

УДК 622.243.24

## ОЦЕНКА ВЯЗКОСТИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ КСАНТАНОВЫХ СМОЛ

Ламбин Анатолий Иванович<sup>1</sup>,  
alambin@ex.istu.edu

Аверкина Елена Владимировна<sup>1</sup>,  
averkina.l@yandex.ru

Ерыгина Анастасия Николаевна<sup>2</sup>,  
erygina\_an@irkutskoil.ru

Красинская Анастасия Сергеевна<sup>2</sup>,  
krasinskaya\_as@irkutskoil.ru

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

<sup>2</sup> ООО «ИНК-СЕРВИС»,  
Россия, 664007, г. Иркутск, ул. Октябрьской Революции, 24А.

**Актуальность.** Повсеместное применение биополимеров в составе буровых растворов позволяет совершенствовать последние в плане улучшения гидравлики циркуляционной системы, повышения выносной способности промывочной жидкости, решения вопросов устойчивости стенок открытого ствола скважины. Интерес к применению в бурении растительных камедей повышается.

**Целью** статьи является определение отличительных свойств водных растворов полимера в реологическом плане. Реологические свойства бурового раствора являются важным фактором производительности процесса углубления скважины. Благодаря реологической кривой бурового раствора мы можем более точно оценить эквивалентную циркуляционную плотность и способность выносить из скважины продукты разрушения, оптимизировать гидравлические параметры и др.

**Объектом** исследования являются реологические свойства водных растворов биополимеров, в частности ксантановой камеди, которую компании-производители поставляют в виде порошка.

**Методы:** инструментальные методы определения реологических параметров водных растворов биополимеров по ГОСТ 33696 (ISO 10416), оценка и анализ распределения дисперсии при трехкратных измерениях в каждой точке опыта.

**Результаты.** Разработана «Методика лабораторных испытаний химических реагентов для приготовления буровых растворов на соответствие требованиям ООО «ИНК-СЕРВИС». Проведено статистическое исследование отличий в показателях напряжения сдвига водных растворов исследуемых порошков. Из-за неподчинения величин измеряемых напряжений нормальному распределению использовался непараметрический критерий сравнения Манна–Уитни, расчеты которого по двум всевозможным сочетаниям малых выборок показали отсутствие отличий. Показана подверженность реологических показателей водных растворов ксантановых порошков псевдопластическим значениям степенной модели Освальда де Вейля.

### Ключевые слова:

Ксантановая камедь, биополимер, реологические свойства, вискозиметрия, напряжение сдвига, вязкость, критерий сравнения.

### Введение

Строительство скважины при разведке или добыче углеводородов является сложнейшей и дорогостоящей операцией, оцениваемой как минимум в 1–1,5 миллиона долларов. Стоимость строительства в значительной степени зависит от характеристик применяемого для промывки скважины бурового раствора. При этом растут требования к буровому раствору с точки зрения экологии, триботехнических и гидродинамических условий, а также устойчивости стенок скважины [1]. Этим требованиям во многом отвечают промывочные жидкости на водной основе, в состав которых в качестве улучшающих добавок входят биополимеры [2, 3]. В частности, к биополимерам относят полисахариды, получаемые на основе гуаровых или ксантановых смол (камедей). Больше применение в буровых растворах находит ксантановая камедь [4–6], промышленного производства которой в России пока нет. Основным поставщиком является Китай и частично Австрия. Малая добавка ксантановой камеди в буровой раствор в

количестве 1,5...7 кг/м<sup>3</sup> значительно улучшает реологический профиль жидкости, определяющий высокую вязкость при низких скоростях сдвига и, наоборот, низкую вязкость при больших скоростях сдвига [7]. Такие растворы, у которых величина динамического напряжения сдвига превышает пластическую вязкость, иногда называют растворами с «обратной» вязкостью. Как следствие, такие растворы обладают низкой эффективной вязкостью при высоких скоростях течения (в бурительных трубах, в забойном двигателе, в насадках долота), что позволяет снизить потери давления и увеличить гидродинамическую мощность на долоте или забойном двигателе, увеличить скорость проходки. При низких скоростях сдвига вязкость резко увеличивается, что сказывается на эффективности очистки скважины. Биополимер эффективно работает во всех буровых растворах на водной основе – от утяжеленных до систем с низким содержанием твердой фазы, включая пресную, морскую воду, системы на основе соленой воды и плотные рассолы [8].

Химическая формула ксантановой камеди:  $C_{35}H_{49}O_{29}$ , молекулярная масса может составлять от 5 до 20 млн, ее снижения добиваются путем облучения. Раствор ксантана устойчив к ферментам, спиртам, ПАВ, кислотам (кроме соляной) и щелочам, высоким (до 120 °С) и низким (до –18 °С) температурам. Его способность работать в соленой воде делает его универсальным. Это связано с его короткими боковыми цепями, состоящими из трех сахаров, которые предотвращают свертывание полимера в солевых условиях [9]. Это уникально для анионных полимеров и действительно отличает ксантан от других типов полисахаридов. Смола по своей силе в качестве загустителя превосходит крахмал в пять–восемь раз. В смеси с другими камедями эффект загущения выше [10].

Биополимерный буровой раствор в процессе бурения выполняет множество сложных и ответственных функций. Главным свойством тиксотропных систем на основе биополимеров, в отличие от других полимеров на основе полисахаридов, является их способность при небольших концентрациях создавать системы, обладающие псевдопластичностью, то есть аномалией вязкости [11]. Реология псевдопластичных жидкостей описывается моделью Освальда де Вейля [12, 13].

При моделировании рецептуры бурового раствора на биополимерной основе важным вопросом всегда остается выбор качественного полимерного реагента, изменяющего реологические характеристики в широком диапазоне скоростей и обеспечивающего высокую выносную способность при низких скоростях сдвига.

Поскольку в настоящее время рынок химических реагентов изобилует компаниями, предлагающими добавки ксантанового типа, это приводит к определенным трудностям при их выборе и создании состава бурового раствора, который будет обеспечивать оптимальные реологические характеристики в процессе строительства скважины.

Поэтому возникает необходимость создания четкого алгоритма подбора ксантановой камеди при приготовлении бурового раствора для конкретных геолого-технических условий строительства скважин.

Цель статьи – оценить различие составов водных растворов ксантанового реагента различных производителей по их вязкостным свойствам.

#### Методика исследования

Для проведения исследований кафедрой нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ) совместно с компанией ООО «ИНК-СЕРВИС» была разработана «Методика лабораторных испытаний химических реагентов для приготовления буровых растворов на соответствие требованиям ООО "ИНК-СЕРВИС"». Данная методика предназначена для руководства при проведении испытаний химических реагентов, применяемых в буровых растворах, при строительстве нефтяных и газовых скважин на месторождениях ГК «ИНК» и включает в себя правила

приемки материалов, правила хранения и утилизации материалов, а также технические задания на выполнение работ по определению качества биополимеров, крахмалов, полианионной целлюлозы высокой и низкой вязкости, бактерицидов, пеногасителей, а также смазочных добавок. Требования методики составлены на основе следующих нормативных документов: ГОСТ Р 56946 (ISO 13500), ГОСТ 33696 (ISO 10416), ГОСТ 33213 (ISO 10414-1).

Испытания материалов для буровых растворов проводились с целью сравнительного анализа качества конкурирующих между собой продуктов различных производителей химических реагентов.

В рамках разработанной методики изучалась вязкость водных растворов ксантановых смол различного производства. Всего было испытано семь разновидностей биополимера (ксантановая камедь) различных компаний, представленных ООО «ИНК-СЕРВИС», которые были обозначены Б1, Б2...Б7.

Согласно требованиям методики, приготавливались три типа раствора по 300 мл путем добавления полимера в установленной концентрации 1,5 г в дистиллированную воду, в 30%-й раствор NaCl и 25%-й минерализованный раствор KCl [14]. Измерение вязкости проводилось на ротационном вискозиметре OFITE, модель 900, при скорости 600, 300, 6 и 3 об/мин до тех пор, пока показания прибора не стабилизируются для каждой из скоростей вращения.

Требуемые показания вискозиметра (табл. 1) соответствуют значениям угла закручивания пружины вискозиметра для бурового раствора, используемого при бурении скважин на объектах ООО «ИНК-СЕРВИС».

Результаты лабораторных испытаний биополимеров представлены в табл. 1.

Совместное рассмотрение реологических критериев позволяет комплексно оценивать технологические свойства биополимерного бурового раствора и его уровень в качестве гидродинамического агента бурящейся скважины [15]. Анализируя данные табл. 1, можно видеть, что растворы с биополимерами Б-3, Б-5, Б-6, Б-7 соответствуют требуемым показаниям угла закручивания вискозиметра и могут быть приняты в качестве структурообразователя бурового раствора.

Кроме установления соответствия измеренных показателей требуемым в данном случае появилась необходимость оценки различия показаний вискозиметра как для отдельного раствора, так и для растворов, содержащих разные марки ксантановой камеди.

Изменчивость показаний прибора определяли путем вычисления оценки дисперсии при тоекратных измерениях в каждой точке опыта по формуле [15]:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (1)$$

с последующим определением среднеквадратического отклонения по формуле:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

где  $x_i$  – измеряемая величина;  $\bar{x}$  – среднее измеренных величин;  $n$  – число измеренных величин.

**Таблица 1.** Требования к показаниям вискозиметра и результаты измерений

**Table 1.** Requirements for viscometer readings and measurement results

Шифр биополимера/ Разновидность раствора Biopolymer cipher/ Type of solution		Требуемые показания вискозиметра (угол закручивания при частоте вращения, об/мин) Required viscometer readings (twist angle at rotation speed/rpm)				Полученные показания вискозиметра Received viscometer readings				Среднеквадратическое отклонение показаний вискозиметра Standard deviation of the viscometer readings			
		600	300	6	3	600	300	6	3	600	300	6	3
Б-1 В-1	вода water	35	27	14	13	47,5	39,0	16,7	16,0	0,8660	1,0969	0,4041	0,2082
	NaCl	50	37	13	12	54,8	40,3	10,3	8,8	1,8770	1,0969	0,3215	0,3215
	KCl	39	31	13	12	47,4	37,4	14,1	12,7	1,0440	0,7506	0,6110	0,795
Б-2 В-2	вода water	35	27	14	13	38,6	32,6	14,9	13,7	0,7810	0,6700	0,2517	0,3606
	NaCl	50	37	13	12	49,7	37,7	11,8	11,0	0,8386	0,3055	0,0577	0,0577
	KCl	39	31	13	12	38,4	31,6	11,8	11,0	0,1155	0,4933	0,1528	0,1155
Б-3 В-3	вода water	35	27	14	13	39,4	33,3	15,8	14,6	0,6197	1,1590	1,4572	1,8009
	NaCl	50	37	13	12	65,9	49,6	15,8	14,1	3,2741	2,7839	1,5716	1,7898
	KCl	39	31	13	12	53,1	41,7	15,4	14,1	1,4048	1,3014	0,8386	0,5774
Б-4 В-4	вода water	35	27	14	13	47,7	35,9	15,6	14,4	0,1155	0,3055	0,2082	0,0577
	NaCl	50	37	13	12	56,0	42,4	11,6	10,1	1,1590	2,9297	0,6000	0,4509
	KCl	39	31	13	12	46,2	35,7	13,7	11,6	1,5588	1,1060	0,8083	1,1533
Б-5 В-5	вода water	35	27	14	13	43,5	35,8	16,3	15,4	0,3464	0,8505	0,6658	0,4933
	NaCl	50	37	13	12	60,8	45,4	13,8	12,1	1,0536	0,5507	0,4619	0,3512
	KCl	39	31	13	12	51,2	40,7	15,4	13,8	1,1547	1,0549	1,0440	1,4154
Б-6 В-6	вода water	35	27	14	13	42,1	35,7	16,9	16,0	0,4933	0,5507	0,6807	0,3055
	NaCl	50	37	13	12	55,2	41,5	13,6	11,6	2,8054	1,6803	1,7214	0,9849
	KCl	39	31	13	12	42,6	34,1	13,9	12,2	0,0580	0,3055	0,4000	0,3056
Б-7 В-7	вода water	35	27	14	13	45,7	35,2	16,4	15,5	0,2517	1,4154	0,2000	0,3000
	NaCl	50	37	13	12	60,5	44,8	13,9	12,4	1,7616	2,0518	0,8888	0,9644
	KCl	39	31	13	12	45,9	36,4	13,4	11,9	0,1155	0,3464	0,3464	0,5196

Значения среднеквадратических отклонений вычисленные по формулам (1), (2) представлены в табл. 1. Максимальные ошибки отмечены при измерении значений поворота боба вискозиметра на малых скоростях сдвига. Наибольшая ошибка составила 12,7% для реагента Б-3 в солевых растворах.

Как отмечалось выше, реология растворов полимеров описывается моделью Освальда де Вейля:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n, \quad (3)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига, Па;  $K$  – коэффициент консистенции;  $n$  – показатель отклонения от ньютоновского поведения жидкости.

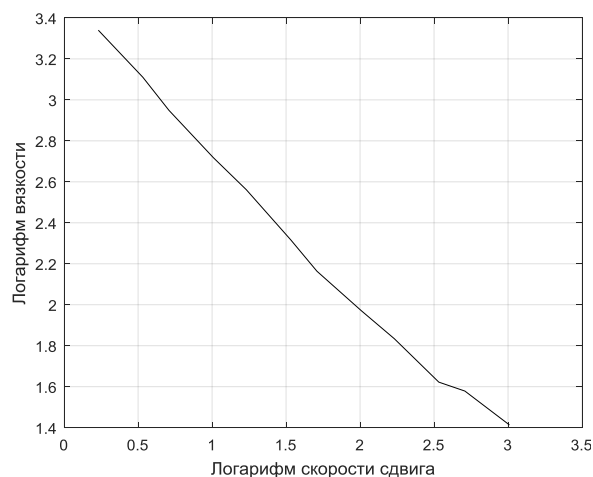
Здесь  $n$  определяется по формуле [16]:

$$n = 3,32 \lg \left( \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \right), K = \theta_{600} / (1022)^n, \quad (4)$$

где  $\theta_{600}$  и  $\theta_{300}$  – показания вискозиметра при 600 и 300 оборотов в минуту.

Прямолинейность графика на рис. 1, построенного в координатах: десятичный логарифм измеренной вязкости жидкости – логарифм частоты вращения ротора вискозиметра, подтверждает полную подчиненность жидкости идеальному степенному закону (3).

На рис. 2 приведено отличие показаний вискозиметра при измерении напряжения сдвига от расчетных значений по формуле (3) для раствора Б-3 с показателем нелинейности  $n=0,5454$  и коэффициентом консистенции  $K=1,4789$ .



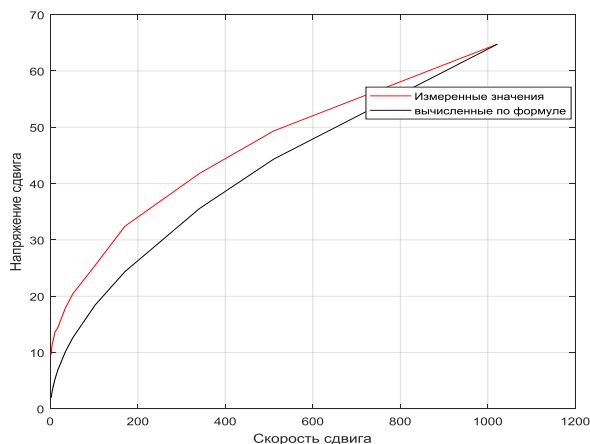
**Рис. 1.** Зависимость вязкости от скорости сдвига, выраженная в логарифмах их измеренных значений

**Fig. 1.** Dependence of viscosity on shear rate, expressed in logarithms of their measured values

Такое отличие характерно для всех рассмотренных растворов.

Рассматривая полученные кривые, можно видеть, что кривые напряжения сдвига практически параллельны друг другу, это подтверждает, что ошибка между измеренными значениями и вычисленными постоянна. Вычисленные по формуле (3), представляющей идеальный степенной закон, значения

напряжения сдвига отличаются от измеренных значений со среднеквадратической ошибкой, равной 10,3. Можно предположить, что для сдвиговых условий в реальной скважине эта ошибка будет иметь примерно такой же порядок.



**Рис. 2.** Отличие значений напряжения сдвига измеренных и вычисленных по формуле (3)

**Fig. 2.** Difference between the values of the shear stress measured and calculated by the formula (3)

Однако для реальных буровых растворов идеальный закон неприемлем, и в расчетах промывки скважины пользуются обобщенным степенным законом, основанным на отношении касательного напряжения к скорости сдвига у стенки, ограничивающей поток раствора [17].

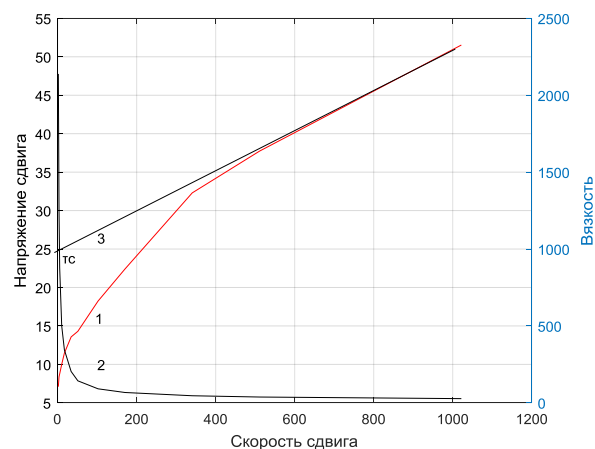
На рис. 3, 4 представлена реологическая характеристика водного раствора биополимера Б-3 и Б-7, где показаны кривые кажущейся вязкости и напряжения сдвига. Касательная прямая, проведенная к прямолинейному участку кривой напряжения сдвига и продолженная до пересечения с осью ординат, определяет  $\tau_c$  – предельное динамическое напряжение сдвига, соответствующее конкретному состоянию раствора, что является одной из характеристик бурового раствора.

Сравнивая графики рис. 3, 4, видно, что кривые кажущейся вязкости и напряжения сдвига для водных растворов биополимеров Б-3 и Б-7 мало различаются. Следовательно, любой из представленных полимеров может определять одинаковые реологические параметры при идентичных условиях приготовления растворов.

Рассматривая рис. 5, можно видеть, что водные растворы полимеров Б-1, Б-2 и Б-3 имеют примерно одинаковые кривые зависимости реологических параметров, что подтверждает схожесть реагентов по химическому составу. Можно предположить, что биополимеры мало отличаются по молекулярному весу.

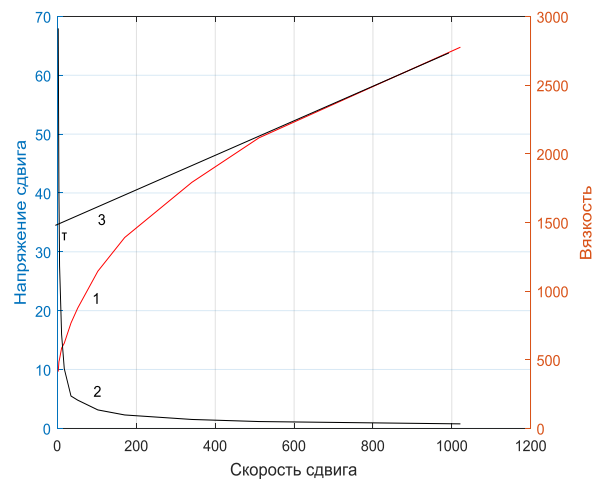
В свою очередь реологическая характеристика водных растворов полимеров зависит от молекулярного веса и гидродинамического размера молекул реагента, а также их взаимодействия между собой. Знание указанной характеристики полимеров позволяет

качественно решать технологические задачи при строительстве скважины путем выбора полимеров с соответствующими макромолекулярными характеристиками [4].



**Рис. 3.** Зависимость эффективной вязкости и напряжения сдвига от скорости сдвига для биополимера Б-3: data 1 – напряжение сдвига, Па; data 2 – эффективная вязкость, Па·с; data 3 – линия, определяющая предельное динамическое напряжение сдвига

**Fig. 3.** Dependence of the effective viscosity and shear stress on the shear rate for biopolymer B-3: data 1 – shear stress, Pa; data 2 – effective viscosity, Pa·s; data 3 – line determining the maximum dynamic shear stress



**Рис. 4.** Зависимость эффективной вязкости и напряжения сдвига от скорости сдвига для биополимера Б-7: data 1 – напряжение сдвига, Па; data 2 – эффективная вязкость, Па·с; data 3 – линия, определяющая предельное динамическое напряжение сдвига

**Fig. 4.** Dependence of the effective viscosity and shear stress on the shear rate for biopolymer B-7: data 1 – shear stress, Pa; data 2 – effective viscosity, Pa·s; data 3 – line determining the maximum dynamic shear stress

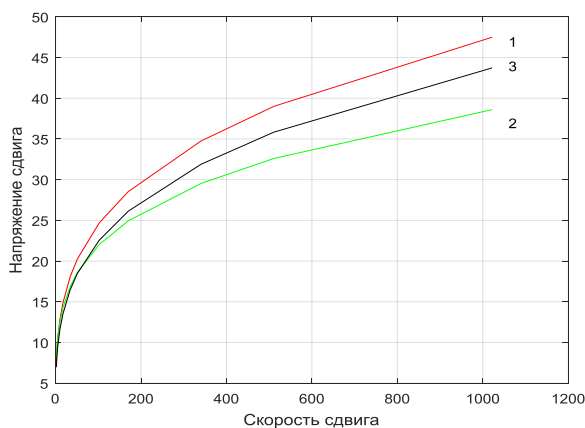


Рис. 5. Визуализация расчетных значений (формула (3)) водных растворов полимеров Б-1, Б-2, Б-3

Fig. 5. Visualization of calculated values (formula (3)) of aqueous solutions of polymer B-1, B-2, B-3

Следующим этапом изучения вязкости водных растворов полимеров явилось определение статистической значимости отличий одних растворов от других по показаниям вязкости и напряжению сдвига. В силу сверх малых выборок указанных значений применение параметрических критериев значимости

затруднено [18]. При распределении по степенному закону величины не группируются вокруг среднего значения. К примеру, применение статистики Стьюдента требует нормального распределения выборочных значений [19]. В результате проверка нулевой гипотезы осуществлялась путем применения непараметрического (рангового) критерия Манна–Уитни [20]. Его критическое значение для выборок в 4 величины равно единице. В нашем случае расчетные значения критерия превышают критическое значение и составляют 4...6 и больше, что говорит о незначимости различий вязкостных характеристик водных растворов биополимеров.

Незначимость различий подтверждается и коэффициентом корреляции Пирсона [20, 21], который вычислен для всех сравниваемых пар растворов и представлен в табл. 2. Этот коэффициент определяет линейность связи сравниваемых пар, и, как видно, его табличные значения отражают очень высокую коррелятивность, объясняющую одинаковость признака, измеряемого вискозиметром на частотах 600, 300, 6 и 3 об/мин. Отсюда следует, что необходимо определиться с критерием, с помощью которого можно значимо оценить видимые различия.

Таблица 2. Коэффициент корреляции Пирсона

Table 2. Pearson correlation coefficient

		Раствор биополимера/Biopolymer solution													
		Б-1/В-1		Б-2/В-2		Б-3/В-3		Б-4/В-4		Б-5/В-5		Б-6/В-6		Б-7/В-7	
Б-1 В-1	1:2	0,9900	1:2	0,9994	1:2	0,9990	1:2	0,9996	1:2	0,9989	1:2	0,7419	1:2	0,9986	
	1:3	0,9997	1:3	0,9998	1:3	0,9997	1:3	0,9988	1:3	0,9998	1:3	0,7424	1:3	0,9998	
	2:3	1,0000	2:3	0,9980	2:3	0,9997	2:3	0,9997	2:3	0,9995	2:3	0,9994	2:3	0,9994	
Б-2 В-2	1:1	0,9995	1:2	0,9881	1:2	0,9977	1:2	0,9987	1:2	0,9976	1:2	0,9976	1:2	0,9970	
	2:2	0,9999	1:3	0,9866	1:3	0,9989	1:3	0,9981	1:3	0,9764	1:3	0,9599	1:3	0,9994	
	3:3	0,9887	2:3	0,9980	2:3	0,9998	2:3	0,9995	2:3	0,9767	2:3	0,9599	2:3	0,9995	
Б-3 В-3	1:1	0,9996	1:1	1,0000	1:2	0,9416	1:2	0,9965	1:2	0,9980	1:2	0,9981	1:2	0,9975	
	2:2	1,0000	2:2	0,9999	1:3	0,9992	1:3	0,9584	1:3	0,9996	1:3	0,9989	1:3	0,9996	
	3:3	1,0000	3:3	0,9992	2:3	0,9997	2:3	0,9597	2:3	0,9995	2:3	0,9999	2:3	0,9995	
Б-4 В-4	1:1	0,9997	1:1	0,9994	1:1	0,9995	1:2	0,9987	1:2	0,9990	1:2	0,9990	1:2	0,9987	
	2:2	0,9998	2:2	0,9999	2:2	0,9726	1:3	0,9989	1:3	0,9998	1:3	0,9995	1:3	0,9998	
	3:3	0,9997	3:3	0,9981	3:3	0,9996	2:3	0,9976	2:3	0,9999	2:3	0,9997	2:3	0,9999	
Б-5 В-5	1:1	0,9998	1:1	0,9995	1:1	0,9996	1:1	1,0000	1:2	0,9992	1:2	0,9991	1:2	0,9988	
	2:2	1,0000	2:2	0,9999	2:2	0,9728	2:2	0,9998	1:3	1,0000	1:3	0,9997	1:3	0,9999	
	3:3	0,9455	3:3	0,9995	3:3	0,9999	3:3	0,9996	2:3	0,9994	2:3	0,9993	2:3	0,9994	
Б-6 В-6	1:1	0,9992	1:1	0,9999	1:1	0,9999	1:1	0,9997	1:1	0,9997	1:2	0,9979	1:2	0,9949	
	2:2	0,9999	2:2	0,9998	2:2	0,9727	2:2	0,9998	2:2	1,0000	1:3	0,9992	1:3	0,9994	
	3:3	0,9456	3:3	0,9950	3:3	0,9998	3:3	0,9997	3:3	0,9999	2:3	0,9995	2:3	0,9962	
Б-7 В-7	1:1	0,9984	1:1	0,9950	1:1	0,9955	1:1	0,9973	1:1	0,9974	1:1	0,9944	1:2	0,9929	
	2:2	1,0000	2:2	0,9960	2:2	0,9727	2:2	0,9996	2:2	1,0000	2:2	0,9915	1:3	0,9946	
	3:3	0,9457	3:3	0,9995	3:3	0,9999	3:3	0,9996	3:3	1,0000	3:3	0,9999	2:3	0,9984	

В табл. 2 по диагонали выделены непосредственно растворы, в которых показано сравнение цифрами. Под цифрой 1 подразумевается водный раствор биополимера, под цифрой 2 – водный раствор с добавкой NaCl, под цифрой 3 – водный раствор с добавкой KCl. Под диагональю показаны сравнения растворов одинаковых по составу. Значения критериев над диагональю показывают сравнение растворов разных по составу. Представленная матрица позволяет сравнить разумное количество растворов с разнообразием их по составу. В данном случае состав каждого раствора обозначен цифрами 1, 2, 3.

### Заключение

Проведенные лабораторные исследования позволяют объективно оценить возможности и потенциальные преимущества разработки таких методик.

Анализ табл. 2 показывает статистическую одинаковость показаний вискозиметра независимо от торговой марки ксантана, по крайней мере при тех его концентрациях, которые указаны в отмеченном ГОСТ Р 56946-2016. Статистическая неразличимость определена одинаковостью материала порошков, производимого разными фирмами. Кроме того, требование ГОСТ Р 56946-2016 оценивать растворы камедей

средним значением при суммировании показаний вискозиметра на частотах вращения 600, 300, 6 и 3 об/мин некорректно, так как эти показания не соответствуют статистически нормальному распределению, а принадлежат показательному распределению,

т. е. каждое последующее значение измеренной величины не группируется вокруг среднего значения. Для целей оценивания растворов по показаниям вязкости или напряжениям сдвига требуется разработка соответствующего показателя.

#### 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. Оценка эффективности применения биополимерных буровых реагентов при бурении горизонтальных стволов / Н.А. Четвернева, Г.А. Тептерева, И.Ф. Гайсин, С.Ю. Шавшукова // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2019. – № 2. – С. 40–43.
3. Эгамбердиев Б.Ш., Негматова К.С., Негматов С.С. Новые композиционные полимерные реагенты для буровых растворов, используемых при бурении нефтегазовых скважин // Universum: технические науки. – 2020. – № 10 (79-3). – С. 40–46.
4. Раствор для бурения скважин в условиях ММП: пат. Рос. Федерация, № RU 2723256 МПК СО9К8/08, заявл. 27.08.2019, опубл. 09.06.2020, Бюл. № 16. – 8 с.
5. Akpan E.U., Enyi G.C., Nasr G.G. Enhancing the performance of xanthan gum in water-based mud systems using an environmentally friendly biopolymer // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2020. – V. 10 (04). – P. 1933–1948.
6. Nemphill T., Campos W., Pilehvari A. Yield-power law model more accurately predicts mud rheology // Journal Oil and Gas. – 1993. – V. 91 (34). – P. 45–50.
7. Akpan E.U. Water-based drilling fluids for high-temperature applications and water-sensitive and dispersible shale formations // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 175. – P. 1028–1038.
8. 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. – V. 4 (6). – P. 2507–2512.
9. Akpan E.U., Enyi G.C., Nasr G.G. Enhancing the performance of xanthan gum in waterbased mud systems using an environmentally friendly biopolymer // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2020. – V. 10 (04). – P. 1933–1948.
10. Салихов И.Ф., Конесев Г.В., Попов А.Н. Математическое моделирование состава и свойств промысловых жидкостей на водной основе с применением бурового комплексного реагента БКР–5М // Территория нефтегаз. – 2014. – № 6. – С. 20–26.
11. Okrajni S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells // Journal SPE Drill Eng. – 1986. – V. 1 (04). – P. 297–308.
12. Влияние простых солей на реологические свойства полимерных растворов для бурения комплексами ССК в глинистых отложениях / А.Л. Неверов, В.П. Рожков, Л.С. Баталина, А.В. Минеев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 196–200.
13. Real-time measurement of drilling fluid rheologica properties: a review / Naipeng Liu, Di Zhang, Hui Gao, Yule Hu, Longchen Duan // Journal Sensors MDPI. – 2021. – V. 21, 3592. – P. 1–20. URL: <https://doi.org/10.3390/s21113592> (дата обращения: 15.04.2022).
14. ГОСТ Р 56946-2016. Материалы буровых растворов. Технические условия и испытания. – М.: Стандартинформ, 2016. – 105 с.
15. Ллойд Э., Ледерман У., Тюрина Ю.Н. Справочник по прикладной статистике: в 2 т. – М.: Изд-во «Финансы и статистика», 1989. – 510 с.
16. Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов (промысловых жидкостей): пер с англ. – М.: Изд-во «Недра», 1985. – 509 с.
17. Справочник химика. Т. 5 / Б.П. Никольский, О.Н. Григоров, М.Е. Позин, Б.А. Порай-Кошиц, В.А. Рабинович, Ф.Ю. Рачинский, П.Г. Романков, Д.А. Фридрихсберг. – Л.: Изд-во «Химия» Ленинградское отделение, 1968. – 968 с.
18. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере. – М.: Изд-во «Финансы и статистика», 1995. – 384 с.
19. Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Изд-во «Мир», 1975. – 648 с.
20. Гублер Е.В., Генкин А.А. Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях. – Л.: Изд-во «Медицина», 1973. – 142 с.
21. Исследование биополимерных буровых растворов на основе высокоминерализованных пластовых вод Восточной Сибири / Н.А. Буглов, Е.В. Аверкина, А.О. Устюжанин, А.С. Красинская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 210–218.
22. Transformation of institutions of socio-economic development in the conditions of a long-term viral pandemic / I. Litvinenko, L. Gaisina, L. Semenova, E. Averkina, E. Gabdrakhmanov // AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research. – 2021 – V. 11. – № 2. S21. – P. 220–224.

Поступила 15.06.2022 г.

#### Информация об авторах

**Ламбин А.И.**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета.

**Аверкина Е.В.**, старший преподаватель кафедры нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета.

**Ерыгина А.Н.**, техник по растворам, служба по растворам ООО «ИНК-СЕРВИС».

**Красинская А.С.**, ведущий инженер по растворам ООО «ИНК-СЕРВИС».

UDC 622.243.24

## EVALUATION OF THE VISCOSITY OF AQUEOUS SOLUTIONS OF XANTHAN RESINS

Anatoly I. Lambin<sup>1</sup>,  
alambin@ex.istu.edu

Elena V. Averkina<sup>1</sup>,  
averkina.l@yandex.ru

Anastasia N. Erygina<sup>2</sup>,  
erygina\_an@irkutskoil.ru

Anastasia S. Krasinskaya<sup>2</sup>,  
krasinskaya\_as@irkutskoil.ru

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

<sup>2</sup> INK-Service,  
24A, Oktyabrskoy revolyutsii street, Irkutsk, 664007, Russia.

**The relevance.** The widespread use of biopolymers in the composition of drilling fluids makes it possible to upgrade the latter in terms of improving the hydraulics of the circulation system, increasing the outflow capacity of the flushing fluid, solving issues of stability of the walls of an open borehole. Interest in the use of vegetable gums in drilling is increasing.

**The main aim** of the article is to determine the distinctive properties of aqueous polymer solutions in geological terms. The rheological properties of the drilling mud are an important factor in the productivity of the well deepening process. Thanks to the rheological curve of the drilling mud, we can more accurately estimate the equivalent circulation density and the ability to remove fracture products from the well, optimize hydraulic parameters, etc.

**Objects:** rheological properties of aqueous solutions of biopolymers, in particular, xanthan gum, which manufacturing companies supply in powder form.

**Methods:** instrumental methods for determining rheological parameters of aqueous solutions of biopolymers according to GOST 33696 (ISO 10416), estimation and analysis of the dispersion distribution with three measurements at each point of the experiment.

**Results.** The authors carried out the statistical study of the differences in the shear stress readings of aqueous solutions of the powders under study. Due to the non-compliance of the measured voltage values with the normal distribution, the nonparametric Mann–Whitney comparison criterion was used, the calculations of which for two possible combinations of small samples showed no differences. The susceptibility of rheological parameters of aqueous solutions of xanthan powders to pseudoplastic values of the Oswald de Weil power model is shown.

**Key words:**

Xanthan gum, biopolymer, rheological properties, viscometry, shear stress, viscosity, comparison criterion.

**REFERENCES**

- 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 Rus.
- Chetverneva N.A., Teptereva G.A., Gaisin I.F., Shavshukova S.Yu. Evaluation of the effectiveness of the use of biopolymer drilling reagents when drilling horizontal wells. *Transport and storage of oil products and hydrocarbons*, 2019, no. 2, pp. 40–43. In Rus.
- Egamberdiev B.Sh., Negmatova K.S., Negmatov S.S. New composite polymer reagents for drilling fluids used in drilling oil and gas wells. *Universum: technical sciences*, 2020, no. 10 (79-3), pp. 40–46. In Rus.
- Minakov A.V., Neverov A.L., Zhigarev V.A., Guzei D.V., Mikhienkova E.I., Pryazhnikov M.I. *Rastvor dlya bureniya skvazhin v usloviyakh MMP* [Solution for drilling wells in MMP conditions]. Patent RF, no. 2723256 IPC SO9K8/08, 2020.
- Akpan E.U., Enyi G.C., Nasr G.G. Enhancing the performance of xanthan gum in water-based mud systems using an environmentally friendly biopolymer, Germany. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020, vol. 10 (04), pp. 1933–1948.
- Hemphill T., Campos W., Pilehvari A. Yield-power law model more accurately predicts mud rheology, Moscow. *Oil and Gas*, 1993, vol. 91 (34), pp. 45–50.
- Akpan E.U. Water-based drilling fluids for high-temperature applications and water-sensitive and dispersible shale formations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 175, pp. 1028–1038.
- 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.
- Akpan E.U., Enyi G.C., Nasr G.G. 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.
- Salikhov I.F., Konesev G.V., Popov A.N. Mathematical modeling of the composition and properties of water-based flushing fluids using the complex drilling reagent BKR-5M *Territory neftegaz*, 2014, no. 6, pp. 20–26. In Rus.
- 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.
- Neverov A.L., Rozhkov V.P., Batalina L.S., Mineev A.V. Influence of simple salts on the rheological properties of polymer solutions for drilling with SCC complexes in clay deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 196–200. In Rus.
- Naipeng Liu, Zhang Di, Hui Gao, Yule Hu, Longchen Duan. Real-time measurement of drilling fluid rheological properties: a review. *Journal Sensors MDPI*, 2021, vol. 21, 3592, pp. 1–20. Available at: <https://doi.org/10.3390/s21113592> (accessed 15 April 2022).
- GOST R 56946. *Materialy burovyykh rastvorov. Tekhnicheskie usloviya i ispytaniya* [Materials of drilling fluids. Technical conditions and tests]. Moscow, StandardInform Publ., 2016. 105 p.

15. Lloyd E., Lederman W., Tyurin Yu.N. *Spravochnik po prikladnoy statistike. v 2 t.* [Handbook of applied statistics: in 2 vol.]. Moscow, Finance and statistics Publ., 1989. 510 p.
16. Gray J.R., Darley G.S.G. *Sostav i svoystva burovnykh agentov (promyvochnykh zhidkostey)* [Composition and properties of drilling agents (flushing fluids)]. Translation from English. Moscow, Nedra Publ., 1985. 509 p.
17. Nikolsky B.P., Grigorov O.N., Pozin M.E., Porai-Koshits B.A., Rabinovich V.A., Romankov P.G., Friedrichsberg D.A. *Spravochnik khimika* [Chemist's handbook]. Leningrad, Khimiya Publ., Leningrad branch, 1968. Vol. 5. 968 p.
18. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. *Analiz dannykh na kompyutere* [Computer data analysis]. Moscow, Finance and Statistics Publ. house, 1995. 384 p.
19. Kramer G. *Matematicheskie metody statistiki* [Mathematical methods of statistics]. Moscow, Mir Publ., 1975. 648 p.
20. Gubler E.V., Genkin A.A. *Primenenie neparametricheskikh kriteriev statistiki v mediko-biologicheskikh issledovaniyakh* [Application of nonparametric criteria for statistics in biomedical research]. Leningrad, Meditsina Publ., 1973. 142 p.
21. Buglov N.A., Averkina E.V., Ustyuzhanin A.O., Krasinskaya A.S. Investigation of biopolymer drilling fluids based on highly mineralized reservoir waters of Eastern Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 210–218. In Rus.
22. Litvinenko I., Gaisina L., Semenova L., Averkina E., Gabdrakhmanov E. Transformation of Institutions of socio-economic development in the conditions of a long-term viral pandemic. *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research*, 2021, vol. 11, no. 2, S21, pp. 220–224.

Received: 15 June 2022.

#### Information about the authors

**Anatoly I. Lambin**, Cand. Sc., associate professor, Irkutsk National Research Technical University.

**Elena V. Averkina**, senior lecturer, Irkutsk National Research Technical University.

**Anastasia N. Erygina**, solution technician, INK-Service.

**Anastasia S. Krasinskaya**, lead engineer of drilling fluids, INK-Service.