

УДК 622.24
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4851
Шифр специальности ВАК: 2.21.03.01
Научная статья

Выбор состава растворов-загустителей с использованием степенных моделей

А.И. Ламбин, Е.В. Аверкина✉

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, г. Иркутск

✉ averkina.l@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Статья посвящена изучению загустителей буровых растворов на основе биополимеров в рамках степенных реологических моделей. Разнообразие этих моделей и множественность целей аппроксимации по ним затрудняют выбор конкретной модели. **Цель.** Исследовать реологические свойства некоторых загущающих растворов с использованием модели Карро–Ясуды. **Методы.** Реологические свойства водных растворов биополимеров изучались путем замера их вязкости с помощью ротационного вискозиметра OFITE. Проводился анализ данных измеренного реологического профиля вязкости водных растворов ксантановой смолы и аппроксимация их путем применения реологических моделей Оствальда де Вейля и Карро–Ясуды для получения дополнительных реологических параметров, расширяющих информационную характеристику загустителей. Влияние солей на вязкость растворов загустителей изучалось путем постановки полного факторного эксперимента. **Результаты и выводы.** Выявлена особенность расчета показателя нелинейности по методике Дарли: если соотношение показаний ротационного вискозиметра $\theta_{300}/\theta_{600} < 0,5$, расчетное значение показателя нелинейности становится равным или большим единицы при измеренном профиле вязкости, соответствующем профилю вязкости псевдопластичной жидкости. Для этого случая предложен алгоритм вычисления параметров именно псевдопластичной жидкости n и K . Исследования проводились с учетом современных требований к буровым растворам. Предложена методика расчета показателей консистенции и нелинейности для аппроксимации измеренных значений вязкости псевдопластичных жидкостей в случае $\theta_{300}/\theta_{600} < 0,5$. Аппроксимация значений вязкости изученных растворов загустителей на основе рассмотренных биополимеров с помощью модели Карро–Ясуды дает более точный результат по сравнению с другими степенными моделями. Как известно, выносная способность бурового раствора улучшается при увеличении его вязкости при малых скоростях сдвига. Показана эффективность оценки выносной способности раствора-загустителя при модифицировании его хлоридами калия и натрия при использовании одного из параметров степенной модели, а именно показателя консистенции раствора.

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

Для цитирования: Ламбин А.И., Аверкина Е.В. Выбор состава растворов-загустителей с использованием степенных моделей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 9. – С. 152–160. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4851

UDC 622.24
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4851
Scientific paper

Selection of the composition of thickening solutions using power models

A.I. Lambin, E.V. Averkina✉

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

✉ averkina.l@yandex.ru

Abstract. Relevance. The article is devoted to the study of drilling fluid thickeners based on biopolymers within the framework of power rheological models. The diversity of these models and the multiplicity of approximation purposes for them make it difficult to choose a specific model. **Aim.** To study the rheological properties of some thickening solutions using the Carreau–Yasuda model. **Methods.** Analysis of measured rheological viscosity profile data for aqueous solutions of xanthan gum and their approximation using the Carreau–Yasuda rheological model to obtain additional rheological parameters that expand the information characteristics of thickeners. A feature of calculating the nonlinearity index using the Darley method is revealed: if the ratio of the rotational viscometer readings is $\theta_{300}/\theta_{600} < 0.5$, the calculated value of the nonlinearity index becomes equal to or greater than one with a measured viscosity profile corresponding to the viscosity profile of a pseudoplastic fluid. The studies were conducted taking into account the requirements for drilling fluids: high viscosity at low shear rates, increased removal capacity, a sharp decrease in viscosity when flowing in narrow gaps, low values of the filtration index. **Results and conclusions.** The authors have proposed a method for calculating the consistency and nonlinearity indices for approximating the measured viscosity values of pseudoplastic fluids in the case of $\theta_{300}/\theta_{600} < 0.5$. Approximation of the viscosity values of the studied thickener solutions based on the considered biopolymers using the Carreau–Yasuda model gives a more accurate result compared to other power models. As it is known, the removal capacity of a drilling fluid improves with an increase in its viscosity at low shear rates. The efficiency of assessing the removal capacity of a thickener solution when modified with potassium and sodium chlorides is shown using one of the parameters of the power model, namely, the consistency index of the solution.

Keywords: biopolymer drilling fluids, xanthan gum, consistency coefficient, viscosity properties, power rheological law, Carreau–Yasuda model

For citation: Lambin A.I., Averkina E.V. Selection of the composition of thickening solutions using power models. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 9, pp. 152–160. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4851

Введение

Структурные особенности дисперсных систем определяют их вязкость при течении. В экспериментальных исследованиях характер течения неньютоновских жидкостей отображается в виде реологических кривых, аппроксимация которых осуществляется с помощью различных математических моделей, отличающихся числом их параметров. Однако следует отметить, что одно реологическое уравнение может обеспечить одинаковую точность для различных по физико-химической природе систем, и, наоборот, приемлемая точность аппроксимации конкретной системы будет удовлетворяться несколькими моделями [1]. Такое положение, как отмечают авторы, приемлемо для инженерных приложений, но для исследовательских целей возможно разделение кривых течения или кривых вязкости на отдельные участки, которые описываются разными способами, но обычно – степенным законом. Например, авторы [2] показали, что результаты для степенной жидкости можно применять к растворам, которые могут быть описаны реологическими моделями Гершеля–Балкли, Оствальда де Вейля и др., путем выбора степенного показателя нелинейности n и показателя консистенции K .

Буровые растворы представляют собой неньютоновские жидкости, и при их течении напряжение сдвига аппроксимируется различными реологическими моделями, основными из которых являются модель Гершеля–Балкли, модель бингамовского пластика и Оствальда де Вейля, или степенного закона, причем модель Гершеля–Балкли объединяет в себе свойства модели бингамовского пластика

и степенной жидкости. Близкой к модели Гершеля–Балкли по форме является модель Сиско [3]. Эти две модели отличаются от степенной модели введением в них третьего параметра. Если в первой модели в качестве третьего параметра введено предельное напряжение сдвига, то во второй – вязкость жидкости, получаемая при бесконечной скорости сдвига. Как отмечается в [4], буровой раствор представляет собой сплошную среду, свойства которой определяются при ее движении проявлением водородных связей, что характерно для псевдопластичных жидкостей.

Круг буровых растворов с псевдопластичными свойствами непрерывно расширяется за счет использования в их составе различного рода полимеров, в частности водорастворимых полимеров, как основных загустителей буровых растворов [5]. Однако их качество весьма разнообразно, что определяет необходимость разработки метода выбора загустителя. К сожалению, как отмечается в [4], не разработаны положения по управлению показателем нелинейности буровых растворов с одновременным увеличением ассортимента используемых реагентов. Отсюда возникает необходимость более детальной интерпретации показателей нелинейности.

Влияние состава бурового раствора, подчиняющегося степенному закону, на показатели нелинейности и консистенции изучались в [4, 6, 7]. Измерению подвергались водные растворы полимеров с различными добавками других веществ. Однако эти добавки, вопреки утверждениям авторов, или не влияют на показатель нелинейности, или их влияние несущественно. Так, например, в работе

[4] исследованы растворы загустителя BARAZAN с добавками различных типов карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ). Все три варианта продемонстрировали одинаковый показатель нелинейности $n=0,22$. Аналогичная закономерность наблюдалась для глицеринового загустителя с добавками КМЦ и гидролизованного полиакрилонитрила (ИКПАНа): все пять изученных композиций показали идентичное значение $n=0,24$. Это свидетельствует о том, что добавки или не влияют, или мало влияют на изменчивость показателя нелинейности и что значения n и K зависят от концентрации загустителя. Отсюда, поиск оптимального n для проектируемого состава необходимо осуществлять (особенно для биополимерных загустителей) работая с их водными растворами с добавками хлоридов Na и K как модификаторов, путем сопоставления значений концентрационного градиента загустителя с оптимизируемым значением показателя нелинейности.

Помимо неньютоновского поведения вязкости, полимерным жидкостям свойственна вязкоупругая реакция. Растяжение полимерных цепей в процессе течения влечет за собой изменение упругой энергии системы, что приводит к более сложной зависимости напряжения от скорости деформаций [8, 9].

Влияние концентрации ксантана в его водном растворе на параметры степенной реологической зависимости изучалось в [10]. Эти авторы установили корреляции между содержанием полимера в его водном растворе и параметрами степенной зависимости, аппроксимирующей экспериментальные данные. Однако измеренные значения параметров степенной зависимости здесь не рассматривались в качестве показателей улучшения состава раствора. В [11] производилась подгонка профиля скорости, полученного экспериментально, к соответствующей теоретической модели (либо ньютоновской жидкости, либо степенной через индекс нелинейности).

Целью статьи является изучение реологической модели Карро–Ясуды для аппроксимации измеренных значений вязкости водных растворов загустителей буровых растворов.

Анализ кривых вязкости

В статье [12] авторами делается вывод, что для рассматриваемых условий значимость моделей Гершеля–Балкли и Шведова–Бингама одинакова, и на этой основе показано, что кривую течения, подчиняющуюся модели бингамовского пластика, можно аппроксимировать пошагово, разбивая всю кривую на отдельные участки, соответствующие каждому шагу, и на каждом участке используется своя бингамовская модель течения, т. е. не в виде одной аппроксимации для всего диапазона скоростей сдвига, а в виде нескольких интерполяцион-

ных зависимостей, построенных между точками данных отдельно для каждого диапазона скоростей сдвига. Авторы [13, 14] рассматривают аппроксимацию вязкости водных растворов полимеров, используя обобщенное уравнение, которое может быть применено как ко всему диапазону скоростей сдвига, так и к отдельным его участкам (низким и высоким скоростям) с различными коэффициентами этого уравнения [14]. Они отмечают, что существует множество полуэмпирических выражений для описания реологических кривых, и предлагают альтернативный подход, заключающийся в искусственном разделении кривых вязкости на отдельные участки, которые описываются разными способами, но обычно степенным законом.

Такой подход, может быть, и уточняет характер формульного приближения на всей возможной шкале сдвиговых деформаций, но усложняет практику применения аппроксимаций. С нашей точки зрения, для решения задач выбора состава бурового раствора, содержащего водорастворимые полимеры, для сравнения свойств таких растворов и выбора самих водорастворимых полимеров достаточно использовать широко применяемые модели течения Гершеля–Балкли и Оствальда де Вейля. Эти модели основаны на использовании степенной зависимости.

Исследователи, применяющие эти модели для оптимизации составов буровых растворов, добиваются уменьшения значения n . По мере уменьшения параметра n происходит уплощение профиля скорости, ветви которого более тесно примыкают к стенкам, ограничивающим поток жидкости. В результате скорость течения у стенок становится выше, чем в случае с течением Пуазейля, что имеет ключевое значение для эффективного удаления продуктов разрушения породы при углублении скважины.

Однако существуют возражения против применения модели Оствальда де Вейля. Авторы [15], ссылаясь на отсутствие теоретического обоснования модели, заявляют о некорректности ее при вычислении вязкости в окрестностях предельных значений скорости сдвига $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ и $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$, хотя предпочли модель Карро, представляющую собой также степенную зависимость.

Некорректность заявления авторов обосновывается тем, что показатель степени в выражении для вязкости равен $-1 < n - 1 < 0$, что определяет на графике этой зависимости наличие асимптот, которые, в свою очередь, отображают верхнее и нижнее ньютоновские плато при течении жидкости. Здесь следует отметить, что для того, чтобы прямая $y=kx+b$ была асимптотой графика функции $y=f(x)$ при $x \rightarrow +\infty$, необходимо и достаточно, чтобы существовали конечные пределы $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x} = k$;

$\lim_{x \rightarrow +\infty} (f(x) - kx) = b$. Асимптота не является частью графика функции, но показывает, как функция ведет себя на крайних ребрах графика. Однако вполне возможно, что функция может пересекать асимптоту и даже касаться её.

Не учитывая вышеприведенное замечание, следует отметить, что графики вязкостей водорастворимых полимеров (в частности, биополимеров), полученные путем применения ротационных вискозиметров с использованием полной шкалы скорости сдвига, их начальные и конечные участки, имеют вид прямых линий. Эти участки кривой вязкости отражают верхнее и нижнее ньютоновские плато. При деформировании водорастворимых полимеров на начальной стадии отмечается ньютоновское течение, т. е. с постоянной вязкостью. При малых скоростях сдвига структура состояния дисперсной системы остается невозмущенной, что приводит к ньютоновскому поведению концентрированной дисперсии. При увеличении скорости сдвига или, соответственно, напряжения сдвига выше критической величины происходит распад «каркаса», или «сетки», дисперсной системы на отдельные элементы, ориентация которых и ряд других процессов вызывают постепенное снижение вязкости. Дальнейшее увеличение скорости сдвига способствует стабилизации всех процессов в дисперсной системе, что вызывает восстановление ньютоновской вязкости. Этот участок кривой течения соответствует второму ньютоновскому плато. Эти два ньютоновских плато прослеживаются при построении кривой вязкости при использовании данных полной шкалы ротационного вискозиметра и соответствуют графически двум асимптотам степенной зависимости при вышеуказанных условиях. Промежуток между этими двумя плато рассматривается нами в виде его аппроксимации с помощью параметров степенной зависимости.

Методы исследования

Объектами исследования являются кривые напряжения сдвига и вязкости, полученные в результате замера реологических свойств водных растворов биополимеров, которые изучались путем замера их вязкости с помощью ротационного вискозиметра OFITE, модель 900. Проводился анализ данных измеренного реологического профиля вязкости водных растворов ксантановой смолы и аппроксимация их путем применения реологических моделей Оствальда де Вейля и Карро–Ясуды для получения дополнительных реологических параметров, расширяющих информационную характеристику загустителей.

Измеренные значения напряжения сдвига и вязкости испытуемых жидкостей аппроксимировались степенной моделью:

- напряжения сдвига

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

- вязкости жидкости

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}, \quad (2)$$

где K – показатель консистентности жидкости; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с^{-1} ; n – показатель, определяющий степень отклонения от прямолинейной зависимости η от $f(\dot{\gamma})$.

Определение параметров этого степенного закона производилось по методике [16]. Влияние солей на вязкость растворов-загустителей изучалось путем постановки полного факторного эксперимента.

Результаты исследования

Следует отметить, что расчет показателей нелинейности n и K по общепринятой методике [16] дает удовлетворительные результаты аппроксимации. Это подтверждают и проведенные нами исследования по изучению зависимостей показателя нелинейности и индекса консистентности от вида биополимера и состава его водных растворов (рис. 1).

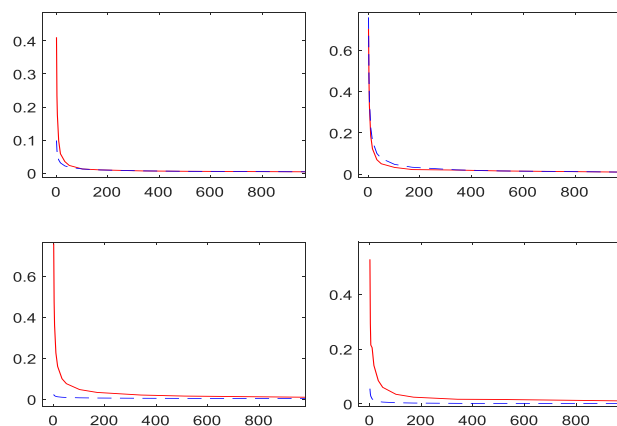


Рис. 1. Визуализация сравнения кривых вязкости водного раствора биополимера DUO- VIS концентраций 0,5 и 1,5 г/л с содержанием KCl в каждом из растворов 15 и 25 г/л

Fig. 1. Visualization of the comparison of viscosity curves of an aqueous solution of DUO-VIS biopolymer at concentrations of 0.5 and 1.5 g/l with a KCl content in each of the solutions of 15 and 25 g/l

Как видно из рисунка, аппроксимация степенной зависимостью не выявляет верхней асимптоты, за исключением одного графика.

Однако большое разнообразие режимов изменения структуры потока под действием сдвигового напряжения весьма значительно, что иногда приводит к нежелательным результатам. В нашем случае в одном из опытов, проведенных по методике [16],

расчетное значение индекса нелинейности оказалось больше единицы, что исключено для псевдопластичных жидкостей. Анализ этого случая показал, что измеренные отношения напряжения сдвига $\theta_{300}/\theta_{600}$ меньше 0,5 дают значения показателя нелинейности по этой методике больше единицы. При этом форма кривых измеренных значений вязкости в зависимости от скорости сдвига соответствует только псевдопластичным жидкостям. Для получения параметров псевдопластической модели пришлось использовать общий подход.

Как известно, кривая напряжения сдвига получается по вышеуказанной модели путем аппроксимирования степенной зависимостью $\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$. Эти параметры можно выбрать, используя координаты уже измеренной кривой вязкости: одну точку в области предельного напряжения сдвига $\tau_{пр}$, вторую в области «утонения» τ_y .

Подставив координаты этих точек в выражение степенной аппроксимирующей зависимости, получим систему двух уравнений с двумя неизвестными K и n :

$$\begin{cases} K \cdot \dot{\gamma}_{пр}^n = \tau_{пр} \\ K \cdot \dot{\gamma}_y^n = \tau_y \end{cases} \quad (3)$$

Решение системы (3) даёт возможность определить n по формуле (4) и K по формуле (5):

$$n = \frac{\lg(\tau_y/\tau_{пр})}{\lg(\dot{\gamma}_y/\dot{\gamma}_{пр})}, \quad (4)$$

$$K = \tau_{пр} / \dot{\gamma}_{пр}^n. \quad (5)$$

Этот метод предполагает линейную зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига, выраженную в логарифмических координатах [3]:

$$\lg \tau = \lg K + n \lg \dot{\gamma}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) видно, что $K = \tau$ при $\dot{\gamma} = 1$, а $n = \lg$ угла наклона линии $\lg \dot{\gamma}$.

На графике рис. 2 показан результат предложенной процедуры вычисления параметров степенной модели. В случае нелинейной зависимости в логарифмических координатах показатель неньютоновости n является переменной величиной. В этом случае для определения коэффициента K реологическую зависимость интерполируют на ось Y до значения $\dot{\gamma} = 1$, а показатель степени рассчитывают по уравнению:

$$n = \lg(\frac{\tau_i}{K}) / \lg \dot{\gamma}_i, \quad (7)$$

где τ_i и $\dot{\gamma}_i$ – текущие значения напряжения и скорости сдвига.

Такая модель уравнения (7) хорошо описывает зависимость вязкости от скорости сдвига в средней области кривой вязкости. Однако эта модель не учитывает выполаживание вязкости при низких и

высоких скоростях сдвига. Тем не менее, в силу математического удобства, модель степенной жидкости широко используют как в аналитических [17], так и в численных [18] расчетах при исследовании течений псевдопластичных жидкостей.

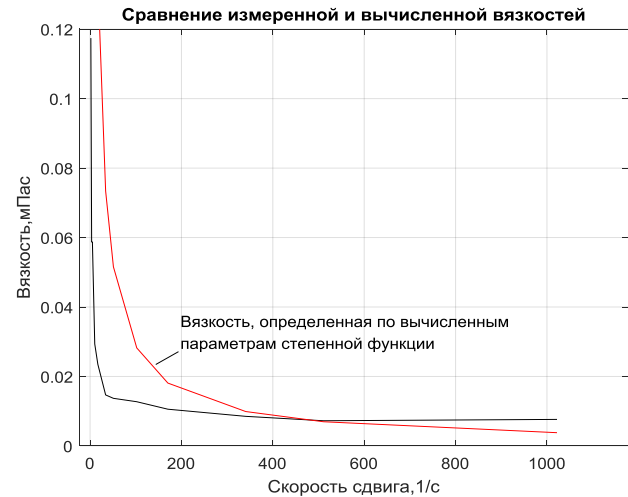


Рис. 2. Сравнение измеренной и вычисленной вязкостей по уравнению (1)

Fig. 2. Comparison of the measured and calculated viscosities using equation (1)

Несмотря на удобство применения модели Оствальда де Вейля (1), (2), она не позволяет выделить ньютоновские плато. Этого недостатка лишена модель Карро–Ясуды [19, 20]. Более того, модель Карро–Ясуды дает возможность определить длины асимптот [8, 20, 21].

Применение модели Карро–Ясуды позволяет получить дополнительные реологические параметры, участвующие в оценке оптимальных составов биополимерных дисперсий:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 + (\dot{\gamma}\lambda)^a]^{\frac{n-1}{a}}, \quad (8)$$

где η_0 и η_{∞} – ньютоновские вязкости среды, соответствующие предельно малым и большим скоростям сдвига, которые отражают ньютоновские плато при измерении вязкости псевдопластичных жидкостей; a – показатель, определяющий форму перехода между ньютоновским плато при малых скоростях сдвига и псевдопластичным поведением с ростом $\dot{\gamma}$; λ – параметр, определяющий скорость сдвига, при которой ньютоновское плато переходит в область снижения вязкости; n – показатель, определяющий угол наклона кривой в зоне уменьшения вязкости, соответствующий критерию неньютоновости; η_0 – значение вязкости, полученное при непосредственном измерении и временной константы λ , вычисленной из модели Карро–Ясуды, которое позволяет определить критическое напря-

жение сдвига τ_{cr} , при котором ньютоновское поведение жидкости сменяется на неньютоновское $\tau_{cr} = \eta_0/\lambda$.

Критическая скорость сдвига, соответствующая началу уменьшения вязкости, определяется как $\dot{\gamma}_{cr} = 1/\lambda$. Параметр λ для разных составов псевдопластичных жидкостей отличается большим количественным разнообразием. Автор [2] приводит такие данные: для 1,5 %-ной карбоксиметилцеллюлозы $\lambda=0,02673 \text{ с}^{-1}$, для крови $\lambda=3,13 \text{ с}^{-1}$, для 0,2 %-ной ксантановой камеди $\lambda=21,2 \text{ с}^{-1}$. Для водных растворов биополимера на основе ксантана разных марок нами предлагается использовать график измеренной вязкости, из которого выбраны значения вязкости из зоны первого ньютоновского плато η_I и из зоны изменяющейся вязкости η_{II} . Эти значения и составят показатель $\lambda = \log\left(\frac{\eta_I}{\eta_{II}}\right)$.

Таким образом, модель Карро–Ясуды дает возможность получить два дополнительных параметра, позволяющих характеризовать вязкостные свойства жидкостей. Частным случаем модели Карро–Ясуды (8) является модель Карро, для которой $a=2$.

На рис. 3 показано сравнение измеренной вязкости с вычисленной по модели Карро–Ясуды с параметрами, представленными в табл. 1.

Таблица 1. Параметры модели Карро–Ясуды для графика (рис. 3)

Table 1. Parameters of the Carro–Yasuda model for the graph (Fig. 3)

a	η_0	η_1	n	λ
2	0,6459	0,01791	0,505	0,560

Коэффициент детерминации, вычисленный по формуле (9), составляет 0,9999.

$$R^2 = \frac{\sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}. \quad (9)$$

Замена λ в уравнении (8): $\lambda = \eta_0^*/\tau^*$, где η_0^* – вязкость при переходе от ньютоновского течения в зону со степенной зависимостью; τ^* – напряжение, соответствующее η_0^* , дает уравнение, позволяющее оценить вязкость в интервале ее изменения [22, 23]:

$$\eta^*(\omega) = \eta_0^* \left[1 + \left(\frac{\eta_0^*}{\tau^*} \omega \right)^a \right]^{\frac{n-1}{a}}, \quad (10)$$

Уравнение (10) можно применить к комплексным данным вязкости для изучения степенного и сдвигового истончения образцов. На рис. 4 представлен интервал кривой (рис. 3), где вязкость уменьшается не прямо пропорционально.

Недостатком в пользовании модели Карро–Ясуды является подбор ее параметров (λ и a) путем сравнения кривых измеренной вязкости и вычисленной по модели. Нами предлагается в качестве λ

использовать логарифм отношения вязкости, выбранной в интервале первого ньютоновского плато, к вязкости в интервале ее изменчивости, а параметр a оставить равным 2, как применяется в [24].

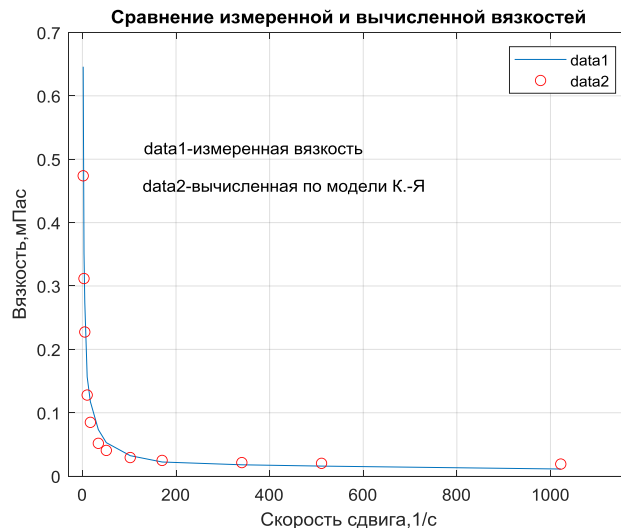


Рис. 3. Иллюстрация сходимости вязкостей, измеренной и вычисленной по модели Карро–Ясуды

Fig. 3. Illustration of the convergence of viscosities measured and calculated using the Carro–Yasuda model

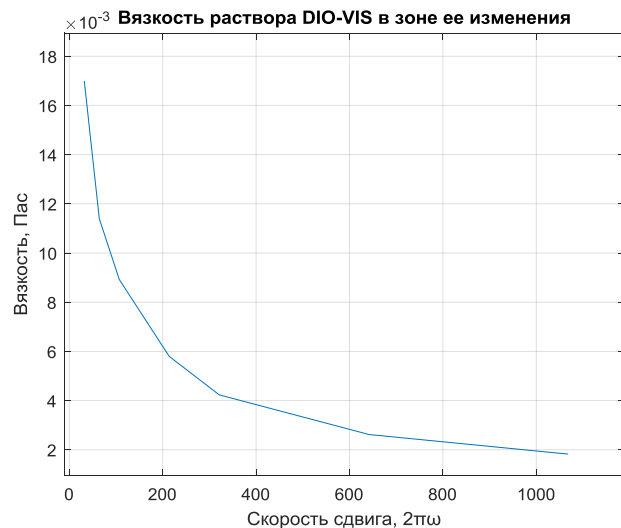


Рис. 4. Участок кривой изменения вязкости

Fig. 4. Viscosity curve section

Применение модели позволяет получить дополнительную информацию об испытываемом составе. Например, можно количественно оценить условную меру степени структурирования дисперсной системы, которая принимается равной разности логарифмов наибольшей и наименьшей вязкости. На рис. 5 приведена степень структурирования для раствора биополимера МНО-80.

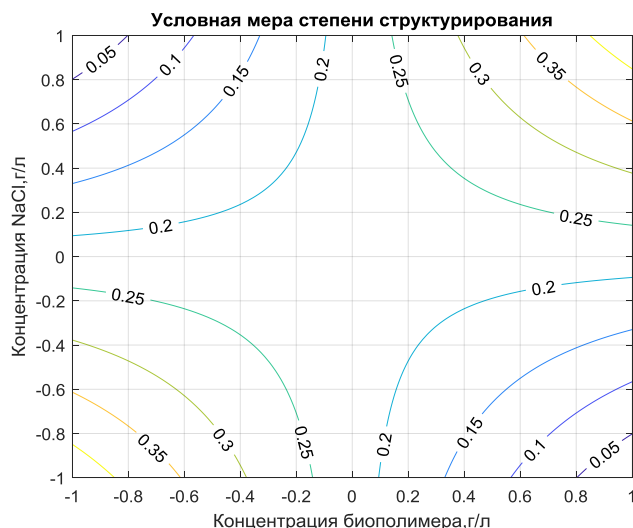


Рис. 5. Иллюстрация условной меры степени структурирования раствора
Fig. 5. Illustration of a conditional measure of the degree of structuring of the solution

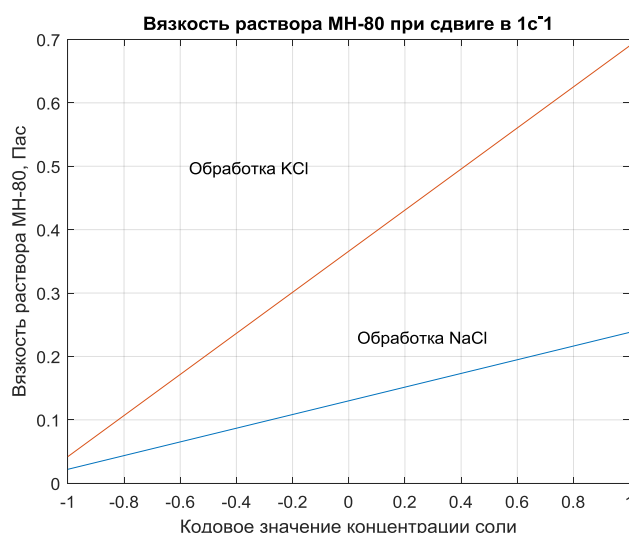


Рис. 6. Сравнение воздействия солей на вязкость раствора биополимера
Fig. 6. Comparison of the effect of salts on the viscosity of a biopolymer solution

Параметры степенной модели позволяют также идентифицировать вязкость при оптимизации выносной способности раствора. Как известно, высо-

кая вязкость при низких скоростях сдвига способствует лучшей очистке скважины. Нами для оценки модифицирования водного раствора биополимера использован параметр консистентности, применяемый в степенных моделях, т. е. вязкость, соответствующая скорости сдвига в 1 с^{-1} . На рис. 6 показано сравнение влияния солей на вязкость раствора. Прямые соответствуют уравнениям регрессии для K , полученным при постановке полного факторного эксперимента типа 2^2 . Надо полагать, что существенная разница во влиянии солей на модификацию водных растворов биополимеров получена не только за счет концентрационной разницы, но и за счет разницы в механизмах воздействия, что важно при оптимизации составов растворов.

Выводы

1. Использование параметров степенных моделей позволяет получить дополнительные данные о реологических свойствах псевдопластических жидкостей, оптимизировать их поведение в потоковых системах, а также повысить выносную способность коллоидных систем. Последнее объясняется увеличением динамического напряжения сдвига при низких скоростях сдвига, а также уплощением профиля скорости потока в кольцевом пространстве скважины.
2. Выявлена особенность измеренных значений напряжений сдвига водных растворов биополимеров при определении параметров степенной модели, когда параметр нелинейности псевдопластической жидкости n , определяемый по методике [16] и определяющий параметр консистентности K , оказывается равным или больше единицы, что несвойственно для псевдопластических жидкостей.
3. Предложен алгоритм вычисления параметра n для вышеуказанного случая.
4. Показан пример визуализации параметра структурирования псевдопластической жидкости.
5. Предложено в качестве параметра λ в модели Каврро–Ясуды использовать логарифм отношения вязкости, выбранной в интервале первого ньютоновского плато, к вязкости, выбранной из начального интервала степенной зависимости вязкости.

Изучение указанных условий позволяет совершенствовать оптимизацию промывки скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвиенко В.И., Кирсанов Е.А. Вязкость и структура дисперсных систем // Вестник Московского ун-та. Серия 2: Химия. – 2011. – Т. 52. – № 4. – С. 243–276. DOI: 17015870.
2. Escudier M.P., Oliveira P.J., Pinho F.T. Fully developed laminar flow of purely viscous non-Newtonian liquids through annuli, including the effects of eccentricity and inner-cylinder rotation // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2002. – Vol. 23. – P. 52–73. DOI: 10.1016/S0142-727X(01)00135-7.
3. Матвиенко О.В. Исследование установившегося течения псевдопластической жидкости, описываемой моделью Сиско, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2018. – № 55. – С. 99–112. DOI: 10.17223/19988621/55/9.

4. 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: 23619413.
5. Оценка эффективности применения биополимерных буровых реагентов при бурении горизонтальных стволов / И.А. Четвертнева, Г.А. Тептерева, И.Ф. Гайсин., С.Ю. Шавшукова // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2019. – № 2. – С. 40–43. DOI: 39198927.
6. 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>.
7. 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.
8. Вагнер С.А. Численное моделирование особенностей течения псевдопластичных полимерных жидкостей в микроканалах: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2018. – 22 с.
9. Larson R.G Constitutive equations for polymer melts and solutions // Butterworths series in chemical engineering. – Boston: Butterworth-Heinemann, 1988. – 364 p.
10. Mohammed A.R., Mohammed A.J. Effect of type and concentration of different water-soluble polymer solutions on rheological properties // Nahrain University, College of Engineering Journal (NUCEJ). – 2009. – Vol. 12. – № 1. – P. 26–37.
11. Ansari S., Rashid M.I., Waghmare P.R. Measurement of the flow behavior index of Newtonian and shear-thinning fluids via analysis of the flow velocity characteristics in a mini-channel // SN Applied Sciences. – 2020. – Vol. 2. – P. 1–15. DOI: 10.1007/s42452-020-03561-w.
12. Обоснование реологической модели утяжеленных буровых растворов на углеводородной основе для гидравлических расчетов / С.Г. Гаджиев, И.Н. Евдокимов, Н.Ю. Елисеев, А.П. Лосев // Бурение и нефть. – 2017. – № 07–08. – С. 66–71.
13. 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/LCAppl.2016.4.69.
14. Параметрическая идентификация реологической модели Карро с использованием регуляризации А. Н. Тихонова на основе CFD-модели / А.А. Хвостов, В.И. Магомедов, В.И. Рязских, А.В. Ковалев и др. // Техника и технология пищевых производств. – 2021. – Т. 51. – № 3. – С. 615–627. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-3-615-627>.
15. Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей) / пер с англ. – М.: Изд-во «Недра», 1985. – 509 с.
16. Boyko E., Stone H.A. Flow rate–pressure drop relation for shear-thinning fluids in narrow channels: approximate solutions and comparison with experiments // Journal of Fluid Mechanics. – 2021. – Vol. 923. – P. 5–9. DOI: 10.1017/jfm.2021.621.
17. Bifurcation in a T-channel junction: effects of aspect ratio and shear-thinning / R.J. Poole, M. Alfateh, A.P. Gauntlett // Chemical Engineering Science. – 2013. – Vol. 108. – P. 839–848. DOI: 10.1016/j.ces.2013.10.006.
18. Carreau–Yasuda fluid flow generated via metachronal waves of cilia in a micro-channel / B. Kada, A.A. Pasha, Z. Asghar, M. Wsaeed Khan, I.B. Aris, M.S. Shaikh // Physics of Fluids. – 2023. – Vol. 35. – P. 1–12. DOI: 10.1063/5.0134777.
19. Gao H., Müser M.H. On the shear-thinning of alkanes // Tribology Letters. – 2024. – Vol. 72:16. – P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-023-01813-5>.
20. Bird R.B., Armstrong R.C., Hassager O. Dynamics of polymeric liquids. Fluid Mechanics. 2nd ed. – New York: Wiley-Interscience, 1987. – Vol. 1. – 672 p.
21. Yasuda K., Armstrong R.C., Cohen R.E. Shear flow properties of concentrated solution of linear and star branched polystyrenes // Rheologica Acta. – 1981. – Vol. 20. – № 2. – P. 163–178. DOI: 10.1007/BF01513059.
22. Рошин Д.Е. Моделирование реологических эффектов и кинетики радикальной полимеризации при течении многофазных неньютоновских жидкостей в микроканалах: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2024. – 24 с.
23. Zare Y., Park S.P., Rhee K.Y. Analysis of complex viscosity and shear thinning behavior in poly (lactic acid)/poly (ethylene oxide)/carbon nanotubes biosensor based on Carreau–Yasuda model // Results in Physics. – 2019. – Vol. 13 (102245). – P. 1–8. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102245.
24. Wang C.H., Ho J.R. A lattice Boltzmann approach for the non-Newtonian effect in the blood flow // Computers & Mathematics with Applications. – 2011. – Vol. 62 (1). – P. 75–86. DOI: 10.1016/j.camwa.2011.04.051

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: 03.10.2024

Поступила после рецензирования: 05.12.2024

Принята к публикации: 17.07.2025

REFERENCES

1. Matvienko V.I., Kirsanov E.A. Viscosity and structure of dispersed systems. *Bulletin of the Moscow University. Series 2: Chemistry*, 2011, vol. 52, no. 4, pp. 243–276. (In Russ.) DOI: 17015870.

2. Escudier M.P., Oliveira P.J., Pinho F.T. Fully developed laminar flow of purely viscous non-Newtonian liquids through annuli, including the effects of eccentricity and inner-cylinder rotation. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2002, vol. 23, pp. 52–73. DOI: 10.1016/S0142-727X(01)00135-7.
3. Matvienko O.V. Investigation of the steady-state flow of a pseudoplastic fluid described by the Cisco model in a cylindrical tube. *Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and Mechanics*, 2018, no. 55, pp. 99–112. (In Russ.) DOI: 10.17223/19988621/55/9
4. Sharafutdinov Z.Z., Sharafutdinova R.Z. Water-based drilling fluids and management of their rheological parameters. *Neftegazovoe delo*, 2004, no. 1, pp. 1–21. (In Russ.)
5. Chetvertneva I.A., Teptereva G.A., Gaysin I.F., Shavshukova S.Yu. Assessment of the effectiveness of using biopolymer drilling reagents when drilling horizontal shafts. *Transport and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*, 2019, no. 2, pp. 40–43. (In Russ.) DOI: 39198927.
6. Lambin 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.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/8/4049>.
7. 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.)
8. Vagner S.A. *Numerical modeling of the flow features of pseudoplastic polymer liquids in microchannels*. Cand. Diss. Abstract. Moscow, 2018. 22 p. (In Russ.)
9. Larson R.G. Constitutive equations for polymer melts and solutions. *Butterworths series in chemical engineering*. Boston, Butterworth-Heinemann, 1988. 364 p.
10. Mohammed A.R., Mohammed A.J. Effect of type and concentration of different water-soluble polymer solutions on rheological properties. *Nahrain University, College of Engineering Journal (NUCEJ)*, 2009, vol. 12, no. 1, pp. 26–37.
11. Ansari S., Rashid M.I., Waghmare P.R. Measurement of the flow behavior index of newtonian and shear-thinning fluids via analysis of the flow velocity characteristics in a mini-channel. *SN Applied Sciences*, 2020, vol. 2, pp. 1–15. DOI: 10.1007/s42452-020-03561-w.
12. Gadzhiev S.G., Evdokimov I.N., Eliseev N.Yu., Losev A.P. Substantiation of the rheological model of weighted drilling fluids on a hydrocarbon basis for hydraulic calculations. *Drilling and oil*, 2017, no. 07–08, pp. 66–71. (In Russ.)
13. 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, no. 4, pp. 69–79. (In Russ.) DOI: 10.18083/LCAppl.2016.4.69.
14. Khvostov A.A., Magomedov V.I., Ryazhskikh V.I., Kovalev A.V. Parametric identification of the rheological Carro model using the regularization of A.N. Tikhonov based on the CFD model. *Technique and technology of food production*, 2021, vol. 51, no. 3, pp. 615–627. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-3-615-627>.
15. 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.)
16. Boyko E., Stone H.A. Flow rate–pressure drop relation for shear-thinning fluids in narrow channels: approximate solutions and comparison with experiments. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, vol. 923, pp. 5–9. DOI: 10.1017/jfm.2021.621.
17. Poole R.J., Alfateh M., Gauntlett A.P. Bifurcation in a T-channel junction: effects of aspect ratio and shear-thinning. *Chemical Engineering Science*, 2013, vol. 108, pp. 839–848. DOI: 10.1016/j.ces.2013.10.006.
18. Kada B., Pasha A.A., Asghar Z., Saeed Khan M.W., Aris I.B., Shaikh M.S. Carreau–Yasuda fluid flow generated via metachronal waves of cilia in a micro-channel. *Physics of Fluids*, 2023, vol. 35, pp. 1–12. DOI: 10.1063/5.0134777.
19. Gao H., Müser M.H. On the shear thinning of alkanes. *Tribology Letters*, 2024, vol. 72:16, pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-023-01813-5>.
20. Bird R.B., Armstrong R.C., Hassager O. *Dynamics of polymeric liquids. Fluid Mechanics*. 2nd ed. New York, Wiley-Interscience, 1987. Vol. 1, 672 p.
21. Yasuda K., Armstrong R.C., Cohen R.E. Shear flow properties of concentrated solution of linear and star branched polystyrenes. *Rheologica Acta*, 1981, vol. 20, no. 2, pp. 163–178. DOI: 10.1007/BF01513059.
22. Roshchin D.E. *Modeling of rheological effects and kinetics of radical polymerization during the flow of multiphase non-Newtonian liquids into microchannels*. Cand. Diss. Abstract. Moscow, 2024. 24 p. (In Russ.)
23. Zare Y., Park S.P., Rhee K.Y. Analysis of complex viscosity and shear thinning behavior in poly (lactic acid)/poly (ethylene oxide)/carbon nanotubes biosensor based on Carreau–Yasuda model. *Results in Physic*, 2019, vol. 13 (102245), pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102245.
24. Wang C.H., Ho J.R. A lattice Boltzmann approach for the non-Newtonian effect in the blood flow. *Computers & Mathematics with Applications*, 2011, vol. 62 (1), pp. 75–86. DOI: 10.1016/j.camwa.2011.04.051.

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: 03.10.2024

Revised: 05.12.2024

Accepted: 17.07.2025