

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2024.3.249-269>

EDN SGKIZL

УДК 622.276.61

Особенности реологических свойств геля полиакриламида при его нагружении и разгрузке

¹Иктисанов В.А., ¹Гордиманов Н.А., ²Иктисанов А.В., ³Сахабутдинов К.Г.

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

²«Московский физико-технический институт» (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

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

Features of rheological properties of polyacrylamide gel during loading and unloading

¹V.A. Iktisanov, ¹N.A. Gordimanov, ²A.V. Iktisanov, ³K.G. Sahabutdinov

¹"St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II", St. Petersburg, Russia

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

³TatNIPIneft Institute - PJSC TATNEFT, Bugulma, Russia

E-mail: iktisanov_va@pers.spmi.ru

Аннотация. При помощи предложенных ранее реологических моделей выполнено описание основных характеристик растворов ПАА с высокой степенью точности при нагружении и разгрузке. Показано, что описание кривых течения можно выполнять как при задании постоянной вязкости для некоторой скорости сдвига, так и для вязкости в функции от изменяющегося во времени напряжения. В последнем случае кроме вязкоупругих свойств дополнительно учитываются тиксотропные свойства, т.е. разрушение и восстановление структуры. Обнаружено, что коэффициенты модели, являющиеся известными реологическими параметрами уравнений Максвелла и Кельвина-Фойгта и обладающие физическим смыслом, коррелируют с высокой степенью точности между собой и от установившегося напряжения и скорости сдвига. Показано, что при нагрузке возникает дополнительный сдвиг к уже задаваемому сдвигу, т.е. возникает опережение сдвига вместо его задержки при разгрузке. При этом дополнительный сдвиг возникает

практически сразу после нагружения или разгрузки, а не по истечении времени, как это принято считать. Обнаружен необычный эффект - вторичный сдвиг при нагружении ПАА максимален для малых установившихся напряжений и минимален для больших напряжений. При разгрузке тенденции меняется на противоположную.

Ключевые слова: вязкоупругие свойства, нелинейно-вязкие свойства, тиксотропия, полиакриламид, дополнительный сдвиг, модуль упругости

Для цитирования: Иктисанов В.А., Гордиманов Н.А., Иктисанов А.В., Сахабутдинов К.Г. Особенности реологических свойств геля полиакриламида при его нагружении и разгрузке // Нефтяная провинция.-2024.-№3(39).-С. 249-269. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2024.3.249-269>. - EDN SGKIZL

Abstract. Using the previously proposed rheological models, a description of the main characteristics of PAA solutions was made with a high degree of accuracy during loading and unloading. It has been shown that the description of flow curves can be performed both when setting a constant viscosity for a specific shear rate and when considering viscosity as a function of time-varying stress. In the latter case, in addition to viscoelastic properties, the thixotropic properties, i.e., the destruction and recovery of the structure, are additionally taken into account. It has been found that the coefficients of model, which are well-known rheological parameters from the Maxwell and Kelvin-Voigt equations, have a physical meaning and correlate with a high degree of accuracy among themselves and from the steady-state stress and shear rate. The commonly used terms "stress relaxation" and "shear delay" are only applicable for unloading. Under loading, both stress and shear increase. Therefore, in general, the parameters of the Maxwell and Kelvin-Voigt models have a wider range of applicability. In this case, additional (secondary) shear and shear rate occur almost immediately after loading or unloading, rather than after a certain time has elapsed, as commonly believed. An unexpected effect was observed - the secondary shear during PAA loading was maximal for small steady-state stresses and minimal for large stresses. Conversely, when unloading, the opposite trends were observed.

Key words: viscoelastic properties, nonlinear viscous properties, thixotropy, polyacrylamide, additional shear, modulus of elasticity

For citation: V.A. Iktisanov, N.A. Gordimanov, A.V. Iktisanov, K.G. Sahabutdinov Osobennosti reologicheskikh svoystv gelya poliakrilamida pri yego nagruzhenii i razgruzke [Features of rheological properties of polyacrylamide gel during loading and unloading]. Neftyanaya Provintsiya, No. 3(39), 2024. pp. 249-269. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2024.3.249-269>. EDN SGKIZL (in Russian)

Введение

Ранее была предпринята попытка описания кривых течения гелеобразного полиакриламида (ПАА) от скорости сдвига и от времени нагружения при помощи предложенных биномиальной модели и модели для вязкоупругих материалов [10]. Достигнута высокая степень соответствия экспериментальных и расчетных напряжений, описан максимум напряжений, выявлены взаимосвязи с высоким коэффициентом корреляции между коэффициентами модели и установившимися напряжениями, скоростями сдвига. Тем не менее, описание кривых явно будет неполным, если дополнительно не рассмотреть процесс разгрузки, т.е. падения напряжения после остановки вращения цилиндра вискозиметра. В связи с этим, целью данной работы является дальнейшее изучение особенностей реологического поведения раствора ПАА при его нагружении и разгрузке.

Широко известно, что деформация жидких и твердообразных тел имеет общие характерные особенности, связанные с проявлениями сил вязкости и упругости [1, 2, 8, 12-24]. При большом времени нагружения текут твердообразные вещества, а при чрезвычайно малом - жидкости проявляют упругие свойства. В этом отношении для изучения особенностей вязкоупругого поведения выбор геля ПАА является наиболее удачным, т.к. за приемлемое время исследований успевают проявиться и упругие силы, и силы вязкостного трения. В целом полученные тенденции и закономерности для ПАА могут оказаться полезными при изучении реологического поведения различных материалов. Для нефтяной промышленности – это вопросы деформации насыщенных пород-коллекторов, их покрышек, деформации стальных и полимерных труб, течения высоковязких нефтей и эмульсий, битумов, буровых растворов, жидкостей для разрыва пласта и др. [3-7].

Одновременный учет сдвига и напряжения

Считается, что процесс релаксации напряжения описывается моделью Максвелла, но использование этой модели и метода наименьших квадратов не позволяет добиться высокой точности в описании экспериментальных данных при разгрузке (Рис. 1). Это может свидетельствовать только о более сложном процессе разгрузки, когда наряду с изменением напряжения происходит изменение сдвига несмотря на то, что вращение цилиндра вискозиметра прекратилось.

Как показала практика, учесть данную тенденцию можно при помощи учета одновременного взаимовлияния напряжения на сдвиг и сдвига на напряжение [9, 10]. Решение данной задачи достигается за счет подключения множества элементов Максвелла и Кельвина с течением времени при помощи совместного численного решения системы двух известных дифференциальных уравнений с небольшими изменениями:

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

где γ - деформация или сдвиг;

τ - напряжение;

t – время;

μ_m - вязкость Максвелла;

E_k - коэффициент упругости Кельвина;

γ_k - сдвиг, определяемый моделью Кельвина – Фойгта;

$T_m = \mu_m / E_m$ - время Максвелла;

$T_k = \mu_k / E_k$ - время Кельвина.

Знаки \pm перед модулем упругости во втором уравнении зависят от приложения нагрузки или процесса разгрузки напряжения.

Исследования геля ПАА выполнены в институте «ТатНИПИнефть» при использовании ротационного вискозиметра «Mettler LH-40». Суть исследований заключалась в записи напряжения от времени при различной скорости сдвига, исследовался процесс нагружения и последующей разгрузки. Температура исследований была близка к температуре пластов, на которых было запланировано применение полимерного заводнения.

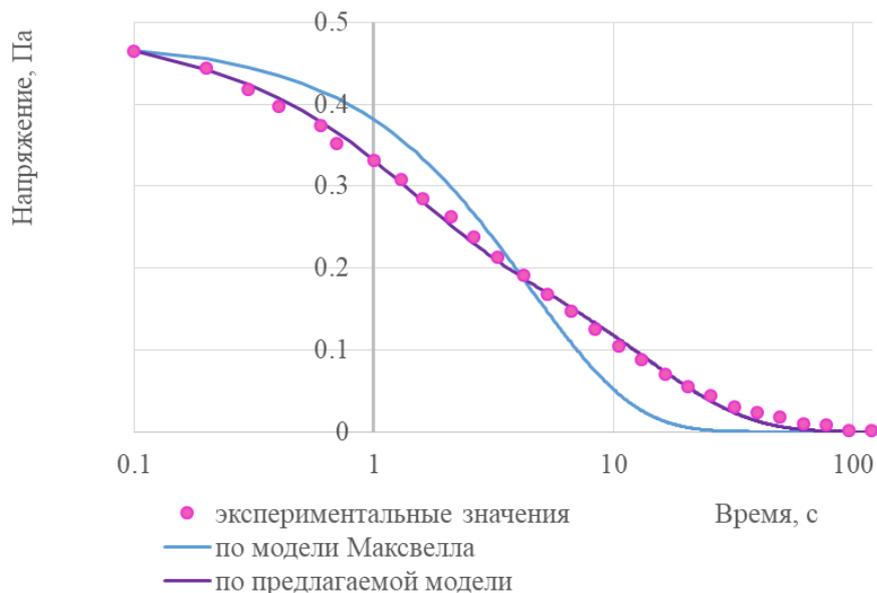


Рис. 1. Пример описания падения напряжения предлагаемой моделью и моделью Максвелла (после скорости сдвига 0.193 1/с)

Вторичный или дополнительный сдвиг

Заметим, что классический термин последствие для описания запаздывания упругой деформации или сдвига лишь частично отражает процесс, а именно в случае снятия нагрузки. При приложении нагрузки, в данном случае момента сил к цилиндру вискозиметра, возникает не запаздывание, а как показали исследования, опережение сдвига. Поэтому в общем случае, вероятно, более приемлем термин – вторичный сдвиг, описываемый уравнением Кельвина-Фойгта, который может характеризовать как процесс запаздывания, так и опережения. Отметим, что термин релаксация (ослабление) напряжений также не всегда отражает суть, т.к. при нагрузке исследу-

емого образца происходит не ослабление, а нарастание напряжений. Вероятно, по этой причине общепринятые термины релаксация напряжений и последствие или задержка деформации послужили причиной некоторых заблуждений, препятствующих пониманию физической сути процессов.

Для вискозиметрических исследований упоминаемый вторичный сдвиг по Кельвину-Фойгту означает, что наряду со скоростью сдвига, задаваемой вращением цилиндра, в исследуемой среде возникает дополнительный сдвиг и соответствующая ему скорость сдвига (Рис. 2). О возникновении дополнительного сдвига упоминали различные авторы, объясняя возникновение сужения при исследовании твердообразных материалов на растяжение. Именно благодаря этому фактору объяснялось возникновение максимума напряжения на деформационной кривой [4, 5, 6, 11, 14, 21, 24]. Однако существует нюанс. Как показали исследования, этот дополнительный или вторичный сдвиг появляется почти сразу после приложения нагрузки, в частности после времени 0,05 с. Причем обнаружилось, что для процесса нагружения этот вторичный сдвиг или сдвиг по Кельвину максимален при малых напряжениях (задаваемой угловой частоте вращения цилиндра вискозиметра) и минимален при больших напряжениях (Рис. 2). Отличие кривых довольно существенное и не может быть объяснено погрешностью исследований.

Если построить суммарный сдвиг, как сумму сдвига Кельвина и произведения постоянной скорости сдвига на время, то также обнаруживается аномалия при малых скоростях сдвига (Рис. 3). Эта аномалия нивелируется с течением времени, когда напряжение стремится к установившемуся значению. При разгрузке наблюдается обратная тенденция – экстремум сдвига Кельвина минимален при малых напряжениях (Рис. 4). Причем для разгрузки сдвиг Кельвина является и суммарным сдвигом, т.к. скорость сдвига, рассчитываемая по вращению цилиндра вискозиметра, обнуляется. Но естественно, что после снятия напряжения сдвиг также будет происходить, чему

немало примеров. Однако, как уже упоминалось, использование только одного уравнения Максвелла не позволяет решать эту задачу (Рис. 1). Необходимо учитывать и изменение напряжения, и изменение сдвига, что позволяет сделать система уравнений (1).

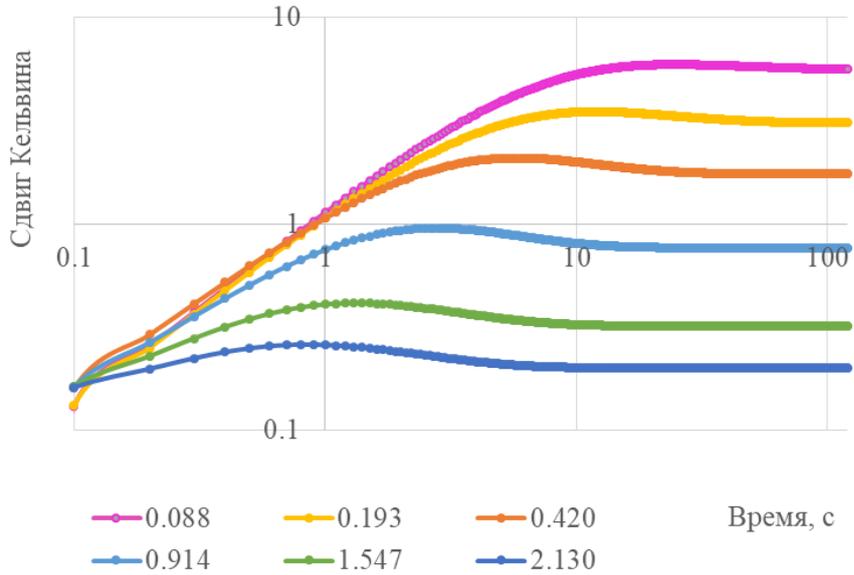


Рис. 2. Сдвиг, описываемый моделью Кельвина-Фойгта, при нагружении раствора ПАА (параметр кривых – скорость сдвига, 1/с)

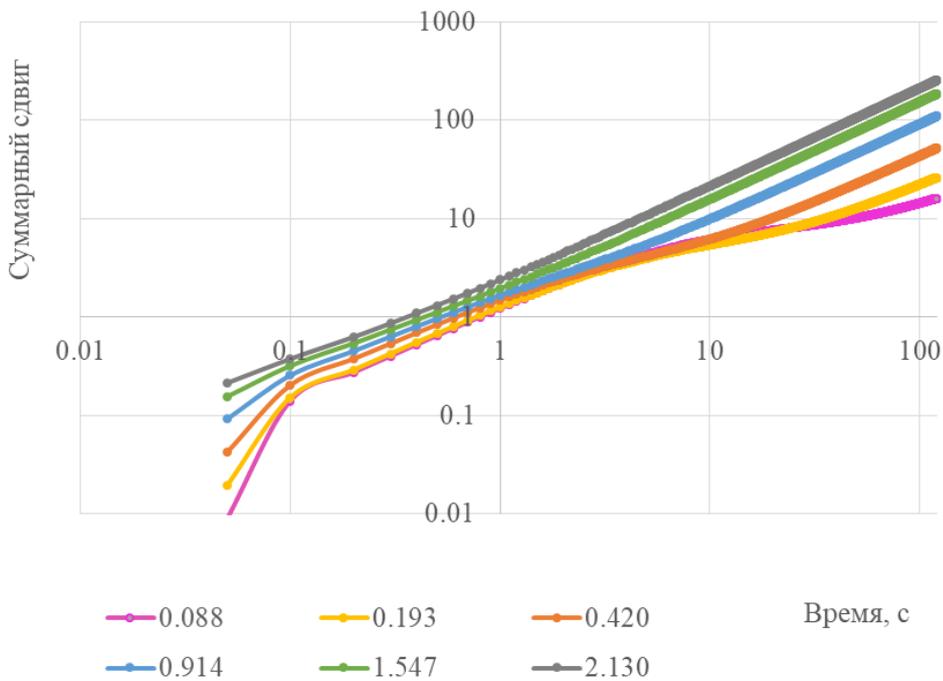


Рис. 3. Суммарный сдвиг при нагружении раствора ПАА (параметр кривых – скорость сдвига, 1/с)

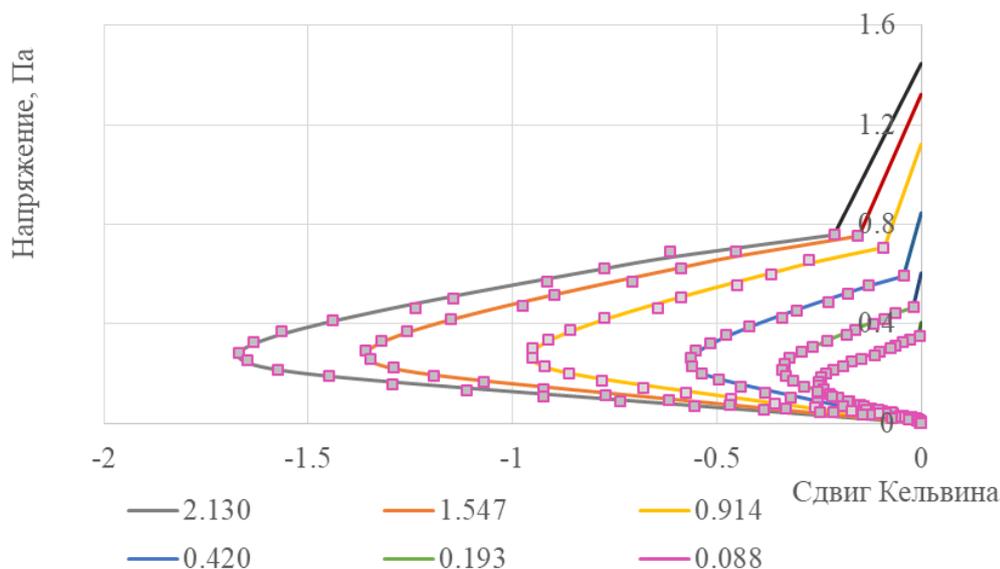


Рис. 4. Описание напряжения от сдвига Кельвина при разгрузке раствора ПАА (параметр кривых – скорость сдвига до остановки вискозиметра, 1/с)

Расчеты с использованием этой системы уравнений показали, что сдвиг Кельвина после снятия нагрузки вначале снижается в отрицательную область, что свидетельствует о частичном сдвиге в обратную сторону. Далее после прохождения минимума сдвиг стремится к нулю.

Возможность описания тиксотропных свойств

Заметим, что для исследуемого раствора ПАА не замечено начального напряжения сдвига, т.е. напряжения после разгрузки стремятся к нулю. Однако можно увидеть, что в конце исследований наблюдается некоторое отличие расчетных и экспериментальных напряжений (Рис. 1), причиной чего может быть возникновение структуры, т.е. увеличение вязкости раствора ПАА с течением времени после прекращения нагрузки. В связи с этим, для повышения точности описания конечного участка была предпринята попытка использования в уравнении Максвелла (1) вязкости как функции от напряжения.

Данная функция получена по установившимся напряжениям τ и скорости сдвига $\dot{\gamma}$ с применением биномиальной модели с отрицательной степенью:

$$\tau = \tau_{\infty} \left(1 + \left(\mu_0 \dot{\gamma} / \tau_{\infty} \right)^{1/n} \right)^n \quad (2)$$

где τ_{∞} - напряжение при бесконечной скорости сдвига, фиктивный параметр;

μ_0 - вязкость при малых скоростях сдвига;

$n < 0$ - показатель степени.

Данный подход позволил несколько повысить точность описания конечного участка разгрузки и снизить сумму квадратов отклонений для всех остановок вискозиметра. Для рассматриваемой скорости сдвига 0,193 1/с эффективная вязкость в конце исследований увеличилась с текущей 3,13 Па·с до начальной $\mu_0 = 21,7$ Па·с. При этом изменились и коэффициенты модели – модули упругости Максвелла и Кельвина и вязкость Кельвина.

Использование вязкости как функции от напряжения во времени также привело к высокой точности описания экспериментальных точек при нагружении. Поэтому в общем случае возможно описание кривых нагружения и разгрузки как для постоянной вязкости в пределах одной скорости сдвига, так и функции вязкости, которая является вязкостью Максвелла в зависимости от текущего напряжения. В последнем случае достигается описание процесса разрушения структуры при нагрузке и её восстановления при снятии нагрузки, т.е. учитываются тиксотропные свойства, чему в реологии уделяется явно недостаточно внимания. Заметим, что через время менее 1 с для нагрузки также характерен наибольший прирост вторичной скорости сдвига для малых установившихся напряжений (Рис. 5), как и при задании напряжения в функции от скорости сдвига. Для разгрузки падение

скорости сдвига, т.е. то, что именуется последствием, наблюдается наоборот и в гораздо меньшем масштабе (Рис. 5).

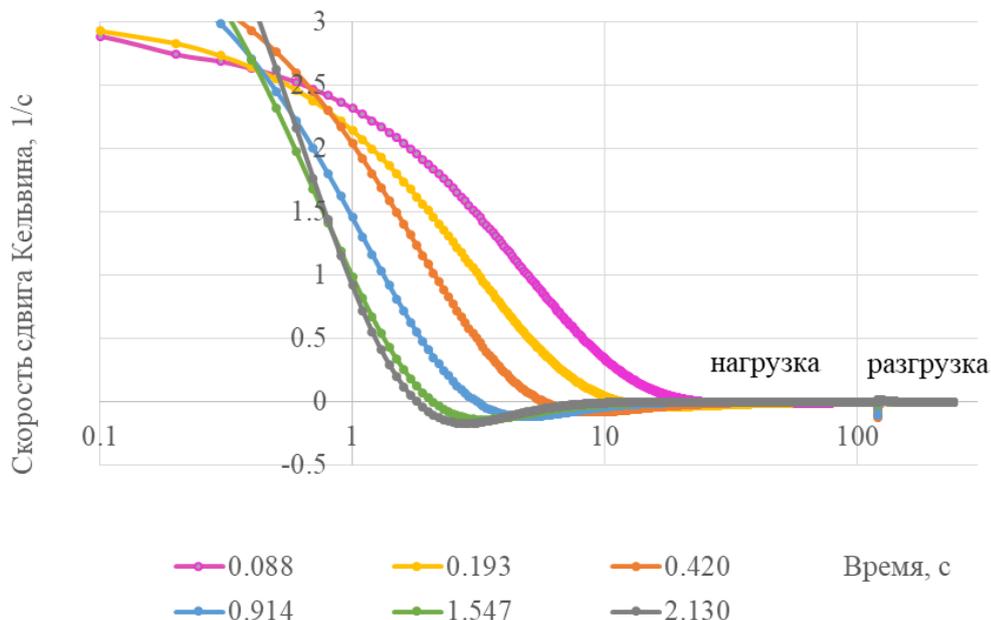


Рис. 5. Скорость сдвига Кельвина от времени с использованием вязкости как функции от напряжения (параметр кривых – скорость сдвига, 1/с)

Анализ результатов

Наибольший интерес представляет не способ учета или не учета эффективной вязкости от изменяющегося напряжения, т.к. в обоих случаях возможно достижение высокой точности результата, а физическая суть возникновения дополнительного сдвига по Кельвину при нагрузке. Согласно второму уравнению (1), определяющее влияние на возникновение дополнительного сдвига оказывает модуль упругости Кельвина. Модуль упругости увеличивается с ростом скорости вращения цилиндра, что в первом приближении и обуславливает снижение дополнительного сдвига при больших установившихся напряжениях. Но почему так происходит, почему при малых напряжениях больше дополнительный сдвиг и выше дополнительная скорость сдвига, хотя само нагружение происходит в меньшей степени, остается непонятным. Неизвестно также, проявляется ли этот эффект для других материалов.

Для возможного ответа на эти вопросы произведен расчет работы упругих сил, для чего выполнено аналитическое решение первого уравнения системы (1) при вязкости Максвелла равной нулю, т.е. при отсутствии действия сил вязкости. В результате для изменения напряжения от начального до установившегося получено следующее выражение для работы упругого сдвига:

$$A = -T_m (\tau_{нач} - \tau_{уст}) \dot{\gamma} e^{-t/T_m} \quad (3)$$

где $\tau_{нач}$ - начальное напряжение в момент времени 0,05 с, записанное вискозиметром;

$\tau_{уст}$ - установившееся напряжение.

Результаты расчетов для исследований при различных скоростях сдвига, задаваемых вискозиметром, приведены на рис. 6. Отмечается, что работа упругих сил при $\tau_{нач} < \tau_{уст}$ получилась с минусом. Обычно знак минус характерен для разгрузки линейно и нелинейно-упругих тел, когда упругий запас энергии переходит в кинетическую энергию движения [2]. Противоположный знак плюс свидетельствует о накоплении потенциальной энергии. В данном случае при нагрузке с начальным напряжением, меньшим установившегося напряжения $\tau_{нач} < \tau_{уст}$, также возможен переход упругого запаса в энергию движения, в частности в вязкое трение, что и увеличивает дополнительный сдвиг по Кельвину. Вероятно, именно по этой причине при малых скоростях сдвига возникает больший дополнительный сдвиг в сравнении с большими скоростями сдвига (Рис. 2, 3, 5). Учет начальной работы упругих сил до времени 0,05 с по формуле $A = \tau^2 / (2E)$ в дополнение к формуле (3) не изменил сути представленной картины – кривые для первых трех скоростей сдвига оказались отрицательными.

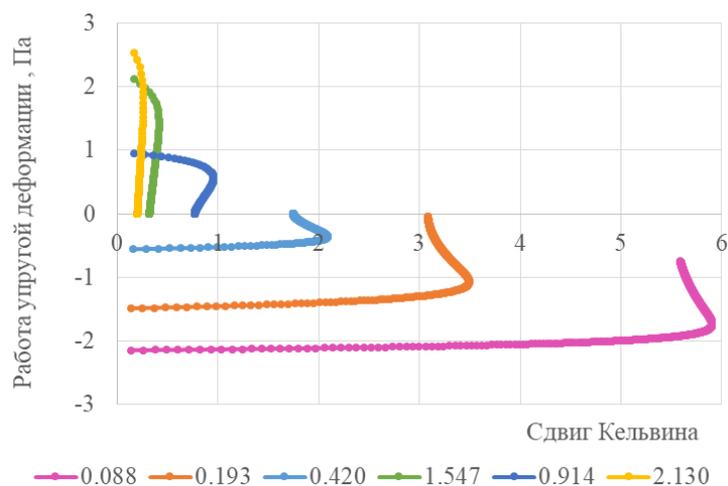


Рис. 6. Работа упругой деформации Кельвина
(параметр кривых – скорость сдвига, 1/с)

Таблица 1

Результаты описания кривых течения ПАА при разгрузке моделью с вязкостью Максвелла в функции от скорости сдвига

Скорость сдвига, 1/с	Установившееся напряжение, Па	Модуль упругости Кельвина E_k , Па	Модуль упругости Максвелла, E_m , Па	Вязкость Кельвина μ_k , Па·с	Вязкость Максвелла, μ_m , Па·с	Время Кельвина, T_k , с	Время Максвелла, T_m , с	Начальный модуль сдвига, Па
0,088	0,4048	0,632	0,410	1,916	4,600	3,03	11,22	7,84
0,193	0,6035	0,625	0,411	1,407	3,127	2,25	7,60	7,15
0,420	0,8449	0,435	0,344	0,963	2,012	2,22	5,84	6,03
0,914	1,122	0,285	0,267	0,602	1,228	2,11	4,59	4,54
1,547	1,322	0,203	0,211	0,431	0,855	2,12	4,05	3,68
2,130	1,446	0,165	0,176	0,351	0,679	2,13	3,85	3,23

Таблица 2

Результаты описания кривых течения ПАА при разгрузке моделью с вязкостью Максвелла в функции изменяющегося во времени напряжения

Скорость сдвига, 1/с	Установившееся напряжение, Па	Модуль упругости Кельвина E_k , Па	Модуль упругости Максвелла, E_m , Па	Вязкость Кельвина μ_k , Па·с	Вязкость Максвелла, μ_m , Па·с	Время Кельвина, T_k , с	Время Максвелла, T_m , с
0,088	0,4048	2,128	0,814	4,680	4,600	2,20	5,65
0,193	0,6035	3,004	1,069	4,719	3,127	1,57	2,93
0,420	0,8449	3,064	1,295	5,751	2,012	1,88	1,55
0,914	1,122	3,065	1,659	8,462	1,228	2,76	0,74
1,547	1,322	4,736	2,169	24,803	0,855	5,24	0,39
2,130	1,446	6,000	2,429	47,865	0,679	7,98	0,28

При разгрузке модуль упругости Кельвина снижается (Табл. 1), что приводит к обратному эффекту - минимальному сдвигу при минимальном установившемся напряжении. Попутно заметим, что разные тенденции – рост при нагрузке и снижение при разгрузке демонстрирует также модуль упругости Максвелла. Интересно, что при использовании вязкости как функции от меняющегося со временем напряжения во всех случаях наблюдается рост модулей упругости Максвелла и Кельвина (Табл. 2).

Итак, при помощи предлагаемых подходов достигнута высокая степень описания кривых разгрузки после окончания вращения вискозиметра с различными угловыми скоростями (Рис. 4). Но, в целом, полное описание разгрузки, как и для нагрузки, достигается ступенчато. До времени 0,1 с происходит скачкообразное снижение напряжения при разгрузке, которое можно описать законом Гука с переменным модулем упругости от 7,8 Па до 3,23 Па (Табл. 1, 2). Коэффициенты биномиальной модели с отрицательной степенью $\tau^{1/n} = \tau_*^{1/n} + (E_*\gamma)^{1/n}$ получились для разгрузки равными: $n=-1,76$; $\tau_\infty = 2,50$ Па; $E_0=10,21$ Па. Можно принять модуль упругости не переменным, а равным начальному E_0 ишить решения не через время 0,1 с, а через некоторый начальный угол напряжения от сдвига, т.к. при малых временах существует погрешность прибора, которую нельзя исключить. Аналогичным образом можно поступить и при нагрузке, задавая постоянный начальный модуль упругости, который как обычно и бывает, составляет большую величину $E_0=45,11$ Па в сравнении с модулем упругости при разгрузке.

Проявление вначале деформационных кривых только упругих сил отмечают видные ученые [2], поэтому данный подход сохранен в этой работе. Тем не менее, вызывает сомнение излом кривых в точке сшивания этих двух методов (Рис. 4). Вероятно, продолжением работ должны стать исследования твердообразных тел без этого резкого излома.

Взаимозависимость и физический смысл параметров модели

Следует отметить еще один аспект, обнаруженный в результате интерпретации кривых ПАА. Параметры модели обнаруживают высокую степень корреляции не только от установившегося напряжения или задаваемой скорости сдвига, но и между собой. Самой неожиданной оказалась прямолинейная зависимость при нагрузке для отношений упругостей Кельвина и Максвелла от отношения вязкостей Кельвина и Максвелла (Рис. 7). Причем эта тенденция была справедливой как для заданной вязкости при некоторой скорости сдвига, так и для вязкости в функции от изменяющегося во времени напряжения, хотя в последнем случае коэффициент корреляции был несколько ниже. Физический смысл этой прямолинейной зависимости пока обнаружить не удалось.

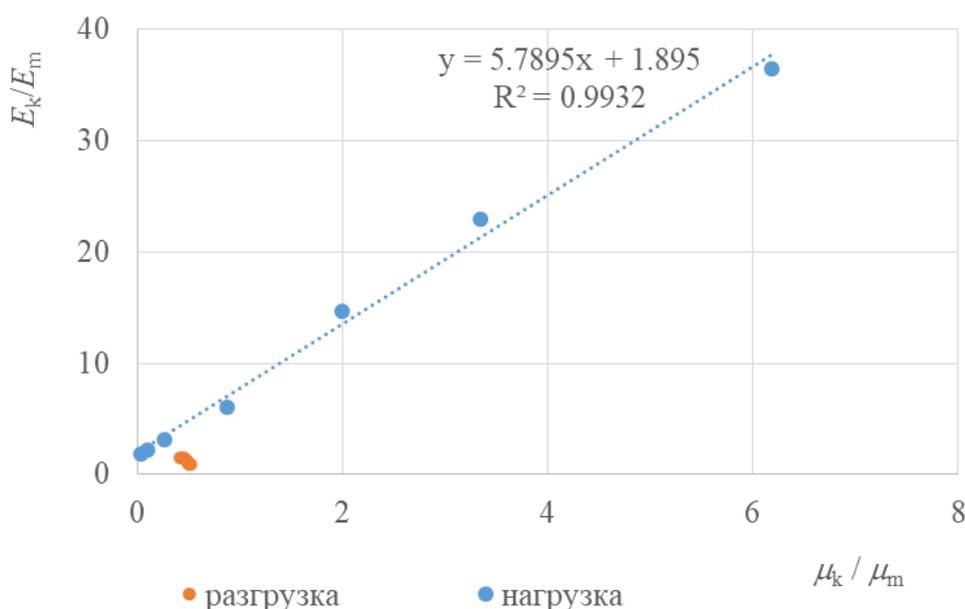


Рис. 7. Зависимость отношения коэффициентов упругости от отношения коэффициентов вязкости

Также для нагрузки обнаружены зависимости с квадратом коэффициента корреляции выше 0,99 для следующих независимых параметров: $E_m = a \ln \mu_k + b$, $E_k = a \mu_m^b$, $T_k = a \ln T_m + b$, $\mu_k = a \mu_m^b$, $T_m = a \mu_k^b$, которые легко проверить по табл. 3. Некоторые из рассмотренных функций имеют неплохой коэффициент корреляции и при разгрузке (Табл. 1, 2).

Таблица 3

Результаты описания кривых течений ПАА при нагрузке моделью с вязкостью Максвелла в функции от скорости сдвига

Скорость сдвига, 1/с	Модуль упругости Кельвина E_k , Па	Модуль упругости Максвелла, E_m , Па	Вязкость Кельвина μ_k , Па·с	Вязкость Максвелла, μ_m , Па·с	Время Кельвина, T_k , с	Время Максвелла, T_m , с
0,088	0,073	0,040	0,150	4,600	2,05	114,0
0,193	0,196	0,087	0,314	3,127	1,60	35,8
0,420	0,484	0,155	0,525	2,012	1,09	12,9
0,914	1,464	0,244	1,079	1,228	0,74	5,04
1,547	4,121	0,282	1,703	0,855	0,41	3,04
2,130	7,190	0,313	2,267	0,679	0,32	2,17

При использовании некоторых из этих зависимостей возможно снижение неизвестных параметров, определяемых по методу наименьших квадратов с трех до двух или даже одного. Однако наибольшую ценность представляет поиск физического смысла этих коэффициентов. Два из 4 параметров являются хорошо известными. Так, вязкость Максвелла – ничто иное как известная всем вязкость, которую определяют на вискозиметре по установленным напряжениям и скорости сдвига. Модуль упругости Кельвина является модулем упругого сдвига, от которого зависит начальная упругая деформация. Вязкость Кельвина характеризует сопротивление упругому сдвигу. Модуль упругости Максвелла показывает запаздывание установления напряжения от вязкого течения.

Можно пойти иным путем и отталкиваться как в системе уравнений (1) от вязкости Максвелла, упругости Кельвина и параметров, которые именуется временем релаксации T_m и временем задержки деформации T_k . Как отмечалось выше, эти наименования не являются корректными и в общем случае их лучше именовать временем Максвелла, которое характеризует релаксацию и рост напряжений и временем Кельвина-Фойгта, физиче-

ская суть которого заключается в задержке и опережении сдвига (деформации). Заметим, что для исследований ПАА при нагрузке $T_m > T_k$ при различных скоростях сдвига, что свидетельствует о более медленном изменении напряжения в сравнении с изменением сдвига.

Основные выводы

Таким образом, при помощи предложенных ранее реологических моделей выполнено описание основных характеристик растворов ПАА с высокой степенью точности как при нагружении, так и при разгрузке. Показано, что описание кривых течения можно выполнять как при задании постоянной вязкости для некоторой скорости сдвига, так и для вязкости в функции от изменяющегося во времени напряжения. В последнем случае кроме вязкоупругих свойств дополнительно учитываются тиксотропные свойства, т.е. разрушение и восстановление структуры.

Обнаружено, что коэффициенты модели, являющиеся известными реологическими параметрами уравнений Максвелла и Кельвина-Фойгта и обладающие физическим смыслом, коррелируют с высокой степенью точности между собой и от установившегося напряжения и скорости сдвига.

Общепотребительные термины релаксация напряжений и задержка деформации справедливы только для разгрузки. При нагрузке наряду с ростом напряжения возникает опережение деформаций. Поэтому в общем случае параметры моделей Максвелла и Кельвина-Фойгта имеют более широкий смысл.

Показано, что дополнительные (вторичные) сдвиг и скорость сдвига возникают практически сразу после нагружения или разгрузки, а не по истечении времени, как это принято считать. Обнаружен необычный эффект - вторичный сдвиг при нагружении ПАА максимален для малых установившихся напряжений, что вероятно вызвано отрицательной работой упругих

сил, приводящих к переходу упругого запаса энергии в энергию движения. При разгрузке тенденция меняется на противоположную.

Список литературы

1. Рогачев, М.К. Обоснование комплексной технологии предупреждения образования асфальтосмолопарафиновых отложений при добыче высокопарафинистой нефти погружными электроцентробежными насосами из многопластовых залежей / М.К. Рогачев, А.Н. Александров // Записки Горного института. – 2021. – Т. 250. – С. 596-605. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.13.
2. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов [Текст]: учеб. пособие для строит. Вузов / С.С. Вялов – М.: Высш. Школа, 1978. – 447 с., ил.
3. Горбунов, А.Т. Разработка аномальных нефтяных месторождений [Текст] / А.Т. Горбунов – М.: Недра, 1981. - 237 с.
4. Двойников М.В. Разработка вязкоупругих систем и технологии изоляции водоносных горизонтов с аномальными пластовыми давлениями при бурении нефтегазовых скважин / М.В. Двойников, В.Н. Кучин, М.Ш. Минцаев // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 57-65. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.7.
5. Дияшев, Р.Н. Фильтрация жидкости в деформируемых нефтяных пластах [Текст] / Р.Н. Дияшев, А.В. Костерин, Э.В. Скворцов – Казань: Изд-во Казанского мат. об-ва, 1999. – 238 с.
6. Добрынин, В.М. Деформации и изменения физических свойств коллекторов нефти и газа [Текст] / В.М. Добрынин - М.: Недра, 1970. - 239 с.
7. Желтов, Ю.П. Деформация горных пород [Текст] / Ю.П. Желтов - М.: Недра, 1966.- 198 с.
8. Зубчанинов, В.Г. Основы теории упругости и пластичности [Текст] / В.Г. Зубчанинов - М.: Высш. шк., 1990. – 368 с.
9. Иктисанов, В.А. Изучение особенностей релаксационной фильтрации жидкости. – Palmarium Academic Publishing, 2012. – 125 с.
10. Иктисанов, В.А. Определение фильтрационных параметров пластов и реологических свойств дисперсных систем при разработке нефтяных месторождений [Текст] / В.А. Иктисанов - М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2001. – 212 с.
11. Молокович, Ю.М. Пьезометрия окрестности скважины [Текст] / Ю.М. Молокович, А.И. Марков, А.А. Давлетшин и др // Теоретические основы. – Казань: Изд ДАС, 1990. - 203 с.
12. Николаевский, В.Н. Геомеханика и флюидодинамика [Текст] / В.Н. Николаевский - М.: Недра, 1996. - 447 с.
13. Реологические основы расчета оборудования производства жиросодержащих пищевых продуктов: Учеб. пособие / В.А. Арет, Б.Л. Николаев, Г.П. Забровский, Л.К. Николаев. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: СПбГУНИПТ, 2006. 435 с.
14. Урьев, Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы [Текст] / Н.Б. Урьев - М.: Химия, 1980. – 320 с.
15. Fan Liu, Jin Wang, Shuchang Long, He Zhang b, Xiaohu Yao 2022 Experimental and modeling study of the viscoelastic-viscoplastic deformation behavior of amorphous polymers over a wide temperature range Mechanics of Materials 167 (2022) 104246.
16. Moschopoulos P., Varchanis S., Syrakos A., Dimakopoulos Y., Tsamopoulo J.. S-PAL: A stabilized finite element formulation for computing viscoplastic flows Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Volume 309, 2022, Article 104883.

17. Tayeb, A., Arfaoui, M., Zine, A., Hamdi, A., Benabdallah, J., Ichchou, M., 2017. On the nonlinear viscoelastic behavior of rubber-like materials: constitutive description and identification. *Int. J. Mech. Sci.* 130, 437–447.
18. Vaiana N., Rosati L., Classification and unified phenomenological modeling of complex uniaxial rate-independent hysteretic responses, *Mech. Syst. Signal Process.* 182 (2023), 109539, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109539>.
19. Xiang, G., Yin, D., Meng, R., Cao, C., 2021. Predictive model for stress relaxation behavior of glassy polymers based on variable-order fractional calculus. *Polym. Adv. Technol.* 32, 703–713.
20. Zografos K, Afonso AM, Poole RJ, Oliveira MSN. A viscoelastic two-phase solver using a phase-field approach. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 2020; 284:104364.
21. Gbadamosi, A., Patil, S., Kamal, M. S., Adewunmi, A. A., Yusuff, A. S., Agi, A., & Oseh, J. (2022). Application of Polymers for Chemical Enhanced Oil Recovery: A Review. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 7). MDPI. DOI:10.3390/polym14071433.
22. Kamal, M. S., Sultan, A. S., Al-Mubaiyedh, U. A., & Hussein, I. A. (2015). Review on polymer flooding: Rheology, adsorption, stability, and field applications of various polymer systems. In *Polymer Reviews* (Vol. 55, Issue 3, pp. 491–530). Taylor and Francis Inc. DOI:10.1080/15583724.2014.982821.
23. Tapias Hernandez, F. A., Lizcano Niño, J. C., & Zanoni Lopes Moreno., R. B. (2018). Effects of salts and temperature on rheological and viscoelastic behavior of low molecular weight HPAM solutions. *Revista Fuentes El Reventón Energético*, 16(1), 19–35. DOI:10.18273/revfue.v16n1-2018002.
24. Wang, D., Cheng, J., Xia, H., Li, Q., Shi, J., LTD,D.O.I.L.C.O., 2001. Viscous-Elastic Fluids Can Mobilize Oil Remaining After Water-Flood By Force Parallel To the Oil-Water Interface SPE Asia Pacific Impr. Oil Recover. Conf. [Aporc2001] (Kuala Lumpur, Malaysia, 10/8-9/2001) Proc. <https://doi.org/10.2118/72123-MS>.

References

1. M.K. Rogachev, A.N. Aleksandrov Obosnovanie kompleksnoj tekhnologii preduprezhdeniya obrazovaniya asfaltosmoloparafिनovыh otlozhenij pri dobyche vysokoparafинistoj nefti pogruzhnymi elektrocentrobezhnymi nasosami iz mnogoplastovыh zalezhej [Justification of a comprehensive technology for preventing the formation of asphalt-resin-paraffin deposits during production of highly paraffinic oil by electric submersible pumps from multi-layered deposits]. *Zapiski Gornogo Instituta [Mining Institute Papers]*. 2021, Vol. 250, pp. 596-605. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.13. (in Russian)
2. S.S. Vyalov Reologicheskie osnovы mekhaniki gruntov [Rheological basis of rock mechanics]. Moscow, 1978, 447 p. (in Russian)
3. Gorbunov A.T. Razrabotka anomalnyh neftыanyh mestorozhdenij [Development of anomalous oil fields]. Moscow, Nedra Publ., 1981, 237 p. (in Russian)
4. Dvoинikov M.V., Kuchin V.N., Mintshev M.Sh. Razrabotka vyazkouprugih sistem i tekhnologii izolyacii vodonosnyh gorizontov s anomalnymi plastovыми davleniyami pri бурении neftegazovyh skvazhin [Development of viscoelastic systems and technologies for isolating water-bearing horizons with abnormal formation pressures during oil and gas well drilling]. *Zapiski Gornogo Instituta [Mining Institute Papers]*. 2021, Vol. 247, pp. 57-65. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.7. (in Russian)
5. Diyashev R.N., Kosterin A.V., Skvortsov E.V. Filtraciya zhидkosti v deformiruemyh neftыanyh plastah [Fluid flow in deformable oil reservoirs]. Kazan, 1999, 238 p. (in Russian)

6. Dobrynin V.M. Deformacii i izmeneniya fizicheskikh svoystv kollektorov nefti i gaza [Deformation and changing of physical properties of oil and gas reservoirs]. Moscow, Nedra Publ., 1970, 239 p. (in Russian)
7. Zheltov Yu.P. Deformaciya gornyh porod [Deformation of rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1966, 198 p. (in Russian)
8. Zubchaninov V.G. Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti [Fundamentals of elasticity and plasticity theory]. Moscow, Higher School Publ., 1990, 368 p. (in Russian)
9. Iktisanov V.A. Izuchenie osobennostej relaksacionnoj filtracii zhidkosti [Studying the features of relaxation fluid flowing]. Palmarium Academic Publ., 2012, 125 p. (in Russian)
10. Iktisanov V.A. Opredelenie filtracionnyh parametrov plastov i reologicheskikh svoystv dispersnyh sistem pri razrabotke neftyanyh mestorozhdenij [Determination of reservoir flow properties and rheological behavior of disperse systems during oil field development]. Moscow, VNIIOENG Publ., 2001, 212 p. (in Russian)
11. Molokovich Yu.M., A.I. Markov, A.A. Davletshin Piezometriya okrestnosti skvazhiny [Piezometry in the vicinity of the wellbore]. Theoretical background. Kazan, DAS Publ., 1990, 203 p. (in Russian)
12. Nikolaevsky V.N. Geomekhanika i flyuidodinamika [Geomechanics and fluid dynamics]. Moscow, Nedra Publ., 1996, 447 p. (in Russian)
13. Aret V.A., Nikolaev B.L., Zabrovsky G.P., Nikolaev L.K. Reologicheskie osnovy rascheta oborudovaniya proizvodstva zhirosoderzhashchih pishchevyh produktov [Rheological basics for designing the equipment for fat-containing food products]. St.-Petersburg, Saint Petersburg State University of Low-temperature and Food Technologies, 2006, 435 p. (in Russian)
14. Uriev N.B. Vysokokoncentrirovannye dispersnye sistemy [Highly concentrated disperse systems]. Moscow, Chemistry Publ., 1980, 320 p. (in Russian)
15. Fan Liu, Jin Wang, Shuchang Long, He Zhang b, Xiaohu Yao 2022 Experimental and modeling study of the viscoelastic-viscoplastic deformation behavior of amorphous polymers over a wide temperature range *Mechanics of Materials* 167 (2022) 104246.
16. Moschopoulos P., Varchanis S., Syrakos A., Dimakopoulos Y., Tsamopoulo J. S-PAL: A stabilized finite element formulation for computing viscoplastic flows *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Volume 309, 2022, Article 104883.
17. Tayeb, A., Arfaoui, M., Zine, A., Hamdi, A., Benabdallah, J., Ichchou, M., 2017. On the nonlinear viscoelastic behavior of rubber-like materials: constitutive description and identification. *Int. J. Mech. Sci.* 130, 437–447.
18. Vaiana N., Rosati L., Classification and unified phenomenological modeling of complex uniaxial rate-independent hysteretic responses, *Mech. Syst. Signal Process.* 182 (2023), 109539, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109539>.
19. Xiang, G., Yin, D., Meng, R., Cao, C., 2021. Predictive model for stress relaxation behavior of glassy polymers based on variable-order fractional calculus. *Polym. Adv. Technol.* 32, 703–713.
20. Zografos K, Afonso AM, Poole RJ, Oliveira MSN. A viscoelastic two-phase solver using a phase-field approach. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 2020; 284:104364.
21. Gbadamosi, A., Patil, S., Kamal, M. S., Adewunmi, A. A., Yusuff, A. S., Agi, A., & Oseh, J. (2022). Application of Polymers for Chemical Enhanced Oil Recovery: A Review. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 7). MDPI. DOI:10.3390/polym14071433.
22. Kamal, M. S., Sultan, A. S., Al-Mubaiyedh, U. A., & Hussein, I. A. (2015). Review on polymer flooding: Rheology, adsorption, stability, and field applications of various polymer systems. In *Polymer Reviews* (Vol. 55, Issue 3, pp. 491–530). Taylor and Francis Inc. DOI:10.1080/15583724.2014.982821.

23. Tapias Hernandez, F. A., Lizcano Niño, J. C., & Zanoni Lopes Moreno., R. B. (2018). Effects of salts and temperature on rheological and viscoelastic behavior of low molecular weight HPAM solutions. *Revista Fuentes El Reventón Energético*, 16(1), 19–35. DOI:10.18273/revfue.v16n1-2018002.
24. Wang, D., Cheng, J., Xia, H., Li, Q., Shi, J., LTD,D.O.I.L.C.O., 2001. Viscous-Elastic Fluids Can Mobilize Oil Remaining After Water-Flood By Force Parallel To the Oil-Water Interface SPE Asia Pacific Impr. Oil Recover. Conf. [Aporc2001] (Kuala Lumpur, Malaysia, 10/8-9/2001) Proc. <https://doi.org/10.2118/72123-MS>.

Сведения об авторах

Иктисанов Валерий Асхатович, доктор технических наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных месторождений Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II
Россия, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2
E-mail: iktisanov_va@pers.spmi.ru

Гордиманов Никита Андреевич, студент Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II
Россия, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2
E-mail: s201335@stud.spmi.ru

Иктисанов Альберт Валерьевич, студент Московского физико-технического института
Россия, 141701, Московская область, Долгопрудный, Институтский переулок, 9
E-mail: a.iktisanov@yandex.ru

Сахабутдинов Камиль Гаптенурович, ведущий специалист Центра промышленной и экологической безопасности ЦОБ института «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина
Россия, 423241, Бугульма, ул. Джалиля, 64
E-mail: skg@tatnipi.ru

Authors

V.A. *Iktisanov*, Dr.Sc., Professor, Oil Field Development Department, «St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II»
2, 21 Line, Vasilyevsky Island, 199106, Saint Petersburg, Russian Federation
E-mail: iktisanov_va@pers.spmi.ru

N.A. *Gordimanov*, Student, «St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II»
2, 21 Line, Vasilyevsky Island, 199106, Saint Petersburg, Russian Federation
E-mail: s201335@stud.spmi.ru

A.V. *Iktisanov*, Student, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9, Institutsky Lane, 141701, Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation
E-mail: a.iktisanov@yandex.ru

K.G. *Sahabutdinov*, Lead Expert, HSE Center, TatNIPIneft Institute - PJSC TATNEFT
64, Djalil Str., 423241, Bugulma, Russian Federation
E-mail: skg@tatnipi.ru

Статья поступила в редакцию 27.06.2024

Принята к публикации 14.09.2024

Опубликована 30.09.2024