

УДК 541.64:532.135:547(458+995)

ВЛИЯНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТВОРОВ СМЕСЕЙ НАТРИЕВЫХ СОЛЕЙ N-СУКЦИНИЛХИТОЗАНА И КАРБОКСИМЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ИЗ ЭТИХ РАСТВОРОВ

© 2023 г. М. В. Базунова^{а,*}, А. С. Шуршина^а, В. В. Чернова^а, Р. Ю. Лаздин^а, Е. И. Кулиш^а

^аБашкирский государственный университет
450076 Уфа, ул. Заки Валиди, 32, Россия

*e-mail: mbazunova@mail.ru

Поступила в редакцию 24.10.2022 г.

После доработки 12.12.2022 г.

Принята к публикации 26.12.2022 г.

Дана экспериментальная оценка структурообразования в растворах индивидуальных полимеров натриевых солей N-сукцинилхитозана и карбоксиметилцеллюлозы и их смесей. Показана возможность регулирования степени ферментативного разложения, а также других свойств материалов, полученных на их основе. В бинарных смесях вероятно возникновение надмолекулярных структур, представляющих собой гомоагрегаты обоих полимеров, для которых характерна повышенная плотность упаковки и замедленная скорость химических и биохимических превращений. Смешение натриевых солей N-сукцинилхитозана и карбоксиметилцеллюлозы в растворе способствует усилению агрегационных процессов. Тип агрегатов (гомо- или гетеро-) определяется концентрацией полимеров в исходном растворе: в разбавленных растворах (с концентрацией порядка концентрации формирования сетки зацеплений) в смеси образуются гомоагрегаты, в более концентрированных — смешанные гетероагрегаты. Установлено, если в растворе смесей полимеров возникают гетероагрегаты, то тогда проявляются повышенные (по сравнению с аддитивными значениями) деформационно-прочностные характеристики, степень ферментативного гидролиза и сорбционной способности пленочных материалов, полученных из таких смесей. Когда в растворах смесей полимеров формируются гомоагрегаты, то все анализируемые показатели имеют пониженные значения.

DOI: 10.31857/S2308113923700316, EDN: PIAQND

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что применяемые при лечении ран традиционные текстильные повязки не обеспечивают необходимой защиты кожного покрова, например, при заживлении ожоговых ран. Пропитанный экссудатом перевязочный материал становится паро- и газонепроницаемым, чем может вызвать ускоренное размножение микроорганизмов на раневой поверхности. Замена традиционных повязок травмирует формирующийся эпителий и вызывает удлинение сроков восстановления кожных тканей, а также может спровоцировать образование рубцов [1]. В связи с чем, необходим поиск новых ранезащитных материалов, которые были бы лишены этих недостатков и вместе с тем обладали бы рядом преимуществ, таких как хорошая влагопоглощающая способность, паро- и газопроницаемость, биосовместимость с тканями организма, бактериостатичность, биоразлагаемость и т.д. [2].

Перспективной основой для создания ранезащитных пленочных покрытий являются полисахариды, например водорастворимое производное хитозана — натриевая соль N-сукцинилхитозана, а также натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы. Создаваемые на их основе защитные материалы отвечают практически всем предъявляемым требованиям [3–10]. При этом одним из главных достоинств этих материалов является способность к биоразложению под действием ферментов, выделяемых раневой поверхностью. Данное обстоятельство позволяет изготавливать такие пленочные покрытия, которые могли бы накладываться на рану однократно, не требуя замены, и постепенно разлагаться (лизироваться) на ране по мере роста новой ткани. Вместе с тем, способность к ферментативному разложению стала некой проблемой для защитных пленочных материалов на основе натриевой соли N-сукцинилхитозана или карбоксиметилцеллюлозы, поскольку они разлагаются на ране слишком быстро и за два–три дня полностью лизируются [11, 12]. Та-

ким образом, полимеры, используемые для создания защитного пленочного материала, нуждаются в модификации, цель которой — увеличение сроков службы материала на ране посредством уменьшения скорости ферментативного разложения.

В качестве модификаторов могут быть использованы коллоидные частицы, низкомолекулярные электролиты, спирты и другие полимеры [13–20]. Так, например, смешение друг с другом растворов двух полимеров может привести к усилению агрегационных процессов, учитывая низкое сродство разных полимеров друг к другу. Однако характер формирующихся надмолекулярных структур в случае растворов смесей полимеров не однозначен и устанавливается, в первую очередь, типом возможных межмолекулярных взаимодействий между полимерами — предпочтительностью контактов полимер1–полимер1, полимер2–полимер2 (гомоагрегаты) или полимер1–полимер2 (гетероагрегаты). Именно в полимерных смесях велика вероятность образования надмолекулярных структур, представляющих собой гомоагрегаты обоих полимеров, для которых характерна повышенная плотность упаковки и замедленная скорость химических и биохимических превращений.

Установлено, что тип образующихся агрегатов, наряду с общими характеристиками конформационно-надмолекулярного состояния полимеров в растворе, является одним из весомых факторов, оказывающих значительное влияние на физико-химические и эксплуатационные свойства формирующегося из раствора материала, в том числе пленочного [21, 22]. Это возможно благодаря тому, что процесс пленкообразования при комнатной температуре осуществляется достаточно быстро, способствуя достижению неравновесного состояния. При этом релаксационные процессы настолько замедленны, что полимерные молекулы не приходят в равновесие не только за время испарения растворителя, но и при последующем пребывании пленки при комнатной температуре. Структура, а значит и свойства полимеров в такой пленке, определяются состоянием макромолекул в исходном растворе [23–25]. Следовательно, при варьировании структурообразования полимеров в растворе открывается возможность регулировать физико-химические и эксплуатационные свойства материалов, сформированных из раствора.

Цель настоящей работы — экспериментальная оценка структурообразования в растворах индивидуальных полимеров натриевой соли N-сукцинилхитозана и карбоксиметилцеллюлозы, а также их смесей друг с другом, что, в свою очередь, позволяет регулировать степень ферментативно-

го разложения и других свойств материалов, полученных на их основе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных полимеров при получении пленочных образцов использовали натриевую соль N-сукцинилхитозана (СХ; ТУ 9284-027-11734126-08) со степенью замещения по аминок группам 75%, степенью деацетилирования исходного образца хитозана 82% и $M = 6.7 \times 10^4$ а.е.м. (Закрытое акционерное общество “Биопрогресс”, Россия); а также натриевую соль карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) марки “Бланоза СМС 7НОФ РН” со степенью замещения 80–95% и $M = 2.6 \times 10^5$ а.е.м. (“Ashland”, США).

Растворение предварительно высушенных и очищенных от примесей СХ и КМЦ (растворитель — бидистиллированная вода) выполняли методом магнитного перемешивания при комнатной температуре в течение 24 ч. Готовили растворы СХ с массовой концентрацией 0.5, 1.0, 3.0 и 5.0%, растворы КМЦ с массовой концентрацией 0.3, 0.5 и 1.0%.

Смеси полимеров получали смешением растворов СХ и КМЦ различной концентрации в разном объемном соотношении.

Реологические исследования растворов полисахаридов и их смесей проводили на модульном динамическом реометре “Haake Mars III” (“Thermo Fisher”, Германия) при 20°C в двух режимах: режиме сдвигового деформирования и динамическом (осцилляционном) режиме.

В работе применяли измерительную систему плоскость–конус с диаметром 35 мм и углом при вершине конуса 2°.

Кривые течения находили в режиме непрерывного сдвигового деформирования в диапазоне скорости сдвига от 0.1 до 10 с⁻¹. За наибольшую ньютоновскую вязкость условно принимали вязкость, определенную при скорости сдвига 0.1 с⁻¹, за наименьшую — при скорости сдвига 10 с⁻¹.

Испытания в осцилляционном режиме выполняли в области линейной вязкоупругости в диапазоне амплитуды 0.1–10.0 Па и частоты осцилляции 0.1–10.0 Гц, что соответствует раствору СХ в интервале концентрации 0.2–15.0%.

Пленочные полимерные материалы на основе свежеприготовленных растворов индивидуальных СХ, КМЦ и их смесей получали методом полива растворов на обезжиренные чашки Петри. Толщину пленочных образцов поддерживали постоянной и равной 0.1 мм.

Физико-механические свойства пленок изучали на универсальной разрывной машине AGS-10 kNG “Trapezium-X” (“Shimadzu”), оснащенной программой “PlasticTensileTest” (длина образца —

Таблица 1. Характеристики свойств растворов полисахаридов, полученные из вискозиметрических данных

Система	$[\eta]$, дл/г	δ	c^* , г/дл	c_e , г/дл
СХ–вода	3.62 ± 0.18	1.0 ± 0.05	0.270 ± 0.020	0.75 ± 0.04
КМЦ–вода	22.84 ± 1.14	1.0 ± 0.05	0.031 ± 0.002	0.30 ± 0.02

20 мм, ширина – 20 мм, толщина – 0.1 мм, скорость растяжения – 1 мм/мин). Разрывное напряжение σ определяли с учетом площади поперечного сечения образца; относительное удлинение при разрыве ε рассчитывали с учетом первоначальной длины пленочного образца, взятого на испытание. Значения относительного удлинения при разрыве и разрывного напряжения находили как среднее арифметическое из трех параллельных измерений.

Процесс ферментативной деструкции пленочных образцов проводили при температуре $37 \pm 1^\circ\text{C}$, выдерживая пленки в течение времени t на подложке, содержащей раствор фермента (гиалуронидазы) в количестве 1 мг. Процесс ферментативной деструкции останавливали кипячением образца в течение 30 мин на водяной бане, после чего пленку растворяли в дистиллированной воде и измеряли характеристическую вязкость $[\eta]$ образцов, подвергнутых деструкции. О глубине протекания процесса судили по значению $\Delta\eta/\eta_0$, где $\Delta\eta = [\eta]_0 - [\eta]_t$, а $[\eta]_0$ – характеристическая вязкость образца полимера, не подвергнутого деструкции.

Относительную и характеристическую вязкости разбавленных растворов полимеров устанавливали с помощью вискозиметра Уббелюде при температуре $25 \pm 1^\circ\text{C}$ [26, 27].

Для определения протекания агрегационных процессов использовали следующие соображения. При описании вязкостных свойств разбавленных растворов, как правило, исходят из линейной зависимости приращения вязкости от концентрации полимерного раствора. Однако в случае полярных полимеров, таких как СХ и КМЦ, существует вероятность протекания обратимых агрегационных процессов, которые могут иметь место не только в области полуразбавленных, но даже и в области разбавленных растворов. В этом случае вклад в вязкость вносят не отдельные частицы с объемом V_0 , а их агрегаты, объем которых $V(n)$ зависит не только от числа составляющих его частиц n , но и от плотности их упаковки, характеризуемой фрактальной размерностью D :

$$V(n) = V_0 \times n^{3/D} \quad (1)$$

В результате неплотной упаковки частиц в агрегате их вклад в вязкость начинает зависеть от концентрации нелинейно:

$$\Delta\eta \sim \eta_0 \times c^\delta, \quad \delta > 1 \quad (2)$$

Следовательно, любое отклонение показателя δ от единицы свидетельствует о том, что исследуемая система является структурированной. При этом рассмотрение экспериментальных зависимостей удельной вязкости растворов смесей СХ и КМЦ от концентрации позволяет определить показатель δ в выражении (2) и текущее значение агрегированности системы.

Опыты по сорбции воды пленками СХ и КМЦ и их смесей проводили при 100% влажности в термостатируемых условиях при 37°C . Относительное количество воды m_t , поглощаемое пленочным образцом к моменту времени, определяли весовым методом, выдерживая пленочные образцы в эксикаторе в парах воды в течение определенного времени:

$$m_t = \frac{\Delta m_t}{m_0}, \quad (3)$$

где m_0 – исходная масса полимера в пленке, Δm_t – разница между массой пленки в момент времени t и исходной массой полимера в пленке.

Погрешность эксперимента при доверительной вероятности 0.95 и количестве параллельных опытов равных 5 не превышала 3%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение гидродинамических свойств макромолекул в растворах позволяет получить важную информацию о состоянии полимера: размер индивидуального клубка (по значениям характеристической вязкости) и степень межмолекулярного взаимодействия (по значению показателя δ в зависимости вязкости от концентрации $\eta \sim c^\delta$) [28].

Как раствор СХ, так и раствор КМЦ в воде в области больших разбавлений представляют собой растворы индивидуальных макромолекул (табл. 1). Возможно, это обусловлено наличием заряда на макромолекулах, приводящим к поли-

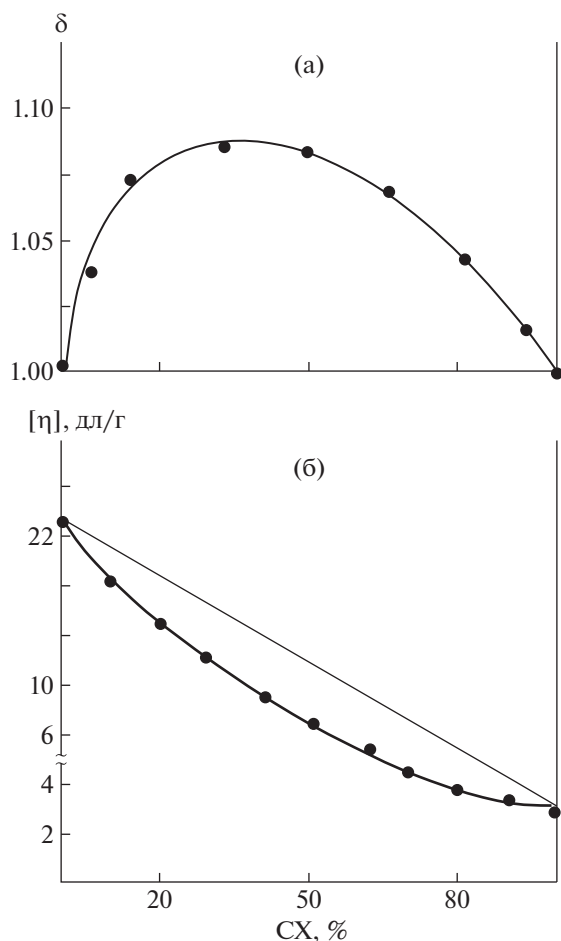


Рис. 1. Зависимости степени агрегированности (а) и характеристической вязкости (б) от соотношения полимеров в смеси для системы СХ–КМЦ–вода.

электролитному набуханию и отталкиванию макромолекул друг от друга в растворе, что, в свою очередь, подавляет их склонность к агрегации.

При смешении друг с другом эквiconцентрированных растворов обоих полимеров невысокой концентрации (0.1 г/дл) можно ожидать не только аддитивного поведения смесевых растворов, но и отклонений от аддитивности за счет перестройки структуры полимеров. Однако тип формирующихся надмолекулярных структур в случае растворов смесей полимеров не однозначен. Результат определяется, в первую очередь, характером возможных межмолекулярных взаимодействий между полимерами – предпочтительностью контактов полимер1–полимер1, полимер2–полимер2 (гомоагрегаты) или полимер1–полимер2 (гетероагрегаты). Судить о типе образуемых агрегатов можно по диаграммам вязкости: если образуются гомоагрегаты, то зависимости вязкости

отклоняются в меньшую сторону от аддитивных значений, если гетеро- – то в большую.

Смеси СХ и КМЦ характеризуются повышенной степенью агрегированности полимеров в растворе (рис. 1), что свидетельствует об усилении межмолекулярных взаимодействий макромолекул в смесях. Значения характеристической вязкости при этом имеют отрицательные отклонения от аддитивной зависимости, это указывает на то, что клубки в смесях полимеров меньше по размерам, нежели клубки индивидуальных полимеров, позволяя тем самым утверждать, что в области разбавленных растворов формируются гомоагрегаты.

С повышением концентрации полимеров агрегационные процессы усиливаются. Зависимости наибольшей ньютоновской (динамической) вязкости η от концентрации индивидуальных СХ или КМЦ в растворе, представленные в логарифмических координатах, для растворов обоих изучаемых полимеров разбиваются на два участка (рис. 2). На первом участке в области небольших значений концентрации полимера тангенс угла наклона (т.е. показатель агрегированности полимера в растворе) равен 1, а на втором ~ 5 . Увеличение степенного показателя свидетельствует о протекании процессов межмолекулярной агрегации по мере увеличения содержания полимера в растворе. При этом концентрация формирования сетки зацеплений c_e в обоих случаях не совпадает со значением точки кроссовера c^* (см. табл. 1).

Структурообразование полимеров в полуразбавленной области вследствие образования сетки зацеплений сопровождается проявлением аномалии вязкости. По характеру зависимости сдвиговой вязкости растворов от скорости сдвига хорошо видно (рис. 3), что по мере концентрирования меняется степень структурированности раствора.

Так, в области меньшей концентрации полимера в растворе, чем значение концентрации, соответствующей началу образования флуктуационной сетки зацеплений, зависимости сдвиговой вязкости растворов от скорости сдвига имеют вид, близкий к кривым, характерным для ньютоновской жидкости. В области значений концентрации, соответствующих началу формирования сетки – вид псевдопластичной жидкости. При переходе в область значений концентрации, при которых образуется устойчивая сетка зацеплений, характер зависимости сдвиговой вязкости от скорости сдвига для растворов становится похожим на нелинейное пластичное поведение с предельным напряжением сдвига. Более того, можно отметить, что значение скорости сдвига, соответствующей перегибу на зависимости вязкости от скорости сдвига, увеличивается с ростом концентрации полимера в растворе.

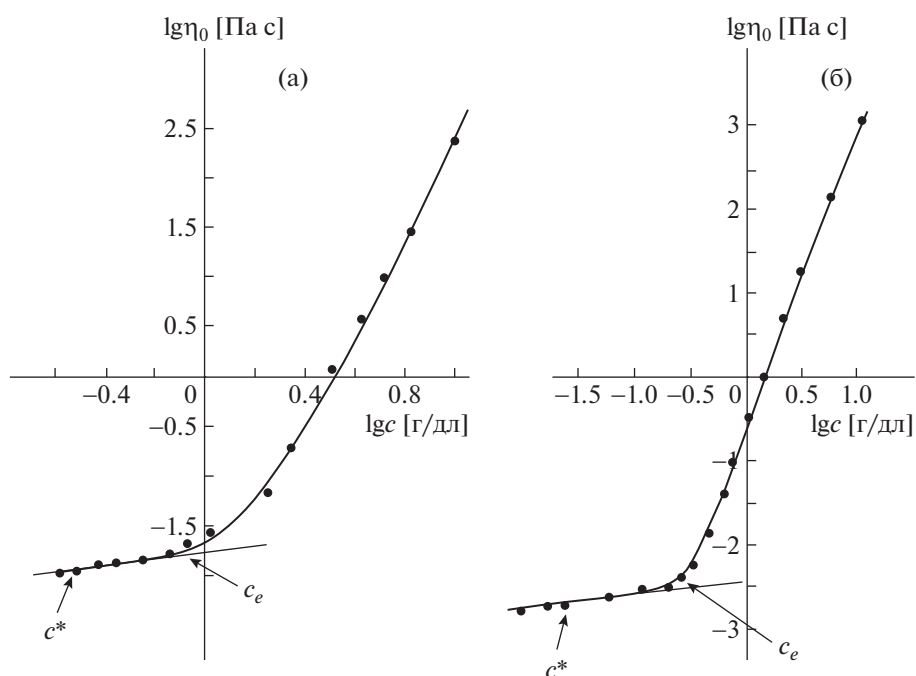


Рис. 2. Концентрационные зависимости наибольшей ньютоновской вязкости растворов СХ (а) и КМЦ (б).

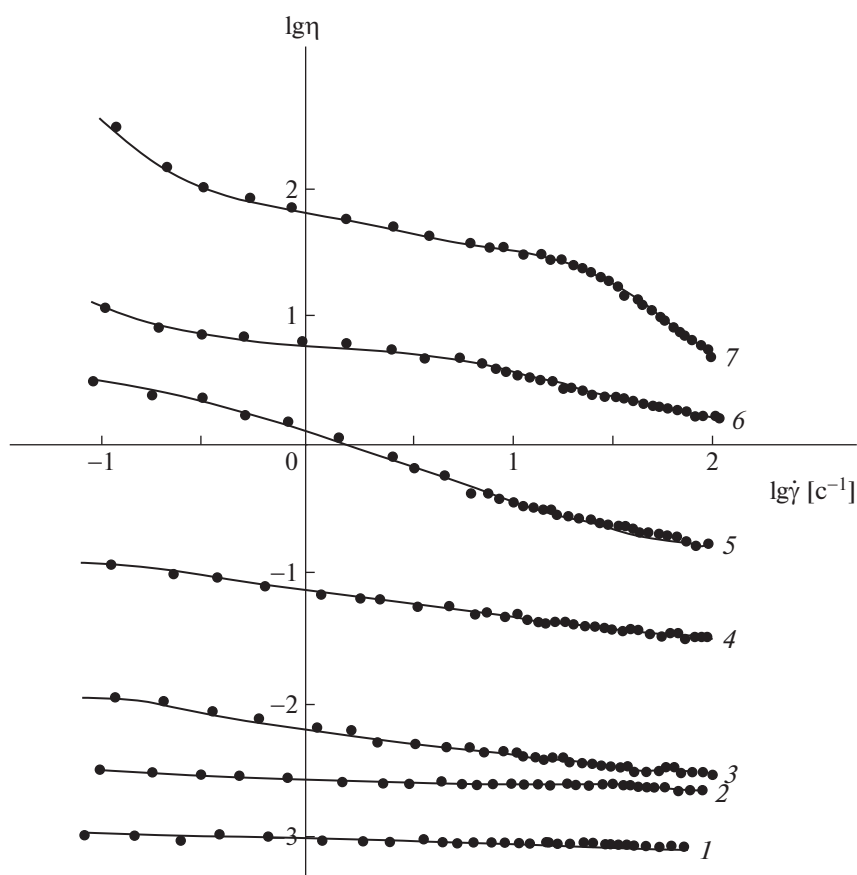


Рис. 3. Зависимость сдвиговой вязкости от скорости сдвига для растворов КМЦ с концентрацией 0.05 (1), 0.1 (2), 0.3 (3), 0.7 (4), 3.0 (5), 4.0 (6) и 6.0 г/дл (7).

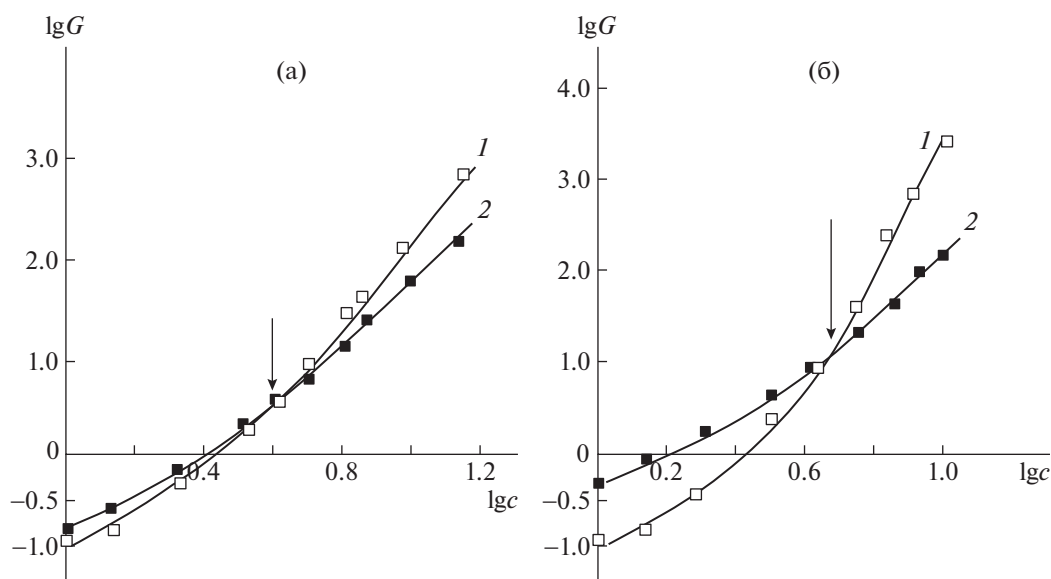


Рис. 4. Зависимости модуля накоплений G' (1) и потерь G'' (2) от содержания СХ (а) и КМЦ (б) в растворе. Частота осциллирующего напряжения — 1 Гц; амплитуда напряжения — 1 Па.

Влияние степени структурированности раствора на реологические свойства проявляется и в результатах реологических испытаний в осцилляционном режиме. Испытания в этом режиме позволяют оценить общее сопротивление раствора полимеров течению и выделить среди него упругую компоненту (модуль накоплений) и вязкую (модуль потерь).

В области небольшой концентрации значения модуля накоплений меньше значений модуля потерь (рис. 4), это указывает на то, что раствор полимера представляет собой вязкоупругую жидкость. Однако при превышении содержания полимеров в растворе ситуация меняется — они начинают вести себя как упруго-вязкие тела. Об этом свидетельствуют зависимости модулей упругости и потерь от концентрации полимеров в растворе. Видно, что формирование флуктуационной сетки происходит постепенно по мере концентрирования раствора. Вместе с тем, при увеличении содержания полимера в растворе происходит переход системы от поведения, типичного для вязких жидкостей, при котором $G' < G''$, к поведению, характерному для упруго-вязких тел ($G' > G''$).

При смешении друг с другом двух полимеров процессы агрегации усиливаются, что понятно, учитывая низкое сродство разных полимеров друг к другу; причем тип образуемых агрегатов зависит от концентрации полимеров в исходных растворах (рис. 5а). Так, если для смешения были взяты достаточно разбавленные растворы (с концентрацией порядка c_c), то формируются гомоагрегаты,

если более концентрированные — то смешанные. Подобного рода закономерности имеют место и для значений модулей накоплений (рис. 5б).

Тип образующихся агрегатов является одним из определяющих факторов, оказывающих значительное влияние на свойства материалов, в том числе пленочных, формирующихся из растворов полимеров [29, 30]. Действительно, пленки, полученные из растворов гетероагрегатов смесей СХ и КМЦ, характеризуются повышенной прочностью, эластичностью и повышенными значениями модуля упругости (рис. 6). Вместе с тем, при получении пленок из растворов смесей СХ и КМЦ, в которых имеются гомоагрегаты, ситуация прямо противоположная.

Одним из важнейших физико-химических свойств современных раневых покрытий являются сорбционные свойства [31]. Вследствие того, что гомоагрегаты обладают повышенной (по сравнению с гетероагрегатами) плотностью упаковки, становится понятно, почему пленки, полученные из растворов смесей полимеров, в которых образуются гомоагрегаты, характеризуются меньшей степенью сорбции паров воды по сравнению с материалами, полученными из растворов смесей полимеров, в которых формируются гетероагрегаты (рис. 7). Более того, для таких пленочных материалов наблюдается четкая корреляция между данными по их сорбционной способности и степенью ферментативного гидролиза (рис. 8).

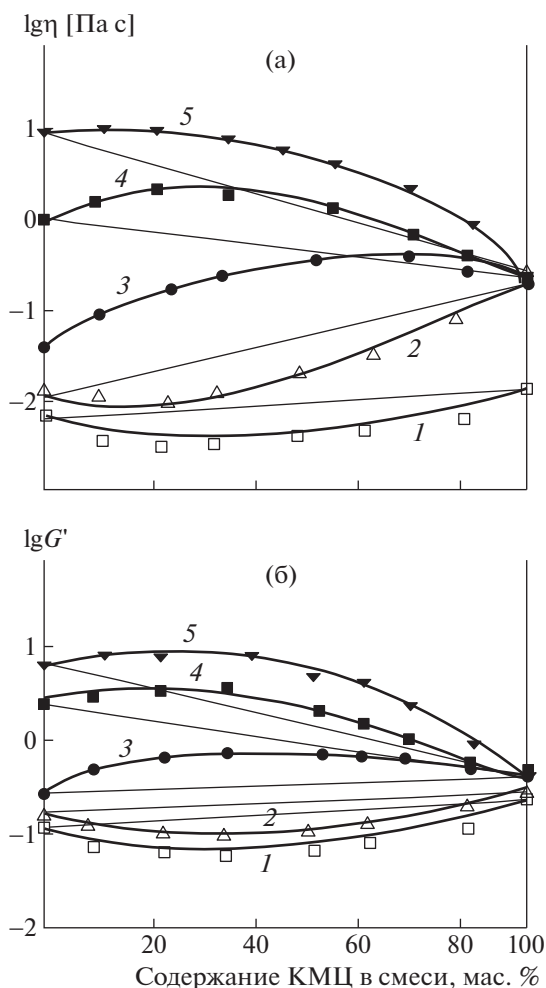


Рис. 5. Зависимости от соотношения полимеров в смеси динамической вязкости (а) и модуля накоплений (б), определенные при частоте осцилляции 0.1 Герц, для растворов СХ–КМЦ с концентрацией 0.5–0.3 (1), 0.5–0.5 (2), 1.0–1.0 (3), 3.0–1.0 (4) и 5.0–1.0 г/дл (5).

В том случае, когда в растворе смесей полимеров образуются гетероагрегаты, степень ферментативного гидролиза обоих полимеров в смеси больше аддитивных значений, а когда гомоагрегаты – меньше, нежели для пленок индивидуальных полимеров (рис. 8). Усиление агрегационных процессов, вызывающее уменьшение доступности звеньев полимера для взаимодействия с ферментным препаратом, является основной причиной уменьшения степени ферментативного гидролиза в случае гомоагрегатов. Следовательно, варьируя тип получаемых агрегатов, создается возможность регулировать и срок службы материала на раневой поверхности.

Таким образом, можно сделать вывод, что при получении полимерных пленок методом полива

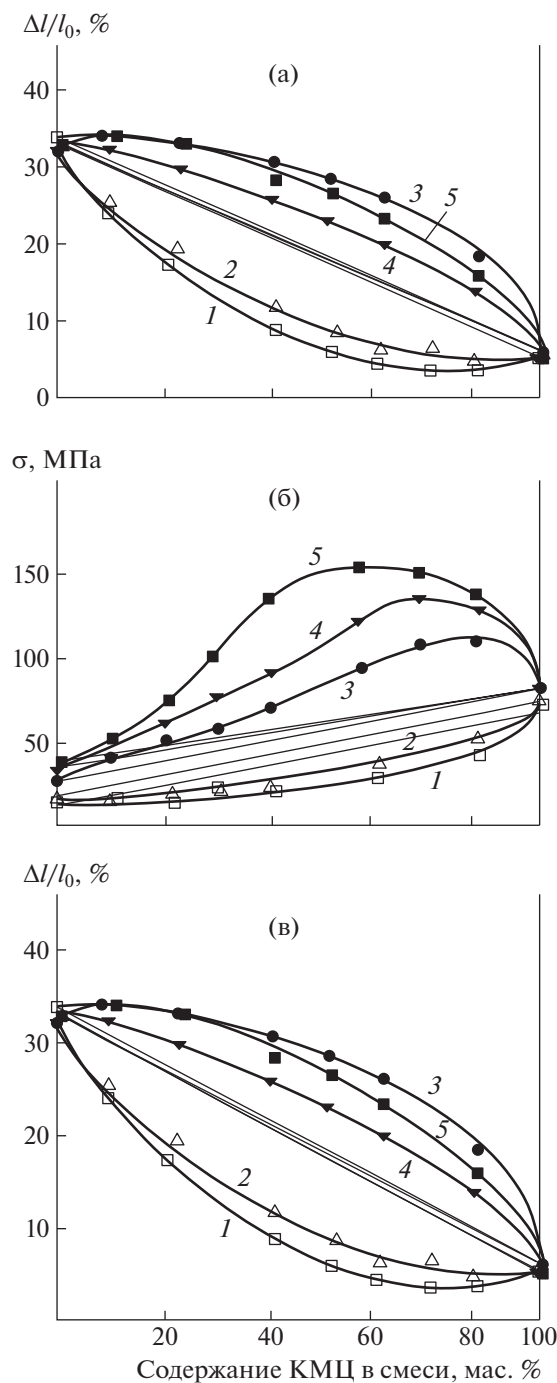


Рис. 6. Зависимости от соотношения полимеров в смеси модуля упругости (а), разрывного напряжения (б) и разрывного удлинения (в) пленочных материалов, полученных из исходных растворов СХ–КМЦ с концентрацией 0.5–0.3 (1), 0.5–0.5 (2), 1.0–1.0 (3), 3.0–1.0 (4) и 5.0–1.0 г/дл (5).

из растворов смесей полимеров, варьируя концентрацию и соотношение полимеров в исходных растворах, можно управлять и свойствами композитов.

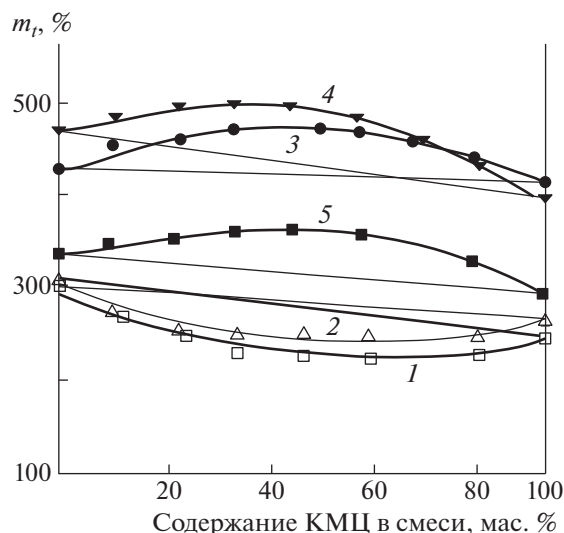


Рис. 7. Зависимость от соотношения полимеров в смеси степени сорбции пленочных материалов, полученных из исходных растворов СХ–КМЦ с концентрацией 0.5–0.3 (1), 0.5–0.5 (2), 1.0–1.0 (3), 3.0–1.0 (4) и 5.0–1.0 г/дл (5). Время поглощения пленками паров воды – 48 ч.

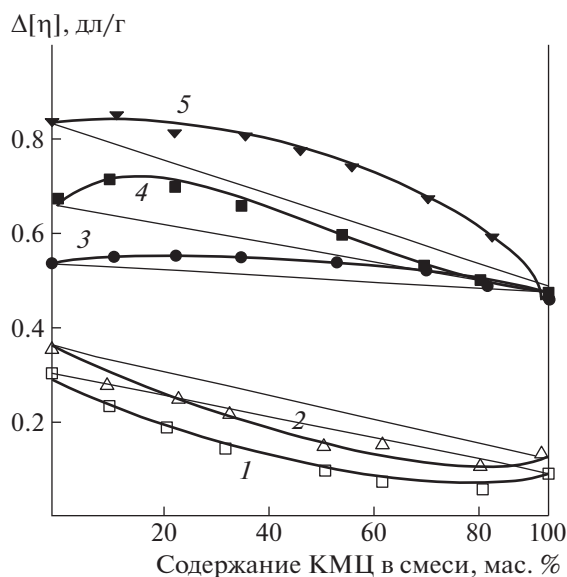


Рис. 8. Зависимость от соотношения полимеров в смеси изменения характеристической вязкости при контакте с раствором ферментным препаратом пленочных материалов, полученных из исходных растворов СХ–КМЦ с концентрацией 0.5–0.3 (1), 0.5–0.5 (2), 1.0–1.0 (3), 3.0–1.0 (4) и 5.0–1.0 г/дл (5). Время контакта – 30 мин; концентрация ферментного препарата – 0.1 г/л.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что растворы индивидуальных N-сукцинилхитозана и карбоксиметилцеллюлозы характеризуются про-

явлением аномалии вязкости и усилением межмолекулярной агрегации по мере увеличения содержания полимера в растворе. Смешение полимеров в растворе приводит к дополнительному усилению агрегационных процессов. При этом тип образующихся агрегатов (гомо- или гетеро-) определяется концентрацией полимеров в исходном растворе. Тип агрегатов служит одним из весомых факторов, оказывающим значительное влияние на свойства материалов, в том числе пленочных, формирующихся из растворов смесей СХ и КМЦ. В том случае, когда в растворе смесей полимеров образуются гетероагрегаты, значения физико-механических характеристик (модуля упругости, разрывного напряжения, разрывного удлинения), а также степени ферментативного гидролиза обоих полимеров и их сорбционной способности в смеси больше аддитивных значений, а когда гомоагрегаты – меньше, нежели для пленок индивидуальных полимеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олтаржевская Н.Д., Коровина М.А., Савилова Л.Б. // Росс. хим. журн. 2002. Т. XLVI. № 1. С. 133.
2. Штильман М.И. Полимеры медико-биологического назначения. М.: Академкнига, 2006.
3. Сливкин Д.А., Лапенко В.Л., Сафонова О.А., Суслина С.Н., Беленова А.С. // Вестн. Воронежского гос. ун-та. 2011. № 2. С. 214.
4. Shurshina A.S., Bazunova M.V., Chernova V.V., Galina A.R., Lazdin R.Y., Kulish E.I. // Polymer Science A. 2020. V. 62. № 4. P. 422.
5. Bazunova M.V., Sharafutdinova L.A., Lazdin R.Y., Chernova V.V., Mixonov D.N., Zakharov V.P. // Appl. Biochem. Microbiol. 2018. V. 54. № 5. P. 474.
6. Material Science of Chitin and Chitosan / Eds by T. Uragami, S. Tokura. Tokyo: Springer, 2006.
7. Dang Duc Long, Dang Van Luyen // J. Macromol. Sci. 1996. V. 33. № 12. P. 1875.
8. Rashmi Boppana // J. Microencapsul. 2010. V. 27. № 4. P. 3.
9. Kato Y., Onishi H., Machida Y. // Biomaterials. 2004. V. 25. № 5. P. 907.
10. Yan C., Gu J., Hou D., Jing H., Wang J., Guo Y., Yamamoto A. // Int. J. Biol. Macromol. 2015. V. 72. P. 751.
11. Лаздин Р.Ю., Чернова В.В., Кулиш Е.И., Захаров В.П. // Сб. ст. материалов Международной научной конференции “Полифункциональные химические материалы и технологии” / Под ред. Ю.Г. Слизова. Томск: Национальный исследовательский Томский гос. ун-т, 2019. С. 91. Т. 1.
12. Chernova V.V., Valiev D.R., Bazunova M.V., Shurshina A.S., Kulish E.I. // Russ. J. Appl. Chem. 2019. V. 92. № 3. P. 332.
13. Валиев Д.Р., Базунова М.В., Чернова В.В., Шуришина А.С., Кулиш Е.И. // Перспективные материалы. 2018. № 4. С. 14.

14. Базунова М.В., Чернова В.В., Лаздин Р.Ю., Захаров В.П., Кулиш Е.И. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 12. С. 51.
15. Litmanovich E.A., Orleneva A.P., Korolev B.A., Kasaikin V.A., Kulichikhin V.G. // Polymer Science A. 2000. V. 42. № 6. P. 689.
16. Savencu I., Ioana S., Sonia I., Alina P., Cătălina B., Ioan T. // React. Funct. Polym. 2021. V. 168. P. 109.
17. Raj S., Kumar P., Sharma R., Malviya R. // Curr. Smart Mater. 2018. V. 1. № 3. P. 38.
18. Izumrudov V.A., Mussabayeva B.Kh., Kassymova Z.S., Klivenko A.N., Orazzhanova L.K. // Russ. Chem. Rev. 2019. V. 88. № 10. P. 1046.
19. Bochek A.M., Shevchuk I.L., Kalyuzhnaya L.M. // Russ. J. Appl. Chem. 2010. V. 83. № 4. P. 712.
20. Teodorescu M., Bercea M. // Polym. Plast. Technol. Eng. 2015. V. 54. № 9. P. 923.
21. Kononova S.V., Gubanova G.N., Romashkova K.A., Smirnova V.E., Popova E.N., Vlasova E.N., Kruchinina E.V., Gofman I.V., Saifutdinova I.F., Romanov D.P. // Polymer Science A. 2016. V. 58. № 3. P. 419.
22. Падохин В.А., Ганиев Р.Ф., Кочкина Н.Е. // Докл. РАН. 2007. Т. 416. № 2. С. 219.
23. Shurshina A.S., Chernova V.V., Lazdina M.Yu., Titlova A.S., Kulish E.I. // Lett. Mater. 2022. V. 12. № 3(47). P. 209.
24. Ахметханов Р.М., Чернова В.В., Шурина А.С., Лаздина М.Ю., Кулиш Е.И. // Конденсированные среды и межфазные границы. 2021. Т. 23. № 2. С. 188.
25. Kulish E.I., Lazdin R.Y., Shurshina A.S., Kolesov S.V., Zakharova E.M., Zakharov V.P. // Polymer Science A. 2021. V. 63. № 1. P. 54.
26. Сони́на А.Н., Успенский С.А., Вихорева Г.А., Филатов Ю.Н., Ганьбра́йх Л.С. // Хим. волокна. 2010. № 6. С. 11.
27. Баранов В.Г., Амрибахшоев Д.Х., Агранова С.А., Френкель С.Я. // Высокомолекул. соедин. Б. 1988. Т. 30. № 5. С. 384.
28. Баранов В.Г., Френкель С.Я., Агранова С.А., Бресткин Ю.В., Пинкевич В.Н., Шабсельс Б.М. // Высокомолекул. соедин. 1987. Т. 29. № 10. С. 745.
29. Philippova O.E., Korchagina E.V. // Polymer Science A. 2012. V. 54. № 7. P. 552.
30. Al Joda H.N.A., Pyshnograï G.V., Shipovskaya A.B., Tregubova Y.B., Zinovich S.A. // Mechan. Comp. Mater. 2016. V. 52. № 5. P. 637.
31. Shipovskaya A.B., Rudenko D.A., Fomina V.I., Ostrovsky N.V. // Eur. J. Natural History. 2012. № 6. P. 7.