

ПЛЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ СМЕСЕЙ НАТРИЕВОЙ СОЛИ *N*-СУКЦИНИЛА ХИТОЗАНА С ПОЛИ-*N*-ВИНИЛПИРРОЛИДОМ

© М. В. Базунова, Р. А. Мустакимов, Р. Б. Салихов, И. Н. Муллагалиев

Башкирский государственный университет,
450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32/3
E-mail: mbazunova@mail.ru

Поступила в Редакцию 18 июля 2022 г.

После доработки 1 сентября 2022 г.

Принята к публикации 1 сентября 2022 г.

*Методами ИК-спектроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии и вискозиметрии исследовано взаимодействие и совместимость компонентов полимерных смесей натриевой соли *N*-сукцинила хитозана с поли-*N*-винилпирролидоном и влияние состава на характеристики пленок, полученных на основе данных смесей. Пленки с молекулярной совместимостью компонентов (с содержанием поли-*N*-винилпирролидона до 20 мас%) характеризуются более высокими значениями модуля Юнга и прочности по сравнению с пленками на основе индивидуальной натриевой соли *N*-сукцинила хитозана. Показана возможность регулирования сорбционных свойств пленочных материалов. Наибольшее значение степени набухания отмечается в случае пленок на основе смесей поли-*N*-винилпирролидона с натриевой солью *N*-сукцинила хитозана с несовместимыми компонентами состава 50:50 мас%. Методом атомно-сканирующей микроскопии показано, что в случае совместимых композиционных пленок наблюдается увеличение среднеквадратичной шероховатости и большее разнообразие структуры поверхности по сравнению с пленками на основе индивидуальной натриевой соли *N*-сукцинила хитозана.*

Ключевые слова: *натриевая соль *N*-сукцинила хитозана; поли-*N*-винилпирролидон; пленочный материал; совместимость полимеров; физико-механические свойства*

DOI: 10.31857/S004446182206007X, EDN: DKMDUM

Физическое смешивание полимеров представляет собой простой и экономически выгодный способ получения полимерных систем, на основе которых можно получать материалы с характеристиками, превосходящими характеристики отдельных компонентов. Данный подход оправдан в основном, если компоненты смесей молекулярно и термодинамически совместимы. Известно, что полимеры проявляют хорошую совместимость в том случае, если их функциональные группы вступают в специфическое межмолекулярное взаимодействие с образованием водородных, донорно-акцепторных и других связей [1]. Также компоненты смеси должны обладать растворимостью в одних и тех же растворителях и схожей полярностью групп [2, 3].

Использование полимерных пленок на основе смесей полисахаридов позволяет создавать биосовме-

стимые медицинские материалы, эксплуатационные характеристики которых можно варьировать в широких пределах в зависимости от условий получения [4, 5]. Наличие молекулярной совместимости компонентов в пленке в свою очередь позволяет добиться улучшения деформационно-прочностных свойств получаемого материала [6].

Достаточно широко изучаются материалы в виде пленок на основе смесей полисахарида хитозана [7, 8]. Ограничением применения хитозана является низкая растворимость в нейтральной среде. Данная проблема может быть решена химической модификацией хитозана с получением водорастворимых производных. К примеру, в ходе взаимодействия с янтарным ангидридом образуется сукцинилированное производное хитозана — *N*-сукцинил хитозана и его соли, в которых сукцинильные остатки обе-

спечивают водорастворимость получаемых соединений, совместимость с тканями и клетками организма, антиагрегантную и антиоксидантную активность [9, 10]. Совмещение хитозана и его сукцинированных производных с синтетическими полимерами интересно с точки зрения модификации деформационно-прочностных, транспортных, сорбционных и структурно-механических свойств получаемых материалов [5, 11].

В качестве модифицирующего компонента натриевой соли N-сукцинила хитозана в работе использовали поли-N-винилпирролидон, который благодаря химической стабильности, совместимости с биологическими системами и хорошей растворимости в водной среде применяется в медицине в качестве искусственного заменителя синовиальной жидкости, а также как модификатор вязкости, солюбилизатор или связующее вещество для создания лекарственных форм с пролонгированным действием [12]. В работе [13] показано, что поли-N-винилпирролидон в сочетании с полидифенилоксидамидо-N-фенилфталимидом способен образовывать ограниченно совместимые смеси, что в свою очередь отражается на деформационно-прочностных свойствах пленок.

Цель работы — исследование совместимости компонентов и изучение физико-химических свойств пленочных материалов на основе полимерных смесей натриевой соли N-сукцинила хитозана с поли-N-винилпирролидоном.

Экспериментальная часть

Для формирования пленочных материалов использовали следующие полимеры: натриевую соль N-сукцинила хитозана с молекулярной массой 200 кДа со степенью замещения по аминогруппам 75% (ЗАО «Биопрогресс»); поли-N-винилпирролидон марки Povidone K-17 USP 26 с молекулярной массой 11 кДа (CNSG Anhui Hongsifang Co.).

Растворы исходных компонентов натриевой соли N-сукцинила хитозана и поли-N-винилпирролидона были приготовлены путем растворения предварительно высушенной навески полимера в очищенной воде, полученной из питьевой воды методом дистилляции* с помощью аквадистиллятора ДЭ-4М (завод «Электромедоборудование»). Массовая концентрация натриевой соли N-сукцинила хитозана и поли-N-винилпирролидона в растворах составляла 0.1–4.0%. Полимерные смеси получали постепенным

добавлением по каплям раствора натриевой соли N-сукцинила хитозана к раствору поли-N-винилпирролидона при непрерывном перемешивании.

Образцы пленок были приготовлены методом полива растворов полимерных смесей на обезжиренную поверхность чашки Петри с дальнейшим удалением растворителя. Пленки сушили в два этапа: 1-й этап — сушка на открытом воздухе, 2-й этап — сушка в вакуумном шкафу до постоянного веса. Толщина полученных пленочных материалов не превышала 150 мкм. Толщину пленок измеряли с помощью толщиномера ThicknessGAUGE (Sensorica-M, Ltd) с точностью до 10 мкм.

ИК-спектры пропускания исходных полимеров и их смесей в различном массовом соотношении в диапазоне 500–4000 см⁻¹ исследовали с помощью инфракрасного Фурье-спектрофотометра IRAffinity-1S (Shimadzu) с использованием приставки, реализующей геометрию нарушенного полного внутреннего отражения с алмазным кристаллом. Для подтверждения наличия взаимодействия компонентов смесей сравнивали спектры смесей с эталонными спектрами индивидуальных полимеров.

Динамическую вязкость растворов индивидуальных полимеров и полимерных смесей определяли с помощью вискозиметра Уббелодде при 25.0 ± 0.1 °С. Значения относительной вязкости ($\eta_{отн}$) рассчитывали как отношение времени истечения раствора полимера или полимерной смеси к времени истечения растворителя. Удельную вязкость ($\eta_{уд}$) рассчитывали по формуле

$$\eta_{уд} = 1 - \eta_{отн}, \quad (1)$$

где $\eta_{отн}$ — относительная вязкость, $\eta_{уд}$ — удельная вязкость.

Изучение теплофизических свойств пленочных образцов проводились на приборе DSC 214 Polyma (NETZSCH-Gerätebau). Термограммы пленок индивидуальных полимеров и смесей были получены в интервале температур –50÷200 °С в инертной среде (азот). Скорость повышения температуры составляла 10 град·мин⁻¹. Абсолютная температурная погрешность не превышала 0.4 °С.

Количество водяных паров, поглощаемых полимерными пленками, определяли эксикаторным методом при $T = 25 \pm 1$ °С. Образцы пленок, полученных из 1%-ных полимерных растворов и высушенных до постоянной массы, помещали в сосуд с насыщенными парами растворителя (очищенной воды) и выдерживали до достижения равновесного влагопоглощения, после чего определяли степень набухания пленок:

* ФС.2.2.0020.15 «Вода очищенная». Государственная фармакопея Российской Федерации. XIV изд. М., 2018.

$$\alpha = \frac{m_t - m_0}{m_0}, \quad (2)$$

где m_0 — исходная масса пленки, m_t — масса набухшей пленки в момент времени t .

Для каждого образца пленки измерение проводили не менее 3 раз.

Совместимость полимеров в пленочном образце изучали методом сорбции общего растворителя. На основании значений массы сорбированного растворителя W , равной разности массы набухшей пленки в состоянии равновесия и исходной массы пленки, были определены параметры взаимодействия растворитель–полимер (χ_1) и полимер–полимер (χ_{23}). Значение χ_1 определяли по выражению Флори–Хаггинса [14]:

$$\ln a_1 = \ln\left(\frac{P_1}{P_1^0}\right) = \ln(1 - \varphi_2) + \varphi_2 + \chi_1 \varphi_2^2, \quad (3)$$

где a_1 — активность растворителя, P_1/P_1^0 — относительное давление паров растворителя, φ_2 — объемная доля полимера.

Ввиду того что испытания проводили при давлении насыщенных паров воды, $\ln a_1 = 0$, так как $a_1 = P_1/P_1^0 = 1$. Для расчета объемной доли полимера в системе пользовались выражением

$$\varphi_2 = \frac{1}{1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} W}, \quad (4)$$

где ρ_1 и ρ_2 — относительные плотности растворителя и полимера, W — масса сорбированного растворителя ($\text{г} \cdot \text{г}^{-1}$).

Параметр взаимодействия полимер–полимер вычисляли по уравнению [15]

$$\chi_{23} = \frac{\chi_2 \varphi_2 + \chi_{13} \varphi_b + \chi_{1(23)}}{\varphi_a \varphi_b}, \quad (5)$$

где χ_{12} , χ_{13} , $\chi_{1(23)}$ — значения параметров взаимодействия Флори–Хаггинса индивидуальных полимеров поли-*N*-винилпирролидона, натриевой соли *N*-сукцинила хитозана и полимерных смесей с растворителем соответственно; φ_a , φ_b — объемные доли поли-*N*-винилпирролидона и натриевой соли *N*-сукцинила хитозана в смеси соответственно.

Исследование упругих свойств поверхности пленок производили в режиме силовой спектроскопии. Для этого при подводе зонда к поверхности получали зависимости силы от расстояния, так называемые «силовые кривые». Оценку упругих свойств (определение эффективного модуля Юнга) пленок проводили на основе анализа полученной зависимости в рамках принятой модели контактной механики Герца по вы-

ражению для зависимости глубины индентирования h от силы F :

$$h = \left(\frac{F^2}{R E_{\text{eff}}^2} \right)^{1/3}, \quad (6)$$

где R — радиус острия зонда, E_{eff} — эффективный модуль Юнга.

Изучение физико-механических свойств пленочных материалов проводили на универсальной разрывной машине AGS-10 kNG Trapezium-X (Shimadzu) с программным обеспечением PlasticTensileTest. Размеры образцов — $20 \times 20 \times 0.1$ мм, скорость растяжения — $1 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$. Разрывное напряжение σ (МПа) определяли с учетом площади поперечного сечения пленочного образца. Относительное удлинение при разрыве $\Delta l/l_p$ (%) рассчитывали с учетом длины образца, взятого на испытание. Значения $\Delta l/l_p$ и σ брали как среднее арифметическое из трех параллельных измерений. Относительная погрешность измерения не превышала 5%.

Определение морфологии и топографии поверхности пленочных материалов проводили методом атомно-силовой микроскопии. Перед измерением образцы высушивали до постоянной массы. Использовали сканирующую зондовую установку Интегра-Спектра (NT-MDT Spectrum Instruments) на воздухе в полуконтактной моде с применением кантиливера NSG-01 с жесткостью $2.5\text{--}10 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$, резонансной частотой $11\ 595 \text{ кГц}$ и радиусом 10 нм . Профили поверхности образцов представляли в виде топографических образов с разрешением $50 \times 50 \text{ мкм}$, исходя из которых были рассчитаны среднеквадратичные шероховатости с помощью программного обеспечения Gwyddion.

Обсуждение результатов

Для формирования однофазных полимерных смесей в смесях ионогенных полимеров необходимо наличие благоприятных специфических межмолекулярных взаимодействий (ионных и водородных связей, ион-дипольных взаимодействий, π - π или взаимодействий с переносом заряда) компонентов смеси [16]. Добавление поли-*N*-винилпирролидона к натриевой соли *N*-сукцинила хитозана приводит к смещению полос поглощения, соответствующих валентным колебаниям связей в $\text{C}=\text{O}$, OH - и NH_2 -группах натриевой соли *N*-сукцинила хитозана в область меньших волновых чисел, что свидетельствует о формировании в системе водородных связей (рис. 1). С увеличением количества поли-*N*-винилпирролидона в комплексе широкая полоса $3600\text{--}3200 \text{ см}^{-1}$ раздваи-

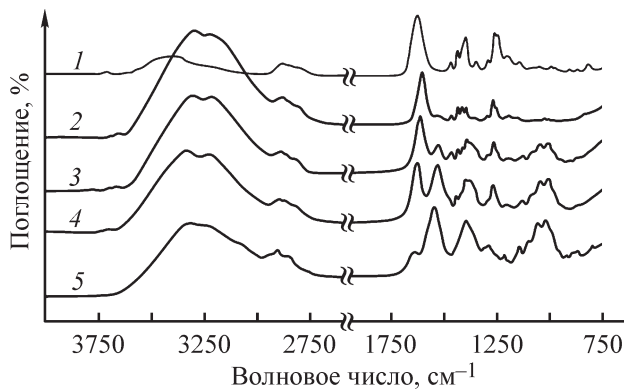


Рис. 1. Инфракрасные спектры смесей поли-N-винилпирролидон:натриевая соль N-сукцинила хитозана с массовыми соотношениями (мас%): 100:0 (1), 70:30 (2), 50:50 (3), 30:70 (4), 0:100 (5).

вается, что может свидетельствовать об образовании ощутимого количества межмолекулярных водородных связей между макромолекулами натриевой соли N-сукцинила хитозана и поли-N-винилпирролидона с участием гидроксильных и аминогрупп.

Известно, что отклонение экспериментальных значений $\eta_{уд}$ от аддитивных значений может рассматриваться как мера межмолекулярного взаимодействия полимеров в общем растворителе [17, 18]. Для всех изученных составов смесей наблюдается положительное отклонение экспериментальных значений $\eta_{уд}$ от аддитивных, что может быть связано с проявлением межмолекулярного взаимодействия разнородных полимеров в растворе (рис. 2). Подобное поведение в полимерных смесях может быть обусловлено формированием в растворах объемных гидрофильных агрегатов, гидродинамический радиус которых превосходит средневесовой гидродинамический радиус индивидуальных полимеров [19]. Максимальное значение удельной вязкости данных систем наблюдается в случае массового соотношения поли-N-винилпирролидон:натриевая соль N-сукцинила хитозана, близкого к 50:50 мас%, что свидетельствует о вовлечении максимального числа макромолекул в образование агрегатов. Таким образом, можно говорить о формировании совместимой полимерной смеси поли-N-винилпирролидона с натриевой солью N-сукцинила хитозана в разбавленных растворах в широком диапазоне массовых соотношений.

В пленочном материале по сравнению с раствором область взаимной растворимости может уменьшиться вследствие высокой концентрации компонентов. О наличии совместимости полимеров в пленке можно судить по появлению на термомеханической кривой релаксационного перехода при температуре, не харак-

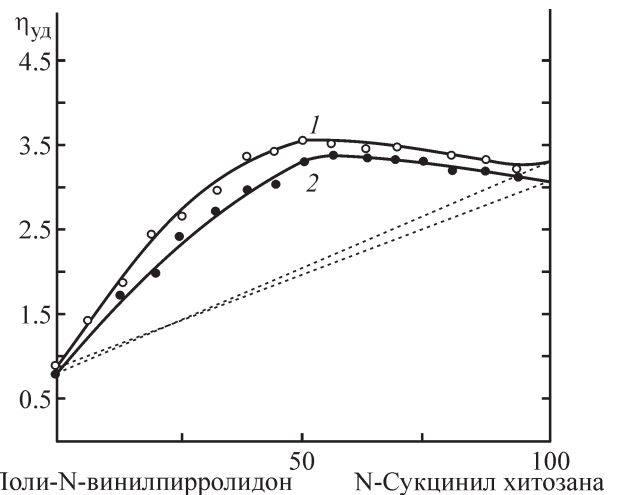


Рис. 2. Зависимость удельной вязкости смеси поли-N-винилпирролидона с натриевой солью N-сукцинила хитозана от содержания поли-N-винилпирролидона (мас%) в фосфатном буферном растворе (1) и водной среде (2). Концентрации растворов индивидуальных полимеров не превышают 0.1 мас%. Пунктирные линии — линии аддитивных значений удельной вязкости.

терной для индивидуальных компонентов [6], либо по смещению температуры стеклования одного из полимеров [13]. Термомеханические кривые дифференциальной сканирующей калориметрии индивидуальных компонентов характеризуются следующими α -переходами: 64.2°C (натриевая соль N-сукцинила хитозана), 155.1°C (поли-N-винилпирролидон). Термограммы первого сканирования пленок N-винилпирролидона с натриевой солью N-сукцинила хитозана различных составов (рис. 3, а) характеризуются наличием эндотерма в области 85–106°C (выделение воды). Для образца состава 50:50 мас% отмечается наличие перехода при 59.4°C, что может соответствовать температуре стеклования натриевой соли N-сукцинила хитозана. На термомеханических кривых смесей поли-N-винилпирролидона с натриевой солью N-сукцинила хитозана не наблюдается эндотерм в области температур стеклования индивидуальных натриевой соли N-сукцинила хитозана и поли-N-винилпирролидона, отмечается появление единственного перехода при температуре 112.7°C (рис. 3, б). С повышением содержания поли-N-винилпирролидона в системе данная температурная область для пленочного образца состава 50:50 мас% не регистрируется, проявляются переходы температур стеклования индивидуальных компонентов из-за потери совместимости. Данные закономерности могут свидетельствовать об отсутствии фазового разделения в полимерных

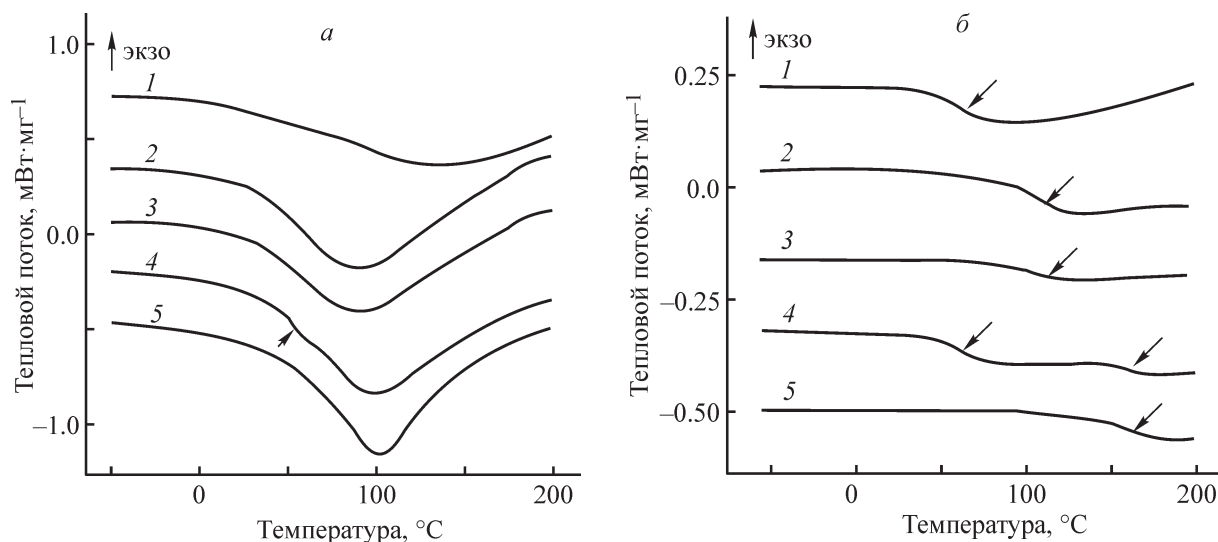


Рис. 3. Термограммы дифференциальной сканирующей калориметрии (*а* — первое сканирование, *б* — повторное) полимерных смесей поли-N-винилпирролидон:натриевая соль N-сукцинила хитозана с массовыми соотношениями (мас%): 0:100 (1), 10:90 (2), 20:80 (3), 50:50 (4), 100:0 (5).

пленках с содержанием поли-N-винилпирролидона до 20 мас% включительно.

Для дополнительного подтверждения сродства между полимерными компонентами в пленочном образце смеси поли-N-винилпирролидона с натриевой солью N-сукцинила хитозана был использован метод сорбции паров общего растворителя (воды). При формировании пленок на основе системы поли-N-винилпирролидон:натриевая соль N-сукцинила хитозана по сравнению с растворами происходит сужение области составов (до 20 мас% поли-N-винилпирролидона), в которой полимерная система остается совместимой, что согласуется с данными дифференциальной

сканирующей калориметрии (табл. 1). Согласно [6], о наличии термодинамической совместимости компонентов в пленочном материале можно судить по отрицательному значению параметра взаимодействия Флори–Хаггинса между полимерами. Следует отметить, что в случае смесей, содержащих более 60 мас% поли-N-винилпирролидона, получение пленок методом полива на стеклянную подложку не представляется возможным ввиду их высокой хрупкости.

Вышеописанные закономерности совместимости коррелируют с изменением деформационно-прочностных свойств систем. Так, полимерные пленки с содержанием поли-N-винилпирролидона до 20 мас%

Таблица 1

Физико-химические свойства пленочных материалов на основе смесей поли-N-винилпирролидона с натриевой солью N-сукцинила хитозана

Состав, мас%		Количество сорбированной воды W , г·г ⁻¹	Значения параметра взаимодействия полимер–растворитель χ_1	Значения параметра взаимодействия полимер–полимер $\chi_{2,3}$
поли-N-винилпирролидон	натриевая соль N-сукцинила хитозана			
100	0	3.704 ± 0.046	$0.609 \pm 0,094$	Неприменимо
60	40	3.271 ± 0.043	$0.611 \pm 0,078$	0.284 ± 0.049
50	50	3.255 ± 0.036	$0.621 \pm 0,077$	0.253 ± 0.043
30	70	$2.838 \pm 0,026$	$0.632 \pm 0,076$	0.094 ± 0.012
20	80	2.622 ± 0.028	$0.643 \pm 0,075$	-0.017 ± 0.004
10	90	2.305 ± 0.022	$0.654 \pm 0,073$	-0.134 ± -0.011
0	100	2.189 ± 0.022	$0.672 \pm 0,076$	Неприменимо

Таблица 2

Физико-механические характеристики пленочных материалов на основе смесей поли-N-винилпирролидона с натриевой солью N-сукцинила хитозана
Толщина пленок 150 мкм

Состав пленки	Модуль Юнга E_1 ,* ГПа	Модуль Юнга E_2 ,** ГПа	Напряжение при разрыве σ_p , МПа	Удлинение при разрыве $\Delta l/l$, %	Плотность ρ_p , г·мл ⁻¹
Натриевая соль N-сукцинила хитозана	2.2 ± 0.3	2.3 ± 0.4	26.4 ± 3.3	18.4 ± 2.5	1.3424 ± 0.1028
Поли-N-винилпирролидон: :натриевая соль N-сукцинила хитозана (10:90 мас%)	6.1 ± 0.8	6.1 ± 0.8	33.9 ± 3.7	16.4 ± 2.0	1.5041 ± 0.1151
Поли-N-винилпирролидон: :натриевая соль N-сукцинила хитозана (20:80 мас%)	5.1 ± 0.6	4.9 ± 0.6	28.2 ± 3.5	12.7 ± 1.8	1.4718 ± 0.1127
Поли-N-винилпирролидон: :натриевая соль N-сукцинила хитозана (50:50 мас%)	2.9 ± 0.3	2.9 ± 0.7	18.6 ± 3.0	7.7 ± 0.8	1.1626 ± 0.0890

* Значение модуля упругости получено посредством разрыва образца на универсальной разрывной машине.

** Значение модуля упругости получено методом индентирования на микротвердомере.

характеризующиеся молекулярной совместимостью компонентов, имеют более высокие значения модуля Юнга и прочности пленки по сравнению с пленками на основе индивидуальной натриевой соли N-сукцинила хитозана. Относительное удлинение пленок при разрыве несколько уменьшается (табл. 2). По всей видимости, наличие взаимодействия между натриевой солью N-сукцинила хитозана и поли-N-винилпирролидоном обуславливает формирование более плотной структуры, что приводит к уменьшению подвижности макромолекул в системе и повышению E и σ_p . Вполне возможно, что рост прочностных свойств также связан с увеличением степени кристалличности получаемых пленок.

Изменение структуры материала может влиять на поверхностные и сорбционные свойства пленок. Так как профиль шероховатости и соответственно площадь поверхности образца напрямую влияют на биосовместимость материала [20], целесообразно рассмотреть топографию получаемых пленок. В случае совместимых композиционных пленок, в состав которых входит 10 мас% поли-N-винилпирролидона, наблюдается повышение среднеквадратичной шероховатости по сравнению с пленками натриевой соли N-сукцинила хитозана с 40.0 ± 2.2 до 64.6 ± 3.7 нм (рис. 4). При увеличении количества поли-N-винилпирролидона до 50 мас% шероховатость поверхности составила 52.5 ± 2.8 нм, а структура микрорельефа изменилась. При формировании пленочного мате-

риала на основе натриевой соли N-сукцинила хитозана глобулярные ассоциаты по мере испарения растворителя принимают более развернутый вид, и на поверхности пленок формируются продолговатые и нитевидные надмолекулярные образования [21]. С добавлением определенного количества поли-N-винилпирролидона в системе происходит рост числа ассоциатов, что формирует более сложную структуру.

Изменение свойств поверхности, а также свободного объема пленочных материалов, проявляющегося в изменении их плотности (табл. 1), приводит к возможности управления процессами сорбции жидкости, что важно при создании материалов биомедицинского назначения. Характер кинетической кривой сорбции паров воды пленками индивидуальной натриевой соли N-сукцинила хитозана свидетельствует о неограниченном набухании (рис. 5). Образцы наиболее интенсивно сорбируют пары воды только в течение первых двух суток, а дальнейшая выдержка в среде насыщенного водяного пара не приводит к сколько-нибудь существенному увеличению степени набухания. Следует отметить, что плотность пленок смесей поли-N-винилпирролидон:натриевая соль N-сукцинила хитозана (20:80 и 10:90 мас%), для которых фиксируется совместимость, несколько выше, чем у остальных пленочных материалов (табл. 1), что отражается в уменьшении степени сорбции (рис. 5).

В случае использования пленки на основе смеси поли-N-винилпирролидона с натриевой солью

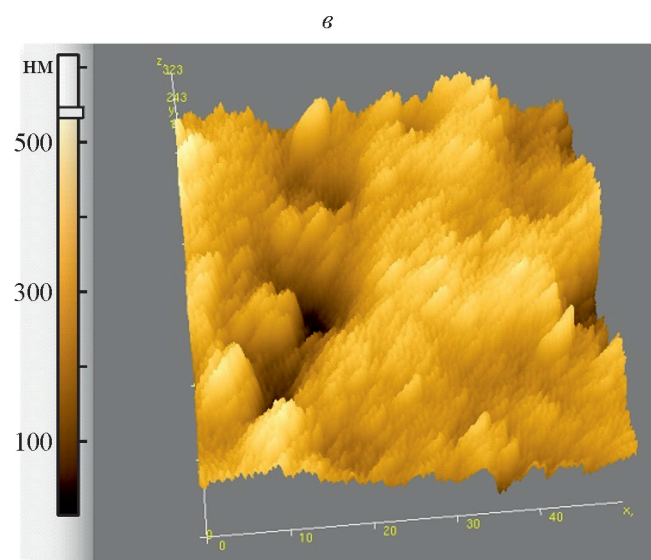
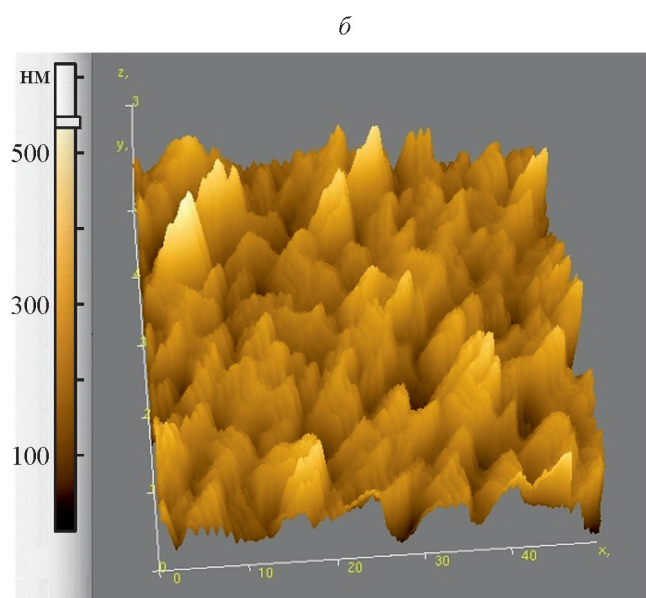
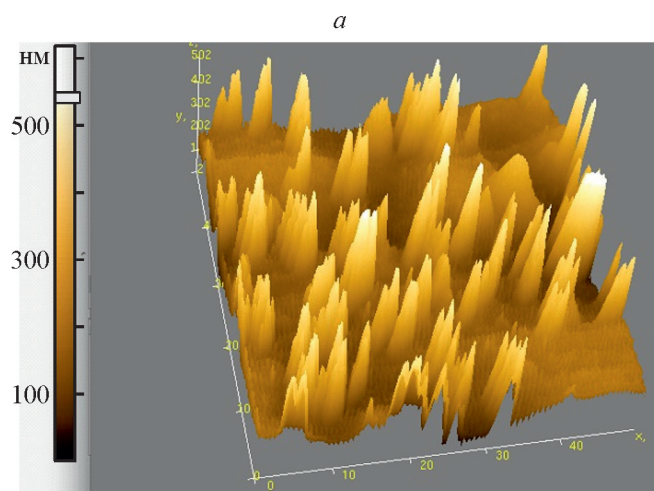


Рис. 4. Топографический образ микрорельефа поверхности пленок на основе: натриевой соли N-сукцинила хитозана (а), смеси поли-N-винилпирролидона с натриевой солью N-сукцинила хитозана (10:90 мас%) (б), смеси поли-N-винилпирролидона с натриевой солью N-сукцинила хитозана (50:50 мас%) (в).

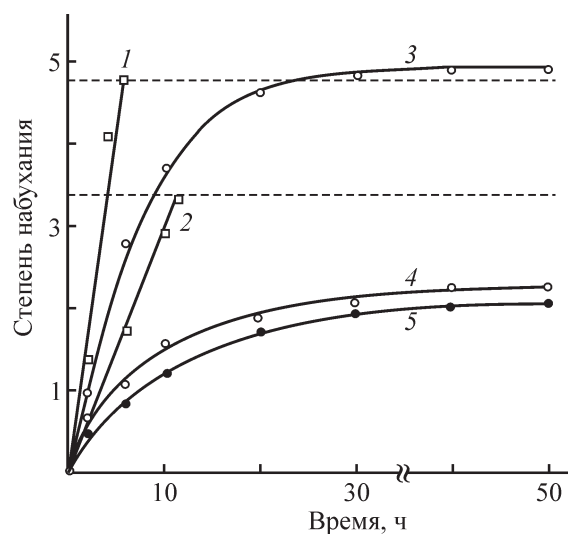


Рис. 5. Кинетические кривые сорбции пленочных образцов на основе смесей поли-N-винилпирролидон:натриевая соль N-сукцинила хитозана с массовыми соотношениями (мас%): 100:0 (1), 0:100 (2), 50:50 (3), 20:80 (4), 10:90 (5).

N-сукцинила хитозана состава 50:50 мас% поглощение воды происходит значительно более интенсивно, что может быть обусловлено большим содержанием поли-N-винилпирролидона в смеси и отсутствием совместимости компонентов, что, по всей видимости, приводит к формированию отдельных микрогетерогенных участков, характеризующихся высокой влагопоглощающей способностью.

Выводы

Модифицирование полимерных пленок на основе натриевой соли N-сукцинила хитозана синтетическим полимером поли-N-винилпирролидоном приводит к возможности регулирования их поверхностных, физико-механических и сорбционных характеристик. Так, в случае композитных пленок с содержанием поли-N-винилпирролидона до 20 мас% формирование более плотной структуры материалов сопровождается улучшением деформационно-прочностных свойств и уменьшением степени сорбции паров воды по сравнению с пленками натриевой соли N-сукцинила хитозана. Пленки на основе смесей с содержанием

поли-N-винилпирролидона более 20 мас% характеризуются гетерофазной структурой, что приводит к ухудшению физико-механических характеристик и увеличению влагопоглощения. Также изменение состава композитных пленок позволяет варьировать профиль шероховатости и соответственно площадь поверхности образца, что может влиять на биосовместимость материала.

Финансирование работы

Работа подготовлена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований, договор № 20-33-90069\20.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Базунова Марина Викторовна, к.х.н., доцент
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3160-3958>
Мустахимов Роберт Альбертович,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2342-7213>
Салихов Ренат Баязитович, д.ф.-м.н., проф.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0603-4183>
Муллагалиев Ильнур Наильевич
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7037-6201>

Список литературы

- [1] Ермаков С. Н., Кравченко Т. П. Совместимость полимеров. Термодинамические и химические аспекты // Пласт. массы. 2012. № 4. С. 32–39.
- [2] Macêdo A. A. M., Figueiró S. D., Ferreira J. C. G., Melo M. R. S., Freitas A. L. P., Sombra A. S. B., Batista B. S., Souza R. D., Almeida R. M., Mendes F., Moreira R. A. Natural film based on collagen and sulfated polysaccharide for antiplatelet effects // Int. J. Polym. Anal. Charact. 2022. P. 1–9. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2022.2103240>
- [3] Janik W., Nowotarski M., Shyntum D. Y., Banas A., Krukiewicz K., Kudla S., Dudek G. Antibacterial and biodegradable polysaccharide-based films for food packaging applications: Comparative study // Materials. 2022. V. 15. N 9. ID 3236. <https://doi.org/10.3390/ma15093236>
- [4] Savencu I., Ioana S., Sonia I., Alina P., Cătălina B., Ioan T. Review of advances in polymeric wound dressing films // React. Funct. Polym. 2021. V. 168. ID 109. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2021.105059>
- [5] Raj S., Kumar P., Sharma R. Malviya R. Pharmaceutical and tissue engineering applications of polyelectrolyte complexes // Current Smart Mater. 2018. V. 1. N 3. P. 38–48. <https://doi.org/10.2174/2405465803666180409130241>
- [6] Куценко Л. И., Сантурян Ю. Г., Каретникова Е. Б., Гофман И. В., Бочек А. М., Панарин Е. Ф. Исследование бикомпонентной системы метилцеллюлоза–поливинилпирролидон в растворе и твердом состоянии // ЖПХ. 2007. Т. 80. № 5. С. 792–792 [Kutsenko L. I., Santuryan Yu. G., Karetnikova E. B., Gofman I. V., Bochek A. M., Panarin E. F. Properties of the methyl cellulose-polyvinylpyrrolidone binary system in solution and in the solid state // Russ. J. Appl. Chem. 2007. V. 80. N 5. P. 771–776. <https://doi.org/10.1134/S1070427207050163>].
- [7] Cavallaro G., Micciulla S., Chiappisi L., Lazzara G. Chitosan-based smart hybrid materials: A Physicochemical perspective // J. Mater. Chem. B. 2021. V. 9. N 3. P. 594–611. <https://doi.org/10.1039/D0TB01865A>
- [8] Сливкин Д. А., Лапенко В. Л., Сафонова О. А., Суслина С. Н., Беленова А. С. Хитозан для фармации и медицины // Вестн. Воронеж. гос. унта. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2011. № 2. С. 214–232.
- [9] Kato Y., Onishi H., Machida Y. N-succinyl-chitosan as a drug carrier: Water-insoluble and water-soluble conjugates // Biomaterials. 2004. V. 25. N 5. P. 907–915. [https://doi.org/10.1016/s0142-9612\(03\)00598-2](https://doi.org/10.1016/s0142-9612(03)00598-2)
- [10] Yan C., Gu, J., Hou D., Jing H., Wang J., Guo Y., Yamamoto A. Synthesis of Tat tagged and folate modified N-succinyl-chitosan self-assembly nanoparticles as a novel gene vector // Int. J. Biol. Macromol. 2015. V. 72. P. 751–756. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.09.031>
- [11] Изумрудов В. А., Мусабаяева Б. Х., Касьмова Ж. С., Кливенко А. Н., Оразжанова Л. К. Интерполиэлектролитные комплексы: достижения и перспективы применения // Успехи химии. 2019. Т. 88. № 10. С. 1046–1062. <https://doi.org/10.1070/RCR4877>
[Izumrudov V. A., Mussabayeva B. Kh., Kassymova Z. S., Klivenko A. N., Orazzhanova L. K. Interpolyelectrolyte complexes: Advances and prospects of application // Russ. Chem. Rev. 2019. V. 88. N 10. P. 1046–062. <https://doi.org/10.1070/RCR4877>].
- [12] Teodorescu M., Bercea M. Poly (vinylpyrrolidone) — a versatile polymer for biomedical and beyond medical applications // Polym.-Plast. Technol. Eng. 2015. V. 54. N 9. P. 923–943. <https://doi.org/10.1080/03602559.2014.979506>
- [13] Кононова С. В., Губанова Г. Н., Ромашкова К. А., Романов Д. П., Смирнова В. Е., Попова Е. Н., Власова Е. Н., Кручинина Е. В., Сайфутдинова И. Ф., Гофман И. В. Новые композиционные

- материалы на основе поливинилпирролидона и поли(дифенилоксидамино-*N*-фенилфталимида) // *Высокомолекуляр. соединения. Сер. А.* 2016. Т. 58. № 3. С. 282–292.
<https://doi.org/10.7868/S2308112016030111>
[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. New composite materials based on polyvinylpyrrolidone and poly(diphenyl oxide amido-*n*-phenylphthalimide) // *Polym. Sci. Ser. A.* 2016. V. 58. N 3. P. 419–428.
<https://doi.org/10.1134/S0965545X16030111>].
- [14] *Тагер А. А.* Физикохимия полимеров. М.: Науч. мир, 2007. С. 88–95.
- [15] *Su C. S., Patterson D.* Determination by gas-liquid chromatography of the polystyrene-poly (vinyl methyl ether) interactions // *Macromolecules.* 1977. V. 10. N 3. P. 708–710. <https://doi.org/10.1021/ma60057a043>
- [16] *Kuo S. W.* Hydrogen-bonding in polymer blends // *J. Polym. Res.* 2008. V. 15. N 6. P. 459–486.
<https://doi.org/10.1007/s10965-008-9192-4>
- [17] *Bercea M., Morariu S., Rusu D.* In situ gelation of aqueous solutions of entangled poly (vinyl alcohol) // *Soft Mater.* 2013. V. 9. N 4. P. 1244–1253.
<https://doi.org/10.1039/C2SM26094H>
- [18] *Eckelt A., Eckelt J., Wolf B. A.* Interpolymer complexes and polymer compatibility // *Macromol. Rapid Commun.* 2012. V. 33. N 22. P. 1933–1937.
<https://doi.org/10.1002/marc.201200431>
- [19] *Бочек А. М., Шевчук И. Л., Калюжная Л. М.* Свойства водных растворов смесей карбоксиметилцеллюлозы разной степени ионизации с поливиниловым спиртом // *ЖПХ.* 2010. Т. 83. № 4. С. 660–665 [Bochek A. M., Shevchuk I. L., Kalyuzhnaya L. M. Properties of aqueous solutions of blends of polyvinyl alcohol with carboxymethyl cellulose ionized to various extents // *Russ. J. Appl. Chem.* 2010. V. 83. N 4. P. 712–717.
<https://doi.org/10.1134/S1070427210040257>].
- [20] *De Isla N. Huseltein C., Jessel N.* Introduction to tissue engineering and application for cartilage engineering // *Biomed. Mater. Eng.* 2010. V. 20. N 3–4. P. 127–133.
<https://doi.org/10.3233/BME-2010-0624>
- [21] *Шуршина А. С., Базунова М. В., Чернова В. В., Галина А. Р., Лаздин Р. Ю., Кулиш Е. И.* Влияние надмолекулярной организации на некоторые характеристики пленок сукцинамида хитозана, полученных из водных растворов // *Высокомолекуляр. соединения. Сер. А.* 2020. Т. 62. № 4. С. 294–301. <https://doi.org/10.31857/S2308112020040100> [Shurshina A. S., Bazunova M. V., Chernova V. V., Galina A. R., Lazdin R. Y., Kulish E. I. Influence of supramolecular organization on some characteristics of chitosan succinamide films produced from aqueous solutions // *Polym. Sci. Ser. A.* 2020. V. 62. N 4. P. 422–429.
<https://doi.org/10.1134/S0965545X20040100>].
-