

## ГИДРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В НАСЫЩЕННЫХ ГЕОСРЕДАХ

Оригинальная статья

УДК 622.276.1/4.001

<https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2024-15-3.art3>

### Описание нелинейно-вязких и вязкоупругих свойств раствора полиакриламида при нагрузке

В.А. Иктисанов<sup>1</sup>✉, Н.А. Гордиманов<sup>1</sup>, А.В. Иктисанов<sup>2</sup>, К.Г. Сахабутдинов<sup>3</sup>

1 - Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

2 – Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

3 – ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина, Бугульма, Россия

**Аннотация.** *Актуальность.* В настоящее время остается актуальной задача описания реологического поведения вязкоупругих и нелинейно-вязких свойств жидких и твердообразных материалов. Для успешного применения полимерных систем для повышения нефтеотдачи пластов, приготовления жидкостей гидроразрыва и буровых растворов необходимо знание их реологических свойств. *Цель работы.* Определение нелинейно-вязких и вязкоупругих свойств раствора полиакриламида. *Материалы и методы.* Предпринята попытка описания реологического поведения раствора полиакриламида в зависимости от скорости сдвига и от времени нагружения. Для описания установившихся напряжений при различных скоростях сдвига использовалась биномиальная реологическая модель, которая показала высокую степень точности. Для описания напряжения от времени предложено использовать численное решение системы двух дифференциальных уравнений, представляющих собой известные уравнения Максвелла и Кельвина–Фойгта. Для описания начального участка кривых при времени менее 0,05 с использовалась модель с переменным модулем упругости. *Результаты.* Достигнута высокая степень соответствия экспериментальных и расчетных напряжений при времени более 0,05 с. Общее решение достигается сшиванием двух решений через сдвиг и напряжение. Обнаружены взаимосвязи с высоким коэффициентом корреляции между модулями упругости и вязкостями Максвелла и Кельвина в зависимости от напряжения и скорости сдвига. *Выводы.* Показано, что наряду с «обычной» скоростью сдвига, определяемой через вращение цилиндра вискозиметра, необходимо учитывать дополнительную скорость сдвига, вызванную изменением напряжения во времени. Именно при помощи данного подхода достигается максимум напряжений и его перемещение в зависимости от скорости сдвига. Замечено, что дополнительная скорость сдвига возникает сразу после приложения напряжения, а не в момент падения напряжения, как это принято считать.

**Ключевые слова:** вязкоупругие свойства, нелинейно-вязкие свойства, раствор полимера, модуль упругости, сдвиг, максимум напряжения, последствие, релаксация

✉ Иктисанов Валерий Асхатович, e-mail: [iktisanov\\_va@pers.spmi.ru](mailto:iktisanov_va@pers.spmi.ru)

© Иктисанов В.А., Гордиманов Н.А., Иктисанов А.В., Сахабутдинов К.Г., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

**Финансирование:** источники финансирования отсутствовали.

**Для цитирования:** Иктисанов В.А., Гордиманов Н.А., Иктисанов А.В., Сахабутдинов К.Г. Описание нелинейно-вязких и вязкоупругих свойств раствора полиакриламида при нагрузке // Актуальные проблемы нефти и газа. 2024. Т. 15, № 3. С. 232–247. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2024-15-3.art3>

### Введение

В нефтяной промышленности широко используются растворы полимеров при заводнении пластов в качестве физико-химических методов увеличения коэффициента извлечения нефти [1–3], при приготовлении жидкостей гидро-разрыва и буровых растворов [4]. Задачей полимерного заводнения является повышение коэффициента охвата за счет блокировки высокопроницаемых пропластков, промытых водой [5–7]. Различают потокоотклоняющие технологии, основанные на снижении проницаемости и блокировки промытых зон [8, 9], и технологии выравниванию профиля приемистости, действующие за счет увеличения вязкости закачиваемой воды, а также их комбинации [10–12]. В первом случае часто используют сшитые полимерные системы и полимерно-гелевые системы, которые, попадая в пласт, создают дополнительное сопротивление движению нагнетаемой воды, что приводит к изменению фронта заводнения.

Частично гидролизованый полиакриламид (ПАА), представляющий собой синтетический полимер с гибкой цепной структурой, является одним из наиболее широко применяемых полимеров для увеличения нефтеотдачи [13–15]. Различными авторами замечено, что чем выше вязкость раствора ПАА, тем больший эффект достигается за счет выравнивания фронта вытеснения [9, 11, 16]. При этом высокая молекулярная масса ПАА приводит к его большей деструкции при движении в пористой среде. Причиной этого является

разрушение связей полимера при его продвижении в периодических сужениях и расширениях фильтрационных каналов, что характерно для терригенных коллекторов. Кроме деструкции полимера наблюдается еще один немаловажный эффект, связанный с возникновением дополнительного фильтрационного сопротивления за счет вязкоупругих свойств, что значительно снижает подвижность и повышает эффективность технологии [2, 5, 8].

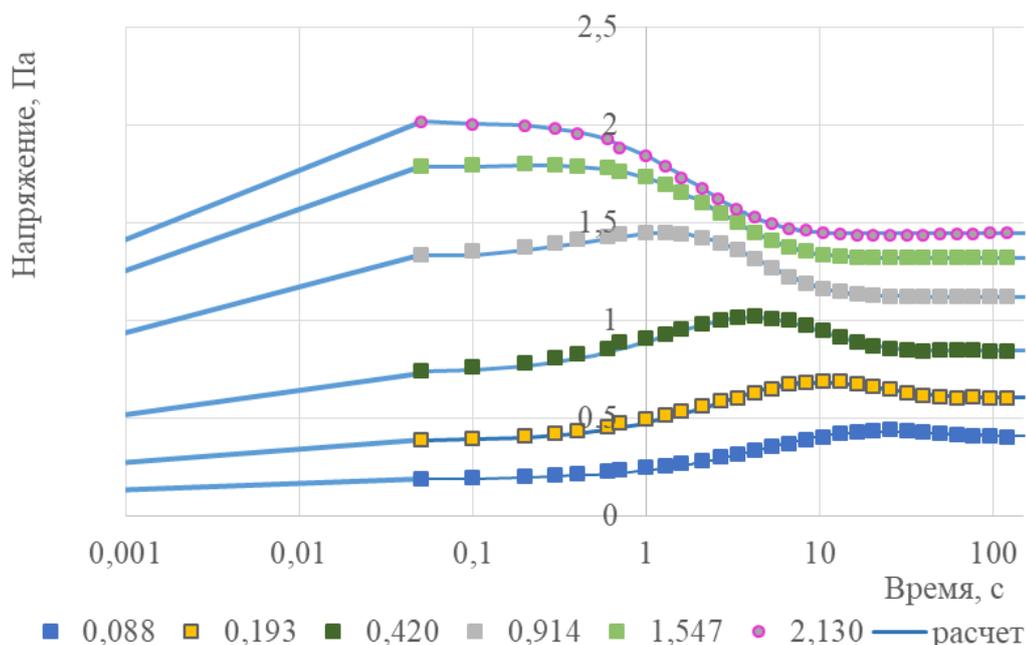
Впервые влияние вязкоупругих свойств жидкостей на процесс фильтрации в пористой среде отмечали Христианович С.А. и Молокович М.А., которые разработали теорию релаксационной фильтрации [17]. В целом вместо этого термина, вероятно, более правильным было бы использовать термин «вязкоупругая фильтрация», так как основой данного типа фильтрации являются: релаксация напряжений и задержка деформаций, которые обусловлены проявлением вязкоупругих свойств. Причем, время релаксации напряжений обычно невелико и им можно пренебречь, а основное влияние оказывает задержка деформации [18].

Для успешного применения полимерных систем для повышения нефтеотдачи пластов кроме знания специфики горно-геологических условий (пористость, проницаемость, температура, насыщенность и др.) необходимо знание реологических свойств закачиваемых систем. Именно этой цели определения нелинейно-вязких и вязкоупругих свойств раствора ПАА посвящена данная работа.

**Реологические исследования**

Исследования 0,5%-го раствора ПАА выполнялись на высокоточном ротационном вискозиметре «Mettler LH-40». Суть исследований заключалась в записи величины напряжения в зависимости от времени и от скорости сдвига. Температура исследований была близка

к пластовой температуре и составляла 30,5 °С. Замечено, что при малых скоростях сдвига наблюдается чистое запаздывание напряжения, а при больших – существование максимума (рис. 1). С ростом скорости сдвига максимум увеличивается и смещается влево по оси времени.



**Рис. 1.** Зависимость деформационных кривых напряжения от времени при различных скоростях сдвига (параметр кривых – скорость сдвига, 1/с)

**Fig. 1.** Dependence of deformation stress curves on time at different shear rates (parameter of the curves – the shear rate, 1/s)

Полученные тенденции не являются новыми. Экспериментальные исследования, впервые описанные Ребиндером П.А., Трапезниковым А.А., Виноградовым Г.В., а впоследствии и другими многочисленными авторами, свидетельствуют, что при течении Куэтта для различных дисперсных и полимерных систем характерно монотонное увеличение напряжения до некоторого установившегося значения, а также существование максимума напряжения или

наличие нескольких максимумов [19, 20]. Заметим, что большинство вязкоупругих реологических моделей не позволяют описать максимум напряжений. Исключение составляют лишь обобщенные модели Максвелла, Кельвина–Фойгта, а также модель Зубчанинова В.Г. Однако в этих многоэлементных моделях используется дискретный спектр времен релаксации, что значительно усложняет понимание физической сути процесса.

Существование максимума или максимумов напряжения традиционно объясняется достижением некоторого критического значения напряжения, после которого происходит разрыв сплошности и реализуется сдвиг, приводящий к падению напряжения. Наличие максимума при исследовании твердообразных материалов на растяжение связывают с появлением шейки, ослабляющей сечение образца перед разрушением. Однако наличие максимума характерно и для других типов течений и деформаций, например, после начала закачки с постоянной скоростью керосина в керн, насыщенный керосином [18]. В этом случае трудно предположить наличие разрыва сплошности. Сложно его представить и при наличии затухающих плавных, а не скачкообразных колебаний напряжения, что иногда наблюдается при реологических исследованиях высоковязких нефтей, эмульсий и полимеров на ротационных вискозиметрах. Заметим, что эти затухающие колебания наблюдаются и в повседневной жизни, например, при торможении машины, поезда, колебании пружины и т. д., что является проявлением реологических свойств различных материалов под воздействием нагрузки. Значит, должна существовать иная причина возникновения максимума или нескольких максимумов напряжения на деформационной кривой.

Причину этого явления один из авторов объяснил в своей ранней работе [19] – наличие максимума за счет возникновения дополнительной скорости сдвига к заданной. Известно, что напряжение влияет на сдвиг, о чем свидетельствует упругое последствие, описываемое уравнением Кельвина–Фойгта. В свою очередь, сдвиг влияет на напряжение, что приводит к релаксации напряжений, описываемой уравнением Максвелла. Но эти процессы

обычно исследуют по отдельности. Поэтому была предпринята попытка одновременного учета взаимовлияния напряжения на сдвиг и сдвига на напряжение, что достигается за счет подключения множества элементов Максвелла и Кельвина с течением времени.

Для этого необходимо решать систему двух известных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \mu_m \left( \dot{\gamma} + \dot{\gamma}_k \right) = \tau + T_m \frac{d\tau}{dt} \\ \frac{\tau}{\pm E_k} = \gamma_k + T_k \frac{d\gamma_k}{dt} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – деформация или сдвиг;

$\tau$  – напряжение;

$t$  – время;

$\mu_m$  – вязкость Максвелла;

$E_k$  – коэффициент (модуль) упругости Кельвина;

$\gamma_k$  – сдвиг, определяемый моделью Кельвина–Фойгта;

$T_m = \mu_m/E_m$  – время Максвелла (релаксации напряжений);

$T_k = \mu_k/E_k$  – время Кельвина (последствия).

Как показала практика, данная модель позволяет описать основные черты реологического поведения и в том числе наличие максимума напряжения. Обнаружено, что при определенных условиях возможно появление затухающих вязкоупругих колебаний или, другими словами, наличие упомянутых выше нескольких максимумов напряжения. Модель имеет четыре неизвестных параметра:  $\mu_m$ ,  $E_k$ ,  $T_m$ ,  $T_k$  или  $\mu_m$ ,  $\mu_k$ ,  $E_m$ ,  $E_k$ , если выразить время Максвелла и Кельвина через вязкость и модуль упругости.

Использование данной модели позволило также описать кривые течения исследуемого раствора ПАА во времени при различных скоростях сдвига с высокой степенью точности. Исключение составляет исследование при самой низкой скорости сдвига, когда не было достигнуто установившееся напряжение. Первоначальная настройка модели проводилась по вязкости Максвелла  $\mu_m$ , определяемой как отношение установившегося во времени напряжения к скорости сдвига. Параметры  $\mu_k$ ,  $E_m$ ,  $E_k$  подбирались из условия достижения минимальной суммы квадратов между расчетными и измеренными напряжениями.

Для каждой кривой были подобраны свои коэффициенты вязкости и упругости (табл. 1), но как оказалось, эти коэффициенты с высокой степенью точности коррелируют с напряжением и скоростью сдвига. Так, время Максвелла и модуль упругости Кельвина зависят от установившегося напряжения

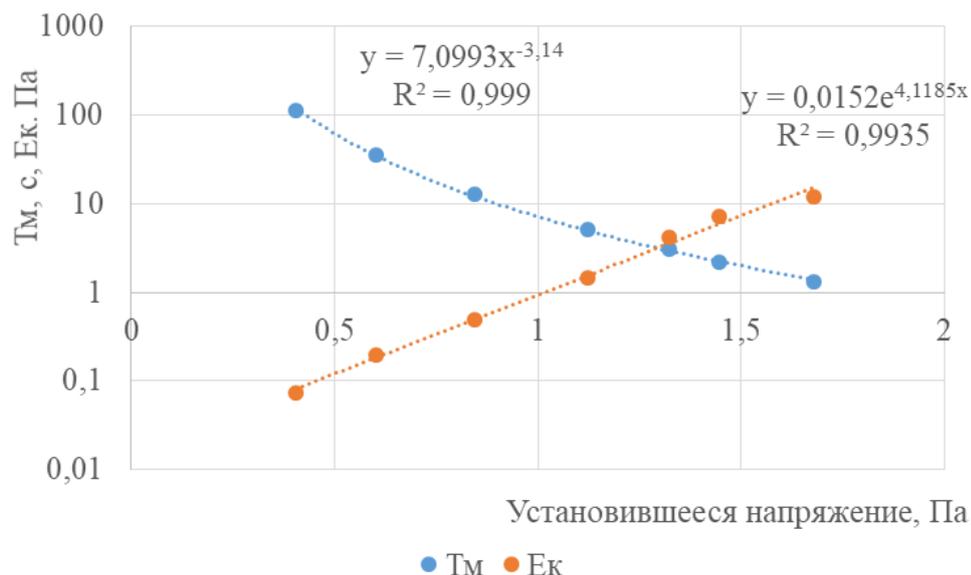
(рис. 2), а вязкость Кельвина и время Кельвина зависят от скорости сдвига (рис. 3). Причем подчеркнем, что это – расчетные значения, полученные для экспериментальных данных при различных скоростях сдвига. Поэтому неожиданное достижение высоких коэффициентов корреляции свидетельствует об установленной тенденции.

Для исследуемого раствора ПАА обнаружилось неравенство  $T_m > T_k$ , что свидетельствует о преобладающем, более быстром влиянии скорости сдвига над релаксацией напряжений. При больших скоростях сдвига это отличие нивелируется. С увеличением скорости вращения цилиндра модуль упругости Кельвина возрастает, а вязкость Максвелла, т. е. по сути, эффективная вязкость жидкости уменьшается. Уменьшение времени Максвелла (релаксации) с увеличением прикладываемого напряжения свидетельствует об увеличении свойств жидкости в сравнении со свойствами твердого тела.

**Табл. 1.** Результаты описания кривых течения раствора полиакриламида

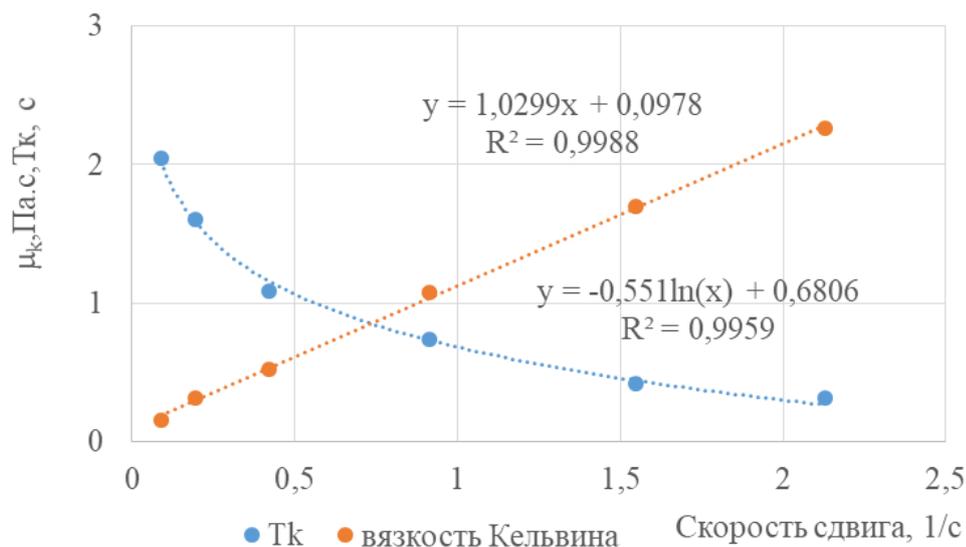
**Table 1.** Results of the description of flow curves of the polyacrylamide solution

Скорость сдвига, 1/с	Установившееся напряжение, Па	Модуль упругости Кельвина $E_k$ , Па	Модуль упругости Максвелла, $E_m$ , Па	Вязкость Кельвина $\mu_k$ , Па·с	Вязкость Максвелла, $\mu_m$ , Па·с	Время Кельвина, $T_k$ , с	Время Максвелла, $T_m$ , с	Начальный сдвиг
0,088	0,4048	0,073	0,040	0,150	4,600	2,05	114	0,004
0,193	0,6035	0,196	0,087	0,314	3,127	1,60	35,8	0,010
0,420	0,8449	0,484	0,155	0,525	2,012	1,09	12,9	0,021
0,914	1,122	1,464	0,244	1,079	1,228	0,74	5,04	0,046
1,547	1,322	4,121	0,282	1,703	0,855	0,41	3,04	0,077
2,130	1,446	7,190	0,313	2,267	0,679	0,32	2,17	0,107
3,879	1,679	11,98	0,328	2,673	0,4328	0,22	1,32	0,194



**Рис. 2.** Зависимости времени Максвелла и модуля упругости Кельвина от установившегося напряжения сдвига

**Fig. 2.** Dependences of Maxwell time and Kelvin modulus of elasticity on the steady-state shear stress



**Рис. 3.** Зависимости времени и вязкости Кельвина от скорости сдвига

**Fig. 3.** Dependences of Kelvin time and viscosity on the shear rate

Для описания взаимосвязи между установившимися напряжениями и скоростью сдвига использовалась биномиальная модель (см. рис. 4), которая имеет следующий вид:

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_* \left( 1 + \left( \frac{\mu \dot{\gamma}}{\tau_*} \right)^{1/n} \right)^n, \quad (2)$$

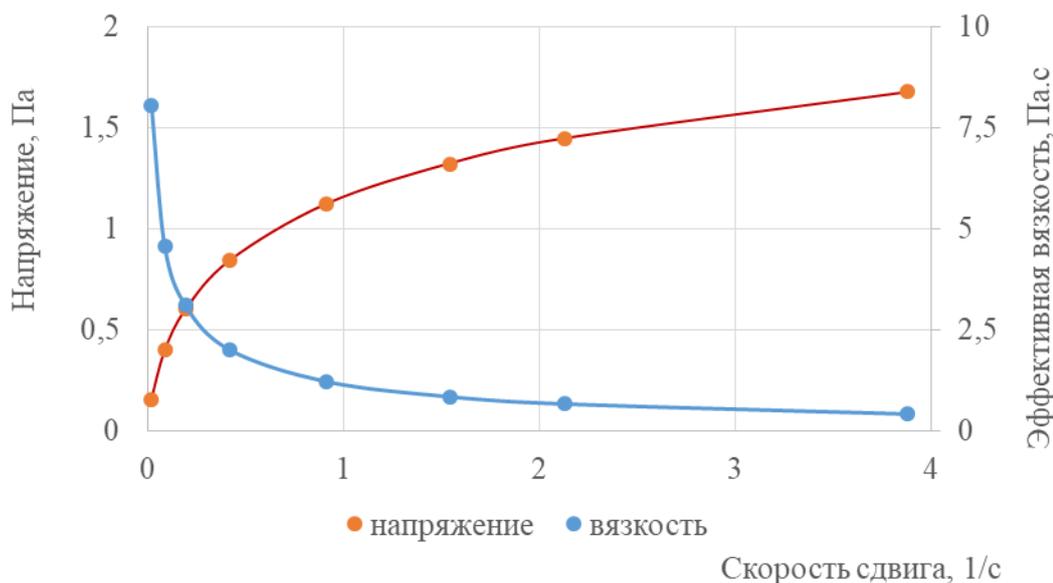


Рис. 4. Представление установившихся напряжений и эффективной вязкости биномиальной моделью

Fig. 4. Steady-state stresses and effective viscosity represented by binomial model

При  $n > 0$  эта модель является моделью Рафферса и описывает вязкопластичные системы. В этом случае  $\tau_* = \tau_0$ , т. е. равно начальному напряжению сдвига,  $\mu_* = \eta_p$  – пластической вязкости. Обнаружено, что при  $n < 0$  биномиальная зависимость характерна для обратных значений параметров и позволяет описать псевдопластичные системы [19]. В этом случае  $\tau_* = \tau_\infty$ , т. е. равно некоему постоянному напряжению при бесконечной скорости сдвига и, по сути, является фиктивным параметром. Но для высокой скорости сдвига реологические исследования теряют смысл из-за возникновения турбулентного режима течения. Другой параметр имеет физический смысл и является вязкостью при малых скоростях сдвига  $\mu_* = \mu_0$ .

Как показали многочисленные исследования [19], уравнение (2) при отрицательной степени позволяет описать с высокой степенью точности самые различные нефти, эмульсии, растворы полимеров, в том числе и исследуемый раствор ПАА. Применение других реостабильных моделей для

рассматриваемого раствора ПАА – Оствальда–де Ваале, Гершеля–Балкли, Сиско, Эллиса, Рейнера–Ривлина, Эйринга, Кросса – не привело к желаемому результату. Коэффициенты модели:  $n = -2,611$ ;  $\tau_\infty = 3,24$ ;  $\mu_0 = 21,74$  Па·с. Отмечается довольно высокое значение вязкости при малой скорости сдвига. По факту в пористой среде за счет вязкоупругих свойств сопротивление движению ПАА будет еще бóльшим, но это уже выходит за рамки данного исследования.

Принципиальным недостатком данных исследований является практически скачкообразное изменение напряжения после начала вращения цилиндра (см. рис. 1). В частности, за 0,05 с произошло увеличение напряжения с 0 до 0,19 Па для самой малой скорости сдвига и с 0 до 2,3 Па для самой высокой скорости сдвига. Чем обусловлен данный скачок – инерционностью датчика вискозиметра или проявлением исключительно упругой деформации на начальном этапе, о чем свидетельствуют различные исследователи, – остается до конца невыясненным.

Одной из версий было возникновение дополнительного напряжения за счет равноускоренного движения ПАА при изменении скорости вращения цилиндра от нулевой до некоторой заданной величины. Для оценки этого влияния использовались уравнения:

$$\dot{\gamma} = \frac{2\omega_1}{1 - \delta^2}, \quad (3)$$

$$\tau_1 = \frac{M}{2\pi l R_1^2}, \quad (4)$$

$$M = maR_1, \quad (5)$$

$$m = \pi\rho(R_2^2 - R_1^2)l, \quad (6)$$

$$\omega_1 = \frac{at}{R_1}, \quad (7)$$

где  $\tau_1$  – напряжение на внутреннем цилиндре ротационного вискозиметра;

$\omega_1$  – угловая скорость вращения внутреннего цилиндра;

$\delta = R_1/R_2$  – величина относительного кольцевого зазора;

$R_1, R_2$  – радиусы внутреннего и внешнего цилиндров;

$l$  – высота цилиндра;

$M$  – момент сил;

$m$  – масса исследуемого образца;

$a$  – ускорение;

$\rho$  – плотность.

Однако рассчитанные напряжения за счет равноускоренного движения получились на порядок меньше экспериментальных напряжений при времени 0,05 с. Эти напряжения фактически и не являлись классическими начальными напряжениями, выше которых начинается течение, так как

при снятии нагрузки их значения стремились к нулю.

Наличие скачка напряжений на начальном этапе привело к необходимости отдельного решения задачи. Именно поэтому для времени больше 0,05 с задавались начальное напряжение и начальный сдвиг (см. табл. 1) для каждой скорости сдвига при решении системы дифференциальных уравнений (1). Итогом аппроксимации являются кривые напряжения на рис. 1 после времени 0,05 с. Полный расчет при задании нулевого начального сдвига и нулевого напряжения практически был невозможен. Отдельное описание изменения напряжения в диапазоне времени 0–0,05 с при помощи вязкоупругой модели также не дало положительного результата. Задача была успешно решена только при использовании модели с переменным модулем упругости (см. рис. 1 в диапазоне времени менее 0,05 с). Для ее решения использовалась уже упомянутая выше биномиальная модель с отрицательным показателем степени. Учитывая совершенно иной процесс, модель была переписана в виде:

$$\tau^{1/n} = \tau_*^{1/n} + (E_*\gamma)^{1/n}. \quad (8)$$

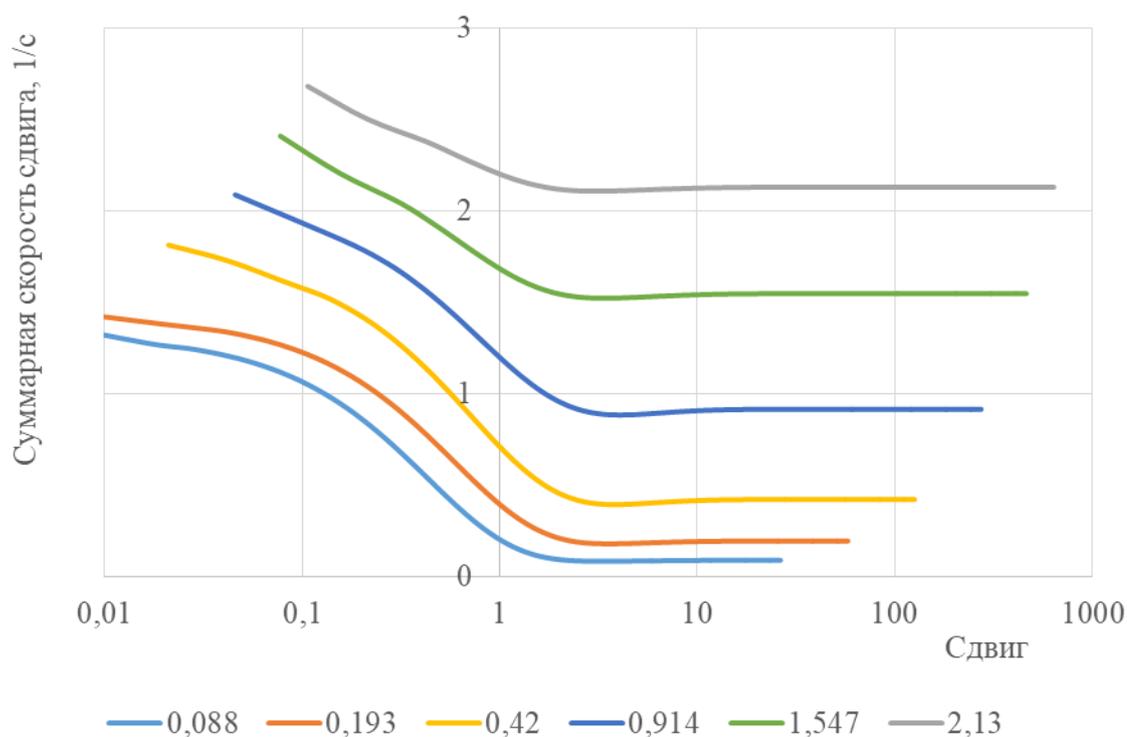
Коэффициенты модели получились следующими:  $n = -0,91$ ;  $\tau_\infty = 2,98$  Па;  $E_0 = 45,11$  Па. Причина использования этой модели заключалась в том, что другие модели – степенная, дробно-линейная, с начальным напряжением сдвига – описывали экспериментальные данные с меньшей степенью точности. Параметр  $\tau_\infty$  в данном случае не лишен физического смысла, так как для раствора ПАА характерно развитие неограниченной деформации.

В итоге, сшиванием двух решений возможно описание нелинейно-вязких и вязкоупругих свойств исследуемого раствора ПАА. Но в целом, для разрешения вопроса по резкому скачку напряжения в начальный момент времени необходимы дополнительные исследования.

### Результаты

Полученные результаты показывают следующее. Скорость сдвига  $\dot{\gamma}_k$ , описываемая уравнением Кельвина-Фойгта, и обусловленный ею сдвиг традиционно относят ко времени последствия, что обусловлено исследованиями по запаздыванию упругого сдвига по окончании нагрузки [20]. Однако при приложении

нагрузки (росте напряжения) должно возникать не запаздывание, а опережение сдвига, соответственно суммарная скорость сдвига должна быть больше. При снижении напряжения после максимума изменяется знак и наблюдается уже традиционное запаздывание сдвига, суммарная скорость сдвига уменьшается. Данные рассуждения подтверждает рис. 5, на котором представлены зависимости суммарной скорости сдвига от сдвига, рассчитанного через произведение скорости сдвига и времени. На начальных участках суммарная скорость сдвига имеет максимальные значения, с течением времени скорость сдвига становится равной скорости, рассчитанной через скорость вращения цилиндра.



**Рис. 5.** Зависимости суммарной скорости сдвига от обычного сдвига, рассчитанного через скорость сдвига и время (параметр кривых – скорость сдвига, 1/с)

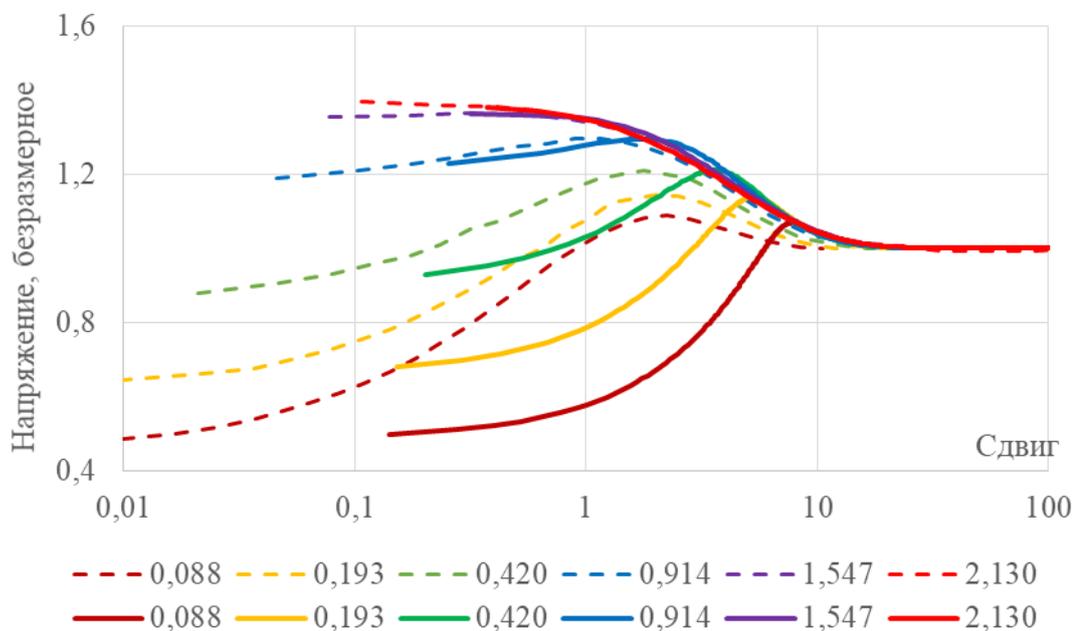
**Fig. 5.** Dependences of the total shear rate on the usual shear calculated through the shear rate and time (parameter of the curves – the shear rate, 1/s)

В результате, отчасти можно согласиться с теми авторами, которые считали, что существование максимума напряжения связано с увеличением деформации, которое они объясняли образованием сужения (шейки) исследуемого твердого материала [21]. Действительно, деформация или сдвиг увеличиваются сверх запланированного, но они увеличиваются максимально на начальном этапе нагружения, а далее только уменьшаются, т. е. дополнительный сдвиг наблюдается сразу же после начала нагружения, а не ближе к концу исследований, как полагали авторы.

В связи с отмеченным выше, следует различать «обычную» скорость сдвига, которая пересчитывается через скорость вращения цилиндра вискозиметра по уравнению (3), и действительную скорость сдвига, обусловленную изменением напря-

жения. Заметим, что в этом нет никакого противоречия и новизны. Как известно, при снятии нагрузки, когда «обычная» скорость сдвига равна нулю, возникают сдвиг (последствие) и дополнительная скорость сдвига. В данных рассуждениях, естественно, не рассматривается методическая погрешность, вызванная применением уравнения (3) для ньютоновской жидкости применительно к нелинейно-вязким жидкостям [19].

В качестве подтверждения отмеченной тенденции отметим интересный факт, полученный при представлении экспериментальных данных в координатах, когда вместо времени вводится суммарный сдвиг с учетом дополнительного сдвига или сдвига по уравнению Кельвина, а напряжения приводятся к безразмерному виду за счет деления на установившиеся значения (рис. 6).



**Рис. 6.** Деформационные кривые напряжения сдвига в безразмерном виде: сплошные кривые – в зависимости от суммарного сдвига; прерывистые кривые – в зависимости от сдвига, как произведение скорости сдвига на время (параметр кривых – скорость сдвига, 1/с)

**Fig. 6.** Deformation curves of the shear stress in dimensionless form: solid curves – depending on the total shear; dash curves – depending on the shear, as the product of the shear rate over time (parameter of the curves – the shear rate, 1/s )

Дополнительно для сравнения на этом же рисунке показаны безразмерные напряжения от «обычного» сдвига. Кривые в полулогарифмических координатах при суммарном сдвиге приобретают упорядоченный вид. Выделяется тенденция изменения максимума кривых, зависящая от суммарного сдвига и напряжения, что объясняет и величину максимума, и его отсутствие при малых напряжениях. При этом для малых напряжений характерно наибольшее различие кривых между «обычным» и суммарным сдвигами. Это может свидетельствовать о том, что материал способен выдерживать кратковременную высокую нагрузку за счет сил упругости, а при меньших нагрузках развивается вязкоупругое течение.

#### **Выводы**

При помощи предложенных ранее биномиальной модели для нелинейно-вязких свойств и модели для вязкоупругих материалов в виде системы двух дифференциальных уравнений выполнено описание результатов вискозиметрических исследований раствора ПАА в зависимости от скорости сдвига и от времени.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Список источников**

1. *Chang H.L., Guo Z., Zhang J.* Polymer flooding: The good, the bad, and the ugly – Lessons learned from field practices // SPE Improved Oil Recovery Conference, Tulsa, Oklahoma, USA, 22–25 April 2024. Paper SPE-218272-MS. <https://doi.org/10.2118/218272-MS>
2. *Kamal M.S., Sultan A.S., Al-Mubaiyedh U.A., Hussein I.A.* Review on polymer flooding: Rheology, adsorption, stability, and field applications of various polymer systems // Polymer Reviews. 2015. Vol. 55, No. 3. P. 491–530. <https://doi.org/10.1080/15583724.2014.982821>
3. *Saboorian-Jooybari H., Dejam M., Chen Z.* Half-century of heavy oil polymer flooding from laboratory core floods to pilot tests and field applications // SPE Canada Heavy Oil Technical

Установлены взаимосвязи с высоким коэффициентом корреляции для модуля упругости Кельвина и времени Максвелла от напряжения, а также для вязкости и времени Кельвина от скорости сдвига.

Показано, что наряду с «обычной» скоростью сдвига, определяемой через вращение цилиндра вискозиметра, необходимо учитывать возникновение дополнительной скорости сдвига, вызванной изменением напряжения. Дополнительный сдвиг обуславливается известным уравнением Кельвина–Фойгта, но учитывает не только последствие по запаздыванию упругого сдвига, но и опережение сил упругости. Замечено, что наибольшее различие кривых между «обычным» и суммарным сдвигами характерно для малых напряжений.

Для описания начального участка времени менее 0,05 с использовалась модель с переменным модулем упругости. Общее описание достигается сшиванием двух упомянутых подходов через сдвиг и напряжение. В целом, необходимо более детальное выяснение причин начальных скачков напряжений, записываемых вискозиметром.

Conference, Calgary, Alberta, Canada, 9–11 June 2015. Paper SPE-174402-MS. <https://doi.org/10.2118/174402-MS>

4. *Двойников М.В., Кучин В.Н., Минцаев М.Ш.* Разработка вязкоупругих систем и технологии изоляции водоносных горизонтов с аномальными пластовыми давлениями при бурении нефтегазовых скважин // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 57–65. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.7>

5. *Бондаренко А.В.* Экспериментальное сопровождение опытно-промышленных работ по обоснованию технологии полимерного заводнения в условиях высокой минерализации пластовых и закачиваемых вод: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 25 с.

6. *Иманбаев Б.А., Сагындииков М.С., Кушекеев Р.М., Таджибаев М.О.* Оценка и научное обоснование применения полимерного заводнения на месторождении Узень // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2022. Т. 4, № 1. С. 9–27. <https://doi.org/10.54859/kjogi104852>

7. *Кетова Ю.А., Бай Б., Казанцев А.Л., Галкин С.В.* Анализ эффективности применения заводнения нефтеносных пластов на основе водорастворимого полиакриламида и предварительно сшитых полиакриламидных частиц // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2019. Т. 19, № 3. С. 251–262. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2019.3.5>

8. *Черепанова Н.А., Усольцев А.В., Кочетов А.В.* Исследования эффективности полимерного заводнения для объектов высоковязкой нефти сеноманского горизонта // Экспозиция Нефть Газ. 2022. № 6(91). С. 51–55. <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2022-6-51-55>

9. *Gbadamosi A., Patil S., Kamal M.S. et al.* Application of polymers for chemical enhanced oil recovery: A review // Polymers. 2022. Vol. 14, No. 7. P. 1433. <https://doi.org/10.3390/polym14071433>

10. *Wang D., Cheng J., Xia H. et al.* Viscous-elastic fluids can mobilize oil remaining after water-flood by force parallel to the oil-water interface // SPE Asia Pacific Improved Oil Recovery Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 8–9 October 2001. Paper SPE-72123-MS. <https://doi.org/10.2118/72123-MS>

11. *Колесник С.В., Ефимов М.Э.* Интенсификация добычи нефти посредством применения жидкости гидроразрыва пласта на основе полиакриламида // Нефтепромысловое дело, 2023. № 9(657). С. 43–47. [https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-9\(657\)-43-47](https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-9(657)-43-47)

12. *Сургучев М.Л., Горбунов А.Т., Забродин Д.П. и др.* Методы извлечения остаточной нефти. М.: Недра, 1991. 347 с.

13. *Liu F., Wang J., Long S. et al.* Experimental and modeling study of the viscoelastic-viscoplastic deformation behavior of amorphous polymers over a wide temperature range // Mechanics of Materials. 2022. Vol. 167. P. 104246. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2022.104246>

14. *Tapias Hernandez F.A., Lizcano Niño J.C., Zannoni Lopes Moreno R.B.* Effects of salts and temperature on rheological and viscoelastic behavior of low molecular weight HPAM solutions // Revista Fuentes El Reventón Energético. 2018. Vol. 16, No. 1. P. 19–35. <https://doi.org/10.18273/revfue.v16n1-2018002>

15. *Tayeb A., Arfaoui M., Zine A. et al.* On the nonlinear viscoelastic behavior of rubber-like materials: Constitutive description and identification // International Journal of Mechanical Sciences. 2017. Vol. 130. P. 437–447. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.06.032>

16. Xiang G., Yin D., Meng R., Cao C. Predictive model for stress relaxation behavior of glassy polymers based on variable-order fractional calculus // *Polymers for Advanced Technologies*. 2021. Vol. 32, No. 2. P. 703–713. <https://doi.org/10.1002/pat.5123>

17. Молокович Ю.М., Марков А.И., Давлетиин А.А., Куштанова Г.Г. Пьезометрия окрестности скважины. Теоретические основы. Казань: ДАС, 2000. 203 с.

18. Иктисанов В.А. Изучение особенностей релаксационной фильтрации жидкости. Саарбрюккен: Palmarium Academic Publishing, 2012. 125 с.

19. Иктисанов В.А. Определение фильтрационных параметров пластов и реологических свойств дисперсных систем при разработке нефтяных месторождений. М.: ВНИИОЭНГ, 2001. 212 с.

20. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. М.: Химия, 1980. 320 с.

21. Иктисанов В.А. Новое решение старой проблемы: описание характерных особенностей реологического поведения вязкоупругих сред // *Нефтепромысловое дело*. 2024. № 7(667). С. 53–60.

#### **Информация об авторах**

*Валерий Асхатович Иктисанов* – д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия; SPIN-код: 3873-9777, <https://orcid.org/0009-0004-4295-909X>; e-mail: [iktisanov\\_va@pers.spmi.ru](mailto:iktisanov_va@pers.spmi.ru)

*Никита Андреевич Гордиманов* – студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0009-0000-7078-5606>; e-mail: [gordimanov02@mail.ru](mailto:gordimanov02@mail.ru)

*Альберт Валерьевич Иктисанов* – студент, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия; <https://orcid.org/0009-0001-0618-2381>; e-mail: [a.iktisanov@yandex.ru](mailto:a.iktisanov@yandex.ru)

*Камиль Гаптенурович Сахабутдинов* – ведущий специалист, ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина Бугульма, Россия; e-mail: [kgs@tatnipi.ru](mailto:kgs@tatnipi.ru)

**Поступила в редакцию 27.06.2024**

## HYDROTHERMODYNAMIC AND GEOMECHANICAL MODELING OF THE PROCESSES IN SATURATED GEOLOGICAL MEDIA

Original article

<https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2024-15-3.art3>

### Description of nonlinear viscous and viscoelastic properties of polyacrylamide solution under loading

V.A. Iktissanov<sup>1</sup>✉, N.A. Gordimanov<sup>1</sup>, A.V. Iktissanov<sup>2</sup>, K.G. Sakhabutdinov<sup>3</sup>

1 – Empress Catherine the Great Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

2 – Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

3 – PJSC Tatneft, Bugulma, Russia

**Abstract.** *Background.* Currently, the solution of the problem of describing the rheological behavior of viscoelastic and nonlinear viscous properties of liquid and solid-like materials is far from perfect. For successful application of polymer systems to enhance oil recovery and for preparation of fracturing fluids and drilling fluids, knowledge of their rheological properties is necessary. *Objective.* To determine the nonlinear viscous and viscoelastic properties of polyacrylamide solution. *Material and methods.* We made an attempt to describe the rheological behavior of a polyacrylamide solution depending on the shear rate and on the loading time. A binomial rheological model was used to describe steady-state stresses at different shear rates, which showed a high degree of accuracy. To describe the stress from time, we proposed to use a numerical solution of a system of two differential equations representing the well-known Maxwell and Kelvin–Voigt equations. To describe the initial section of the curves for times less than 0.05 s, a model with a variable modulus of elasticity was used. *Results.* A high degree of correspondence of experimental and design stresses with a time of more than 0.05 s was achieved. The overall solution was achieved by combining two solutions based on shear rate and shear stress. Relationships with high correlation coefficients were found between the elastic modulus, viscosities of Maxwell and Kelvin and the shear stress and shear rate. *Conclusions.* We show that in addition to the “ordinary” shear rate determined by the rotation of the viscometer cylinder, it is necessary to consider an additional shear rate due to stress changes in time. Due to this approach, a description of the stress maximum and its displacement from the shear rate can be made. We note that the additional shear rate occurred immediately after the start of loading, rather than at the time of stress drop, as commonly believed.

**Keywords:** viscoelastic properties, nonlinear viscous properties, polymer solution, modulus of elasticity, shear, shear stress maximum, aftereffect, relaxation

**Funding:** the work received no funding.

**For citation:** Iktissanov V.A., Gordimanov N.A., Iktissanov A.V., Sakhabutdinov K.G. Description of nonlinear viscous and viscoelastic properties of polyacrylamide solution under loading. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2024. Vol. 15, No. 3. P. 232–247. (In Russ.). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2024-15-3.art3>

---

✉ Valery A. Iktissanov, e-mail: [iktisanov\\_va@pers.spmi.ru](mailto:iktisanov_va@pers.spmi.ru)

© Iktissanov V.A., Gordimanov N.A., Iktissanov A.V., Sakhabutdinov K.G., 2024



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

### References

1. Chang H.L., Guo Z., Zhang J. Polymer flooding: The good, the bad, and the ugly – Lessons learned from field practices. In: *SPE Improved Oil Recovery Conference*, Tulsa, Oklahoma, USA, 22–25 April 2024. Paper SPE-218272-MS. <https://doi.org/10.2118/218272-MS>
2. Kamal M.S., Sultan A.S., Al-Mubaiyedh U.A., Hussein I.A. Review on polymer flooding: Rheology, adsorption, stability, and field applications of various polymer systems. *Polymer Reviews*. 2015. Vol. 55, No. 3. P. 491–530. <https://doi.org/10.1080/15583724.2014.982821>
3. Saboorian-Jooybari H., Dejam M., Chen Z. Half-century of heavy oil polymer flooding from laboratory core floods to pilot tests and field applications. In: *SPE Canada Heavy Oil Technical Conference*, Calgary, Alberta, Canada, 9–11 June 2015. Paper SPE-174402-MS. <https://doi.org/10.2118/174402-MS>
4. Dvoynikov M.V., Kuchin V.N., Mintzaev M.Sh. Development of viscoelastic systems and technologies for isolating water-bearing horizons with abnormal formation pressures during oil and gas wells drilling. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 247. P. 57–65. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.7>
5. Bondarenko A.V. Experimental support of pilot works on substantiation of polymer flooding technology in conditions of high salinity of formation and injected water. Cand. Sci. diss. abstr. Moscow, 2017. 25 p. (In Russ.).
6. Imanbayev B.A., Sagyndikov M.S., Kushekov R.M., Tajibayev M.O. Evaluation and scientific justification of polymer flooding application in the Uzen oilfield. *Kazakhstan Journal for Oil & Gas Industry*. 2022. Vol. 4, No. 1. P. 9–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.54859/kjogi104852>
7. Ketova Yu.A., Bai B., Kazantsev A.L., Galkin S.V. Analysing the efficiency of flooding oil reservoirs with water-soluble polyacrylamide and preliminary cross-linked polyacrylamide particles. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2019. Vol. 19, No. 3. P. 251–262. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2019.3.5>
8. Cherepanova N.A., Usoltsev A.V., Kochetov A.V. Studying polymer flooding performance in Cenomanian reservoirs of highly viscous oil. *Exposition Oil Gas*. 2022. No. 6(91). P. 51–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2022-6-51-55>
9. Gbadamosi A., Patil S., Kamal M.S. et al. Application of polymers for chemical enhanced oil recovery: A review. *Polymers*. 2022. Vol. 14, No. 7. P. 1433. <https://doi.org/10.3390/polym14071433>
10. Wang D., Cheng J., Xia H. et al. Viscous-elastic fluids can mobilize oil remaining after water-flood by force parallel to the oil-water interface. In: *SPE Asia Pacific Improved Oil Recovery Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia, 8–9 October 2001. Paper SPE-72123-MS. <https://doi.org/10.2118/72123-MS>
11. Kolesnik S.V., Efimov M.E. Intensification of oil production through the use of hydraulic fracturing fluid based on polyacrylamide. *Oilfield Engineering*. 2023. No. 9(657). P. 43–47. (In Russ.). [https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-9\(657\)-43-47](https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-9(657)-43-47)
12. Surguchev M.L., Gorbunov A.T., Zabrodin D.P. et al. *Methods of Residual Oil Recovery*. Moscow: Nedra, 1991. 347 p. (In Russ.).

13. Liu F., Wang J., Long S. et al. Experimental and modeling study of the viscoelastic-viscoplastic deformation behavior of amorphous polymers over a wide temperature range. *Mechanics of Materials*. 2022. Vol. 167. P. 104246. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2022.104246>
14. Tapias Hernandez F.A., Lizcano Niño J.C., Zaroni Lopes Moreno R.B. Effects of salts and temperature on rheological and viscoelastic behavior of low molecular weight HPAM solutions. *Revista Fuentes El Reventón Energético*. 2018. Vol. 16, No. 1. P. 19–35. <https://doi.org/10.18273/revfue.v16n1-2018002>
15. Tayeb A., Arfaoui M., Zine A. et al. On the nonlinear viscoelastic behavior of rubber-like materials: Constitutive description and identification. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017. Vol. 130. P. 437–447. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.06.032>
16. Xiang G., Yin D., Meng R., Cao C. Predictive model for stress relaxation behavior of glassy polymers based on variable-order fractional calculus. *Polymers for Advanced Technologies*. 2021. Vol. 32, No. 2. P. 703–713. <https://doi.org/10.1002/pat.5123>
17. Molokovich Yu.M., Markov A.I., Davletshin A.A., Kushtanova G.G. *Piezometry of Well Vicinity. Theoretical Foundations*. Kazan: DAS, 2000. 203 p. (In Russ.).
18. Iktisanov V.A. *Study of the Features of Relaxation Fluid Filtration*. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2012. 125 p. (In Russ.).
19. Iktisanov V.A. *Determination of Filtration Parameters of Reservoirs and Rheological Properties of Disperse Systems in the Development of Oil Fields*. Moscow: VNIIOENG, 2001. 212 p. (In Russ.).
20. Uriev N.B. *Highly Concentrated Disperse Systems*. Moscow: Khimiya, 1980. 320 p. (In Russ.).
21. Iktissanov V.A. A new solution to the old problem: description of the characteristic specific features of the viscous-elastic media rheological behavior. *Oilfield Engineering*. 2024. No. 7(667). P. 53–60. (In Russ.).

#### **Information about the authors**

Valery A. Iktissanov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Empress Catherine the Great Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0004-4295-909X>; e-mail: [iktissanov\\_va@pers.spmi.ru](mailto:iktissanov_va@pers.spmi.ru)

Nikita A. Gordimanov – Student, Empress Catherine the Great Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0000-7078-5606>; e-mail: [gordimanov02@mail.ru](mailto:gordimanov02@mail.ru)

Albert V. Iktissanov – Student, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia; <https://orcid.org/0009-0001-0618-2381>; e-mail: [a.iktissanov@yandex.ru](mailto:a.iktissanov@yandex.ru)

Kamil G. Sakhabutdinov – Leading Specialist, PJSC Tatneft, Bugulma, Russia; e-mail: [kgs@tatnipi.ru](mailto:kgs@tatnipi.ru)

**Received 27.06.2024**