

УДК 622.276.64

DOI: 10.15372/KhUR2024542

EDN: HVWBZZ

Реологические свойства низкотемпературной гелеобразующей композиции на неорганической основе

И. С. КОЖЕВНИКОВ, А. В. БОГОСЛОВСКИЙ, Л. К. АЛТУНИНА

*Институт химии нефти СО РАН,
Томск, Россия**E-mail: www.tsu@gmail.com*

(Поступила 15.12.2023; принята к печати 22.12.2023)

Аннотация

Представлены результаты реологических измерений низкотемпературного состава гелеобразующей композиции на неорганической основе (ГАЛКА®), разработанной в Институте химии нефти СО РАН. Исследования выполнены на реометре Haake Viscotester IQ с использованием геометрии СС25 (режим осцилляции при частоте 1 Гц) при различных температурах. В ходе амплитудного теста определен диапазон значений деформации и напряжения, соответствующие диапазону линейной вязкоупругости. При заданном значении амплитуды деформации из диапазона линейной вязкоупругости определены зависимости модуля комплексной вязкости ($|\eta^*|$), модуля упругости (модуля накопления, G'), модуля вязкости (модуля потерь, G'') от времени при значениях температуры 38, 30 и 20 °С. Охарактеризована кинетика процесса образования геля, по наибольшему значению модуля упругости оценена максимальная прочность сформировавшейся структуры, определены время формирования последней и точки начала гелеобразования.

Ключевые слова: гелеобразующий состав, реокинетика, режим осцилляции, ротационная реометрия, точка гелеобразования

ВВЕДЕНИЕ

Одним из аспектов рационального природопользования является наиболее полное извлечение полезных ископаемых при разработке месторождений. В условиях неуклонного роста доли трудноизвлекаемых запасов в общем балансе добываемого углеводородного сырья актуальны работы, направленные на повышение эффективности добычи с помощью физико-химических методов увеличения нефтеотдачи, которые основаны на применении специально разработанных составов с заданными реологическими и коллоидно-химическими свойствами. Используемые для перераспределения фильтрационных потоков гелеобразующие составы в поверхност-

ных условиях являются маловязкими ньютоновскими жидкостями и теряют текучесть после закачки в пласт [1–8].

Превращение жидкости в нетекучее твердобразное тело отслеживается, как правило, путем реологических измерений [9, 10]. При этом для адекватной характеристики геля необходимо сохранение его формирующейся структуры. Этому требованию в полной мере удовлетворяют вибрационные вискозиметры и реометры, работающие в режиме осцилляции.

Цель работы – исследовать изменение реологических свойств низкотемпературной неорганической композиции при различных температурах в осцилляционном режиме и оценить

динамику гелеобразования и свойства образующегося геля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования использован низкотемпературный вариант гелеобразующей композиции, разработанной в Институте химии нефти СО РАН (Томск) на основе системы “соль алюминия – карбамид” (ГАЛКА®).

В качестве методов исследования применяли реометрию в режиме осцилляции (реометр Haake Viscotester iQ (Thermo Electron, Германия), измерительная система коаксиальных цилиндров CC25 DIN/Ti). Термостатирование образца при заданных температурах (38, 30 и 20 °C) выполнялось с помощью встроенного в измерительный блок реометра элемента Пельтье.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для характеристики кинетики процесса гелеобразования и свойств сформировавшегося геля рассмотрим результаты, полученные в режиме осцилляции при частоте 1 Гц.

На рис. 1 и 2 представлены результаты амплитудного теста. На рис. 1 по горизонтальной оси отложена величина амплитуды деформации в долях от единицы (безразмерная величина), по вертикальной – значения модуля упругости (модуля накопления, G' , Па) и модуля вязкости (модуля потерь, G'' , Па). По результатам ам-

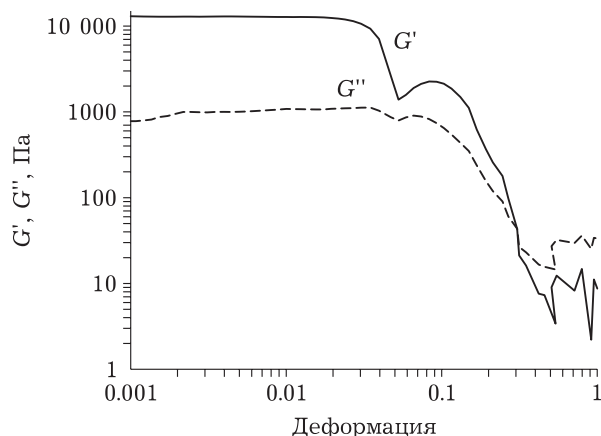


Рис. 1. Развертка по амплитуде деформации в логарифмических координатах. Измерения проводили при температуре 38 °C в режиме заданной амплитуды деформации в интервале от 0.001 до 1. Здесь и на рис. 2, 3: G' – модуль упругости; G'' – модуль потерь.

плитудного теста определен диапазон линейной вязкоупругости (область значений амплитуды деформации, в которой графики модулей накопления и потерь параллельны горизонтальной оси), он составляет 0.0022–0.0242.

На рис. 2. показаны линейные участки зависимостей G' и G'' от амплитуды напряжения в диапазоне от 12.7 до 327.6 Па. Эти значения напряжения соответствуют диапазону деформации от 0.001 до 0.0375 и могут быть использованы в дальнейших кинетических экспериментах. Но поскольку мерой разрушения структуры является величина деформации, удобно работать в режиме осцилляции с контролируемой деформацией, когда в результате измерений определяется величина напряжения сдвига и угла смещения фаз. Для дальнейших экспериментов выбрано значение деформации 0.01.

На рис. 3 представлены временные зависимости модуля упругости G' , модуля потерь (модуль вязкости) G'' и модуля комплексной вязкости ($|\eta^*|$), зарегистрированные при постоянном значении амплитуды деформации ($\gamma = 0.01$) для исследуемой композиции при 38, 30, 20 °C. Общий вид кривых с понижением температуры не изменяется, при этом время выхода величин G' , а также G'' и $|\eta^*|$ на максимум увеличивается с уменьшением температуры. Это связано с увеличением времени гелеобразования. Величины G' и G'' с течением времени изменяются симбатно, для характеристики динамики гелеобразования и оценки структурно-механических свойств формирующегося геля достаточно рассмотреть характер изменения величины модуля упругости G' . Регистрируемые при частоте колебаний ротора 1 Гц и величине деформации 0.01 зависимости модуля упругости G' (наряду с зависимостями модуля потерь G'' и модуля комплексной вязкости $|\eta^*|$), зафиксированные в режиме контроля деформации, могут быть использованы для оценки динамики реологических свойств образца, времени гелеобразования и прочности сформировавшейся структуры. Начальные участки кривых характеризуются замедляющимся ростом величин G' и G'' , далее следует резкий рост значений G' (и G''), который фиксируется после 2300 с (при 38 °C), 3900 с (при 30 °C) и 21 000 с (при 20 °C). Эти значения можно считать началом гелеобразования композиции при данных температурах. Затем кривые с изменяющейся скоростью выходят на максимум, после чего наблюдается некоторое сниже-

ние их значений, связанное, возможно, с частичным испарением растворителя (воды) и некоторой деградацией геля в условиях эксперимента (измерения проводились в течение 24–48 ч). Модуль комплексной вязкости $|\eta^*|$ в этих условиях, напротив, возрастает.

На рис. 4 представлены зависимости, отражающие кинетику модуля упругости G' для исследуемого гелеобразующего состава при температурах 38, 30, 20 °С. С ростом температуры сокращается время образования геля, а также повышается прочность сформированной структуры, о чем свидетельствует некоторое увеличение максимального значения величины G' при 38 и 30 °С по сравнению с максимумом кривой, полученной при 20 °С. С течением времени, по мере протекания реакции, происходит сшивка неорганического компонента, формируется упрочняющаяся трехмерная структура – гель. На кинетической зависимости модуля упругости G' время достижения максимума (т. е. время

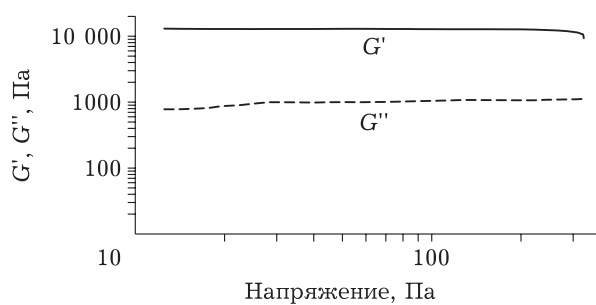


Рис. 2. Развертка по амплитуде напряжения в логарифмических координатах. Измерения проводили при температуре 38 °С в режиме заданной амплитуды деформации; представленный диапазон значений напряжения соответствует деформации от 0.001 до 0.0375. Обозн. см. рис. 1.

формирования геля максимальной прочности) составляет 21 000 с (для 38 °С), 44 760 с (для 30 °С) и 149 070 с (для 20 °С). Максимальные значения G' равны 33 779, 32 805 и 24 404 Па для 38, 30, 20 °С соответственно.

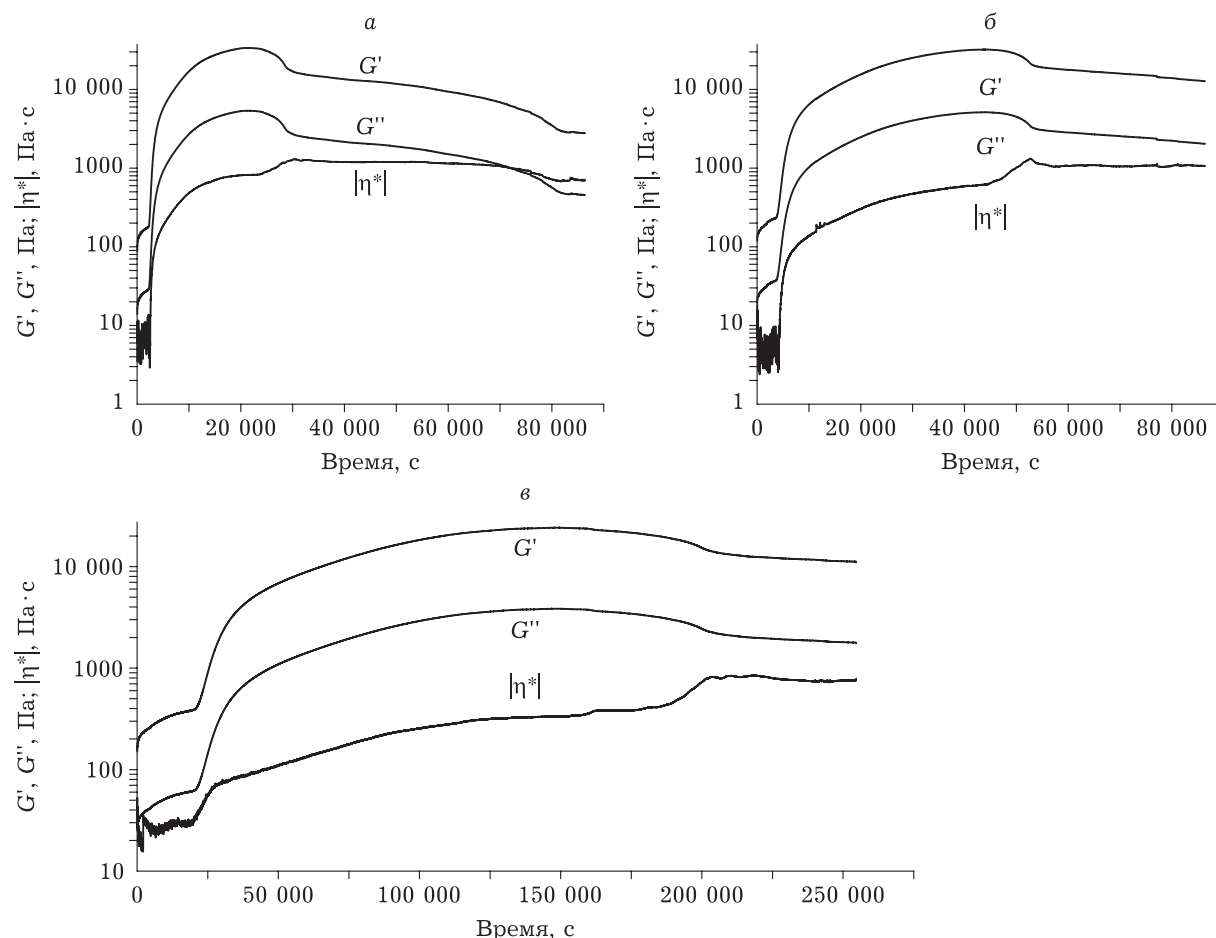


Рис. 3. Временные зависимости модуля упругости (G'), модуля потерь (G'') и модуля комплексной вязкости ($|\eta^*|$), полученные в осцилляционном режиме при частоте 1 Гц и постоянном значении (0.01) амплитуды деформации при температурах: 38 (а), 30 (б) и 20 °С (в).

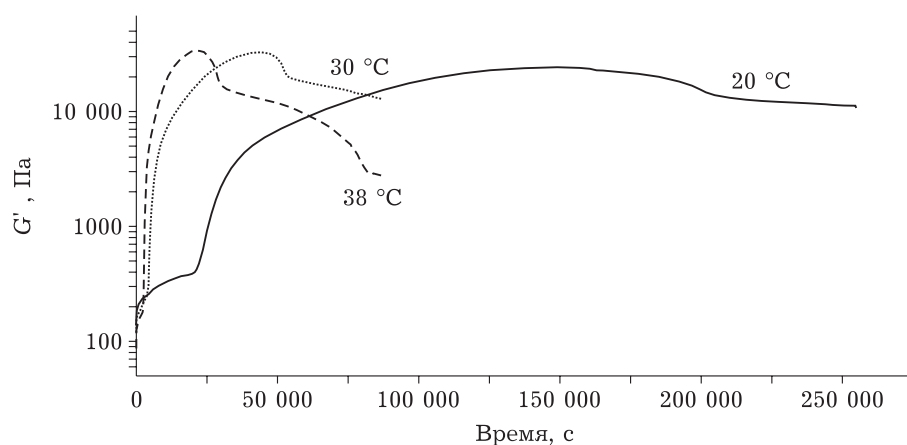


Рис. 4. Кинетика модуля упругости (G') при 38, 30, 20 °C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для низкотемпературного геолообразующего состава на неорганической основе проведены реокинетические эксперименты в осцилляционном режиме. По результатам амплитудного теста определен диапазон линейной вязкоупругости и выбрано значение амплитуды деформации для дальнейших измерений. Получены временные зависимости модуля упругости G' , модуля потерь G'' и модуля комплексной вязкости $|\eta^*|$, из анализа которых определены точки начала гелеобразования и времена формирования максимально прочной структуры при различных температурах. Охарактеризована кинетика процесса и прочность сформировавшейся структуры, определены максимальные значения модуля упругости в зависимости от температуры.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтунина Л. К., Кувшинов В. А., Стасьева Л. А., Кувшинов И. В., Козлов В. В. Нефевытесняющая композиция ПАВ с регулируемой вязкостью для увеличения нефтеотдачи залежей высоковязких нефтей // Георесурсы. 2016. Т. 18, № 4–1. С. 281–288.
- Алтунина Л. К., Кувшинов В. А., Кувшинов И. В., Стасьева Л. А., Чертенков М. В., Шкрабук Л. С., Андреев Д. В. Физико-химические и комплексные технологии увеличения нефтеотдачи пермо-карбоновой залежи высоковязкой нефти Усинского месторождения // Нефтяное хозяйство. 2017. № 7. С. 26–29.
- 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.
- Alvarado V., Manrique E. Enhanced oil recovery: an update review // Energies. 2010. Vol. 3, No. 9. P. 1529–1575.
- Ружин Л. М., Морозюк О. А., Дуркин С. М. Особенности и инновационные направления освоения ресурсов высоковязких нефтей // Нефтяное хозяйство. 2013. № 8. С. 51–53.
- Mukherjee S., Skrettingland K., Stavland A., Altunina L., Reimann S., Dillen M., Robøle B. Validation and enchainment of an inorganic aluminium-carbamide gel system for in-depth and near wellbore conformance control // Proceedings – SPE Symposium on Improved Oil Recovery. 2020. Vol. 2020-August. Art. 162753.
- Altunina L. K., Kuvshinov V. A., Stasyeva L. A., Alekseev V. N. Improved cyclic-steam well treatment using thermoreversible polymer gels // Smart Fields, Smart Wells and Smart Technologies / I. Lakatos (Ed.). Budapest: Akadémiai Kiadó, 2007. P. 75–82. (Progress in Oilfield Chemistry; 7).
- Altunina L. K., Kuvshinov V. A., Stasyeva L. A. Effect of in situ generated CO_2 and alkaline buffers on rheological properties of high viscosity oils // Advances in Incremental Petroleum Production / I. Lakatos (Ed.). Budapest: Akadémiai Kiadó, 2003. P. 123–132. (Progress in Mining and Oilfield Chemistry; 5).
- Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. М.: КолосС, 2003. 311 с.
- Малкин А. Я. Основы реологии. СПб.: Профессия, 2018. 334 с.