

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГЕЛЕОБРАЗУЮЩИХ СОСТАВОВ

И.С. Кожевников, А.В. Богословский

Иван Сергеевич Кожевников (ORCID 0000-0003-2505-2002)*, Андрей Владимирович Богословский (ORCID 0009-0000-6936-4425)

Лаборатория коллоидной химии нефти, Институт химии нефти СО РАН, Академический пр-т, 4, Томск, Российская Федерация, 634055

E-mail: www.tsu@gmail.com *, bav@ipc.tsc.ru

В настоящей работе исследованы реологические свойства низкотемпературных вариантов гелеобразующих составов, разработанных в ИХН СО РАН для увеличения нефтеотдачи на месторождениях с низкой пластовой температурой – композиция на неорганической основе и композиция полимерно-неорганического состава. Измерения проводили на реометре Haake Viscotester iQ с измерительной системой коаксиальных цилиндров СС25 в осцилляционном режиме с контролируемой деформацией при частоте 1 Гц. В ходе осцилляционного теста зарегистрированы зависимости модуля упругости G' , модуля вязкости G'' от амплитуды деформации, установлены диапазоны линейной вязкоупругости исследуемых образцов, выбрана величина деформации для кинетических экспериментов. При заданном значении деформации (0,01) получены кинетические зависимости G' , оценена динамика реологических свойств и прочность сформировавшейся структуры. Определено время начала гелеобразования, которое составляет для неорганической композиции: 2300 с при 38 °С, 3900 с при 30 °С, и 21000 с при 20 °С, а для полимерно-неорганической композиции: 200 с при 70 °С, 570 с при 60 °С и 1920 с при 50 °С. Время формирования геля максимальной прочности также увеличивается с ростом температуры. Установлено, что с повышением температуры для всех исследованных систем сокращается время образования геля, а также повышается прочность сформированной структуры – для состава на неорганической основе наблюдается некоторое увеличение максимального значения модуля G' для 38 и 30 °С (33490 и 32805 Па, соответственно) по сравнению с максимумом зависимости, полученной при 20 °С (24660 Па), а для состава на полимерно-неорганической основе зарегистрировано более существенное увеличение значения модуля G' с ростом температуры – с 8970 Па для 50 °С до 11680 Па для 60 °С и 14590 Па для 70 °С, при этом общий вид реокинетической зависимости для различных составов и температур не изменяется.

Ключевые слова: вибрационная вискозиметрия, гелеобразующие составы, модуль упругости, модуль вязкости, режим осцилляции, реокинетика

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF LOW-TEMPERATURE GEL-FORMING COMPOSITIONS

I.S. Kozhevnikov, A.V. Bogoslovskii

Ivan S. Kozhevnikov (ORCID 0000-0003-2505-2002) *, Andrey V. Bogoslovskii (ORCID 0009-0000-6936-4425)

Laboratory of Petroleum Colloidal Chemistry, Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the RAS, Akademicheskii ave., 4, Tomsk, 634055, Russia

E-mail: www.tsu@gmail.com *, bav@ipc.tsc.ru

In this work, the rheological properties of low-temperature versions of gel-forming compositions developed at the IPC SB RAS are studied. A composition on an inorganic basis and a composition comprising a polymer and inorganic components are intended to increase oil recovery from low temperature reservoirs. The measurements were carried using a Haake Viscotester iQ rheometer with a CC25 coaxial cylinder measuring system in oscillatory mode with controlled strain at a frequency of 1 Hz. During the oscillation test, the dependences of the elastic modulus G' and the viscosity modulus G'' on the strain amplitude were recorded, the ranges of linear viscoelasticity of the samples under study were established, and the strain value for kinetic experiments was chosen. At a given strain value (0.01), the kinetic dependences of G' were obtained and the dynamics of the rheological properties and the strength of the formed structure were evaluated. The time of gelation onset has been found. It was 2300 s at 38 °C, 3900 s at 30 °C, and 21000 s at 20 °C for the inorganic composition and 200 s at 70 °C, 570 s at 60 °C, and 1920 s at 50 °C for the polymer-inorganic composition. The time required to form a gel of maximum strength also was found to be increased with increasing temperature. It has been established that for all systems under study the time of gel formation was reduced with increasing temperature, while the strength of the formed structure also increased. A slight increase in the maximum value of the modulus G' (33490 and 32805 Pa) was observed for the composition on an inorganic basis at 38 and 30 °C respectively as compared with the maximum of the dependence obtained at 20 °C (24660 Pa). The major increase in the value of the modulus G' has been recorded for the composition on a polymer-inorganic basis with increase in temperature. In this case the value of the modulus G' increased from 8970 Pa at 50 °C to 11680 Pa at 60 °C and 14590 Pa at 70 °C, while the general form of the rheokinetic dependence for different compositions and temperatures remained the same.

Keywords: vibrational viscometry, gel-forming compositions, elastic modulus, viscosity modulus, oscillation mode, rheokinetics

Для цитирования:

Кожевников И.С., Богословский А.В. Реологические свойства низкотемпературных гелеобразующих составов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 8. С. 22–28. DOI: 10.6060/ivkkt.20246708.1t.

For citation:

Kozhevnikov I.S., Bogoslovskii A.V. Rheological properties of low-temperature gel-forming compositions. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 8. P. 22–28. DOI: 10.6060/ivkkt.20246708.1t.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях роста доли трудноизвлекаемых запасов актуальны работы, посвященные физико-химическим методам повышения нефтеотдачи [1-11]. В пласт закачиваются специально разработанные гелеобразующие составы (ГОС), обеспечивающие ограничение водопритока в добывающие скважины, выравнивание профиля приемистости для нагнетательных скважин, создание в пласте гелевых экранов для перераспределения фильтрационных потоков [4-7]; также разработаны многофункциональные нефтевытесняющие и потокоотклоняющие композиции [10, 11]. Эти мероприятия проводятся, как правило, на месторождениях, находящихся на поздней стадии разработки, направлены на повышение коэффициента нефтеизвлечения и приводят к снижению обводненности добываемой продукции.

При разработке гелеобразующих систем существует потребность в контроле динамики изменения реологических свойств объекта. Наиболее предпочтительны неразрушающие формирующуюся структуру методы, основанные на колебательном режиме движения пробного тела – реометры, работающие в режиме осцилляции [12, 13], и вибрационные вискозиметры [14-18]. Дополнительным преимуществом вибрационной вискозиметрии является широкий диапазон измерения вязкости, позволяющий в одном эксперименте охватить изменение вязкости образца при его эволюции от маловязкой ньютоновской жидкости до нетекучего структурированного геля [15, 16, 18]; в ИХН СО РАН разработаны вибрационные вискозиметры тиксотропных жидкостей [19], предложен способ определения точки гелеобразования [20, 21], вис-

козиметры для кинетических измерений и исследования межфазной области [22]. Серийно выпускаемые реометры, позволяющие проводить измерения в осцилляционном режиме (например, производства Нааке и др.), хорошо подходят для характеристики сформировавшегося геля, недостаточно чувствительны в области малых значений вязкости, однако в ряде практически важных случаев они могут быть использованы для контроля кинетики нарастания упругости образца в процессе гелеобразования [13]. В настоящей работе в осцилляционном режиме [13] исследована кинетика изменения реологических свойств ГОС на неорганической и полимерно-неорганической основе, предназначенных для применения на месторождениях с низкой пластовой температурой (30–70 °С).

ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объектов исследования выступали низкотемпературные (НТ) варианты разработанных в ИХН СО РАН гелеобразующих композиций на основе состава «соль алюминия – карбамид – вода» (ГАЛКА®, композиция на неорганической основе), далее – ГОС-НТ № 1, и состава «эфир целлюлозы – соль алюминия – многоатомный спирт – вода» (композиция более сложного состава, с неорганическим компонентом композиции ГАЛКА® и полимерным термотропным компонентом, применяемым в композиции МЕТКА®), далее – ГОС-НТ № 2.

В качестве метода исследования использовали осцилляционную реометрию [13], а именно реометр Haake Viscotester iQ с измерительной системой коаксиальных цилиндров CC25 DIN/Ti. Методика измерений в режиме осцилляций описана в руководстве по эксплуатации к реометру, принцип описан в [12,13] и др. Термостатирование образца при заданных температурах (38, 30, 20 °С – для ГОС-НТ № 1 и 50, 60, 70 °С – для ГОС-НТ № 2) выполнялось с помощью встроенного в измерительный блок Haake Viscotester iQ элемента Пельтье. Растворы компонентов композиций готовили непосредственно перед измерением при температуре 22–23 °С. Предварительно проводили эксперименты со сформировавшимся гелем (развертка по амплитуде в режиме контролируемой деформации – CD amplitude sweep) для определения диапазона линейной вязкоупругости (LVE-диапазона), затем при заданном значении деформации из LVE-диапазона проводили в осцилляционном режиме кинетические измерения реологических характеристик.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Определение LVE-диапазона для сформировавшихся гелей.

На рис. 1 представлена амплитудная развертка для геля ГОС-НТ №1, сформированного при температуре 38 °С, полученная в режиме заданной деформации в интервале от 0,001 до 1. По горизонтальной оси отложена величина амплитуды деформации в долях от единицы (безразмерная величина), по вертикальной – значения модулей накопления и потерь (Па).

На рис. 2 приведены результаты амплитудного теста для геля ГОС-НТ №2, сформированного при 60 °С.

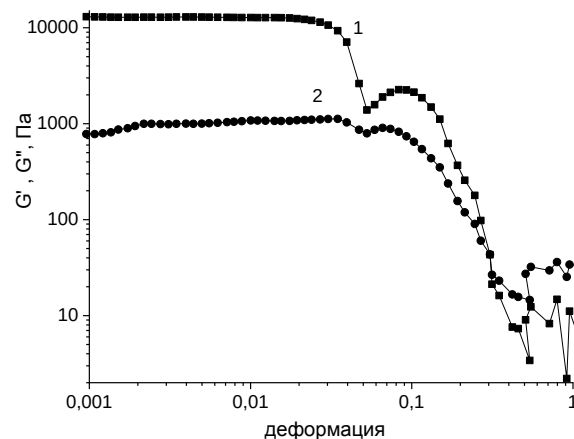


Рис. 1. Амплитудная развертка для ГОС-НТ №1, 1 – G' , 2 – G''
Fig. 1. Amplitude sweep for GOS-NT No.1, 1 – G' , 2 – G''

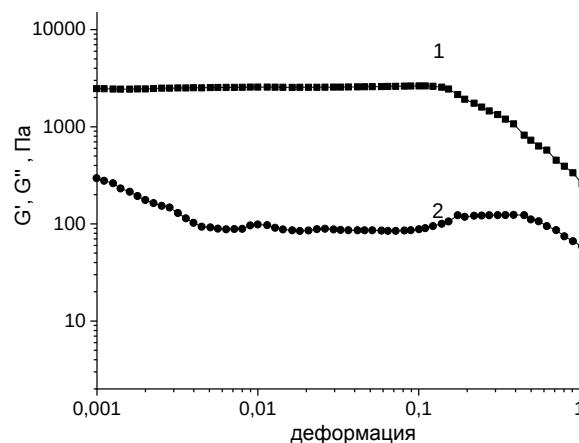


Рис. 2. Амплитудная развертка для ГОС-НТ № 2, 1 – G' , 2 – G''
Fig. 2. Amplitude sweep for GOS-NT N 21 – G' , 2 – G''

В условиях эксперимента сформировавшиеся гели обладают выраженными упругими свойствами ($G' > G''$, кроме значений деформации более 0,3 для ГОС-НТ № 1).

По результатам амплитудных тестов определены диапазоны линейной вязкоупругости – области значений деформации, при которых графики

модуля накопления G' и модуля потерь G'' параллельны оси абсцисс. Так, из графиков рис. 1 и 2 установлено, что LVE-диапазон для ГОС-НТ № 1 составляет от 0,002 до 0,03, а для ГОС-НТ № 2 – от 0,0045 до 0,12. Для кинетических экспериментов выбрано значение деформации 0,01 для обоих образцов.

2. Исследование кинетики модуля упругости в процессе гелеобразования в исследуемых системах при различных температурах. Зависимости модуля упругости G' (наряду с зависимостями модуля вязкости G'' и комплексной вязкости, которые здесь не приводятся), зафиксированные в режиме осцилляции, можно использовать для оценки динамики реологических свойств образца, для оценки времени гелеобразования, для оценки прочности сформировавшейся структуры.

На рис. 3 представлены кинетические зависимости модуля упругости G' для ГОС-НТ № 1, полученные при температурах 38, 30, 20 °С, при частоте 1 Гц в режиме осцилляции с контролируемой деформацией, значение которой (0,01) взято из LVE-диапазона, определенного по данным рис. 1. Для ГОС-НТ № 1 уже при незначительном повышении температуры протекает химическая реакция гидролиза карбамида с образованием аммиака и углекислого газа, которая сопровождается постепенным увеличением pH раствора; при достижении определенного, порогового, значения pH происходит практически мгновенное образование геля гидроксида алюминия сразу во всем объеме раствора. Из приведенных кинетических зависимостей видно, что с повышением температуры, сокращается время образования геля, а также повышается прочность сформированной структуры, о чем свидетельствует некоторое увеличение максимального значения модуля G' для 38 и 30 °С (33490 и 32805 Па, соответственно) по сравнению с максимумом кривой, полученной при 20 °С (24660 Па). Поскольку при температурах 38 и 30 °С гелеобразование протекает быстрее, чем при 20 °С, соответствующие зависимости приведены для различных значений времени. При 38 и 30 °С процесс закончился менее чем за 100000 с, а при 20 °С для его регистрации было необходимо около 250000 с. Повышение температуры с 20 до 30 °С в большей степени влияет на упрочнение структуры, чем дальнейшее повышение до 38 °С, что связано с природой геля на

неорганической основе, в котором нет полимерного термотропного компонента. С течением времени, по мере протекания реакции, происходит сшивка неорганического компонента, формируется упрочняющаяся трехмерная структура – гель. На зависимости модуля упругости G' начальные участки кривых характеризуются замедляющимся ростом величины G' , далее следует резкий рост значений модуля G' , который регистрируется спустя 2300 с (для 38 °С), 3900 с (для 30 °С), и 21000 с (для 20 °С), эти значения можно считать началом гелеобразования композиции.

Затем, с течением времени, кривые с изменяющейся (и увеличивающейся с ростом температуры) скоростью, выходят на максимум $G'_{\max}$, значение которого увеличивается с ростом температуры; после достижения максимума наблюдается некоторое снижение модуля, связанное с частичным испарением растворителя и некоторой деградацией геля за время измерения (от 24 до 48 ч). Время достижения максимума (т.е. время формирования геля максимальной прочности) также увеличивается с ростом температуры и составляет 21000 с (для 38 °С), 44760 с (для 30 °С) и 149070 с (для 20 °С).

На рис. 4 представлены кинетические зависимости G' , отражающие изменение модуля упругости G' при формировании геля для ГОС-НТ № 2, зарегистрированные при 50, 60, 70 °С. С повышением температуры сокращается время образования геля, а также повышается прочность сформированной структуры, о чем свидетельствует увеличение максимального значения модуля G' .

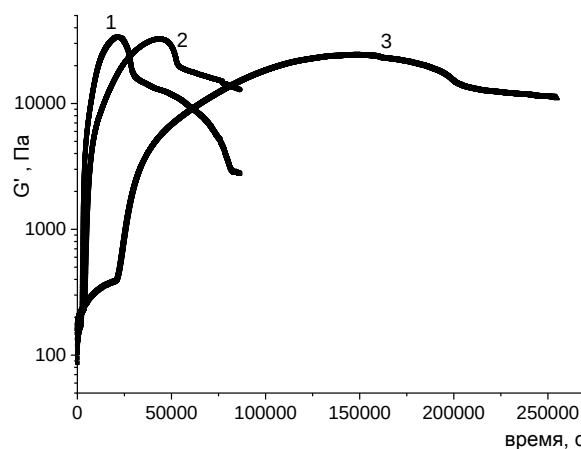


Рис. 3. Кинетика модуля упругости G' для ГОС-НТ № 1, 1 – 38 °С, 2 – 30 °С, 3 – 20 °С

Fig. 3. Kinetics of elastic modulus G' for GOS-NT 1, 1 – 38 °С, 2 – 30 °С, 3 – 20 °С

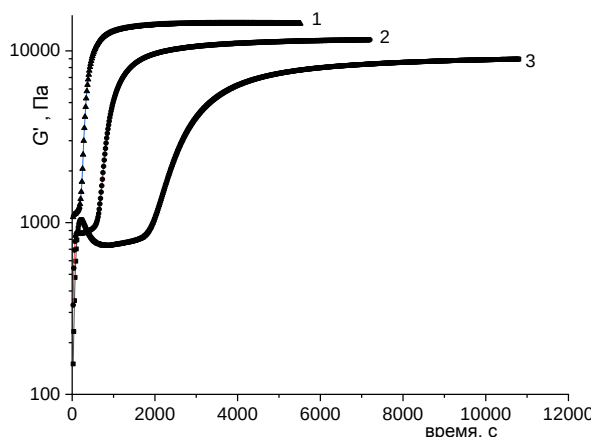


Рис.4. Кинетика модуля упругости G' для ГОС-НТ № 2,
1 – 70 °C, 2 – 60 °C, 3 – 50 °C
Fig.4. Kinetics of elastic modulus G' for GOS-NT N 2,
1 – 70 °C, 2 – 60 °C, 3 – 50 °C

Индукционный период, зарегистрированный для образца при 50 °C, от 650 до 750 с, практически полностью исчезает на зависимости, полученной для того же образца при 70 °C. Промежуточный экстремум модуля упругости, в представленном масштабе отчетливо виден на кривой, соответствующей 50 °C, и отсутствует на зависимостях, полученных для более высоких температур. Время начала гелеобразования, определенное по резкому росту модуля упругости, при 70 °C составляет 200 с, при 60 °C – 570 с, при 50 °C – 1920 с. С повышением температуры, максимальное значение модуля упругости сформировавшегося геля возрастает и составляет 8970 Па (для 50 °C), 11680 Па (для 60 °C) и 14590 Па (для 70 °C). Два гелеобразующих агента (неорганический – гидроксид алюминия и полимерный – метилцеллюлоза) в условиях, моделирующих пластовые, образуют систему «гель в геле» с улучшенными по сравнению с базовыми составами структурно-механическими свойствами. На промысле эти изменения происходят под действием температуры пласта или теплоносителя, без сшивающего агента, а область применения состава – пародовые скважины и месторождения, разраба-

тываемые методом термического заводнения. Более существенное, по сравнению с гелем на неорганической основе, увеличение модуля упругости с повышением температуры связано с упрочнением термотропной составляющей геля. Определенные по графикам рис. 3-4 значения времен гелеобразования совпадают с независимо полученными результатами (визуальным методом по подвижности образца в пробирке и по методике [20, 21]).

ВЫВОДЫ

Таким образом, исследованы реологические свойства низкотемпературных вариантов композиций разработки ИХН СО РАН. Для исследуемых образцов установлен диапазон линейной вязкоупругости и в режиме контроля деформации зарегистрированы кинетические зависимости G' , G'' и комплексной вязкости, оценена динамика реологических свойств и прочность сформировавшейся структуры, определены времена гелеобразования образцов при различных температурах. Установлено, что с повышением температуры сокращается время образования геля, а также повышается прочность сформированной структуры: в значительной степени – для композиции с термотропным компонентом и менее выражено – для композиции на неорганической основе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР № 121031500048-1).

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

The work was carried out within the State Assignment for IPC SB RAS, financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (NIOKTR 121031500048-1).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Муслимов Р.Х.** Нефтеотдача – прошлое, настоящее, будущее. Казань: изд-во «ФЭН». 2012. 664 с.
2. **Romero-Zeron L.** Chemical Enhanced Oil Recovery (cEOR) – a Practical Overview. London: InTechOpen Ltd. 2016. 200 p. DOI: 10.5772/61394.

REFERENCES

1. **Muslimov R.X.** Oil recovery: Past, Present, Future. Kazan': «FéN». 2012. 664 p. (in Russian).
2. **Romero-Zeron L.** Chemical Enhanced Oil Recovery (cEOR) – a Practical Overview. London: InTechOpen Ltd. 2016. 200 p. DOI: 10.5772/61394.

3. Алтунина Л.К., Кувшинов В.А. Физико-химические методы увеличения нефтеотдачи пластов нефтяных месторождений (обзор). *Усп. химии*. 2007. Т. 76. № 10. С. 1034-1052. DOI: 10.1070/RC2007v076n10ABEH003723.
4. Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Стасьева Л.А., Кувшинов И.В. Тенденции и перспективы развития физико-химических методов увеличения нефтеотдачи месторождений тяжелой нефти. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2018. Т. 26. № 3. С. 261-277. DOI: 10.15372/KhUR20180303.
5. Муслимов Р.Х. Повышение нефтеотдачи пластов – приоритетное направление развития нефтяной отрасли современной России. *Нефть. Газ. Новации*. 2013. № 4 (171). С. 63-73.
6. Рузин Л.М., Морозюк О.А., Дуркин С.М. Особенности и инновационные направления освоения ресурсов высоковязких нефтей. *Нефть. хоз-во*. 2013. № 8. С. 51-53.
7. Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Стасьева Л.А., Кувшинов И.В. Увеличение нефтеотдачи залежей высоковязких нефтей кислотными композициями на основе поверхностно-активных веществ, координирующих растворителей и комплексных соединений. *Георесурсы*. 2019. № 21 (4), С. 103-113. DOI: 10.18599/grs.2019.4.103-113.
8. Кувшинов И.В., Кувшинов В.А., Алтунина Л.К. Применение термотропных композиций для повышения нефтеотдачи. *Нефть. хоз-во*. 2017. № 1. С. 44-47.
9. Alvarado V., Manrique E. Enhanced oil recovery: An update review. *Energies*. 2010. V. 3. N 9. P. 1529-1575. DOI: 10.3390/en3091529.
10. Кувшинов И.В., Алтунина Л.К., Козлов В.В., Шолитодов М.Р., Рождественский Е.А. Эффективность многофункциональных нефтевытесняющих и потокоотключающих композиций в неоднородных пластах. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 11. С. 92-100. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.5t.
11. Шолитодов М.Р., Сайденцаль А.Р., Алтунина Л.К., Козлов В.В., Кувшинов В.А., Стасьева Л.А. Оценка эффективности кислотной композиции ГБК при вытеснении маловязкой и высоковязкой нефти. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 11. С. 101-109. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.8t.
12. Малкин А.Я. Основы реологии. СПб.: ЦОП «Профессия». 2018. 336 с.
13. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. М.: Колосс. 2003. 311 с.
14. Колешко В.М., Сунка В.Я., Полинкова Е.В., Крупская Е.В. Проектирование интеллектуальных сенсорных систем измерения вязкости. Минск: изд-во БНТУ. 2010. 81 с.
15. Соловьев А.Н., Каплун А.Б. Вибрационный метод измерения вязкости жидкостей. Новосибирск: Наука. 1970. 142 с.
16. Крутин В.Н. Колебательные реометры. М.: Машиностр. 1985. 160 с.
17. Вибровискозиметр серии SV. Руководство по эксплуатации. Электронный ресурс: <https://www.mirvesov.ru/docs/guide/10138.pdf>.
18. Богословский А.В., Кожевников И.С. Архитектура камертонных датчиков вязкости. *Башкир. Хим. Журн*. 2023. Т. 30. № 1. С. 129-133. DOI: 10.17122/bcj-2023-1-129-133.
3. Altunina L.K., Kuvshinov V.A. Physico-chemical methods for enhanced oil recovery of oil fields (review). *Russ. Chem. Rev.* 2007. V. 76. N 10. P. 971-987. DOI: 10.1070/RC2007v076n10ABEH003723.
4. Altunina L.K., Kuvshinov V.A., Stasyeva L.A., Kuvshinov I.V. Trends and prospects of physicochemical methods for enhanced oil recovery of heavy oil fields. *Chemistry for Sustainable Development [Khimiya v Interesah Ustoichivogo Razvitiya]*. 2018. V. 26. N 3. P. 240-255 (in Russian). DOI: 10.15372/KhUR20180303.
5. Muslimov R.Kh. Enhanced oil recovery is a priority direction for the development of the oil industry in modern Russia. *Neft. Gaz. Novatsii*. 2013. N 4(171). P. 63-73 (in Russian).
6. Ruzin L.M., Morozyuk O.A., Durkin S.M. Features and innovative ways of highly viscous oil field development. *Oil Industry [Neft. Khoz-vo]*. 2013. 8. 51-53 (in Russian).
7. Altunina L.K., Kuvshinov V.A., Stasyeva L.A., Kuvshinov I.V. Enhanced oil recovery from high-viscosity oil deposits by acid systems based on surfactants, coordinating solvents and complex compounds. *Georesources [Georesursy]*. 2019. N 21(4). P. 103-113 (in Russian). DOI: 10.18599/grs.2019.4.103-113.
8. Kuvshinov I.V., Kuvshinov V.A., Altunina L.K. Field experience of thermotropic compositions application for enhanced oil recovery. *Oil Industry [Neft. Khoz-vo]*. 2017. N 1. P. 44-47 (in Russian).
9. Alvarado V., Manrique E. Enhanced oil recovery: An update review. *Energies*. 2010. V. 3. N 9. P. 1529-1575. DOI: 10.3390/en3091529.
10. Kuvshinov I.V., Altunina L.K., Kozlov V.V., Sholidodov M.R., Rozhdestvensky E.A. Efficiency of multifunctional oil-displacing and flow-diverting compositions in heterogeneous reservoirs. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 11. P. 92-100 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.5t.
11. Sholidodov M.R., Saidentsal A.R., Altunina L.K., Kozlov V.V., Kuvshinov V.A., Stasyeva L.A. Evaluation of the GBA acid composition in the displacement of low-viscosity and high-viscosity oil. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 11. P. 101-109 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.8t.
12. Malkin A.Ya. Fundamentals of rheology. SPb.: TsOP "Professiya". 2018. 336 p. (in Russian).
13. Shramm G. Fundamentals of Practical Rheology and Rheometry. M.: Koloss. 2003. 311 p. (in Russian).
14. Koleshko V.M., Sunka V.Ya., Polynkova E.V., Krupskaya E.V. Designing intelligent sensor systems for viscosity measurement. Minsk: BNTU. 2010. 81 p. (in Russian).
15. Solov'ev A.N., Kaplun A.B. Vibration method for measuring the viscosity of liquids. Novosibirsk: Nauka. 1970. 142 p. (in Russian).
16. Krutin V.N. Oscillating rheometers. M.: Mashinost. 1985. 160 p. (in Russian).
17. Vibroviscometer of the SV series. Manual. Electronic resource: <https://www.mirvesov.ru/docs/guide/10138.pdf>.
18. Bogoslovskii A.V., Kozhevnikov I.S. Architecture of tuning-fork viscosity sensors. *Bashkir. Khim. Zhurn*. 2023. V. 30. N 1. P.129-133 (in Russian). DOI: 10.17122/bcj-2023-1-129-133.

19. **Богословский А.В., Кожевников И.С., Алтунина Л.К.** Вискозиметр тиксотропных жидкостей. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2023. Т. 16. № 3. С. 287-295.
20. **Богословский А.В., Кожевников И.С., Стасьева Л.А., Алтунина Л.К.** Определение точки гелеобразования полимерсодержащих составов вибрационным методом. *Вестн. ТвГУ. Сер.: Химия*. 2017. № 4. С. 91-98.
21. **Богословский А.В., Галкин В.М., Кожевников И.С.** Определение момента гелеобразования с использованием измерительных сосудов разной величины. *Газ. пром-сть*. 2013. № 11. С. 98-100.
22. Вискозиметрический комплекс «Реосканк». Каталог оборудования ЦКП РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. Т. 1. Москва. 2010. С. 88. Электронный ресурс: www.gubkin.ru/general/structure/scientific_activity/files/Center_RGU.pdf.
19. **Bogoslovskii A.V., Kozhevnikov I.S., Altunina L.K.** Viscometer of thixotropic liquids. *J. Sib. Fed. Univ. Chem. [Zhurn. Sibir. Fed. Univ. Tekhnika Tekhnologii]*. 2023. V. 16. N 3. P. 287-295 (in Russian).
20. **Bogoslovskii A.V., Kozhevnikov I.S., Stasyeva L.A., Altunina L.K.** Determination the point of gelation of polymer-containing compositions of the vibrational method. *Vestn. TvGU. Ser.: Khimiya*. 2017. N 4. P. 91-98 (in Russian).
21. **Bogoslovskii A.V., Galkin V.M., Kozhevnikov I.S.** Determination of the gelation point using measuring vessels of various sizes. *Gaz. Prom-st'*. 2013. N 11. P. 98-100 (in Russian).
22. Viscometric complex 'Reoskank'. Catalog of the equipment of the Central Collective Use Center of the I. M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas. V 1. Moskva. 2010. P. 88. Electronic resource: www.gubkin.ru/general/structure/scientific_activity/files/Center_RGU.pdf

Поступила в редакцию 24.02.2024

Принята к опубликованию 14.05.2024

Received 24.02.2024

Accepted 14.05.2024