

ПРОИЗВОДСТВО И ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИМЕРНОГО СУЛЬФОБЕТАИНА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В КАЧЕСТВЕ ВЯЗКОУПРУГОЙ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА[#]

© 2022 г. Chen Wang^{1,*}, Yan Hou¹, Xiaowu Yang¹, Zhigang Li¹, Feng Chang², Peizhi Li¹, Jiangtao Wang¹, Meng Li^{3,**}

¹ Key Laboratory of Auxiliary Chemistry & Technology for Chemical Industry, Ministry of Education, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an, 710021 China

² Research Institute of Petroleum Engineering Technology, Sinopec Shengli Oilfield, Dongying, 257001 China

³ Shaanxi Key Laboratory of Optoelectronic Functional Materials and Devices, School of Materials Science and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, 710021 China

*E-mail: sustwangchen@163.com

**E-mail: limeng@xatu.edu.cn

Поступила в редакцию 31 марта 2021 г.

После доработки 3 августа 2022 г.

Принята к публикации 16 августа 2022 г.

В ходе исследования был получен димерный олеамидопропилгидроксисульфобетаин (GOHSB) и изучены его свойства. Критическая концентрация мицелл (СМК) продукта GOHSB составляла 7.19×10^{-5} и 8.74×10^{-5} моль/л, а поверхностное натяжение GOHSB и разрушающей гель жидкости составляло 31.7 и 48.9 мН/м, соответственно. Вязкость раствора (2 мас. %) при pH 4 составляла 71.5 мПа·с при скорости сдвига 170 с^{-1} , а скорость осаждения проппанта (расклинивающего агента) – 0.0047 мм/с. При добавлении 15000 мг/л NaCl и CaCl₂ вязкость GOHSB (2 мас. %) составляла 26.94 и 18.51 мПа·с при скорости сдвига 170 с^{-1} . τ – время релаксации. При 1 мас. % τ составляло 0.019 с, а при 2 мас. % τ снижалось до 0.013 с. Раствор GOHSB с концентрацией 1 мас. % показал упругие характеристики.

Ключевые слова: бетаин, цвиттер-ионные поверхностно-активные вещества, разрушение гелей, вязкоупругие поверхностно-активные вещества, чистая жидкость для гидроразрыва

DOI: 10.31857/S0028242122060077, **EDN:** NPMWRV

Метод гидроразрыва пластов был введен в практику в 1947 г. [1, 2]. Первый эксперимент был проведен на газовом месторождении Хьюгтон (Hugoton) в Канзасе [3]. К жидкостям для гидроразрыва относятся жидкости на водной и углеводородной основе с вязкоупругими поверхностно-активными веществами (ПАВ) и т.д. [4–6]. В традиционной жидкости для гидроразрыва пластов в качестве загустителя часто используется гуаровая камедь или готовые полимеры [7, 8], а соединения

бора, титана или циркония – в качестве сшивающего агента [9]. Полимеры, такие как гуаровая камедь или полиакриламид, были исследованы на термостойкость с помощью методов молекулярного моделирования, и в этом направлении был достигнут значительный прогресс. Однако точная модификация этого полимера затруднена, к тому же метод устранения повреждения пласта еще предстоит разработать [10]. Было обнаружено, что для решения этих проблем весьма полезны вязкоупругие ПАВ благодаря их превосходным эксплуатационным характеристикам и большому потенциалу с точки зрения повышения эффективности вытесне-

[#] Дополнительные материалы для этой статьи доступны по doi 10.31857/S0028242122060077 для авторизованных пользователей.

ния нефти [11]. Эти вязкоупругие поверхностно-активные вещества (ВПАВ) широко используются в качестве жидкостей для гидроразрыва пласта из-за отсутствия остатков в системе [12]. Более того, ВПАВ могут значительно снизить сопротивление трения.

В зависимости от ионного заряда гидрофильной головки ПАВ подразделяются на следующие классы: катионные, анионные, неионные и цвиттер-ионные [13–17]. Цвиттер-ионные ПАВ, которые содержат положительно заряженную гидрофильную головную группу и отрицательно заряженную гидрофильную концевую группу, привлекают интерес исследователей как в нефтяной промышленности, так и в других областях научных исследований благодаря своим беспрецедентным преимуществам, таким как превосходная растворимость в воде, нечувствительность к присутствию неорганических солей и температуре, высокая устойчивость пены и взаимно усиливающее действие с различными ионными и неионными ПАВ, отличная биоразлагаемость, биологическая безопасность для кожи и глаз [18]. Число атомов углерода в неполярных «хвостах» для большинства разработанных в последнее время ПАВ составляет менее 18, а в традиционных ПАВ их обычно от 8 до 16 [19]. В последние годы увеличилось количество исследований длинноцепочечных ПАВ (C_{18} или C_{22}), поскольку они продемонстрировали чрезвычайно низкую СМС и легкость образования червеобразных мицелл [20–22]. В работе Wang и др. [23] был получен димерный сульфобетаин аммония для изучения связанных с ним свойств жидкости для гидроразрыва и анализа механизма ее разрушения. Цвиттер-ионные ПАВ (C_{22}) могут образовывать червеобразные мицеллы в присутствии кислоты или неорганической соли, которые могут связываться друг с другом в присутствии органического гидрофильного вещества или неорганической соли, образуя временные сети, проявляющие вязкоупругие свойства [24–29].

GOHSB был синтезирован с расчетом на отсутствие у него загущающих свойств в дополнение к снижению межфазного натяжения. В данном исследовании для приготовления GOHSB использовали олеиновую кислоту, *N,N*-диметил-1,3-пропандиамин, натриевую соль 3-хлор-2-гидроксипропансульфоновой кислоты и изофорондиизоцианат.

Трансформация микроструктур системы GOHSB была исследована на основе ее реологии, микрограммы, полученной методом сканирующей электронной микроскопии (SEM), и СМС.

В данной статье было исследовано влияние температуры, pH и неорганических солей на вязкость GOHSB и проанализированы свойства суспендированного проппанта. Кроме того, описываются характеристики GOHSB как вязкоупругого ПАВ, используемого для гидроразрыва.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы. Олеиновая кислота (ОА, >99%), абсолютный этиловый спирт (99%), персульфат аммония (>98%), хлорид натрия (NaCl, >99%), петролейный эфир (>99%) были приобретены у компании Tianjin Tianli Chemical Reagents Co. Ltd. (Тяньцзинь, Китай). *N,N*-диметил-1,3-пропандиамин (DMAPA, 99%) был приобретен у компании Alfa Co. Ltd. (Гуанчжоу, Китай). Натриевая соль 3-хлор-2-гидроксипропансульфоновой кислоты (CHPS-Na, 95%) была предоставлена компанией Shanghai Macklin Biochemical Co. Ltd. (Шанхай, Китай). Моногидрат *n*-толуолсульфоновой кислоты (>98.5%), изофорондиизоцианат (IPDI, 99%), *N,N*-диметилформамид (DMF, 99.8%) и дитинбутилдилаурат (95%) были получены от компании Aladdin Industrial Corporation (Шанхай, Китай). Хлорид кальция ($CaCl_2$, >99%) был закуплен на заводе химических реагентов Tianjin HongYan (Тяньцзинь, Китай). Гидроксид натрия (NaOH, >99%) и соляная кислота (HCl, 10%) были предоставлены химическим заводом Chengdu Kelong Chemical Factory (Чэнду, Китай) и использовались без дополнительной очистки. Все растворы готовили на дистиллированной воде.

Синтез олеамидопропил бетаина (ОАВ). ОАВ получали в соответствии с путем реакции, показанным на схеме 1. В трехгорлую колбу добавляли ОА (1 моль) и DMAPA (1.05 моль) при 60°C. К этому раствору добавляли моногидрат *n*-толуолсульфоновой кислоты (0.5 мас. %) и перемешивали при 160°C в течение 9 ч. Реакцию проводили в атмосфере азота, а в конце реакции непрореагировавший DMAPA и образовавшуюся воду удаляли вакуумной перегонкой. Продукт (ОАВ) охлаждали до комнатной температуры.

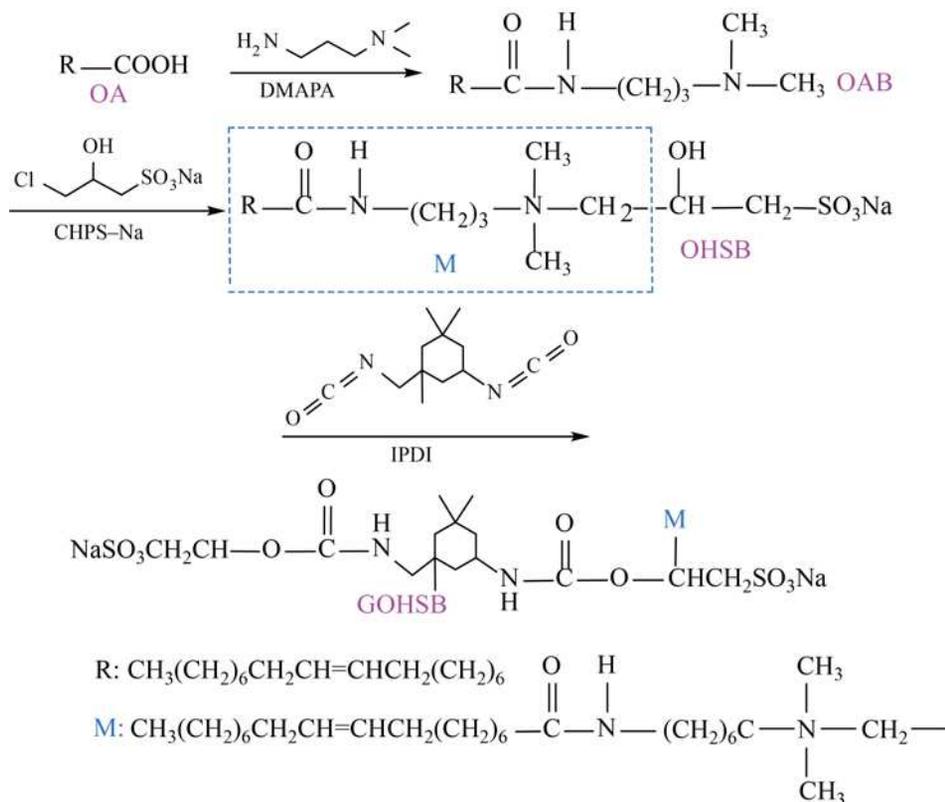


Схема 1. Схема синтезов OAB, OHSB и GOHSB.

Синтез олеамидопропилгидроксилсульфобеттаина (OHSB). OHSB получали в соответствии с путем реакции, представленным на схеме 1. OAB (1 моль) и CHPS-Na (1.3 моль) добавляли к раствору абсолютного этилового спирта и дистиллированной воды (1:1). Реакцию проводили в атмосфере азота, при этом смесь перемешивали при 80°C в течение 8 ч. Полученный OHSB представлял собой желтоватую вязкую жидкость, которую сушили в вакуумной сушилке, а затем растворяли в абсолютном этиловом спирте для удаления неорганических солей. Петролейный эфир добавляли к смеси OHSB и абсолютного этанола для удаления OAB. Абсолютный этиловый спирт удаляли на ротаторном испарителе с получением продукта OHSB.

Синтез GOHSB. Продукт был синтезирован по пути реакции, представленному на схеме 1. OHSB, дитинбутилдилаурат (0.4 мас. %) и DMF добавляли в три колбы. Повышали температуру до 50°C и постепенно добавляли IPDI до тех пор, пока молярное отношение OHSB к IPDI не достигало значе-

ния 2.1:1. На реакцию потребовалось 4 ч. GOHSB выделяли после вакуумной перегонки.

Измерение вязкости. Вязкость GOHSB проверяли на цифровом вискозиметре (DV-3+PRO) производства компании Shanghai NiRun Intelligent Technology Co. Ltd (Шанхай, Китай). Все растворы были приготовлены на дистиллированной воде, а вязкость измеряли при различных факторах воздействия, таких как температура, pH и наличие неорганических солей (NaCl и CaCl₂). Солевою и кислотно-щелочную стойкость измеряли при концентрации 2 мас. %. Вязкость измеряли при различных концентрациях и температурах на цифровом вискозиметре. Кажущуюся вязкость измеряли при скорости сдвига 170 с⁻¹.

Реологические измерения. Динамический реологический график был построен по данным наблюдения на ротационном реометре HAAKE RS600 (Германия), оснащенном стальной пластиной толщиной 40 мм, при температуре 298.15 К. Вязкость при различных концентрациях опреде-

ляли в диапазоне скоростей сдвига $0\text{--}170\text{ с}^{-1}$. Вязкоупругие характеристики (модуль накопления G' и модуль потерь G'') исследовали при угловой частоте $0.1\text{--}100\text{ рад/с}$ и концентрации 1 и 2 мас. %, а коэффициент потерь ($\text{tg } \delta$) анализировали в диапазоне частот $0.16\text{--}15.92\text{ Гц}$ при концентрациях 1 и 2 мас. %.

Сублимационная сушка и измерения на сканирующем электронном микроскопе. Микроморфологию GOHSB и разрушающую гель жидкость наблюдали методом SEM с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA3 (Мэриленд, США). Персульфат аммония использовали в качестве реагента для разрушения гелей при массовом соотношении к раствору 1:100. Жидкость, разрушающую гель, замораживали и сушили в губке методом сублимационной сушки в условиях разрушения при 80°C в течение 3 ч.

Измерение критической концентрации мицелл. Растворы (0.01 моль/л) GOHSB и разрушающей гель жидкости готовили на дистиллированной воде и пропорционально разбавляли бидистиллированной водой. Поверхностное натяжение растворов GOHSB и разрушающей гель жидкости измеряли с помощью прибора для измерения поверхностного натяжения Kruss DSA25S (Германия) при температуре 295.15 К .

Измерения суспензии проппанта. Эксперимент по изучению статической характеристики суспензии проппанта GOHSB проводили с использованием мерного цилиндра, в котором наблюдали скорость осаждения керамзита 70 меш. Вес керамзита составлял 20% от массы раствора. Регистрировали высоту оседания и время нахождения проппанта в мерном цилиндре.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структурные характеристики GOHSB. Была определена структура GOHSB с использованием методов анализа FT-IR и ядерно-магнитного резонанса $^1\text{H NMR}$ (рис. 1). Анализ методом ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье (FT-IR) (рис. 1а) проводили на ИК-спектрометре Bruker VECTOR-22 (Швейцария) в диапазоне волновых чисел $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ с использованием пластинки бромида калия KBr. Были измерены спектры с разрешением 4 см^{-1} при 10-кратном сканировании.

Пик валентного колебания связи --C=O по отношению к карбоновой кислоте при волновом числе 1712.69 см^{-1} можно отнести к ОА исходного материала, который нельзя было наблюдать в продукте. Пики валентного колебания связи --NH при 3399.60 см^{-1} и связи C=O при 1640.07 см^{-1} могут быть отнесены к DMAPA; эти пики доказывают существование группы --NH_2 . Спектр анализа полученного продукта GOHSB методом FT-IR показал пики первичного поглощения при 3459.37 см^{-1} (валентное колебание связи N--H (растяжение)), 1648.11 см^{-1} (валентное колебание связи C=O (растяжение)), 1550.85 см^{-1} (валентное колебание связи N--H (изгиб)) и 1465.47 см^{-1} (валентное колебание связи C--N (изгиб в своей плоскости)). Другие пики наблюдались при 2926.47 см^{-1} (валентное колебание связи --CH_3 (растяжение)), 2856.60 см^{-1} (валентное колебание связи $\text{--CH}_2\text{--}$ (растяжение)), 728.81 см^{-1} (группа $(\text{CH}_2)_n$), 1197.76 см^{-1} ($\text{CH}_2\text{--SO}_3\text{--}$ (асимметричное колебание)), 618.53 и 531.71 см^{-1} ($\text{--SO}_3\text{--}$ среднее поглощение).

Анализ методом $^1\text{H NMR}$ проводили на спектрометре Bruker Ascend 400 при частоте 400 МГц . $^1\text{H NMR}$ (400 МГц ; диметилсульфоксид, DMSO), м.д.: 7.75 (s, 4H, f), 5.31 (t, 4H, d), 3.48 (s, 12H, h), 3.24 (m, 16H, g), 3.02 (m, 4H, j), 2.73 (s, 2H, i), 2.41 (m, 10H, c), 2.09 (m, 48H, b), 1.48 (m, 4H, e), 0.85 (t, 15H, a). Успешный синтез продукта GOHSB был подтвержден методами FT-IR и $^1\text{H NMR}$, а также $^{13}\text{C NMR}$ и XRD (см. Доп. материалы).

Вязкость – важный показатель, используемый для оценки характеристик жидкости для гидроразрыва. Из-за сложной среды пласта во время фактического процесса строительства жидкость для гидроразрыва должна обладать определенной термостойкостью, стойкостью к солям, а также стойкостью к кислотам и щелочам. Изменение вязкости растворов GOHSB различной концентрации в зависимости от времени сдвига показано на рис. 2а. При увеличении концентрации агрегатная структура ПАВ изменяется от сферических до стержневидных мицелл и далее до червеобразных мицелл. Такое изменение агрегатной структуры характеризуется резким увеличением вязкости. Изменение вязкости при различных концентрациях регистрировали в момент, когда время сдвига составляло 300 с ; вязкость пробы с концентрацией 2 мас. % достигла $45.4\text{ мПа}\cdot\text{с}$. Согласно требова-

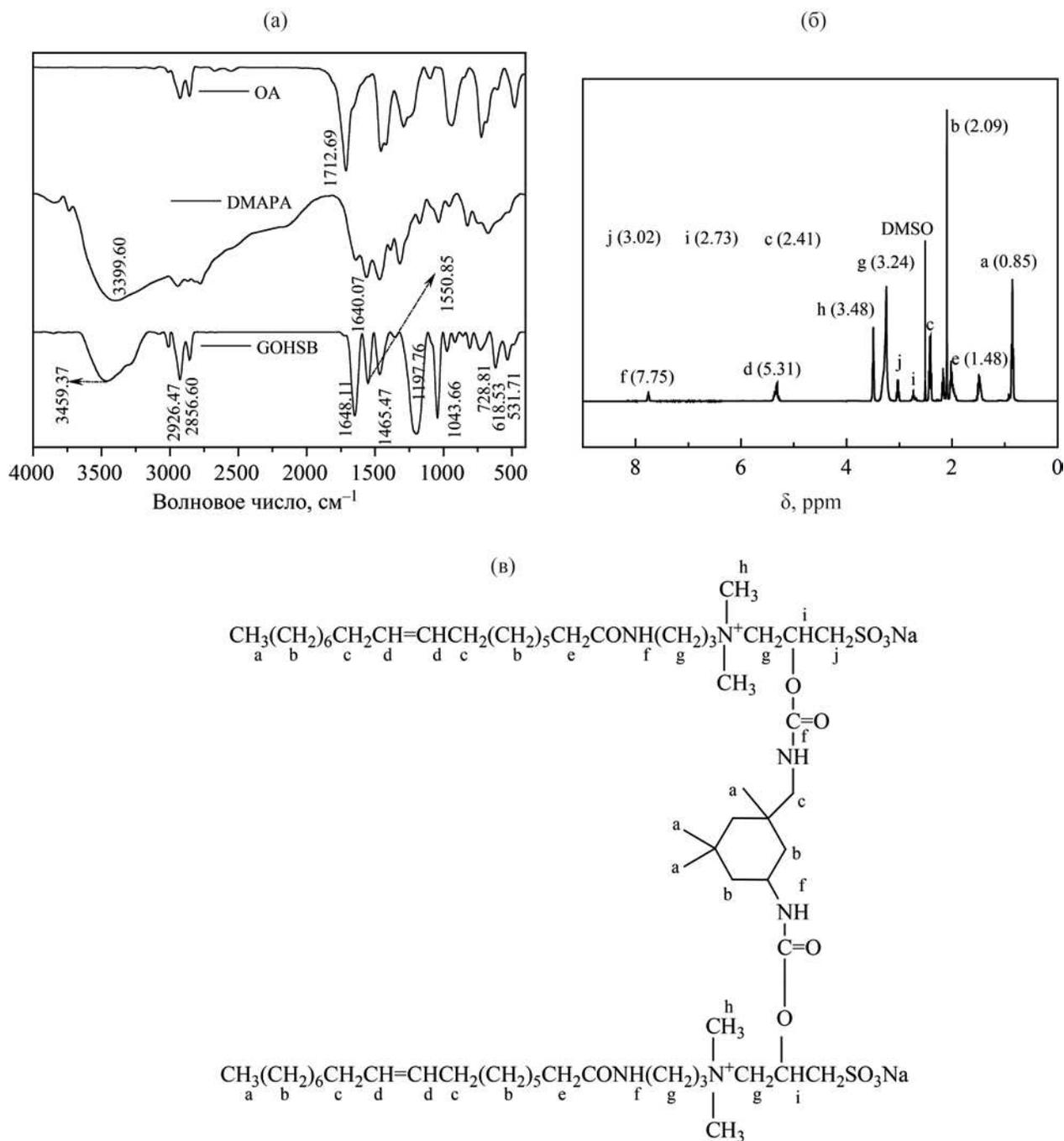


Рис. 1. Характеристики GOHSB, полученные методами: а – FT-IR; б – ¹H NMR; в – химического сдвига.

ниям «Общих технических условий на жидкость для гидроразрыва SY/T 6376-2008» кажущаяся вязкость более 20 мПа·с может удовлетворять строительным требованиям.

Изменение вязкости GOHSB при различных значениях pH в зависимости от времени сдвига

показано на рис. 2б. С увеличением pH вязкость раствора GOHSB сначала увеличивается, а затем уменьшается. Максимальная вязкость приблизительно 71.5 мПа·с была зарегистрирована при pH 4. При низком pH гидрофильное взаимодействие между GOHSB и ионами H⁺ усиливается, что

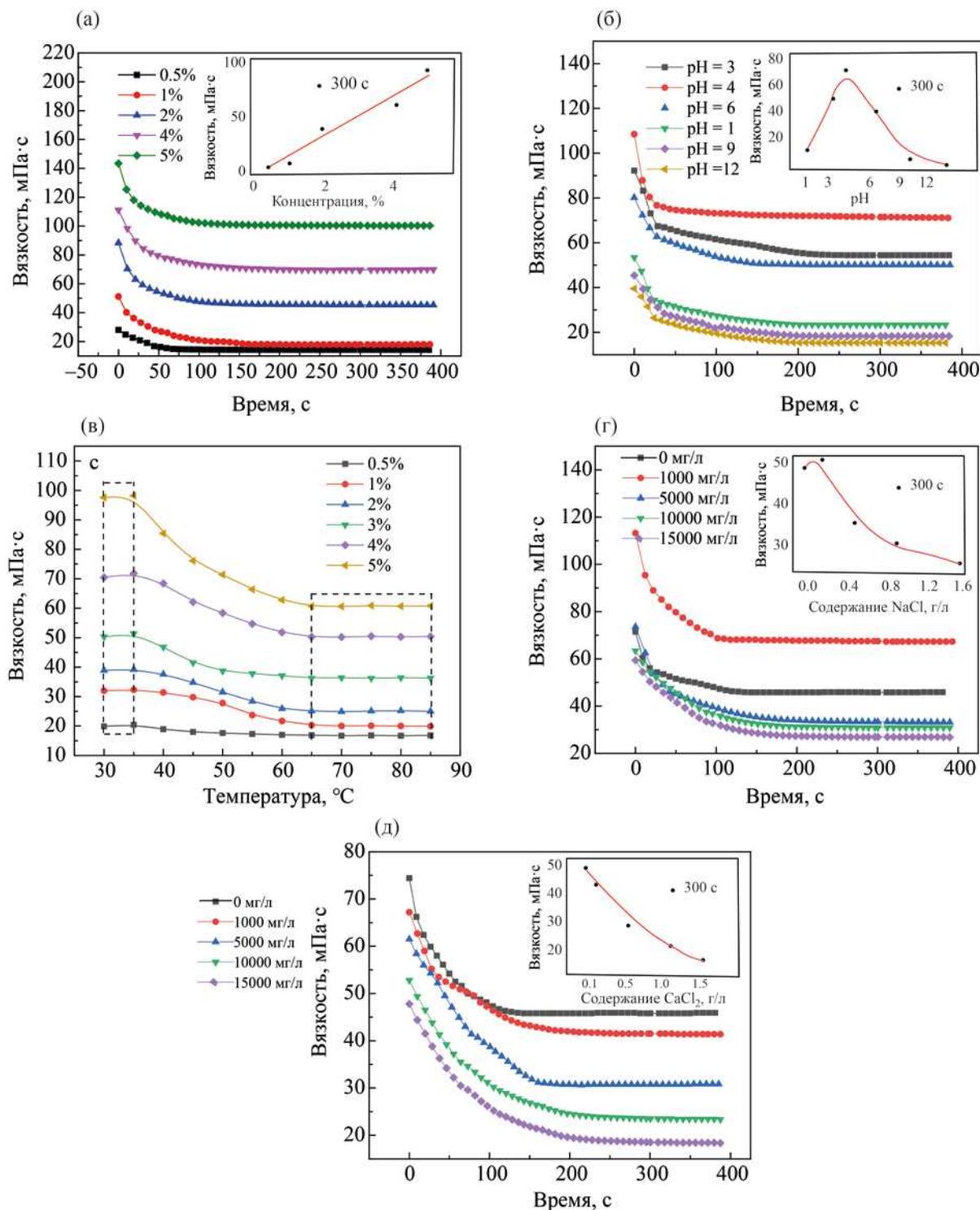


Рис. 2. Изменение вязкости при различных значениях концентрации (а), рН (б) и температуры (в) и с учетом влияния добавления неорганических солей (г, д).

способствует образованию мицелл и, следовательно, увеличению вязкости GOHSB. С увеличением pH взаимодействие GOHSB с ионами H^+ ослабевает, что приводит к снижению вязкости.

Изменение вязкости GOHSB в зависимости от температуры показано на рис. 2в. Наблюдается незначительное увеличение вязкости GOHSB при повышении температуры от 30 до 35°C, что благоприятно сказывается на образовании мицелл. При повышении температуры от 35 до 65°C вязкость постепенно снижается и остается неизменной в диапазоне 65–85°C. Напротив, с повышением температуры скорость движения молекул ПАВ увеличивается, что не способствует агрегации его молекул с образованием мицелл и приводит к снижению вязкости. Другими словами, повышение температуры разрушает воду вокруг гидрофобной структуры, препятствуя образованию мицелл. При повышении температуры до 85°C вязкость 2%-процентного раствора GOHSB может сохраняться на уровне 25 мПа·с. Кроме того, этот раствор демонстрирует хорошую термостойкость.

Результаты нечувствительности GOHSB к добавлению солей NaCl и $CaCl_2$ показаны на рис. 2г и 2д, соответственно. Наблюдается неуклонное снижение вязкости раствора по мере увеличения концентрации NaCl. Однако ионы кальция в большей степени влияют на вязкость раствора GOHSB, чем ионы натрия. Ионы кальция вызывают большую степень снижения дзета-потенциала из-за их более высокой валентности. Вязкость 1000 мг/л воды, минерализованной молекулами NaCl, составила 47.5 мПа·с, что выше, чем значение вязкости без NaCl. Добавление неорганических солей к раствору GOHSB увеличивает концентрацию противоположных ионов в системе, что ведет к повышению вязкости. Вязкость 1000 мг/л воды, минерализованной молекулами $CaCl_2$, составила 41.5 мПа·с, что выше, чем при добавлении NaCl до такой же солености. Вязкость GOHSB составила 26.94 и 18.51 мПа·с при 15000 мг/л для NaCl и $CaCl_2$, соответственно.

Реологические характеристики. Соотношение между вязкостью GOHSB и чувствительностью к сдвигу показано на рис. 3а. Замечено, что с увеличением скорости сдвига вязкость раствора GOHSB сначала уменьшается, а затем постепенно стабилизируется. Эта тенденция соответствует

типичным реологическим характеристикам разжижения при сдвиге. Кроме того, при высокой скорости сдвига нарушается выравнивание запутанных мицелл, при этом восстановление разрушенных мицелл занимает больше времени, чем разрушение мицелл. Другими словами, при высоких скоростях сдвига восстановление структуры трехмерной сетки становится невозможным. Следовательно, вязкоупругость раствора и критическая скорость сдвига, при которой начинается переход к разжижению при сдвиге, снижаются. Низкую концентрацию (2%) можно наблюдать при 33.3 мПа·с, когда скорость сдвига составляет 170 s^{-1} . Жидкость для гидроразрыва требует определенной стойкости к сдвигу. Данный анализ напрямую доказывает, что раствор GOHSB обладает определенной стойкостью к сдвигу.

Результаты определения динамического реологического модуля накопления (G') и модуля потерь (G'') интерпретируются как функция угловой частоты (ω) при различных концентрациях раствора GOHSB, который демонстрирует типичные вязкоупругие характеристики, изменяющиеся от упругости до вязкости в определенном диапазоне угловых частот. Эластичность раствора GOHSB преобладает в области низких частот, в то время как при высоких частотах материал превращается из упругого в вязкий. Благодаря уникальной вязкоупругости GOHSB его можно использовать для получения суспензии проппанта. Критическая частота сдвига составила 53.53 рад/с при концентрации 1 мас. %, а при дальнейшем увеличении концентрации до 2 мас. % критическая частота сдвига составила 77.78 рад/с. Характерное время релаксации (τ) является обратной величиной угловой частоты (ω), т. е. $\tau = 1/\omega$. При концентрации 1 мас. % значение τ составило 0.019 с, а при увеличении концентрации до 2 мас. % оно снизилось до 0.013 с.

Коэффициент потерь ($tg \delta$) является важным параметром вязкоупругости раствора и рассчитывается по формуле: $tg \delta = G''/G'$. Коэффициент потерь раствора GOHSB показан на рис. 3с. В диапазоне частот 0.1–15.92 Гц раствор (1 мас. %) проявляет упругие свойства с $tg \delta < 1$. При частоте менее 12.38 Гц раствор (2 мас. %) проявляет упругость с $tg \delta < 1$. Однако при частоте более 12.38 Гц раствор (2 мас. %) начинает проявлять вязкость $tg \delta > 1$. То есть с увеличением коэффициента потерь

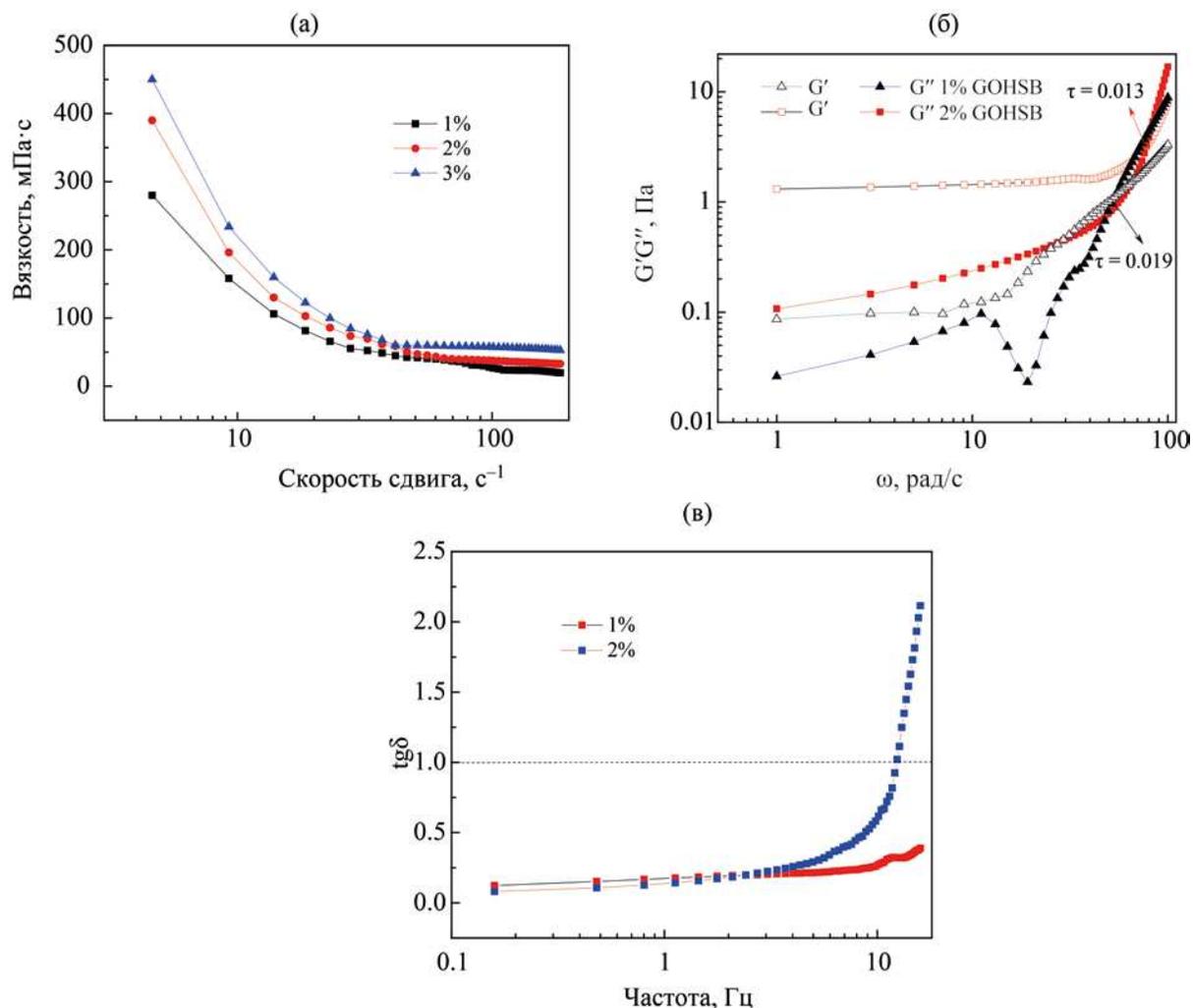


Рис. 3. Связь между вязкостью и скоростью сдвига (а), а также влияние концентрации GOHSB на динамическую кривую сдвига (б) и коэффициент потерь (в).

свойства раствора меняются с упругих на вязкие. Способность чистой жидкости к гидроразрыву суспендированного проппанта зависит в основном от ее упругих свойств.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). Микроструктуры раствора GOHSB и разрушающей гель жидкости показаны на рис. 4. Сложные сетчатые структуры раствора GOHSB, наблюдаемые при увеличении в 500, 2000 и 1300 раз, показаны на рис. 4а–4в, соответственно. Структура раствора GOHSB состоит из червеобразных мицелл, соединенных в трехмерную сетчатую микроструктуру. Из-за образования трехмерной сетки вязкость раствора резко возрастает. На рис. 4г–4е

показана структура разрушающей гель жидкости при увеличении в 400, 1500, 2000 раз. Разрушающая гель жидкость имеет слоистую структуру, к поверхности которой прикреплен персульфат аммония, который разрушает червеобразные мицеллы, в результате чего на мицеллярной поверхности образуются отверстия. Разрушение микроструктуры трехмерной сетки приводит к быстрому снижению вязкости раствора.

Критическая концентрация мицелл как показатель поверхностной активности ПАВ, является важной характеристикой и имеет большое значение для изучения и использования поверхностно-активных веществ. Как показано на рис. 5,

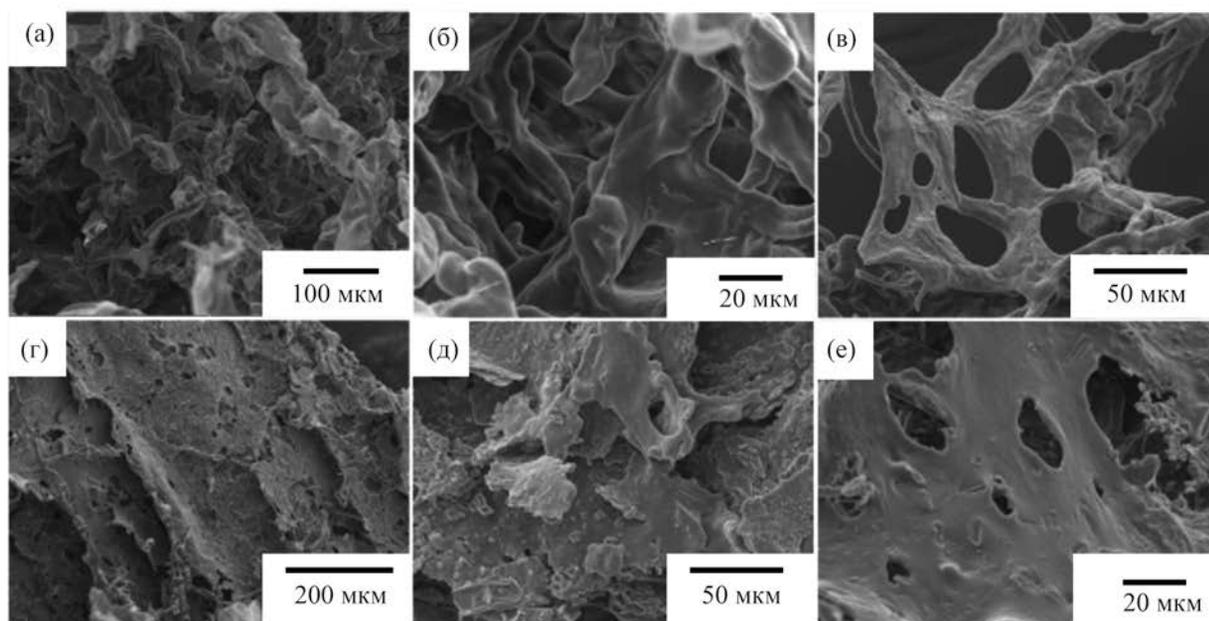


Рис. 4. Микроструктура раствора GOHSB и разрушающей гель жидкости: а–в – сложные сетчатые структуры раствора GOHSB, наблюдаемые при увеличении в 500, 2000 и 1300; г–е – структура разрушающей гель жидкости при увеличении в 400, 1500, 2000 раз.

поверхностное натяжение поверхностно-активного вещества GOHSB уменьшается с увеличением его концентрации и достигает определенной точки перегиба, называемой критической концентрацией мицелл (СМС). Когда концентрация достигает

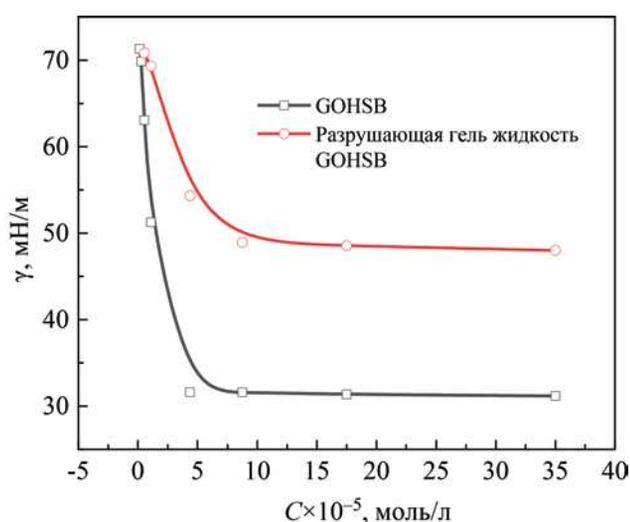


Рис. 5. Зависимость поверхностного натяжения от концентрации GOHSB и жидкости для разрушения геля.

этого значения, поверхностное натяжение постепенно стабилизируется и сводится к минимуму. Плотность упаковки GOHSB на границе раздела воздух-вода, на которую сильно влияет сорбция поверхностно-активных веществ, является важным объяснением поверхностной активности. СМС синтезированного ПАВ GOHSB составляла 7.19×10^{-5} моль/л, а поверхностное натяжение при достижении СМС – 31.7 мН/м. Точно так же СМС разрушающей гель жидкости составляла 8.74×10^{-5} моль/л, а поверхностное натяжение при СМС составляло 48.9 мН/м. Поверхностное натяжение и СМС системы GOHSB были выше, чем у соответствующей разрушающей гель жидкости. Из-за поврежденной структуры ПАВ ухудшается его способность снижать поверхностное натяжение.

Суспендированный проппант. Жидкость для гидроразрыва может быть надлежащим образом использована в качестве левитирующего проппанта, поэтому очень важно оценить ее характеристики [30, 31]. Результаты эксперимента с суспендированным проппантом показаны на рис. 6. Скорость осаждения – отношение высоты ко времени осаждения. Синтезированный раствор GOHSB обладает

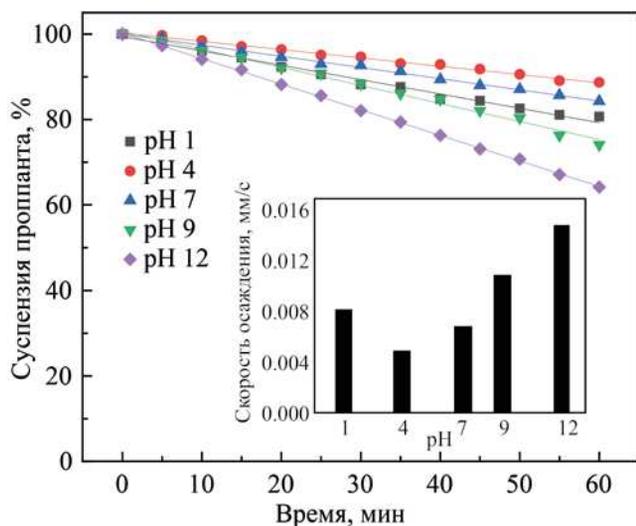


Рис. 6. Результаты измерения времени осаждения суспензии проппанта.

хорошей способностью суспендировать проппант. Результаты показывают, что скорость осаждения проппанта увеличивается с увеличением pH от 4 до 12 и что проппант имеет самую низкую скорость осаждения при низкой кислотности (pH 4), при которой скорость осаждения составляет 0.0047 мм/с. Таким образом подтверждается максимальная вязкость при pH 4. Скорость осаждения единичных частиц составляет менее 0.08 мм/с. При дальнейшем увеличении pH запутанные червеобразные мицеллы в структуре повреждаются из-за ослабления свойств жидкости GOHSB, определяемых присутствием проппанта.

Таким образом, вязкоупругие поверхностно-активные вещества являются безопасными и обеспечивают защиту окружающей среды. Димерный олеамидопропилгидроксисульфобетаин (GOHSB) был успешно получен с помощью трехступенчатого процесса. Он содержал амидные группы и группы сульфоновой кислоты, которые могут увеличить его растворимость и устойчивость к минералам. Для определения структуры GOHSB были использованы методы анализа ^1H NMR и FT-IR. Результаты экспериментов показали, что GOHSB является новым материалом для гидроразрыва с хорошими характеристиками – трехмерной сетчатой микроструктурой и превосходной вязкоупру-

гостью. Система представляет собой желатин с высокой вязкоупругостью, который может поддерживать проппант в состоянии суспензии при определенной концентрации. Следовательно, GOHSB является исключительным вспомогательным реагентом для использования в нефтегазовой отрасли.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы выражаем признательность за финансовую поддержку Китайскому фонду естественных наук (грант № 51603117), Научной ассоциации по развитию университетских талантов в провинции Шэньси (грант № 20190604) и проекту инноваций в области науки и технологий в сельском хозяйстве (грант № 20193053YF041NS041).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Chen Wang, ORCID IDs: <https://orcid.org/0000-0002-6991-9416>

Yan Hou, ORCID IDs: <https://orcid.org/0000-0001-9212-0592>

Xiaowu Yang, ORCID IDs: <https://orcid.org/0000-0001-6838-1610>

Zhigang Li, ORCID IDs: <https://orcid.org/0000-0001-5355-5075>

Feng Chang, ORCID IDs: <https://orcid.org/0000-0002-2867-2621>

Peizhi Li, ORCID IDs: <https://orcid.org/0000-0002-3256-0446>

Jiangtao Wang, ORCID IDs: <https://orcid.org/0000-0002-6383-9546>

Meng Li ORCID IDs: <https://orcid.org/0000-0001-7993-0873>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bajpai P., Singh J.P., Mandal A., Ojha K. The synthesis and characterization of a clean hydrofracturing fluid // Petrol. Sci. Technol. 2010. V. 28. P. 1750–1760. <https://doi.org/10.1080/10916460903261723>
2. Barati R., Liang J.T. A review of fracturing fluid systems used for hydraulic fracturing of oil and gas wells // J.

- Appl. Polymer Sci. 2014. V. 131. P. 318–323. <https://doi.org/10.1002/APP.40735>
3. *Montgomery C.T., Smith M.B.* Hydraulic fracturing: history of an enduring technology // *J. Pet. Technol.* 2015. V. 62. P. 26–40. <https://doi.org/10.2118/1210-0026-JPT>
 4. *Chu Z.L., Feng Y.J., Sun H.Q., Li Z.Q., Song X.W., Han Y.G., Wang H.Y.* Aging mechanism of unsaturated long-chain amidosulfobetaine worm fluids at high temperature // *Soft Matter*. 2011. V. 7. P. 4485–4489. <https://doi.org/10.1039/c0sm01394c>
 5. *Chu Z.L., Feng Y.J., Su X., Han Y.X.* Wormlike micelles and solution properties of a C₂₂-tailed amidosulfobetaine surfactant // *Langmuir*. 2010. V. 26. P. 7783–7791. <https://doi.org/10.1021/la904582w>
 6. *Dong S.J., Li Y.L., Song Y.B., Zhi L.F.* Synthesis, characterization and performance of unsaturated long-chain carboxybetaine and hydroxy sulfobetaine // *J. Surfactants Deterg.* 2013. V. 16. P. 523–529. <https://doi.org/10.1007/s11743-013-1441-9>
 7. *Chieng Z.H., Mohyaldinn M.E., Hassan A.M., Bruining H.* Experimental investigation and performance evaluation of modified viscoelastic surfactant (VES) as a new thickening fracturing fluid // *Polymers*. 2020. V. 12. P. 1470–1488. <https://doi.org/10.3390/polym12071470>
 8. *Castro Dantas T.N., Santanna V.C., Dantas Neto A.A., and Barros Neto E.L.* Application of surfactants for obtaining hydraulic fracturing gel // *Petrol. Sci. Technol.* 2003. V. 21. P. 1145–1157. <https://doi.org/10.1081/LFT-120017880>
 9. *Dong Z., Zheng, Y., Zhao J.S.* Synthesis, physicochemical properties and enhanced oil recovery flooding evaluation of novel zwitterionic gemini surfactants // *J. Surfactants Deterg.* 2014. V. 17. P. 1213–1222. <https://doi.org/10.1007/s11743-014-1616-z>
 10. *Feng D., Zhang Y.M., Chen Q.S., Wang J.Y., Li B., Feng Y.J.* Synthesis and surface activities of amidobetaine surfactants with ultra-long unsaturated hydrophobic chains // *J. Surfactants Deterg.* 2012. V. 15. P. 657–661. <https://doi.org/10.1007/s11743-012-1359-7>
 11. *Kumar A., Mandal A.* Characterization of rock-fluid and fluid-fluid interactions in presence of a family of synthesized zwitterionic surfactants for application in enhanced oil recovery // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2018. V. 549. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.04.001>
 12. *Baruah A., Pathak A.K., Ojha K.* Phase behaviour and thermodynamic properties of lamellar liquid crystal developed for viscoelastic surfactant based fracturing fluid // *Chem. Eng. Sci.* 2015. V. 131. P. 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.03.067>
 13. *Lu H.S., Shi Q.P., Wang B.G., Huang Z.Y.* Spherical-to-wormlike micelle transition in a pseudogemini surfactant system with two types of effective pH-responsive groups // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2016. V. 494. P. 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.01.014>
 14. *Luo M.L., Jia Z.L., Sun H.T., Liao L.J., Wen Q.Z.* Rheological behavior and microstructure of an anionic surfactant micelle solution with pyroelectric nanoparticle // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2012. V. 395. P. 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.12.052>
 15. *Ma X.P., Zhu Z.X., Dai L.Y., Liu L.Y., Shi W.* Introducing hydroxyl into cationic surfactants as viscoelastic surfactant fracturing fluid with high temperature resistance // *Russ. J. Appl. Chem.* 2016. V. 89. P. 2016–2026. <https://doi.org/10.1134/s1070427216120132>
 16. *Mao J.C., Yang X.J., Chen Y.N., Zhang Z.Y., Zhang C., Yang B., Zhao J.Z.* Viscosity reduction mechanism in high temperature of a gemini viscoelastic surfactant (VES) fracturing fluid and effect of counter-ion salt (KCl) on its heat resistance // *J. Petrol. Sci. Eng.* 2018. V. 164. P. 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.01.052>
 17. *Al-Sadat W., Nasser M.S., Chang F., Nasr-El-Dind H.A., Hussein I.A.* Rheology of a viscoelastic zwitterionic surfactant used in acid stimulation: Effects of surfactant and electrolyte concentration // *J. Petrol. Sci. Eng.* 2014. V. 124. P. 341–349. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.09.014>
 18. *Pak A., Chan D.H.* A Fully implicit single phase T-H-M fracture model for modelling hydraulic fracturing in oil sands // *J. Can. Pet. Technol.* 2004. V. 43. P. 35–44. <https://doi.org/10.2118/04-06-01>
 19. *Qi L.Y., Fang Y., Wang Z.Y., Ma N., Jiang L.Y., Wang Y.Y.* Synthesis and physicochemical investigation of long alkylchain betaine zwitterionic surfactant // *J. Surfactants Deterg.* 2008. V. 11. P. 55–59. <https://doi.org/10.1007/s11743-007-1054-2>
 20. *Qiu L.W., Shen Y.D., Wang C.* pH- and KCl-induced formation of worm-like micelle viscoelastic fluids based on a simple tertiary amine surfactant // *J. Petrol. Sci. Eng.* 2018. V. 162. P. 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.12.037>
 21. *Shakil Hussain S.M., Animashaun M.A., Kamal M.S., Ullah N., Hussein I.A., Sultan A.S.* Synthesis, characterization and surface properties of amidosulfobetaine surfactants bearing odd-number hydrophobic tail // *J. Surfactants Deterg.* 2016. V. 19. P. 413–420. <https://doi.org/10.1007/s11743-016-1788-9>
 22. *Wang C., Li X.R., Du B., Li P.Z., Li H.B.* Associating and rheological behaviors of fluorinated cationic guar gum in aqueous solutions // *Carbohydr. Polym.* 2013. V. 95. P. 637–643. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.02.064>

23. Wang T., Xiao J.H., Wang L.S., Ma A.Q., Tian M.M., Wang C. Synthesis of gemini ammonium sulfobetaine and its proppant suspension and gel-breaking mechanisms // RSC Adv. 2020. V. 10. P. 7879–7886. <https://doi.org/10.1039/D0RA00211A>
24. Wang C., Li X.R., Li P.Z., Niu Y.H. Interactions between fluorinated cationic guar gum and surfactants in the dilute and semi-dilute solutions // Carbohydr. Polym. 2014. V. 99. P. 638–645. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.083>
25. Wang C., Qiu L.W., Wang T. Self-assembly and rheological behaviors of intermacromolecular complexes consisting of oppositely charged fluorinated guar gums // Carbohydr. Polym. 2018. V. 184. P. 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.001>
26. Zhang Q.Q., Cai B.X., Gang H.Z., Yang S.Z., Mu B.Z. A family of novel bio-based zwitterionic surfactants derived from oleic acid // RSC Adv. 2014. V. 4. P. 38393–38396. <https://doi.org/10.1039/c4ra06851c>
27. Zhang Y.M., Luo Y.Y., Wang Y.J., Zhang J.C., Feng Y.J. Single-component wormlike micellar system formed by a carboxylbetaine surfactant with C₂₂ saturated tail // Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp. 2013. V. 436. P. 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.06.016>
28. Zhao J.H., Dai C.L., Ding Q.F., Du M.Y., Feng H.S., Wei Z.Y., Chen A., Zhao M.W. The structure effect on the surface and interfacial properties of zwitterionic sulfobetaine surfactants for enhanced oil recovery // RSC Adv. 2015. V. 5. P. 13993–14001. <https://doi.org/10.1039/c4ra16235h>
29. Zhou C.C., Cheng X.H., Zhao O.D., Liu S., Liu C.J., Wang J.D., Huang J.B. The evolution of self-assemblies in the mixed system of oleic acid-diethylenetriamine based on the transformation of electrostatic interactions and hydrogen bonds // Soft Matter. 2014. V. 10. P. 8023–8030. <https://doi.org/10.1039/c4sm01204f>
30. Philippova O.E., Khokhlov A.R. Smart polymers for oil production // Pet. Chem. 2010. V. 50. P. 266–270. <https://doi.org/10.1134/S0965544110040031>
31. Malhotra S., Sharma M.M. Settling of spherical particles in unbounded and confined surfactant-based shear thinning viscoelastic fluids: An experimental study // Chem. Eng. Sci. 2012. V. 84. P. 646–655. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.09.010>