхмерные гидрофильные полимерные сетки, способные

удерживать большие объёмы воды за счёт наличия в структуре полимерной цепи гидрофильных групп, таких как $-\text{COOH}$, $-\text{SO}_3\text{H}$, $-\text{NH}_2$ и $-\text{OH}$. Молекулы воды в гидрогеле могут быть как связаны с сеткой, так и свободно перемещаться внутри неё. Гидрогели можно классифицировать по разным параметрам: процессу полимеризации, ионному заряду, физическим свойствам, сшивателям, виду использованных полимеров. По способу формирования сетки гидрогели можно разделить на физические и химические. Химические гидрогели образуются при возникновении ковалентных связей между полимерными цепями. Такие сетки формируются при полимеризации мономера в присутствии сшивателя или при сшивании водорастворимого полимера. В шитом состоянии химически сшитые гидрогели достигают равновесной степени набухания в водных растворах. В физических гидрогелях полимерные цепи удерживаются вместе за счёт молекулярных зацеплений и/или сил межмолекулярного взаимодействия, таких как ионные, водородные или гидрофобные взаимодействия. Как правило, физические гидрогели характеризуются высокой гетерогенностью, поскольку различные межмолекулярные взаимодействия вызывают образование неоднородностей [2].

Полимерный гидрогель состоит из большого количества воды и разреженной полимерной сети. Внутри гидрогеля вода представляет собой дисперсионную среду с низкой вязкостью. Разреженная полимерная сеть действует как энтропийная пружина, имеющая как ковалентные сшивки, так и физические контакты/зацепления. Полимерный гель, сшитый химически, ведёт себя как упругое тело (резина), не способное к течению. Гели с физическими контактами, способными к разрыву и восстановлению, способны к сдвиговому течению и обладают как упругими, так и вязкими свойствами.

Вязкоупругие свойства гидрогелей тесно связаны с их структурой и предоставляют полезную информацию для их дальнейшего использования, в частности в медицине, косметике, в качестве рабочего материала для 3D-принтеров и т. д. [2–5].

Реологические, в частности вязкоупругие, свойства гидрогелей исследуют в образцах, подготовленных двумя способами: свежие, только что изготовленные гидрогели; набухшие гидрогели, полученные из сухого порошка (ксерогеля) добавлением воды [6].

Будем рассматривать вязкоупругие характеристики гидрогелей в рамках структурных представлений [7; 8].

Аппроксимация реологических данных уравнениями структурной модели

В работе [6] экспериментально исследованы вязкоупругие свойства гидрогеля поливинилпирролидона и карбоксиметилцеллюлозы (ПВП-КМЦ). Основное внимание уделяется влиянию амплитуды деформации на динамические вязкоупругие свойства.

Гидрогели были приготовлены путём растворения поливинилпирролидона (PVP; в концентрации 0,2 % w/v), карбоксиметилцеллюлозы (СМС; 0,8 % w/v), полиэтиленгликоля (PEG; 1,0 % w/v), агара (2,0 % w/v) и глицерина (1,0 % w/v) в дистиллированной воде. В чашках Петри были получены мягкие, прозрачные круглые гидрогели, которые были названы «свежим гидрогелем PVP-СМС». Затем свежеприготовленные гидрогели выдерживают до высыхания при комнатной температуре (22–25°C) и хранят их для приготовления набухших образцов гидрогеля. Для этого сухие образцы замачивали в воде на 60 минут и получали «набухший» гидрогель (ПВП-КМЦ).

Вязкоупругие свойства гидрогелей исследовали с помощью реометра с параллельными пластинами (ARES, Rheometrics Scientific, США). Испытания проводились при температуре 28°C для получения частотной зависимости модуля накопления G' и модуля потерь G'' . Параллельная пластина имела диаметр 25 мм. Зазор между пластинами изменялся в зависимости от толщины образца (примерно от 1 мм до 3 мм для набухших гидрогелей и до 6 мм для свежих). Измерения проводились в режиме сдвиговых колебаний с диапазоном частот от $0,1 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ до $100 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ при двух различных амплитудах деформации: 1 % и 10 %. Последняя величина амплитуды считается наивысшим пределом деформации для измерений в области линейной вязкоупругой области для полимеров.

Экспериментальные результаты для свежего и набухшего гидрогеля (из работы [6]) показаны на рис. 1–7. Авторы [6] провели качественное описание реологических кривых, не касаясь структурных причин реологического поведения. Отмечено, что поведение гидрогеля может быть связано с разрывом физических связей (зацеплений) между макромолекулами полимеров.

Рассмотрим приведённые в [6] результаты измерений с точки зрения структурного подхода. Структурная реологическая модель [7] использована нами для описания результатов динамических измерений. Такое описание возможно, если допустить, что периодически изменяющаяся скорость сдвига влияет на структуру системы подобно постоянной скорости сдвига при стационарном течении. Эффективная скорость сдвига при сдвиговых осцилляциях может быть уподоблена скорости сдвига при сдвиговом течении одного направления. Тогда уравнения, полученные для стационарного сдвигового течения, могут быть преобразованы для осциллирующего сдвигового течения. В этом случае сдвиговые осцилляции рассматриваются как сдвиговое течение, периодически изменяющееся со временем по величине и направлению.

Уравнение для модуля потерь имеет вид:

$$G''^{1/2} = \frac{g' \omega^{1/2}}{\omega^{1/2} + \chi'} + \eta_{\infty}'^{1/2} \omega^{1/2}. \quad (1)$$

Первое слагаемое представляет собой структурную часть модуля потерь, обусловленную вязким поведением агрегатов частиц (ассоциатов макромолекул); второе слагаемое описывает часть модуля потерь, связанную с

вязким поведением совокупности отдельных частиц (отдельных макромолекул). Коэффициент g' показывает степень агрегации частиц. Коэффициент компактности χ' связан с плотностью частиц в агрегате (более рыхлые или более компактные агрегаты). Сплошная сетка частиц возникает при $\chi' = 0$ в пределе частоты $\omega \rightarrow 0$. Коэффициент $\eta_{\infty}'^{1/2}$ описывает динамическую вязкость, возникающую за счёт обтекания отдельных частиц, и соответствует предельной вязкости при $\omega \rightarrow \infty$.

Уравнение для модуля накопления имеет вид:

$$G'^{1/2} = \frac{g'' \omega^{1/2}}{\omega^{1/2} + \chi''} + \eta_{\infty}''^{1/2} \omega^{1/2}, \quad (2)$$

Первое слагаемое представляет собой структурную часть модуля накопления, обусловленную упругостью ассоциатов частиц (макромолекул); второе слагаемое описывает часть модуля накопления (или динамической упругости), связанную с упругостью отдельных частиц (макромолекул). Физический смысл коэффициентов в (1) и (2) одинаков, величина коэффициентов различна.

Если под действием гидродинамических сил возникают новые контакты или зацепления, то формируются новые агрегаты частиц или ассоциаты макромолекул. Этот процесс идёт одновременно с разрывом контактов или зацеплений.

Реологическое уравнение для этого режима осциллирующего течения имеет вид:

$$G''^{1/2} \approx g_0' \omega^{1/2} + \Delta G''^{1/2}. \quad (3)$$

Коэффициент $\Delta G''^{1/2}$ может быть как положительным, так и отрицательным, кроме того, $g_0' > \eta_{\infty}'^{1/2}$.

Рассмотрим реологическое поведение свежего гидрогеля (ПВП-КМЦ) при амплитуде сдвиговых колебаний $\gamma_0 = 1\%$ (рис. 1).

Формы кривых $G'(\omega)$ и $G''(\omega)$ существенно отличаются. Аппроксимация уравнениями структурной модели производится на отдельных участках циклической частоты. Выбор этих участков проводится с помощью реологических кривых, построенных в корневых координатах (рис. 2). Коэффициенты реологических уравнений (1) и (2) приведены в табл. 1.

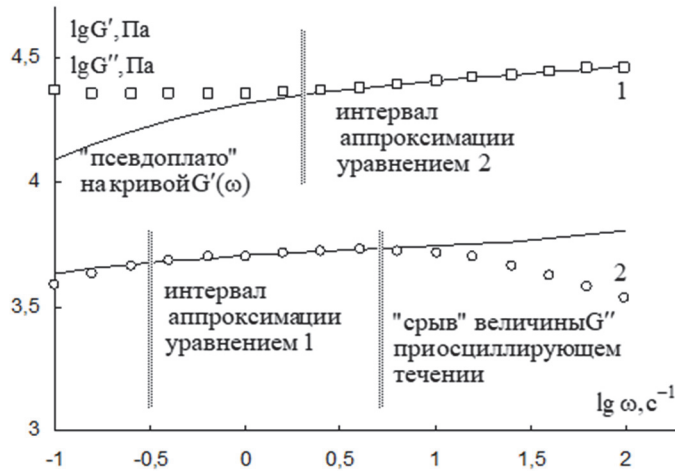


Рис. 1 / Fig. 1. Зависимость модуля накопления (1) и модуля потерь (2) свежего гидрогеля ПВП-КМЦ от циклической частоты в двойных логарифмических координатах при амплитуде деформации сдвига $\gamma_0 = 1\%$ / Dependence of the storage modulus (1) and loss modulus (2) of fresh PVP-CMC hydrogel on the cyclic frequency in double logarithmic coordinates at a shear strain amplitude of $\gamma_0 = 1\%$

Источник: [6].

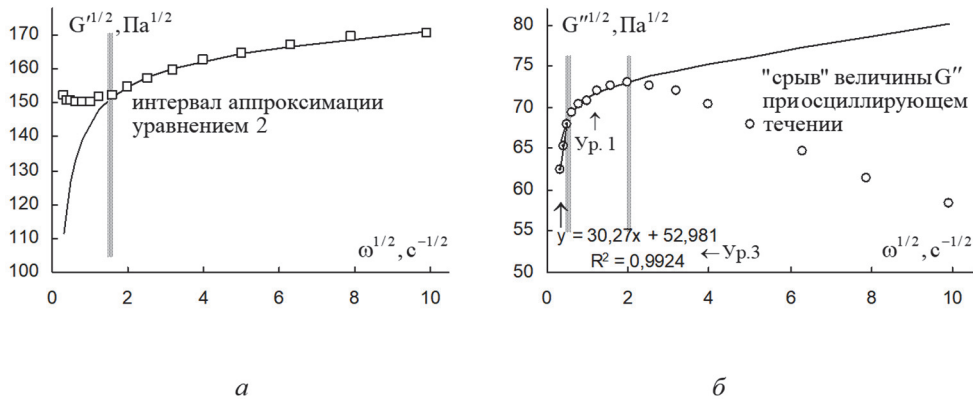


Рис. 2 / Fig. 2. Зависимость динамических модулей свежего гидрогеля ПВП-КМЦ от циклической частоты при амплитуде деформации сдвига $\gamma_0 = 1\%$

в корневых координатах:

a – модуль накопления G' ; b – модуль потерь G'' /

Dependence of dynamic moduli of fresh PVP-CMC hydrogel on cyclic frequency at shear deformation amplitude $\gamma_0 = 1\%$ in root coordinates:

a – storage modulus G' ; b – loss modulus G''

Источник: [6].

Можно выделить характерные участки на кривой $G'(\omega)$: «псевдоплато» при низких частотах и участок постепенного разрушения «упругой» структуры в районе высоких частот.

На кривой $G''(\omega)$ можно выделить следующие участки: небольшой интервал низких частот, где сосуществуют процессы разрушения и формирования «вязкой» структуры; участок, где происходит постепенное разрушение «вязкой» структуры; большой интервал частот, где происходит монотонное уменьшение величины G'' с частотой ω . Последнее явление будем называть «срывом» величины G'' при осциллирующем течении. По нашему мнению, явление «срыва» связано со сдвиговым расслоением образца, изменением профиля скоростей и возникновением слоя с низкой вязкостью и высокой скоростью вблизи движущегося элемента ячейки реометра.

Рассмотрим реологическое поведение свежего гидрогеля (ПВП-КМЦ) при амплитуде сдвиговых колебаний $\gamma_0 = 10\%$ (рис. 3).

Аппроксимация уравнениями структурной модели производится на отдельных участках циклической частоты. Выбор этих участков проводится с помощью реологических кривых, построенных в корневых координатах (рис. 4).

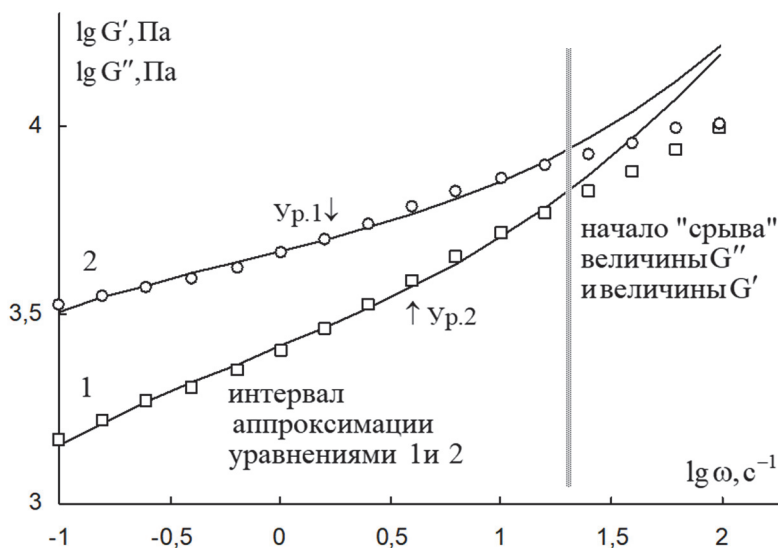


Рис. 3 / Fig. 3. Зависимость модуля накопления (1) и модуля потерь (2) свежего гидрогеля ПВП-КМЦ от циклической частоты в двойных логарифмических координатах при амплитуде деформации сдвига $\gamma_0 = 10\%$ /
Dependence of the storage modulus (1) and loss modulus (2) of fresh PVP-CMC hydrogel on the cyclic frequency in double logarithmic coordinates at a shear strain amplitude of $\gamma_0 = 10\%$

Источник: [6].

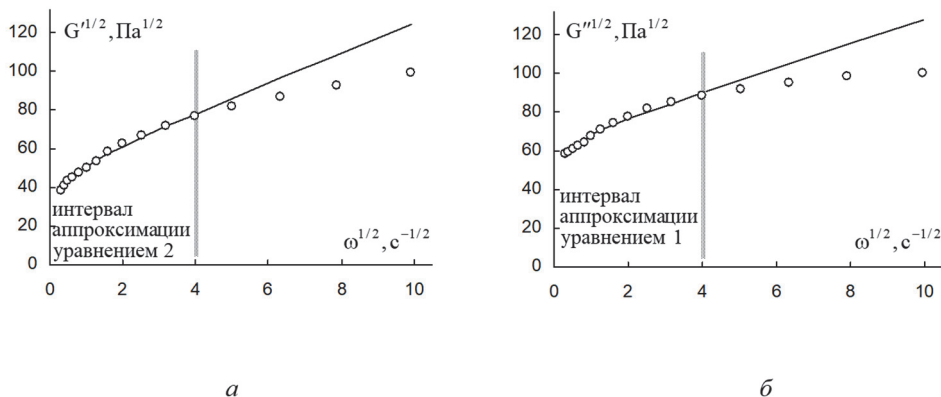


Рис. 4 / Fig. 4. Зависимость динамических модулей свежего гидрогеля ПВП-КМЦ от циклической частоты при амплитуде деформации сдвига $\gamma_0 = 10\%$ в корневых координатах:

a – модуль накопления G' ; b – модуль потерь G'' /

Dependence of dynamic moduli of fresh PVP-CMC hydrogel on cyclic frequency at shear deformation amplitude $\gamma_0 = 10\%$ in root coordinates:

a – storage modulus G' ; b – loss modulus G''

Источник: [6].

Выделим характерные участки на кривой $G'(\omega)$: участок постепенного разрушения «упругой» структуры в районе низких и средних частот; участок высоких частот, где начинается новый режим течения, возможно связанный с явлением «срыва» осциллирующего течения.

На кривой $G''(\omega)$ можно выделить следующие аналогичные интервалы частот: участок, где происходит постепенное разрушение «вязкой» структуры; интервал высоких частот, где начинается новый режим течения, возможно связанный со «срывом» течения.

Таблица 1 / Table 1

Коэффициенты реологических уравнений (1) и (2) для гидрогеля
ПВП-КМЦ / Rheological equation coefficients (1) and (2) for PVP-CMC hydrogel

	$g', \text{Па}^{1/2}$	$\eta_{\infty}'^{1/2}, (\text{Па} \cdot \text{с})^{1/2}$	$\chi', \text{с}^{-1/2}$	$g'', \text{Па}^{1/2}$	$\eta_{\infty}''^{1/2}, (\text{Па} \cdot \text{с})^{1/2}$	$\chi'', \text{с}^{-1/2}$
Свеж. 1 %	72,94	0,744	0,037	164,9	0,873	0,154
10 %	66,06	6,280	0,064	48,68	7,72	0,120
Набух. 1 %	44,23	0,569	0,024	118,47	1,457	0,075
10 %	57,56	5,812	0,041	43,31	10,30	0,063

Источник: по данным авторов

Для свежего гидрогеля ПВП-КМЦ при амплитуде деформации сдвига $\gamma_0 = 1\%$ в области низких частот можно использовать уравнение (3) с коэффициентами:

$$\Delta G''^{1/2} = 52,98 \text{ Па}^{1/2}; g_0' = 30,27 (\text{Па} \cdot \text{с})^{1/2}.$$

Судя по табл. 1, величина g'_0 значительно выше величины $\eta'_{\infty}{}^{1/2}$.

Рассмотрим реологическое поведение набухшего гидрогеля (ПВП-КМЦ) при амплитуде сдвиговых колебаний $\gamma_0 = 1\%$ (рис. 5). Легко видеть, что реологические кривые $G'(\omega)$ и $G''(\omega)$ по своему характеру сходны с типичными кривыми для растворов и расплавов полимеров.

Аппроксимация уравнениями структурной модели производится на отдельных участках циклической частоты. Выбор этих участков проводится с помощью реологических кривых, построенных в корневых координатах (рис. 6). Коэффициенты реологических уравнений (1) и (2) приведены в табл. 1.

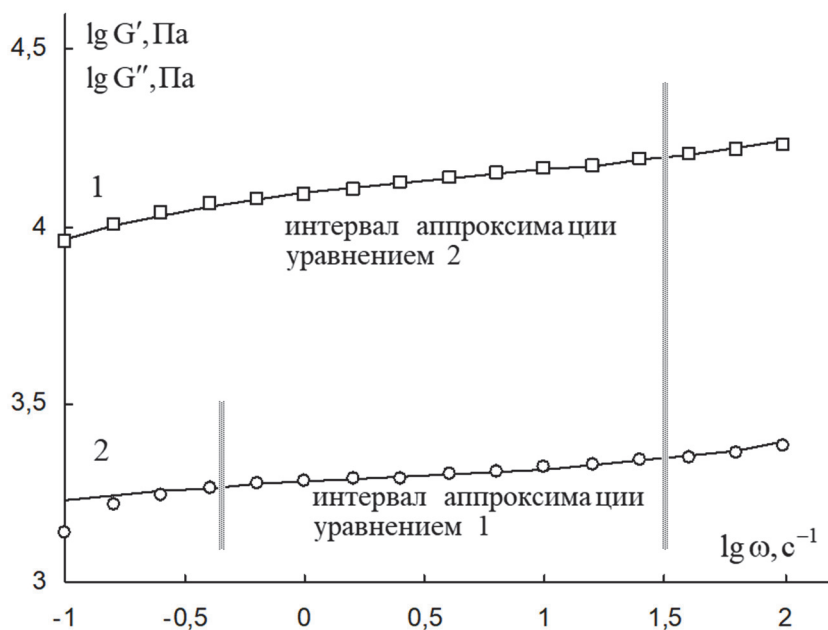


Рис. 5 / Fig. 5. Зависимость модуля накопления (1) и модуля потерь (2) набухшего гидрогеля ПВП-КМЦ от циклической частоты в двойных логарифмических координатах при амплитуде деформации сдвига $\gamma_0 = 1\%$ /

Dependence of the storage modulus (1) and loss modulus (2) of the swelled PVP-CMC hydrogel on the cyclic frequency in double logarithmic coordinates at a shear strain amplitude of $\gamma_0 = 1\%$

Источник: [6].

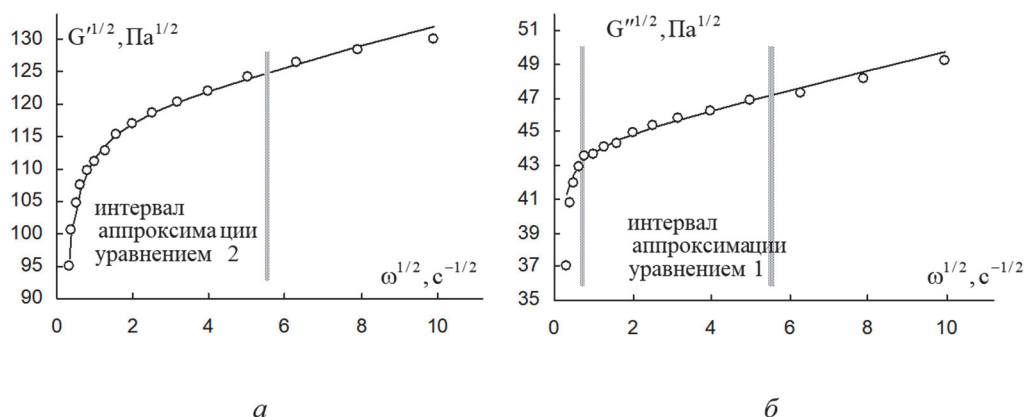


Рис. 6 / Fig. 6. Зависимость динамических модулей набухшего гидрогеля ПВП-КМЦ от циклической частоты при амплитуде деформации сдвига $\gamma_0 = 1\%$ в корневых координатах:

a – модуль накопления G' ; b – модуль потерь G'' /

Dependence of dynamic moduli of swelled PVP-CMC hydrogel on cyclic frequency at shear deformation amplitude $\gamma_0 = 1\%$ in root coordinates:

a – storage modulus G' ; b – loss modulus G''

Источник: [6].

Выделим характерные участки на кривой $G'(\omega)$: режим постепенного разрушения «упругой» структуры в районе низких и средних частот; район высоких частот, где возможно начинается «срыв» осциллирующего течения. На кривой $G''(\omega)$ можно выделить следующие интервалы частот: небольшой интервал низких частот, где величина G'' резко уменьшается с уменьшением частоты ω ; большой интервал средних частот, где происходит постепенное разрушение «вязкой» структуры; интервал высоких частот, где начинается новый режим течения, возможно связанный с частичным разрушением структуры образца.

Рассмотрим реологическое поведение набухшего гидрогеля (ПВП-КМЦ) при амплитуде сдвиговых колебаний $\gamma_0 = 10\%$ (рис. 7). Реологические кривые $G'(\omega)$ и $G''(\omega)$ на интервале средних частот аппроксимируются уравнениями (1) и (2). На малом интервале низких частот наблюдаются плато или снижение динамических модулей. На большом интервале высоких частот происходит снижение величины G' по отношению к экстраполированным значениям уравнения (2). Функция $G''(\omega)$ демонстрирует плато с постоянной величиной G'' , что характерно для явления срыва течения.

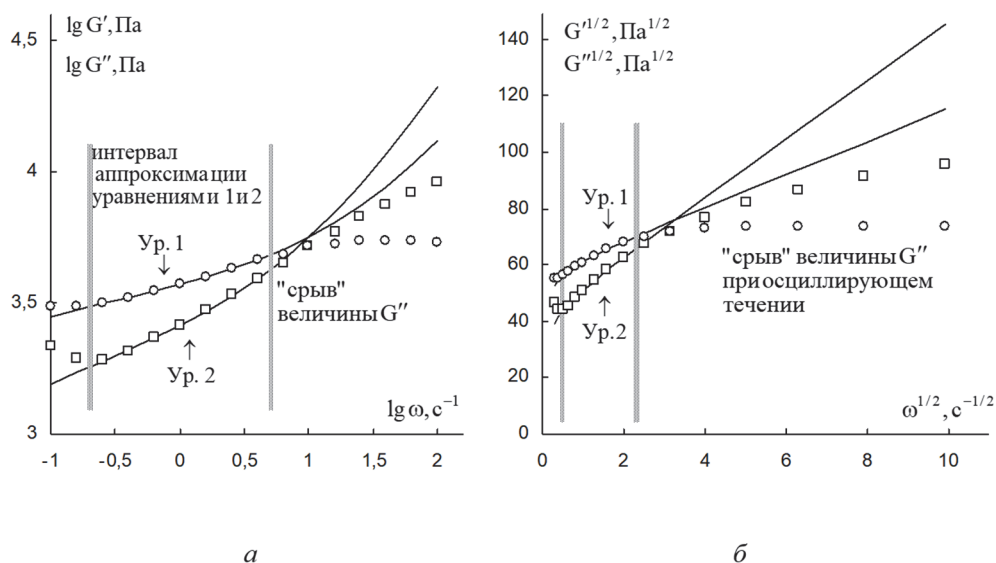


Рис. 7 / Fig. 7. Зависимость динамических модулей набухшего гидрогеля ПВП-КМЦ от циклической частоты при амплитуде деформации сдвига $\gamma_0 = 10\%$:

a – в двойных логарифмических координатах; b – в корневых координатах /
Dependence of dynamic moduli of swelled PVP-CMC hydrogel on cyclic frequency at shear deformation amplitude $\gamma_0 = 10\%$:

a – in double logarithmic coordinates; b – in root coordinates

Источник: [6].

Кривые $G'(\omega)$ и $G''(\omega)$ имеют сложную форму и внешне различаются как для двух разных амплитуд деформации сдвига, так и для двух разных состояний гидрогеля (свежий и набухший). Тем не менее можно выделить отдельные интервалы частот, где имеются определённые режимы осциллирующего течения, связанные с состоянием структуры геля. На интервалах частот, где величины динамических модулей G' и G'' устойчиво увеличиваются с ростом ω происходит постепенное разрушение структуры, которое описывается уравнениями (1), (2) и (3). На интервалах частот, где значения модулей G' и G'' практически постоянны или снижаются с ростом частоты ω , вероятно, имеет место сдвиговое расслоение образца, т. е. скорость сдвига различна в разных участках образца гидрогеля.

Выводы

Вязкоупругое поведение гидрогеля ПВП-КМЦ рассмотрено в рамках структурой реологической модели. Реологические кривые $G'(\omega)$ и $G''(\omega)$ имеют характерные участки, которые можно аппроксимировать, используя уравнения структурной реологической модели. Изменение величины динамических модулей с частотой сдвиговых колебаний объясняется изменением структуры гидрогеля под действием осциллирующего течения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебник для вузов; 3-е изд., стер., испр., перепеч. с изд. 1989 г. М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. 464 с.
2. Антипова К. Г. Полимерные и композиционные гидрогелевые материалы для биомедицины с регулируемыми механическими характеристиками: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2024. 157 с.
3. Rheological characterization of biological hydrogels in aqueous state / K. Alam, M. Iqbal, A. Hasan, N. Al-Maskari // *Journal of Applied Biotechnology Reports*. 2020. Vol. 7. No. 3. P. 172–176. DOI: 10.30491/JABR.2020.109994.
4. Молчанов В. С., Глухова С. А., Филиппова О. Е. Реологические свойства полисахаридных гидрогелей альгината с малыми добавками нанотрубок галлузита для экструзионной 3D-печати // *Вестник Московского университета. Серия 16: Биология*. 2023. Т. 78. № 3S. С. 63–68. DOI: 10.55959/MSU0137-0952-16-78-3S-11.
5. Tearing a hydrogel of complex rheology / Ruobing Bai, Baohong Chen, Jiawei Yang, Zhigang Suo // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2019. Vol. 125. P. 749–761. DOI: 10.1016/j.jmps.2019.01.017.
6. Effect of strain on viscoelastic behavior of fresh, swelled and mineralized PVP-CMC hydrogel / N. Saha, R. Vyroubal, R. Shah, K. Takeshi, P. Saha // *AIP Conference Proceedings*. 2013. Vol. 1526. Iss. 1. P. 301–309. DOI: 10.1063/1.4802624.
7. Кирсанов Е. А., Матвеев В. Н. Вязкость и упругость структурированных жидкостей: монография. М.: Техносфера, 2022. 284 с.
8. Вековищев М. П., Кирсанов Е. А. Неньютоновское течение структурированных систем. XXXVII. Вязкоупругость полимерного композита глина / нейлон-11 // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2023. Т. 23. №4. С. 67–75. DOI: 10.18083/LCAppl.2023.4.67.

REFERENCES

1. Frolov, Yu. G. (2004). *Course of Colloid Chemistry. Surface Phenomena and Disperse Systems*. Moscow: «Alliance» publ. (in Russ.).
2. Antipova, K. G. (2024). *Polymer and composite hydrogel materials for biomedicine with adjustable mechanical characteristics* [dissertation]. Moscow (in Russ.).
3. Alam, K., Iqbal, M., Hasan, A. & Al-Maskari, N. (2020). Rheological characterization of biological hydrogels in aqueous state. In: *Journal of Applied Biotechnology Reports*, 7 (3), 172–176. DOI: 10.30491/JABR.2020.109994.
4. Molchanov, V. S., Glukhov, S. A. & Philippova, O. E. (2023). Rheological behavior of polysaccharide hydrogels of alginate reinforced by small amount of halloysite nanotubes for extrusion 3D printing. In: *Herald of Moscow University. Series 16. Biology*, 78 (3S), 63–68 (in Russ.).
5. Ruobing, Bai, Baohong, Chen, Jiawei, Yang & Zhigang, Suo (2019). Tearing a hydrogel of complex rheology. In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 125, 749–761.

6. Saha, N., Vyroubal, R., Shah, R., Takeshi, K. & Saha, P. (2013). Effect of strain on viscoelastic behavior of fresh, swelled and mineralized PVP-CMC hydrogel. In: *AIP Conference Proceedings*, 1526 (1), 301–309. DOI: 10.1063/1.4802624.
7. Kirsanov, E. A. & Matveenko, V. N. (2022). *Viscosity and elasticity of structured liquids*. Moscow: Technosphera publ. (in Russ.).
8. Vekovishchev, M. P. & Kirsanov, E. A. (2023). Non-Newtonian flow of structured systems. XXXVII. Viscoelasticity of a clay/nylon-11 polymer composite. In: *Liquid Crystals and their Application*, 23 (4), 67–75 (in Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вековищев Михаил Петрович (г. Коломна, Московская обл.) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и химии Государственного социально-гуманитарного университета;

<https://orcid.org/0000-0001-9100-9526>; e-mail: mpv.71@mail.ru

Кирсанов Евгений Александрович (г. Коломна, Московская обл.) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и химии Государственного социально-гуманитарного университета;

<https://orcid.org/0000-0003-3030-7989>; e-mail: Kirsanov47@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail P. Vekovishchev (Kolomna, Moscow region) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Physics and Chemistry, State University of Humanities and Social Studies; <https://orcid.org/0000-0001-9100-9526>; e-mail: mpv.71@mail.ru

Evgeny A. Kirsanov (Kolomna, Moscow region) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Physics and Chemistry, State University of Humanities and Social Studies; <https://orcid.org/0000-0003-3030-7989>; e-mail: Kirsanov47@mail.ru