

УДК 622.24
DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4558
Шифр специальности ВАК: 2.21.03.01

Оптимизация реологических характеристик растворов на основе ксантана для обработки промывочной жидкости

А.И. Ламбин, Е.В. Аверкина ✉

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, г. Иркутск

✉ averkina.l@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. В пределах выделенных концентраций ксантана и солей показана оптимизация реологических показателей псевдопластичной жидкости, предназначенной для загущения бурового раствора. Для этого предложено из полной реологической кривой выделить участок разжижения жидкости, по которому определяется параметр нелинейности. Поставленный полный факторный эксперимент позволяет конкретизировать зависимость реологической нелинейности от концентрации ингредиентов. Постановка полного факторного эксперимента дает возможность качественно оценивать различные торговые марки биополимеров. На основе показателей нелинейности предложен показатель оптимизации выносной способности буровых растворов. Используемые параметры приведенной и характеристической вязкостей растворов могут стать качественной и количественной оценкой проектируемых составов буровых растворов. Множественность торговых марок ксантановых камедей предопределяет их качественное разнообразие. Выбор камеди для загущения буровых растворов не формализован. В статье предложен один из вариантов выбора. **Цель.** В рамках модели Оствальда де Вейля оценка реологических характеристик водных растворов ксантановой камеди торговой марки DUO-VIS в присутствии хлоридов Na и K при повышенной концентрации ксантана и солей, а также анализ влияния состояния дисперсной фазы раствора-загустителя на его реологические характеристики. **Методы.** Инструментальные методы определения параметров буровых растворов по ГОСТ 33213-2014, математическое моделирование с помощью полного факторного эксперимента. **Результаты и выводы.** На примере раствора ксантана торговой марки DOU-VIS, используемого в качестве загустителя буровых растворов, показана S-образная форма профилей вязкости растворов ксантановых загустителей. Рассмотрен пример выделения участка кривой вязкости с уменьшающейся вязкостью и аппроксимации его степенной зависимостью. Показано с помощью полного факторного эксперимента влияние биополимера и хлорида калия (в рамках их выделенных концентраций) на параметры степенной зависимости, используемой в качестве аппроксимируемой кривой вязкости. Приведено распределение параметра оптимизации, представляющего собой отношение коэффициента консистенции к показателю нелинейности, в пределах изменения концентраций биополимера и KCl. Показан пример расчета объемной доли макромолекул биополимера в растворе, и представлено применение приведенной и характеристической вязкостей для оценки растворов в масштабе частиц суспензии.

Ключевые слова: биополимерные буровые растворы, ксантановая камедь, коэффициент консистенции, вязкостные свойства, степенной реологический закон

Для цитирования: Ламбин А.И., Аверкина Е.В. Оптимизация реологических характеристик растворов на основе ксантана для обработки промывочной жидкости // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 11. – С. 228–236. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4558

UDC 622.24
DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4558

Optimization of rheological characteristics of xanthan-based solutions for washing liquid treatment

A.I. Lambin, E.V. Averkina ✉

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

✉ averkina.l@yandex.ru

Abstract. Relevance. Within the limits of the isolated concentrations of xanthan and salts, optimization of rheological parameters of a pseudoplastic liquid intended for thickening drilling mud is shown. For this purpose, it is proposed to isolate from the complete rheological curve the separation of the liquid liquefaction section, according to which the nonlinearity parameters are determined. The complete factorial experiment allows us to specify the dependence of rheological nonlinearity on the concentration of ingredients. The formulation of the complete factorial experiment makes it possible to qualitatively evaluate other brands of biopolymers. Based on the non-linearity indicators, an indicator for optimizing the carrying capacity of drilling fluids is proposed. The use of the above and characteristic viscosity of the solutions can serve as qualitative and quantitative estimates of the projected compositions of drilling fluids. The multiplicity of brands of xanthan gums determines their qualitative diversity. The choice of gum for thickening drilling fluids is not formalized. The article offers one of the options. **Aim.** Using the Ostwald de Weil model to evaluate the rheological characteristics of aqueous solutions of DUO-VIS xanthan gum in the presence of Na and K chlorides at elevated concentrations of xanthan and salts, as well as to analyze the effect of the dispersed phase of the thickener solution on its rheological characteristics. **Methods.** Instrumental methods for determining the parameters of drilling fluids according to SS 33213-2014, mathematical modeling using a complete factorial experiment. **Results and conclusions.** Using the example of a DOU-VIS xanthan solution applied as a thickener for drilling fluids, the S-shape of the viscosity profiles of solutions of xanthan thickeners is shown. The paper considers the example of highlighting a section of the viscosity curve with decreasing viscosity and approximating it by a power dependence. The effect of biopolymer and potassium chloride (within the limits of their isolated concentrations) on the parameters of the power dependence used as an approximated viscosity curve is shown using a complete factorial experiment. The paper introduces the distribution of the optimization parameter, which is the ratio of the consistency coefficient to the nonlinearity indicator, within the range of changes in the concentrations of biopolymer and KCl. An example of calculating the volume fraction of biopolymer macromolecules in solution is shown and the application of the reduced and characteristic viscosities for estimating solutions at the scale of suspension particles is given.

Keywords: biopolymer drilling fluids, xanthan gum, consistency coefficient, viscosity properties, power rheological law

For citation: Lambin A.I., Averkina E.V. Optimization of rheological characteristics of xanthan-based solutions for washing liquid treatment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 11, pp. 228–236. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4558

Введение

Реализация большого количества функций бурового раствора осуществляется обработкой его основы путем введения различного рода химических соединений. Дисперсной фазой основы является вода, нефть и газ [1]. Обработка буровых растворов полимерами различного происхождения позволяет совершенствовать их рецептуры, тем самым обеспечивая технологичность промывки скважин, т. е. снижение затрат на строительство скважины за счет повышения качества бурового раствора (реологической характеристики, смазывающей и выносной способностей и многих других). Полимерный комплекс бурового раствора существенно изменяет его реологические характеристики, удовлетворяя многочисленным требованиям к характеру течения жидкости в процессе углубления скважины. Реологические свойства являются важнейшими физико-химическими характеристиками веществ [2].

Существует большое количество реологических моделей буровых растворов, пригодность которых выявляется путем построения графических зависимостей напряжения сдвига, измеряемого при движении жидкости, от скорости сдвига. Наибольшее внимание в последние десятилетия уделяется использованию биополимеров в составе буровых растворов, определяющих совершенство процессов углубления скважин, путем оптимального регулирования реологии промывочных жидкостей. Био-

полимеры на 75–90 % определяют структурно-реологические свойства их водных растворов [3]. Общепринятой реологической моделью водных растворов биополимеров является модель Оствальда де Вейля, которая удачно аппроксимирует кривые течения псевдопластичных жидкостей [4]. Коэффициент консистенции «К» и показатель нелинейности «n» определяют с помощью ротационной вискозиметрии по методике, приведенной в [4, 5].

Эту степенную зависимость используют для регулирования состава и свойств бурового раствора, причем наилучшими растворами считают растворы с показателем нелинейности, меньшим 0,3 [6, 7].

Для проходки скважин на месторождениях Восточной Сибири применяются буровые растворы на водной основе с большим многообразием составов, включающим биополимеры для обеспечения многофункциональности раствора, в частности, его загущения. При изучении реологии таких растворов оценивают зависимость ее показателей от ионной силы раствора, вводя катионы Na^+ , K^+ , Ca^{2+} в составе солей [8, 9].

Ввод солей в раствор производят для выявления устойчивости дисперсной системы раствора при проходке хемогенных пород, определения способности ингибировать глинодержащие горные породы, а также определения степени загрязнения буровых растворов вышеуказанными катионами.

Влияние солей на реологию водных растворов ксантана изучалось в [10, 11] с целью выявления

оптимальной концентрации биополимера и характера влияния хлоридов на реологические показатели раствора. Оптимальной признана концентрация ксантана в 0,5 %. Указывается, что при добавлении хлоридов полимер изменяет свою структуру от первичной к вторичной, а затем и к третичной, что приводит к нелинейному изменению реологических показателей. Авторы в [10, 11] установили предельное содержание хлоридов Na, K и Mg в водных растворах ксантана, а именно: концентрация NaCl не должна превышать 8 % из-за уменьшения предельного напряжения (YP), концентрация KCl не должна превышать 10,5 % из-за уменьшения реологических и фильтрационных параметров, для концентрации $MgCl_2$ этот предел составляет 7–8 %.

Реология водных растворов ксантана зависит от пространственной структуры макромолекул, которая может формироваться в результате комплексообразования при введении в раствор полисахарида противоположно заряженных ионов, в частности, катионов, что приводит к формированию макромолекул двойной спирали с ионами металла внутри. При повышении ионной силы раствора или концентрации ксантана образуется трехмерная сетка из двойных спиралей, связанных межмолекулярными водородными связями [2].

Как указано в [6, 7], оптимальное значение индекса течения «n» должно быть меньше 0,3. При этом не уточняется, является ли это значение пределом псевдопластичности водных растворов модификаций ксантана, осуществляемых путем введения в раствор соли, а также алгоритм достижения значения этого показателя.

Оценка реологических особенностей загущающих растворов с добавками солей может послужить основой для исследования более сложных составов буровых растворов.

Целью статьи является оценка (в рамках модели Оствальда де Вейля) реологии водных растворов ксантановой камеди торговой марки DUO-VIS в присутствии хлоридов Na и K при повышенной концентрации ксантана и солей, а также анализ влияния состояния дисперсной фазы раствора-загустителя на его реологические характеристики.

Анализ факторов, влияющих на реологию жидкостей, подчиняющихся степенному закону

Для обработки буровых растворов используются биополимеры, образцы которых изготавливаются на основе различных камедей (ксантановая, гуаровая смолы и т. п.). Загущающая способность самих биополимеров регулируется, помимо изменения их концентрации, путем введения в раствор ионов одновалентных или двухвалентных металлов. Изменяя ионную силу раствора, определяют пределы концентрации соли, при которых загущающая способность биополимера либо повышается,

либо сохраняется. Эти процессы сопровождаются изменением реологических свойств раствора, что и определяет необходимость изучения этой изменчивости для оптимизации состава и свойств бурового раствора.

Для того чтобы точно знать, какие реагенты применять в конкретном случае, необходимо иметь математическую модель физико-химических процессов, происходящих в буровом растворе при его обработке различными добавками [12–15].

Вязкость полимерного раствора на молекулярном уровне является мерой гидродинамического объема, т. е. объема, который занимает разрыхленный или набухший молекулярный клубок вместе с иммобилизованным растворителем. Эта характеристика тесно связана с молекулярным весом полимера и конформацией молекул или их ассоциатов, последняя зависит от скорости деформации. Зависимость вязкости от скорости сдвига определяет реологическую кривую, по виду которой можно судить о поведении дисперсной фазы при сдвиге, различной интенсивности [16].

Отмечается [14] недостаток степенной реологической модели, который заключается в том, что эта модель описывает ту часть полной реологической кривой, которая аппроксимирует только изменение вязкости, не затрагивая асимптотических частей этой кривой. Исследователи по-разному объясняют начало уменьшения вязкости псевдопластической жидкости (т. е. то напряжение сдвига или ту скорость сдвига, при которых начинается разжижение жидкости).

Реология дисперсии определяется балансом трех основных сил [17–20]: броуновской диффузией, гидродинамическим взаимодействием и поверхностными силами (отталкивающие или притягивающие). На уровне процессов, происходящих в масштабе взвешенных частиц, наиболее важными факторами являются объемная доля частиц, распределение частиц по размеру и форме, их пространственное положение. Неучет этих факторов отрицательно сказывается на прогнозе реологических характеристик разрабатываемых буровых растворов.

Методика исследования

Для изучения изменчивости параметров «n» и «K» модели Оствальда поставлен двухфакторный эксперимент, в котором первым фактором является содержание в растворе DUO-VIS, а вторым – содержание KCl.

Химический реагент DUO-VIS является высокомолекулярным биополимером, который производится в виде порошка плотностью 1500 кг/м^3 . После приготовления раствора с содержанием биополимера в концентрации 0,5 % и KCl в 25 % при температуре в $20 \text{ }^\circ\text{C}$ проведена его реометрия, результаты которой представлены в табл. 1.

Таблица 1. Измеренные значения вязкости

Tabl. 1. Measured viscosity values

$\dot{\gamma}$	1,704	3,408	5,112	10,224	17,04	34,08	51,12	102,2	170,4	340,8	511,2	1022,4
τ	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,1	2,1	4,3
η	0,058	0,029	0,0196	0,01	0,012	0,009	0,008	0,005	0,004	0,003	0,004	0,004

Примечание: $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, c^{-1} ; τ – касательное напряжение сдвига, Па; η – динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Note: $\dot{\gamma}$ is the shear rate, s^{-1} ; τ is the shear stress, Pa; η is the dynamic viscosity coefficient, Pa·s.

Руководствуясь общепринятыми представлениями о том, что растворы биополимеров в реологическом плане подчиняются степенному закону, по методике [4] определили его параметры ($n=1,0333$, $K=0,0033$). На рис. 1 представлено сопоставление измеренных значений вязкости и вычисленных по степенному закону.

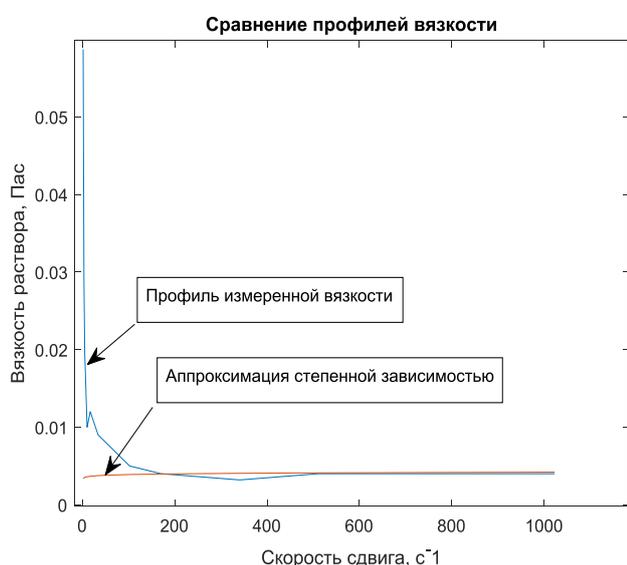


Рис. 1. Сравнение профиля измеренной вязкости раствора и аппроксимированной по степенному закону

Fig. 1. Comparison of the profile of the measured viscosity of the solution and the one approximated by the power law

Аппроксимация по степенному закону, как видно по графику, представляет собой прямую линию, что противоречит логике степенного реологического закона. Это объясняется, во-первых, тем, что вычисленный по методике [2] показатель степени n близок к единице, что алгебраически и определяет прямую линию. Во-вторых, как отмечалось выше, недостатком степенного закона является его способность отображать только тот интервал скоростей сдвига, где вязкость изменяется, т. е. тот интервал, где жидкость разжижается. Определение показателя нелинейности n по методике [4] производится при скоростях сдвига, равных 511,2 и

1022,4 c^{-1} , при которых структура дисперсной системы полностью разрушена и находится в равновесном состоянии, т. е. вязкость не изменяется и поведение системы отображается графиком на рис. 2.

Отсюда напрашивается вывод, что при реометрии растворов необходимо задействовать полную шкалу реометра и по графику вязкости определять участок изменения скорости деформации, где изменяется вязкость.

При необходимости применения степенной функции (такая необходимость весьма существенна) следует преобразовать интервал аппроксимации, т. е. исключить из него асимптотические части, где вязкость жидкости при сдвиговом напряжении прямо пропорциональна напряжению, т. е. жидкость в начальном и конечном участках интервала скоростей сдвига является ньютоновской.

Для примера из табл. 1 выделим интервал, где жидкость под сдвиговым напряжением «разжижается». Это примерно $\tau = [0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,7]$ и $\dot{\gamma} = [17,04; 34,08; 51,12; 102,24; 170,4]$. На рис. 2 представлено сопоставление измеренных и аппроксимированных значений вязкости, которое показывает правомерность использования степенного закона в выделенном интервале скоростей сдвига.

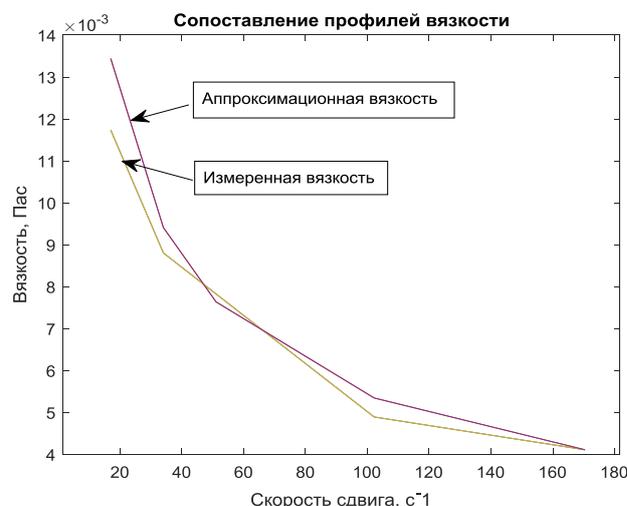


Рис. 2. Сопоставление измеренных и аппроксимированных значений вязкости

Fig. 2. Comparison of measured and approximated viscosity values

Это сопоставление свидетельствует о том, что выделение интервалов разжижения раствора и их аппроксимация степенной зависимостью весьма приемлемы. Таким образом можно различать жидкости по величине интервала «разжижения».

Для определения степени влияния концентраций биополимера и KCl на показатель нелинейности раствора и его коэффициента консистенции, применяемые для аппроксимации вязкости раствора степенной зависимостью, поставлен полный факторный эксперимент типа 2^2 .

Под кодовым значением первого фактора $X_1=+1$ определено содержание биополимера, равное 1,5 г/л, и $X_1=-1$, равное 0,5г/л, и, соответственно, $X_2=+1$ определено содержание KCl, равное 25 г/л, и $X_2=-1$, равное 15 г/л.

По данным, полученным при проведении полного факторного эксперимента в области значений реологической кривой (для «n» и «K»), сформированы уравнения (1), (2), где жидкость разжижается:

$$n = 0,298 - 0,132X_1 + 0,006X_2 - 0,019X_1X_2, \quad (1)$$

$$K = 0,964 + 0,890X_1 + 0,054X_2 + 0,070X_1X_2. \quad (2)$$

Визуализация этих уравнений представлена на рис. 3, 4.

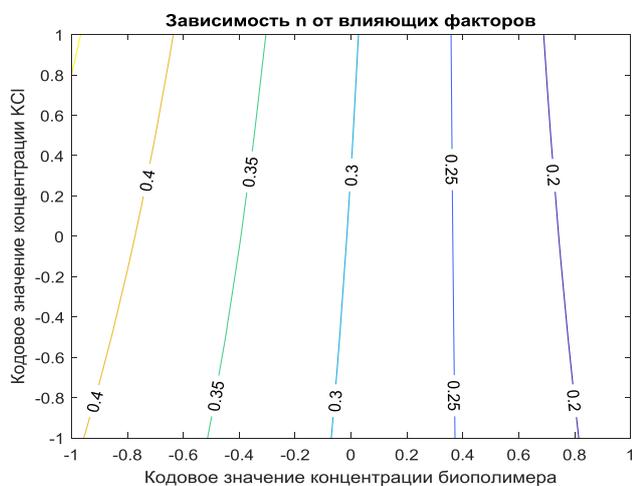


Рис. 3. Зависимость показателя нелинейности n от изменения концентрации биополимера и хлористого калия

Fig. 3. Dependence of the nonlinearity index n on changes in the concentration of biopolymer and potassium chloride

Для оптимизации функциональных свойств бурового раствора авторами [6, 7, 21] предлагается изменять показатель нелинейности до значений $n=0,3$. Исходя из уравнения (1) и рис. 3, видно, что показатель «n» можно значительно уменьшить.

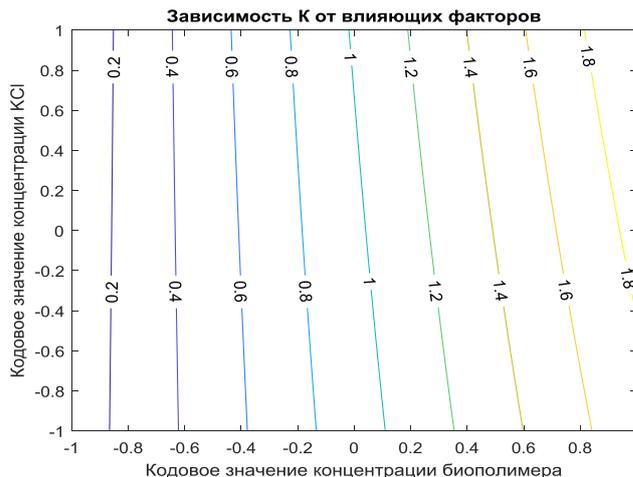


Рис. 4. Зависимость коэффициента консистенции K от изменения концентрации биополимера и хлористого калия

Fig. 4. Dependence of the consistency coefficient K on changes in the concentration of biopolymer and potassium chloride

В результате проведенного эксперимента получено уравнение показателя оптимизации, представленное в [5]:

$$\lambda = 7,03 - 6,925X_1 + 1,14X_2 + 1,13X_1X_2. \quad (3)$$

Визуализация уравнения (3) представлена на рис. 5.

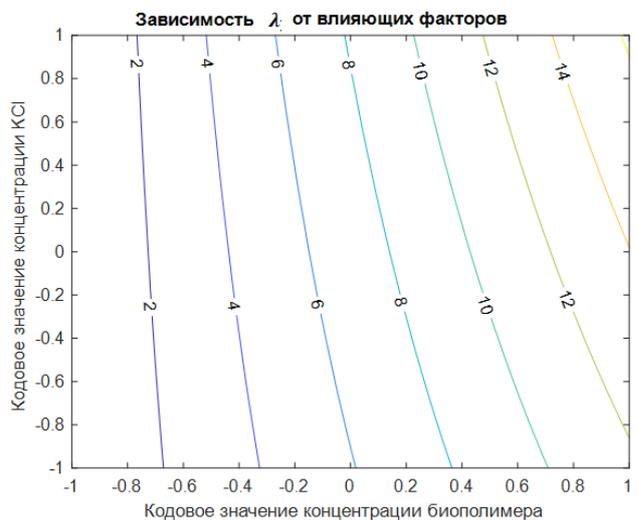


Рис. 5. Геометрическое представление уравнения показателя оптимизации

Fig. 5. Geometric representation of the optimization indicator equation

В [22] кривые течения растворов полимеров аппроксимированы в рамках обобщенного уравнения

течения только на участке высоких скоростей, т. е. ближе к участку разжижения. Авторы отмечают трудности в описании кривой течения на большом интервале скоростей сдвига, если отсутствует «заметный переходный участок между двумя режимами течения». Однако информации, получаемой путем реометрии растворов в режиме одномерной меры ($\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$) и только в режиме разжижения, недостаточно для более полного определения течения растворов загустителей.

Реология суспензии частиц является сложной функцией ее физических свойств и процессов, происходящих на уровне взвешенных частиц. Как упоминалось выше, наиболее значимыми факторами являются объемная доля частиц, их форма и взаимодействие между частицами. Исходя из объемной доли дисперсной фазы φ , Эйнштейн установил вязкость дисперсии (4):

$$\eta = \eta_0(1 + \alpha\varphi), \quad (4)$$

где η_0 – вязкость дисперсионной среды, мПа·с; η – вязкость смеси, мПа·с.

Для относительной $\eta_{отн}$ и удельной $\eta_{уд}$ вязкости дисперсной системы уравнения Эйнштейна соответственно принимают вид (5), (6):

$$\eta_{отн} = \frac{\eta}{\eta_0} = 1 + \alpha\varphi, \quad (5)$$

$$\eta_{уд} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} = \alpha\varphi. \quad (6)$$

Коэффициент $\alpha=2,5$ для шарообразной формы частиц дисперсной фазы, и при этом предполагается, что система несжимаема, находится в режиме ламинарного течения, скольжение между частицами и жидкостью минимально, отсутствует взаимодействие между частицами. Объемная доля дисперсной фазы увеличивается на объем иммобилизованной жидкости. Объемную долю рассчитывали по формуле [23]:

$$\varphi = \frac{\omega/d_2}{\omega/d_2 + \frac{(1-\omega)}{d_1}}, \quad (7)$$

где d_1, d_2 – значения плотности растворителя и полимера соответственно; ω – массовая доля полимера в растворе.

При массовой доле биополимера $\omega=0,5$ г/л объемная доля по уравнению (7) составляет 0,4. Таким образом, объем макромолекул биополимера вместе с иммобилизованной жидкостью составляет 40 % от общего объема раствора, который и определяет значения измеряемой вязкости. Это далеко не разбавленный раствор, по которому можно было бы определить молекулярную массу и размеры макромолекул, влияющие на вязкость растворов. В рамках жестко установленных концентрационных границ объемная доля дисперсной фазы может послужить

классификационной характеристикой растворов ксантана различных торговых марок. Увеличение консистенции раствора связано с изменением концентрации при растворении полимера. Она определяется удельной вязкостью (6), которая показывает, на какую величину повышается текучесть раствора биополимера на единицу вязкости дисперсионной среды. Удельная вязкость зависит от концентрации раствора биополимера и от его молекулярной массы. Кроме этого, состав характеризуется приведенной вязкостью $\eta_{уд}/c$, которая определяет рост его густоты, отнесенной к единице концентрации раствора, и это приращение пропорционально молекулярной массе полимера. Устремляя этот параметр вязкости к нулю, получают так называемую характеристическую вязкость [24]:

$$[\eta] = \lim \left(\frac{\eta_r - 1}{c} \right) = \lim \frac{\eta_{sp}}{c}, \quad (8)$$

где η – вязкость раствора; η_{sp} – вязкость растворителя; η_r – относительная вязкость $= \eta/\eta_{sp}$; c – концентрация в мг/мл или мг/л.

Данные проведенного эксперимента определили характер зависимости приведенной вязкости в виде уравнений $\eta_{уд}/c = 0,796 \cdot \tau + 0,756$ для раствора с содержанием биополимера в 0,5 % и KCl=15 % и $\eta_{уд}/c = 0,404 \cdot \tau + 0,952$ для раствора в 1,5 и 25 % соответственно.

Использование вышеуказанных характеристик также способствует качественному выбору торговых марок биополимера. На рис. 6 показаны эти характеристики в установленных пределах концентраций биополимера и соли ($C_{биопол}=0,5$ и 1,5 г/л, $C_{KCl}=15$ и 25 г/л).

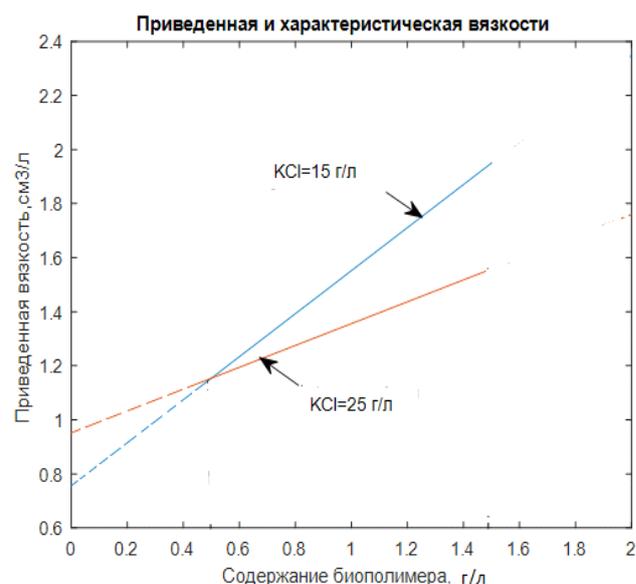


Рис. 6. Определение характеристической вязкости
 Fig. 6. Determination of the characteristic viscosity

Значение характеристической вязкости (8) увеличивается вместе со значением вязкости при добавлении бесконечно малого количества растворенного вещества к растворителю. Это значение имеет размерность удельного объема и служит мерой дополнительных потерь энергии, связанных с вращением макромолекул в ламинарном потоке с градиентом скорости. В данном случае повышение предельной вязкости при дополнительном увеличении концентрации КСl требует теоретического объяснения.

Как указано в [25], при наличии электролита формируется коллоидная сеть, в основе которой лежат межмолекулярные водородные связи между спиральными сегментами стержней, в дополнение к ограниченному перепутыванию полимера. Переплетенные жесткие молекулы определяют характерные реологические свойства ксантановой камеди.

Выводы

На примере биополимера торговой марки DOU-VIS ксантанового ряда показан перевернутый S-образный вид кривой вязкости водных растворов ксантана, получаемый при измерении вязкости ротационным вискозиметром при использовании его

полной шкалы. На асимптотических частях этой кривой жидкость при деформации подчиняется закону Ньютона, а на остальной ее части – степенному закону. Выделены интервалы скорости деформации, где показания вязкости подчиняются степенному закону. Приемлемость степенной аппроксимации при таком выделении показана графически.

Проведенный полный факторный эксперимент позволил выявить зависимость параметров степенной модели от концентрации биополимера и КСl, которая представлена в виде полинома первого порядка. При существующей тенденции устремлять показатель нелинейности для псевдопластичных жидкостей к значению, равному 0,3 и меньше, в нашем исследовании в рамках установленных концентраций получено значение этого показателя, равное 0,2.

Применение приведенной и характеристической вязкостей растворов может послужить качественной и количественной оценками проектируемых составов буровых растворов.

При вычислении характеристической вязкости установлено соотношение массовой доли ксантана и его гидратированного объема в водном растворе, которое составило в процентном соотношении 0,5/40.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полимерные буровые растворы. Эволюция «Из грязи в князи» / В.П. Овчинников, Н.А. Аксенова, Л.А. Каменский, В.А. Федоровская // Бурение и нефть. – 2014. – № 12. – С. 24–29.
2. Кочуров Д.В. Реология разбавленных растворов полимеров // Международный студенческий научный сборник. – 2018. – № 5. – С. 157–158.
3. Исследование эффектов синергетического взаимодействия ксантановой и гуаровой смол в водных растворах / О.И. Валиева, О.Ю. Шарова, В.Ю. Клеттер, Р.А. Мулюков, И.М. Борисов // Вестник Башкирского университета. – 2013. – Т. 18. – № 1. – С. 52–55. DOI: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18956899&ysclid=lpgd3cji9m958935489>.
4. Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей) / пер с англ. – М.: Изд-во «Недра», 1985. – 509 с.
5. Ламбин А.И., Аверкина Е.В. Изучение изменчивости реологических свойств дисперсий биополимеров на водной основе в составе буровых растворов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 91–97. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/8/4049>.
6. Шарафутдинов З.З., Шарафутдинова Р.З. буровые растворы на водной основе и управление их реологическими свойствами // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2004. – № 1. – С. 1–21. DOI: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23619413>.
7. Уляшева Н.М., Леушева Е.Л., Галишин Р.Н. Разработка композиции бурового раствора для проводки наклонно направленного ствола скважины с учетом реологических параметров жидкости // Записки горного института. – 2020. – Т. 244. – С. 454–461. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.8.
8. Wenxi Z., Xiuhua Z. Effective modified xanthan gum fluid loss agent for high-temperature water-based drilling fluid and the filtration control mechanism // ACS Omega. – 2021. – Vol. 6. – P. 23788–23801. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02617>.
9. Jeremic K., Sinisa M. The influence of temperature and inorganic salts on therheological properties of xanthan aqueous solutions // Journal of the Serbian Chemical Society. – 1999 – Vol. 64 (2). – P. 109–116. DOI: https://www.researchgate.net/publication/26404786_The_influence_of_temperature_and_inorganic_salts_on_therheological_properties_of_xanthan_aqueous_solutions.
10. Blinov P.A., Dvoynikov M.V. Rheological and filtration parameters of the polymer salt drilling fluids based on xanthan gum // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – Vol. 13 (14). – P. 5661–5664. DOI:10.3923/jeasci.2018.5661.5664
11. Brunchi C.-E., Morariu S., Bercea M. Intrinsic viscosity and conformational parameters of xanthan inaqueous solutions: Salt addition effect // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. – 2014. – Vol. 122. – P. 512–519. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2014.07.023.
12. Птичкин И.И., Птичкина Н.М. Пищевые полисахариды: структурные уровни и функциональность. – Саратов: Саратовский ГАУ, 2005. – 160 с.
13. Леушева Е.Л. Оценка влияния фракционного состава твердой фазы на фильтрационные характеристики промывочной жидкости // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2022. – № 11 (359). – С. 33–37. DOI: 10.33285/0130-3872-2022-11(359)-33-37.

14. Матвиенко О.В. Исследование установившегося течения псевдопластической жидкости, описываемой моделью Сиско, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного ун-та. Математика и механика. – 2018. – № 55. – С. 99–112.
15. Программное управление свойствами бурового раствора на водной основе / А.Я. Мендель, З.А. Мулюков, В.Ю. Клеттер, И.З. Мухамедзянов, О.Ф. Кондрашев // Нефтегазовое дело. Бурение и горные выработки. – 2007. – Т. 5. – № 1. – С. 42–45.
16. Tadros F.T. Rheology of dispersions: principles and applications. – Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. – 216 p.
17. Emmanuel U.A., Godpower C.E., Ghasem G.N. Enhancing the performance of xanthan gum in waterbased mud systems using an environmentally friendly biopolymer // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2020. – Vol. 10 (04). – P. 1933–1948. DOI: 10.1007/s13202-020-00837-0
18. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. – СПб.: Профессия, 2007. – 560 с.
19. Barnes H.A., Hutton J.F., Walters K. Introduction to Rheology. – Amsterdam: Elsevier Science Pub. Co, 1989. – 210 p.
20. Numerical modeling of laminar and turbulent annular flows of power-law fluids in partially blocked geometries / Н. Miao, V. Dokhani, Y. Ma, D. Zhang // Results in Engineering. – 2023. – Vol. 17. – P. 100930. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100930>.
21. Кирсанов Е.А., Тимошин Ю.Н. Неньютоновское течение структурированных систем. XX. Вязкость полимерных растворов // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2016. – Т. 16 (4). – С. 69–79. DOI: 10.18083/LCApp.2016.4.69.
22. Сафронов А.П., Адамова Л.В., Курляндская Г.В. Параметры Флори–Хаггинса гуара, ксантана, агарозы и геллана в водных растворах // Высокомолекулярные соединения. – 2019. – Т. 61. Серия А. – № 1. – С. 33–43.
23. Effect of carbon and nitrogen sources on the production of xanthan gum from *Xanthomonas campestris* isolated from soil / S.M. Kumara, B.A. Khan, K.C. Rohit, B. Purushotham // Journal Arch Appl Sci Res. – 2012. – Vol. 4 (6). – P. 2507–2512.
24. Okrajni S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells // Journal SPE Drill Eng. – 1986. – Vol. 1 (04). – P. 297–308. DOI: 10.1134/S2308112019010152.
25. Оценка вязкости водных растворов ксантановых смол / А.И. Ламбин, Е.В. Аверкина, А.Н. Ерыгина, А.С. Красинская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 7. – С. 96–103. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3522.

Информация об авторах

Анатолий Иванович Ламбин, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. alambin@ex.istu.edu; <https://orcid.org/0009-0000-1783-7569>

Елена Владимировна Аверкина, старший преподаватель кафедры нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. averkina.l@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5492-4079>

Поступила в редакцию: 01.02.2024

Поступила после рецензирования: 22.05.2024

Принята к публикации: 28.10.2024

REFERENCES

1. Ovchinnikov V.P., Aksenova N.A., Kamensky L.A., Fedorovskaya V.A. Polymer drilling fluids. Evolution «from rags to riches». *Drilling and Oil*, 2014, no. 12, pp. 24–29. (In Russ.)
2. Kochurov D.V. Rheology of dilute polymer solutions. *International Student Scientific Collection*, 2018, no. 5, pp. 157–158. (In Russ.)
3. Valieva O.I., Sharova O.Yu., Kletter V.Yu., Mulyukov R.A., Borisov I.M. Investigation of the effects of synergistic interaction of xanthan and guar resins in aqueous solutions. *Bulletin of Bashkir University*, 2013, vol. 18, no.1, pp. 52–55. (In Russ.) DOI: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18956899&ysclid=lpgd3cji9m958935489>.
4. Gray J.R., Darley G.S.G. *Composition and properties of drilling agents (flushing fluids)*. Translated from English. Moscow, Nedra Publ., 1985. 509 p. (In Russ.)
5. Lamin A.I., Averkina E.V. Study of the variability of rheological properties of water-based biopolymer dispersions in the composition of rastvorov drilling rigs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 8, pp. 91–97. (In Russ.)
6. Sharafutdinov Z.Z., Sharafutdinova R.Z. Water-based drilling fluids and management of their rheological parameters. *Neftegazovoye delo*, 2004, no. 1, pp. 1–21. (In Russ.)
7. Ulyasheva N.M., Leusheva E.L., Galishin R.N. Development of a drilling mud composition for wiring an obliquely directional borehole, taking into account the rheological parameters of the liquid. *Notes of the Mining Institute*, 2020, vol. 244, pp. 454–461. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2020.4.8.
8. Wenxi Z., Xiuhua Z. Effective modified xanthan gum fluid loss agent for high-temperature water-based drilling fluid and the filtration control mechanism. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, pp. 23788–23801.
9. Jeremic K., Sinisa M. The influence of temperature and inorganic salts on the rheological properties of xanthan aqueous solutions. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 1999, vol. 64 (2), pp. 109–116. DOI: https://www.researchgate.net/publication/26404786_The_influence_of_temperature_and_inorganic_salts_on_the_rheological_properties_of_xanthan_aqueous_solutions.
10. Blinov P.A., Dvoynikov M.V. Rheological and filtration parameters of the polymer salt drilling fluids based on xanthan gum. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13 (14), pp. 5661–5664. DOI: 10.3923/jeasci.2018.5661.5664.

11. Brunchi C.-E., Morariu S., Bercea M. Intrinsic viscosity and conformational parameters of xanthan in aqueous solutions: salt addition effect. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2014, vol. 122, pp. 512–519. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2014.07.023.
12. Ptichkin I.I., Ptichkina N.M. *Food polysaccharides: structural levels and functionality*. Saratov, Saratov State University of Economics Publ., 2005. 160 p. (In Russ.)
13. Leusheva E.L. Evaluation of the effect of the fractional composition of the solid phase on the filtration characteristics of the washing liquid. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2022, no. 11 (359), pp. 33–37. (In Russ.) DOI: 10.33285/0130-3872-2022-11(359)-33-37.
14. Matvienko O.V. Investigation of the steady-state flow of a pseudoplastic fluid described by the Cisco model in a cylindrical pipe. *Bulletin of the Tomsk State University. Mathematics and mechanics*, 2018, no. 55, pp. 99–112. (In Russ.)
15. Mendel A.Ya., Mulyukov Z.A., Kletter V.Yu., Muhamedzyanov I.Z., Kondrashev O.F. Software control of the properties of a water-based drilling mud. *Oil and gas business. Drilling and mining operations*, 2007, vol. 5, no. 1, pp. 42–45. (In Russ.) DOI: <http://ngdelo.ru/article/view/1466>.
16. Tadros F.T. *Rheology of dispersions: principles and applications*. Germany, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGa., 2010, pp. 216.
17. Emmanuel U.A., Godpower C.E., Ghasem G.N. Enhancing the performance of xanthan gum in waterbased mud systems using an environmentally friendly biopolymer. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020, vol. 10 (04), pp. 1933–1948. DOI: 10.1007/s13202-020-00837-0.
18. Malkin A.Ya., Isaev A.I. *Rheology: concepts, methods, applications*. St. Petersburg, Profession Publ., 2007. 560 p. (In Russ.)
19. Barnes H.A., Hutton J.F., Walters K. *Introduction to rheology*. Amsterdam, Elsevier Science Publ. Co, 1989. 210 p.
20. Miao H., Dokhani V., Ma Y., Zhang D. Numerical modeling of laminar and turbulent annular flows of power-law fluids in partially blocked geometries. *Results in Engineering*, 2023, vol. 17, pp. 100930. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100930>.
21. Kirsanov E.A., Timoshin Yu.N. Non-Newtonian flow of structured systems. XX. Viscosity of polymer solutions. *Liquid crystals and their practical use*, 2016, vol. 16 (4), pp. 69–79. (In Russ.) DOI: 10.18083/LCApp.2016.4.69.
22. Safronov A.P., Adamova L.V., Kurlyandskaya G.V. Parameters of Flori–Huggins guar, xanthan, agarose and gellan in aqueous solutions. *High molecular weight compounds*, 2019, vol. 61. Series A, no. 1, pp. 33–43. (In Russ.) DOI: 10.1134/S2308112019010152.
23. Kumara S.M., Khan B.A., Rohit K.C., Purushotham B. Effect of carbon and nitrogen sources on the production of xanthan gum from *Xanthomonas campestris* isolated from soil. *Journal Arch Appl Sci Res*, 2012, vol. 4 (6), pp. 2507–2512.
24. Okrajni S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells. *SPE Drill Eng*, 1986, no. 1 (04), pp. 297–308.
25. Lambin A.I., Averkina E.V., Yarygina A.N., Krasinskaya A.S. Evaluation of the viscosity of aqueous solutions of xanthene resins. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 7, pp 96–103. (In Russ.)

Information about the authors

Anatoly I. Lambin, Cand. Sc., Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. alambin@ex.istu.edu; <https://orcid.org/0009-0000-1783-7569>

Elena V. Averkina, Senior Lecturer, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. averkina.l@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5492-4079>

Received: 01.02.2024

Revised: 22.05.2024

Accepted: 28.10.2024