

## ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПЛЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ПОЛИУРЕТАНОВЫХ КАУЧУКОВ ДЛЯ ОСУШЕНИЯ НЕФТЕЙ

**© М. А. Невестенко<sup>1</sup>, Е. Б. Брюзгина<sup>1</sup>, О. И. Тужиков<sup>1</sup>,  
Е. В. Брюзгин<sup>1</sup>, Ю. С. Тарасова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет,  
400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, д. 28

<sup>2</sup> Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ВолгоградНИПИМорнефть»,  
400078, г. Волгоград, пр. им. Ленина, д. 96  
E-mail: nevestenkoma@gmail.com

Поступила в Редакцию 16 ноября 2019 г.

После доработки 2 декабря 2019 г.

Принята к публикации 14 декабря 2019 г.

*В работе обсуждается использование одновременно целлюлозы и полиуретановых каучуков марок СКУ-8ТБ и СКУ-8А для создания пленочных материалов для осушения нефти. Методом ИК-спектроскопии подтверждено протекание химического взаимодействия между гидроксильными группами целлюлозы и карбоксильными группами полиуретанового каучука. Изучены особенности термических свойств пленок, позволяющие говорить о многократном регенерировании материалов от поглощенной влаги без их разрушения. Полученные пленочные материалы обладают повышенными эластичностью, гидрофильтрностью и олеофобностью в сравнении с исходной целлюлозной пленкой, что позволяет использовать их в качестве сорбентов и мембран в области нефтегазодобычи. Результаты исследований показали, что полиуретановые каучуки марок СКУ-8ТБ и СКУ-8А при совмещении с целлюлозой действуют как функциональные добавки при изготовлении пленок, способных к извлечению воды из нефти.*

**Ключевые слова:** полимерные пленки; целлюлоза; полиуретановые каучуки; гидрофильтрность; олеофобность; осушение водонефтяных эмульсий

**DOI:** 10.31857/S0044461820040106

Одним из наиболее распространенных методов повышения эффективности нефтедобычи является закачка воды в пласт с целью увеличения пластового давления и последующего вытеснения нефти к забою [1–3]. Несмотря на свои преимущества, данный метод приводит к попаданию в выкачиваемую нефть воды, что влечет за собой увеличение эксплуатационных затрат, направленных на их разделение, а также из-за коррозии металлического оборудования. Тем не менее вода содержится в пластовой нефти, даже если процесс закачки воды полностью исключить при добыче [4]. Использование полимерных материалов, обладающих гидрофильтральными свойствами, для осушки нефти может оказаться одним из наиболее многообещающих вариантов решения этой проблемы.

Осушение нефти и разделение их эмульсий с водой может осуществляться двумя способами [5–7]. В первом случае используются полимерные изделия с гидрофобной и одновременно олеофильной поверхностью, которые смачиваются и пропускают нефть, но отталкивают воду. При этом поглощение материалом части нефти приводит к его загрязнению и невозможности полной регенерации. Применение же гидрофильтральных и одновременно олеофобных полимерных материалов, отталкивающих нефть, но пропускающих или поглощающих воду, позволяет избежать данной проблемы за счет образования гидратирующего слоя вблизи поверхности материала.

В настоящее время наиболее эффективным способом быстрого разделения воды и нефти является

использование различных сорбентов на органической или неорганической основе. Применение таких материалов ограничивается высокой стоимостью, мелкодисперсной формой, сложностью утилизации поглотителей [8–10].

Целлюлоза (Ц), несомненно, является востребованным продуктом для получения большого спектра новых материалов (пленок, гранул, губок, волокон), а создание на ее основе полимерных смесей — одно из перспективных и экономичных направлений. Целлюлоза обладает такими свойствами, как биосовместимость, нетоксичность, биоразлагаемость и доступность, а совмещение ее с полиуретановыми каучуками, характеризующимися износостойкостью, маслобензостойкостью, виброустойчивостью, хорошими амортизационными свойствами, позволит придать исследуемым материалам вышеописанные характеристики, а также эластичность, несвойственную целлюлозе [11, 12]. В соответствии с вышеизложенным разработка материалов для осушки водонефтяных эмульсий с использованием возобновляемого, экологичного и доступного сырья является актуальной.

Цель работы — исследование особенностей получения гидрофильных и олеофобных пленок на основе целлюлозы и полиуретанового каучука, обладающих улучшенными в сравнении с целлюлозными материалами физико-механическими характеристиками и термостабильностью, для использования их в качестве сорбентов при осушении водонефтяных эмульсий.

### Экспериментальная часть

**Материалы.** В работе использовали: микрокристаллическую целлюлозу (AvicelPH-101, Sigma-Aldrich,  $M_w = 60\ 000$ ), полиуретановые (ПУ) каучуки СКУ-8ТБ ( $M_w = 60\ 000$ ) и СКУ-8А ( $M_w = 100\ 000$ ), диметилацетамид (х.ч., 99.9%), литий хлористый безводный (х.ч., хранение осуществляли в сухом экскаторе над  $P_2O_5$ );  $P_2O_5$  (х.ч.);  $NaNO_3$  (х.ч.);  $K_2SO_4$  (х.ч.); нефть метанонафтено-вого типа ( $\rho_0 = 0.811$  и  $0.835\ g\cdot cm^{-3}$ ), н-декан (х.ч.), ацетон (ч.д.а.), деионизированную воду.

**Приготовление растворов целлюлозы и полиуретанового каучука.** Предварительно в виалу помещали 9.33 г диметилацетамида и 0.67 г LiCl, перемешивали при температуре 80°C в течение 30 мин, затем добавляли навески целлюлозы и СКУ-8ТБ/СКУ-8А с общим содержанием полимеров в растворе 3% (из которых количество целлюлозы составляло 20–100 мас%), продолжали перемешивание до полного растворения полимеров (около 10 ч).

**Формование пленочных материалов на основе целлюлозы и полиуретанового каучука.** Раствор полимеров пропускали через фильтр Шотта № 160, дегазировали при помощи водоструйного насоса, отливали в чашку Петри, коагулировали, выдерживая раствор в экскаторе с относительной влажностью 98% (над  $K_2SO_4$ ) в течение 12 ч, многократно промывали дистиллированной водой, затем сушили в шкафу при температуре 40°C до постоянной массы. Микрометром GRIFF марки МКЦ 25 (ГОСТ 6507–90 «Микрометры. Технические условия») определяли толщину пленок, она составляла 40–60 мкм.

**Структурные исследования.** Исследование структуры пленок проводили методом ИК-спектроскопии на аппарате ИнфраЛЮМ ФТ-08 (Россия) с использованием приставки нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Перед снятием спектров образцы выдерживали в течение 24 ч в экскаторе с влажностью 66% (над насыщенным раствором  $NaNO_3$ ) при комнатной температуре. Интерпретацию ИК-спектров отражения проводили с использованием литературных данных по отнесению частот функциональных групп в спектрах соединений-аналогов.

**Термогравиметрические исследования.** Исследования температурной стабильности и деградации пленочных образцов проводили на дериватографе Q-1500D фирмы МОМ (Венгрия) с термопарой при нагревании образцов в керамических тиглях от комнатной температуры до 1000°C на воздухе, скорость подъема температуры 5 град·мин<sup>-1</sup>. Эталоном служил прокаленный оксид алюминия. Вес образцов составлял 102–104 мг. Фиксировали кривые изменения температуры ( $T$ ), изменения массы (ТГ), дифференцированные кривые изменения тепловых эффектов (ДТА), дифференцированные кривые изменения массы (ДТГ).

**Физико-механические исследования.** Прочностные свойства пленок определяли на разрывной машине ZwickiLine 5kN zwicki (Германия) при скорости растяжения 1 мм·мин<sup>-1</sup> согласно ГОСТ 14236–81 «Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение». Для испытаний использовали образцы прямоугольной формы шириной 2 мм и длиной 20 мм. Перед проведением испытаний образцы кондиционировали не менее 16 ч по ГОСТ 12423-2013 «Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб)» при температуре 23 ± 2°C, относительной влажности 60 ± 5%.

**Определение лиофильных свойств поверхности пленочных материалов.** Определение влагопоглощения проводили путем определения количества влаги, поглощенной образцами пленок, по изменению массы

образцов в эксикаторах с влажностью 0 (над  $P_2O_5$ ) и 98% (над  $K_2SO_4$ ) по ГОСТ 10315–75 «Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения влагостойкости и водостойкости».

ГОСТ 4650–2014 «Пластмассы. Методы определения водопоглощения» регламентирует определение водопоглощения — количества сорбированной пленкой воды. Перед испытанием пленки сушили в эксикаторах над  $P_2O_5$  в течение  $24 \pm 1$  ч при  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ . После высушивания образцы вынимали из эксикатора и взвешивали не более чем через 5 мин. На 1 см<sup>2</sup> поверхности образца брали не менее 8 см<sup>3</sup> воды. Подготовленные образцы быстро погружали в дистиллированную воду и выдерживали при  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  в течение  $24 \pm 1$  ч, вынимая каждый час, вытирали чистой сухой тканью или фильтровальной бумагой и взвешивали не более чем через 1 мин.

Определение нефтепоглощения проводили аналогично измерению водопоглощения. В качестве осушаемой жидкости использовали нефть метанонафтено-вого типа ( $\rho_0 = 0.811 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ ) с содержанием влаги 0%, измеренным методом Дина–Старка по ГОСТ 2477–2014 «Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды».

Смачивание поверхности синтезированных пленок определяли на приборе марки ОСА 15 ЕС фирмы DataPhysics (Германия). Гидрофильные свойства оценивали методом «сидящей капли» [13] в среде неполярной жидкости — декане. Для изучения изменения контактного угла во времени в среде декана на поверхность каждой из пленок помещали каплю воды объемом 10 мкл.

*Осушение нефти.* Для оценки возможности осушки нефтью пленками образцы площадью 1 см<sup>2</sup> погружали в 8 мл нефти метанонафтено-вого типа ( $\rho_0 = 0.835 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ ) с содержанием влаги более 10%. Эффективность осушки оценивалась методом ИК-спектроскопии с использованием разборной жид-

костной кюветы с материалом окон  $\text{CaF}_2$  и толщиной слоя 0.06 мм. Степень поглощения воды из нефти определяли по уменьшению интенсивности полос поглощения гидроксильных групп, наблюдавшихся в областях 3100–3600 и 1650 см<sup>-1</sup>.

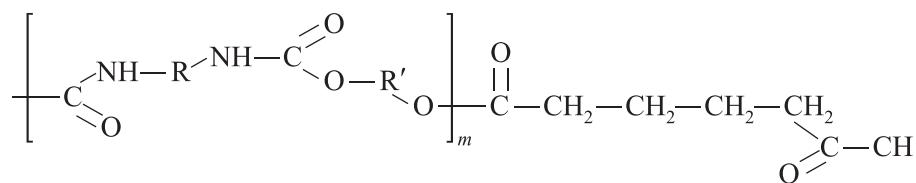
## Обсуждение результатов

Необходимым условием использования различных материалов в области разделения и осушки водонефтяных эмульсий является износстойкость, маслобензостойкость, эластичность, что нехарактерно для чистой целлюлозы. Поэтому необходимо дополнительно использовать наполнители либо разрабатывать композиционные материалы на основе этого полисахарида и синтетических полимеров, среди которых наиболее перспективными, с точки зрения свойств, можно считать полиуретановые каучуки. Совместная целлюлоза с полиуретанами, можно получать биоматериалы, обладающие требуемыми для селективных сорбентов при осушении водонефтяных эмульсий износстойкостью, маслобензостойкостью, эластичностью.

Расчет гидрофильно-липофильного баланса (ГЛБ), учитывающий соотношение между гидрофильными и гидрофобными группами в соединении, проводили методом Девиса [14]. Из расчета следует, что целлюлоза является гидрофильным полимером ( $\text{ГЛБ} > 20$ ), что объясняется большим содержанием гидроксильных групп. Однако она не обладает необходимой олеофобностью, которую можно достичь, вводя в состав материалов маслобензостойкие каучуки.

Отличительной особенностью полиуретановых каучуков марок СКУ-8ТБ и СКУ-8А является то, что в их структуру входят концевые карбоксильные группы, которые в условиях растворения системы полимеров могут взаимодействовать с гидроксильными группами целлюлозы (Ц):

Структурная формула полиуретановых каучуков



СКУ-8ТБ ( $R$  — диэтилен,  $R'$  — пропилен); СКУ-8А ( $R, R'$  — диэтилен)

Для установления структурных особенностей композиционных пленок использован метод ИК-спектроскопии (рис. 1).

В области 1750–1735 и 1736–1700 см<sup>-1</sup> наблюдаются полосы поглощения, характерные для ва-

лентных колебаний  $\text{C}=\text{O}$  сложных эфиров и уретановой группы соответственно. Ввиду непосредственной близости данных полос на спектре происходит их перекрывание. Помимо полос поглощения 1726–1734 см<sup>-1</sup>, характеризующих амидную

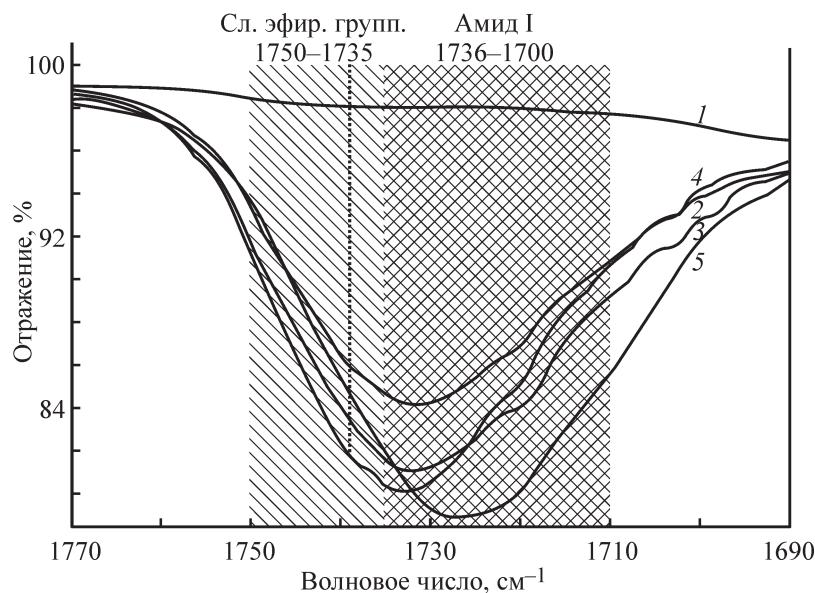


Рис. 1. ИК-спектры пленок на основе целлюлозы (1), Ц/СКУ-8ТБ (5%) (2), Ц/СКУ-8ТБ (10%) (3), Ц/СКУ-8ТБ (25%) (4), СКУ-8ТБ (5).

группу каучука, наблюдается полоса поглощения  $1738 \text{ см}^{-1}$ , что, вероятно, связано с образованием сложноэфирной связи между макромолекулами в результате взаимодействия гидроксильных групп целлюлозы с концевыми карбоксильными группами полиуретана.

Исследованием термостабильности получаемых пленок методом термогравиметрии (рис. 2) показано, что потеря массы образцов как чистой целлюлозы, так и смесевой композиции в интервале температур до  $700^\circ\text{C}$  проходит в несколько стадий.

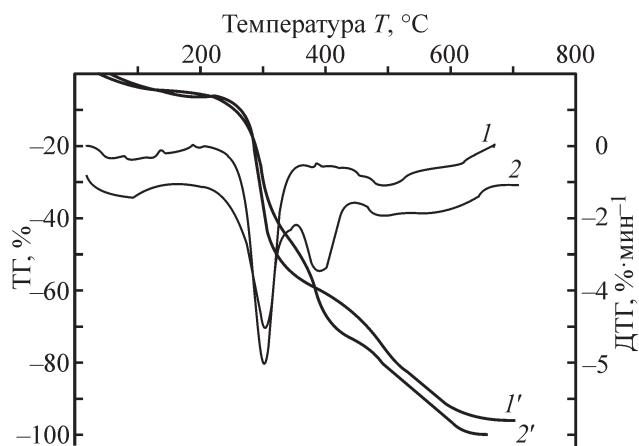


Рис. 2. Кривые потери массы при нагревании пленок целлюлозы (1') и Ц:ПУ = 60:40 мас% (2') и дифференциальные термогравиметрические кривые разложения пленок целлюлозы (1) и Ц:ПУ = 60:40 мас% (2).

При температурах от 20 до  $150^\circ\text{C}$  происходит потеря массы, связанная с удалением несвязанной влаги. Дальнейшее увеличение температуры способствует разрушению водородных связей, в связи с чем в интервале температур  $150$ – $240^\circ\text{C}$  наблюдается изменение массы образцов, обусловленное, вероятно, десорбцией легколетучих соединений с поверхности и объема образцов.

Температура начала деструкции обоих образцов составляет  $T_d \sim 240^\circ\text{C}$ . В температурном интервале  $240$ – $350^\circ\text{C}$  скорость разложения образцов максимальна (рис. 2, кривые 1, 2). Так, для целлюлозы потеря массы образца, определенная по изменению интенсивности пика, составляет  $6 \cdot \text{мин}^{-1}$ , для образцов, содержащих полиуретановый каучук, —  $4 \cdot \text{мин}^{-1}$ . Таким образом, скорость деструкции смесевых композиций меньше, чем у исходной целлюлозы.

Температура плавления полиуретанов довольно высока (не ниже  $160^\circ\text{C}$ ) вследствие образования водородных связей между макромолекулами за счет полярных групп [15]. При нагревании до температуры выше  $220^\circ\text{C}$  полиуретаны начинают разлагаться. Исходя из этого, можно предположить, что пик в интервале температур  $350$ – $420^\circ\text{C}$  на кривой 2 (рис. 2) связан с взаимодействием целлюлозы и полиуретанового каучука, которое приводит к задержке распада композиции.

При температуре  $380^\circ\text{C}$  образцы теряют до 60% исходной массы, причем в случае пленки Ц/ПУ термическая деструкция проходит медленнее, чем у чи-

стой целлюлозной пленки, но далее (при температурах выше  $380^{\circ}\text{C}$ ) ситуация изменяется, и потеря массы целлюлозы более 60% происходит при температуре  $\approx 480^{\circ}\text{C}$  по сравнению со смесевой композицией, теряющей такую же массу при  $\approx 410^{\circ}\text{C}$ , что можно использовать при разработке способа утилизации отработанных композиционных материалов.

Исследование физико-механических свойств (рис. 3) образцов показало, что прочность пленок на основе смесей целлюлозы и полиуретанового каучука снижается с увеличением содержания полиуретана. Изменение относительного удлинения пленок проходит через концентрационный максимум. Максимальное удлинение имеют образцы с содержанием полиуретана 40%, и оно в 3 раза превышает этот показатель для целлюлозной пленки. Такой характер поведения пленок, вероятно, связан с упорядочением структуры пленок за счет организации системы водородных связей [16].

При содержании полиуретанового каучука 5–30% относительное удлинение растет, прочность падает незначительно, что делает эту рецептуру более интересной для дальнейшего изучения с целью определения направлений практического использования. Увеличение содержания полиуретанового каучука до 50% и более сопровождается значительным снижением прочностных характеристик (рис. 3).

По изменению влагопоглощения в зависимости от содержания целлюлозы в пленочных материалах видно, что смесевые образцы с содержанием СКУ-8ТБ менее 50% обладают более высокими гидрофильными свойствами по сравнению с целлюлозной пленкой, а некоторые способны поглощать в 2 раза больше влаги (рис. 4). Однако для смесевых образцов Ц/СКУ-8А степень влагопоглощения уменьшается с увеличением доли каучука.

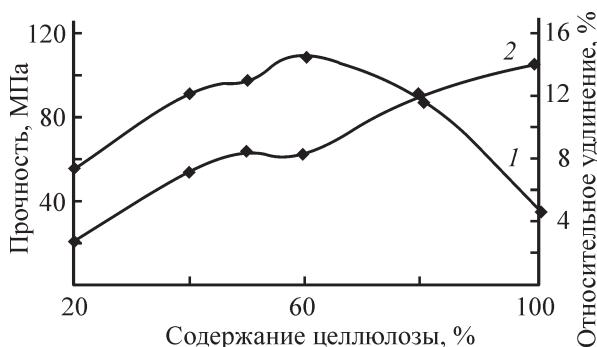


Рис. 3. Зависимость прочностных характеристик (1 — относительного удлинения, 2 — прочности) пленок на основе целлюлозы и СКУ-8ТБ.

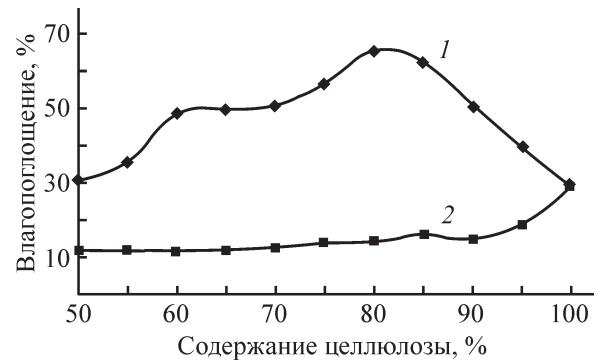


Рис. 4. Зависимость изменения влагопоглощения от состава композиционных пленок для СКУ-8ТБ (1), СКУ-8А (2).

Для дополнительной оценки гидрофильных, а также олеофобных свойств пленочных материалов были проведены исследования по определению степени водо- и нефтепоглощения. Необходимо отметить, что образцы целлюлозной пленки имеют достаточно низкое значение нефтепоглощения по сравнению с волокнистыми целлюлозными материалами [17]. Смесевые материалы с содержанием СКУ-8ТБ менее 30% не только показывают высокие олеофобные свойства, но и способны поглощать большее количество воды в сравнении с целлюлозной пленкой (рис. 5, а). Для смесевых образцов Ц/СКУ-8А степень водопоглощения уменьшается с увеличением доли каучука.

Нефтепоглощение смесевых композиций как с СКУ-8ТБ, так и с СКУ-8А уменьшается с увеличением доли синтетического полимера (рис. 5, б). Тем не менее пленки, содержащие СКУ-8А, поглощают большее количество нефтяных углеводородов в отличие от пленок состава Ц/СКУ-8ТБ.

Для оценки возможности взаимодействия смесевых пленок с водой в нефти были проведены динамические исследования поведения ее капель на поверхности целлюлозных и композиционных образцов.

Для образцов Ц/СКУ-8ТБ (рис. 6) изменение контактного угла капли воды в среде неполярной жидкости (н-декане), идентичной нефти, хорошо коррелирует с данными по водопоглощению. Наилучшими гидрофильностью и водопоглощением характеризуются образцы с содержанием каучука до 25%. Контактные углы капель воды в состоянии равновесия на  $3\text{--}15^{\circ}$  меньше, чем у целлюлозной пленки (рис. 7).

В то же время введение в состав композиций СКУ-8А не приводит к повышению гидрофильных свойств пленочных материалов (рис. 8). Лишь при добавлении 5% каучука контактный угол в состоя-

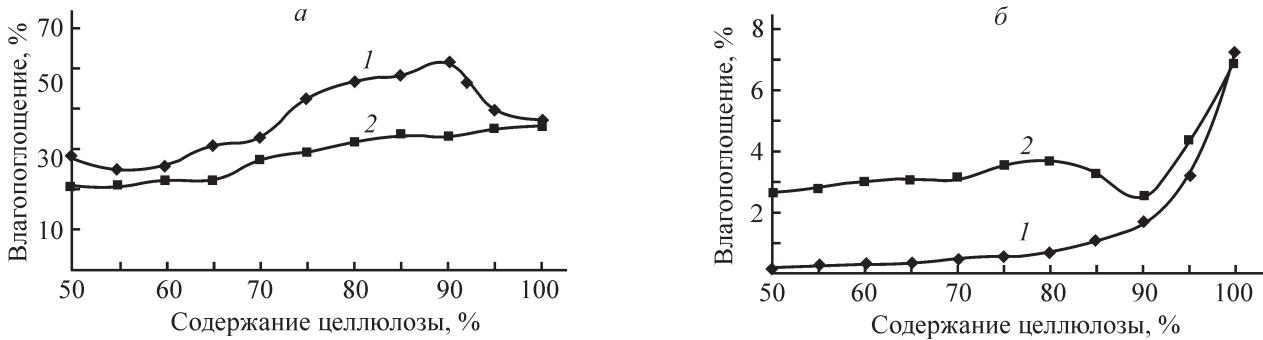


Рис. 5. Зависимость изменения водо- (а) и нефтепоглощения (б) от состава композиционных пленок для SKU-8TB (1), SKU-8A (2).

нии равновесия становится меньше, чем у исходной целлюлозной пленки.

В результате изучения лиофильных свойств поверхности смесевых пленок выявлено, что наилучшими гидрофильными и олеофобными свойствами обладают материалы на основе целлюлозы и

SKU-8TB. Исходя из этого была определена оптимальная рецептура композиции для осушки нефти, содержащая 90% целлюлозы и 10% SKU-8TB.

Результаты ИК-спектроскопии (рис. 9) показывают, что выбранные смесевые пленки способны удалить из нефти значительное количество влаги, что

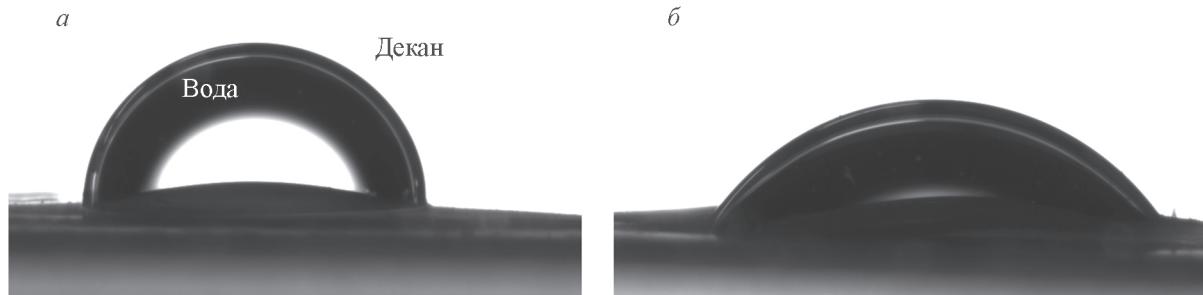


Рис. 6. Капля воды на поверхности целлюлозно-полиуретановой пленки в среде декана.  
а — в начальный момент времени, б — в состоянии равновесия.

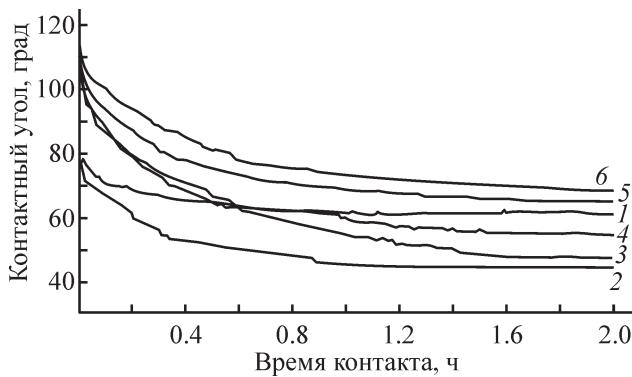


Рис. 7. Зависимость краевого угла от времени контакта капли воды с поверхностью пленок в среде декана для образцов Ц/SKU-8TB.

1 — целлюлоза; 2 — Ц/SKU-8TB (5%), 3 — Ц/SKU-8TB (10%), 4 — Ц/SKU-8TB (20%), 5 — Ц/SKU-8TB (35%), 6 — Ц/SKU-8TB (40%).

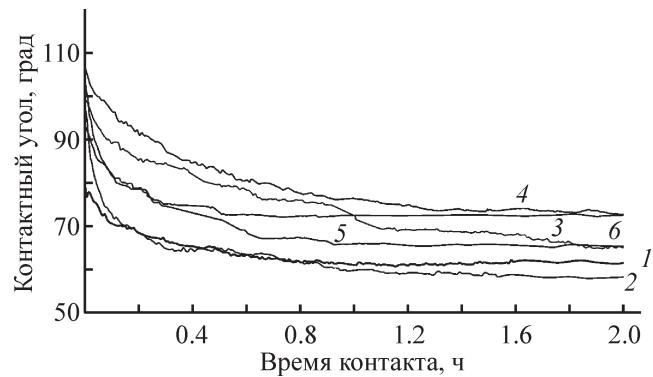


Рис. 8. Зависимость краевого угла от времени контакта капли воды с поверхностью пленок в среде декана для образцов Ц/SKU-8TB.

1 — целлюлоза; 2 — Ц/SKU-8A (5%), 3 — Ц/SKU-8A (10%), 4 — Ц/SKU-8A (20%), 5 — Ц/SKU-8A (25%), 6 — Ц/SKU-8A (50%).

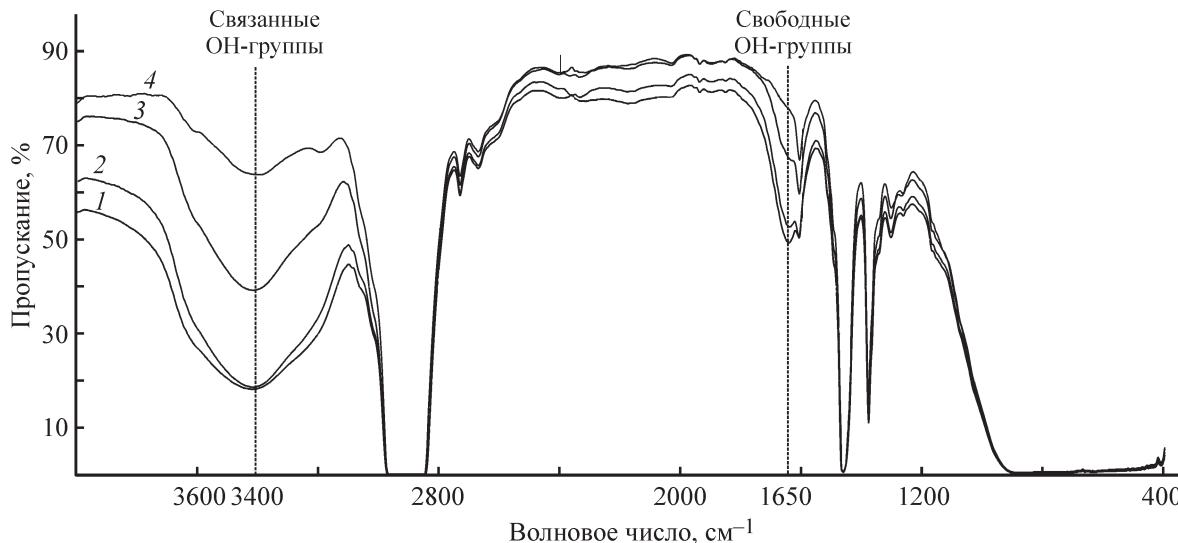


Рис. 9. ИК-спектры нефти: исходной (1), после 6 ч осушки (2), после 1 сут осушки (3), после 3 сут осушки (4).

подтверждается уменьшением интенсивности полос поглощения связанных и свободных -ОН-групп при 3400 и 1650  $\text{см}^{-1}$ .

### Выводы

На основании результатов проведенных исследований можно сделать вывод, что смесевые пленочные материалы на основе целлюлозы с содержанием полиуретана <40% обладают лучшими гидрофильтральными, олеофобными и физико-механическими свойствами в сравнении с целлюлозными пленками. Методом ИК-спектроскопии подтверждено протекание химического взаимодействия гидроксильных групп целлюлозы с карбоксильными группами полиуретанового каучука. Описанные особенности термических свойств смесевых композиций в перспективе позволят регенерировать материалы от поглощенной влаги без их разрушения. Таким образом, комплекс полученных свойств свидетельствует о возможности использования материалов на основе целлюлозы и полиуретанового каучука в качестве более экологичных сорбентов и мембран для осушения водонефтяных эмульсий.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 19-73-10147.

### Конфликт интересов

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

### Информация об авторах

**Невестенко Михаил Александрович**, аспирант кафедры ТВБМ, Волгоградский государственный технический университет,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2431-7638>

**Брюзгина Екатерина Борисовна**, к.х.н., преподаватель кафедры ТВБМ, Волгоградский государственный технический университет,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9627-334X>

**Тужиков Олег Иванович**, д.х.н., проф., проф. кафедры ТВБМ, Волгоградский государственный технический университет,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5365-6375>

**Брюзгин Евгений Викторович**, к.х.н., доцент кафедры ТВБМ, Волгоградский государственный технический университет,  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2930-1910>

**Тарасова Юлия Станиславовна**, инженер 2 категории, филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ВолгоградНИПИМорнефть»,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8141-0639>

### Список литературы

- [1] Pat. US 9234413 B2 (publ. 2010). Water injection systems and methods.
- [2] Vajahi F., Diaz P., Sagbana I., Zabini H., Farhadi A., Sherhani S. Effect of low salinity water injection on capillary pressure and wettability in carbonates. 2017. URL: <http://www.jgmaas.com/SCA/2017/SCA2017-051.pdf> (дата обращения: 18.11.2019).
- [3] Farajzadeh R., Zaai C., van den Hoek P., Bruining J. Life-cycle assessment of water injection into

- hydrocarbon reservoirs using exergy concept // J. Cleaner Production. 2019. V. 235. P. 812–821. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.034>
- [4] Кадыров Р. Р., Низаев Р. Х., Яртиев А. Ф., Мухаметшин В. В. Ограничение водопритока в горизонтальных скважинах на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами нефти // Нефт. хоз-во. 2017. № 5. С. 44–47. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-5-44-47>
- [5] Annunciado T. R., Sydenstricker T. H. D., Amico S. C. Experimental investigation of various vegetable fibers as sorbent materials for oil spills // Marine Pollution Bull. 2005. V. 50. N 11. P. 1340–1346. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.04.043>
- [6] Teas C., Kalligeros S., Zanikos F., Stournas S., Lois E., Anastopoulos G. Investigation of the effectiveness of absorbent materials in oil spills clean up // Desalination. 2001. V. 140. N 3. P. 259–264. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00375-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00375-7)
- [7] Xu Z., Zhao Y., Wang H., Wang X., Lin T. A superamphiphobic coating with an ammonia-triggered transition to superhydrophilic and superoleophobic for oil–water separation // Angew. Chem. Int. Ed. 2015. V. 54. N 15. P. 4527–4530. <https://doi.org/10.1002/anie.201411283>
- [8] Lin X., Chen Y., Liu N., Cao Y., Xu L., Zhang W., Feng L. In situ ultrafast separation and purification of oil/water emulsions by superwetting TiO<sub>2</sub> nanocluster-based mesh // Nanoscale. 2016. V. 8. N 16. P. 8525–8529. <https://doi.org/10.1039/C6NR01119E>
- [9] Lee C. H., Tiwari B., Zhang D., Yap Y. K. Water purification: Oil–water separation by nanotechnology and environmental concerns // Environmental Sci.: Nano. 2017. V. 4. N 3. P. 514–525. <https://doi.org/10.1039/C6EN00505E>
- [10] Zhang W., Liu N., Cao Y., Chen Y., Xu L., Lin X., Feng L. A solvothermal route decorated on different substrates: Controllable separation of an oil/water mixture to a stabilized nanoscale emulsion // Advanced Mater. 2015. V. 27. N 45. P. 7349–7355. <https://doi.org/10.1002/adma.201502695>
- [11] Torcello-Gómez A., Foster T. J. Influence of interfacial and bulk properties of cellulose ethers on lipolysis of oil-in-water emulsions // Carbohydrate Polym. 2016. V. 144. P. 495–503. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.005>
- [12] Dai L., Long Z., Chen J., An X., Cheng D., Khan A., Ni Y. Robust guar gum/cellulose nanofibrils multilayer films with good barrier properties // ACS Appl. Mater. & Interfaces. 2017. V. 9. N 6. P. 5477–5485. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b14471>
- [13] Bryuzgin E. V., Klimov V. V., Repin S. A., Navrotskiy A. V., Novakov I. A. Aluminum surface modification with fluoroalkyl methacrylate-based copolymers to attain superhydrophobic properties // Appl. Surface Sci. 2017. V. 419. P. 454–459. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.222>
- [14] Yamashita Y., Sakamoto K. Hydrophilic–lipophilic balance (hlb): Classical indexation and novel indexation of surfactant // Encyclopedia of Biocolloid and Biointerface Science 2V Set. 2016. P. 570–574. <https://doi.org/10.1002/9781119075691.ch45>
- [15] Fernández-d'Arlas B., Balko J., Baumann R. P., Poselt E., Dabbous R., Eling B., Thurn-Albrecht Th., Muller A. J. Tailoring the morphology and melting points of segmented thermoplastic polyurethanes by self-nucleation // Macromolecules. 2016. V. 49. N 20. P. 7952–7964. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.6b01527>
- [16] Zhang Ch., Liu R., Xiang J., Kang H., Liu Zh., Huang Y. Dissolution mechanism of cellulose in N,N-dimethylacetamide/lithium chloride: Revisiting through molecular interactions // J. Phys. Chem. 2014. V. 118. P. 9507–9514. <https://doi.org/10.1021/jp506013c>
- [17] Байдурдов Т. А., Шмаков С. Л. Полимерные сорбенты для сбора нефтепродуктов с поверхности водоемов: обзор англоязычной литературы за 2000–2017 гг. (часть 1) // Изв. Саратов. ун-та. Сер. Химия. Биология. Экология. 2018. Т. 18. Вып. 1. С. 41–44. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2018-18-1-36-44>