

Разработка буровых растворов на основе полисахаридов и природных минералов

^{1,2}Нуррахметова Ж.А. *, ^{1,2}Гусенов И.Ш.,
¹Сигитов В.Б., ^{1,2}Кудайбергенов С.Е.

¹Институт полимерных материалов и технологий, г. Алматы, Казахстан
²Лаборатория инженерного профиля, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан
*E-mail: nurakhmetova86@mail.ru

В работе обоснована технология бурения нефтяных скважин в сложных горно-геологических условиях с использованием буровых растворов на основе полисахаридов – геллана, ксантана и их смеси, потенциально обладающих хорошими флокулирующими свойствами и способностью к обратимому золь-гель переходу в зависимости от температуры и концентрации низкомолекулярных катионов в воде. Для приготовления буровых растворов полисахаридов использованы геллан и ксантан, полученные из биомассы аэробной ферментацией с помощью микроорганизмов *Sphingomonas elodea* и *Xanthomonas campestris*. В качестве дисперсной фазы применен бентонит. Определены физико-химические характеристики водных и водно-солевых растворов природных полисахаридов геллана и ксантана, такие как: плотность, приведенная и эффективная вязкость, статическое напряжение сдвига (СНС), динамическое напряжение сдвига (ДНС), седиментационная устойчивость и другие параметры, при варьировании состава и концентрации полимеров, ионной силы раствора, природы низкомолекулярных солей, содержания дисперсной фазы, pH среды и температуры.

Ключевые слова: буровые растворы; геллан; ксантан; золь-гель переход; бентонит.

Полисахаридтер және табиғи минералдардың негізінде бұрғылау ерітінділерін жасау

^{1,2}Нуррахметова Ж.А. *, ^{1,2}Гусенов И.Ш.,
¹Сигитов В.Б., ^{1,2}Кудайбергенов С.Е.

¹Полимерлі материалдар және технологиялар институты, Алматы қ., Қазақстан
²Инженерлік профильді зертхана, Қ.И. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан
*E-mail: nurakhmetova86@mail.ru

Жұмыста күрделі таулы-геологиялық жағдайда әлеуетті жақсы флокирлеуші қасиеттерге және температура мен төменгі молекулалық катиондардың концентрациясын өзгерткенде қайтымды золь-гель ауысу мүмкіндігіне ие геллан, ксантан полисахаридтері мен олардың қоспалары негізіндегі мұнай ұңғымаларының бұрғылау технологиясын негіздеуі көрсетілген. Полисахаридтердің бұрғылау ерітінділерін дайындау үшін *Sphingomonas elodea* және *Xanthomonas campestris* микроағзалар көмегімен аэробты ферментация биомассасынан алынған геллан және ксантан қолданылды. Дисперстік фаза ретінде бентонит қолданылды. Табиғи полисахарид геллан және ксантанның сулы және сулы-тұзды ерітінділерінің тығыздық, келтірілген және тиімді тұтқырлық, ығысудың статистикалық кернеуі (ЫСК), ығысудың динамикалық кернеуі (ЫДК), седиментациялық тұрақтылық және басқа параметрлері сияқты физика-химиялық қасиеттері полимерлердің концентрациясын және құрамын, ерітінділердің иондық күшін, төменгі молекулалық тұздардың табиғатын, дисперстік фаза мөлшерін, ортаның pH-ын және температураны түрлендіре отырып анықталды.

Түйін сөздер: бұрғылау ерітінділері; геллан; ксантан; золь-гель ауысу; бентонит.

Development of drilling fluids based on polysaccharides and natural minerals

^{1,2}Nurakhmetova Zh.A., ^{1,2}Gussenov I.Sh.,
¹Sigitov V.B., ^{1,2}Kudaibergenov S.E.

¹Institute of Polymer Materials and Technology, Almaty, Kazakhstan
²Laboratory of engineering profile, K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan
*E-mail: nurakhmetova86@mail.ru

The technology of oil well drilling in complex geological conditions by applying the drilling muds based on the polysaccharides – gellan, xanthan and their mixture which potentially possess a good flocculation properties and the ability to reversible sol-gel transition in dependence of temperature and concentration of low molecular weight cations in water has been justified in this work.

For the preparation of drilling muds, gellan and xanthan were used, these polymers were obtained from biomass by an aerobic fermentation using microorganisms *Sphingomonas elodea* and *Xanthomonas campestris*. Bentonite was used as a natural mineral.

Physical and chemical characteristics of aqueous and aqueous-salt solutions of natural polysaccharide gellan including: density, intrinsic and effective viscosity, static shear stress, dynamic shear stress, sedimentation stability and other parameters were determined while varying polymer compositions and concentrations, ionic strength of the solution, nature of low molecular weight salts, concentration of dispersion phase, pH of the medium and temperature.

Keywords: drilling fluids; gellan; xanthan; sol-gel transition; bentonite.



Разработка буровых растворов на основе полисахаридов и природных минералов

^{1,2}Нурахметова Ж.А.* , ^{1,2}Гусенов И.Ш., ¹Сигитов В.Б., ^{1,2}Кудайбергенов С.Е.

¹Институт полимерных материалов и технологий, г. Алматы, Казахстан

²Лаборатория инженерного профиля, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

*E-mail: nurakhmetova86@mail.ru

1. Введение

Практика нефтедобычи показывает, что увеличение дебитов нефтяных скважин напрямую связано с качеством проводимых буровых работ. Процесс бурения является одной из самых капиталоемких статей затрат при разработке месторождений. Важным этапом в технологии строительства скважин является подготовка промывочной жидкости, определяющей во многом эффективность первичного вскрытия продуктивного пласта, а также коммерческую скорость бурения.

Считается, что природные полисахариды (крахмал, ксантан и др.) являются хорошей полимерной основой для буровых растворов благодаря высоким эксплуатационным свойствам и способности не загрязнять окружающую среду [1-4]. Геллан в настоящее время не используется в буровых растворах [1].

Буровой раствор является многокомпонентной и многофункциональной системой. Как известно, важнейшими характеристиками бурового раствора являются реологические и фильтрационные свойства. Применение полимеров в составе буровых растворов позволяет эффективно понижать фильтрацию.

Используемые полимеры придают растворам низкую пластическую вязкость, высокое динамическое напряжение сдвига, а также структурные характеристики, обеспечивающие высокие скорости бурения и эффективную очистку забоя и ствола скважины от выбуренной породы ввиду особенностей строения макромолекул.

Кроме того, полисахариды способны к быстрой биологической деструкции, за счет этого обеспечивается возможность разрушения и удаления кольматационного слоя, образующегося в процессе бурения, и практически полное восстановление коллекторских свойств пласта [5].

2. Эксперимент

Приведенную вязкость определяли на капиллярном вискозиметре Уббелоде. Реологические свойства растворов исследовали методом ротационной вискозиметрии на вискозиметре Anton Paar (Австрия). Стабильность коллоидных систем определяли по стандартной методике [6].

Методом ротационной вискозиметрии получены кривые течения (в зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига) растворов геллана и геллана с ксантаном при варьировании состава полимеров ([геллан]:[ксантан] = 1:1, 2:1, 4:1, 1:2 и 1:4), суммарной концентрации полимеров (0,1; 0,25; 0,5 и 1%), содержания дисперсной фазы - бентонита (0÷8%), ионной силы, температуры (25÷70°C) и pH среды (6.5÷9.5). Ионную силу раствора создавали хлоридами щелочных и щелочноземельных металлов KCl, NaCl, MgCl₂, CaCl₂, (10⁻³ – 10⁻² ммоль·кг⁻¹ по Na⁺ и Ca²⁺).

Экспериментальные кривые течения водных растворов обработаны с использованием моделей Бингама-Шведова, Оствальде-ДеВаале и Хершеля-Балкли [7] с целью нахождения реологических и конформационных характеристик (CHC₁, CHC₁₀, динамическое напряжение сдвига – τ_{0r} , пластическая вязкость – η , показатель консистенции – K и показатель нелинейности – n), необходимых для выбора оптимальных рецептур буровых растворов и технологических условий их применения при бурении.

3. Результаты и обсуждение

Растворы геллана чувствительны к воздействию катионов металлов, что напрямую связано с химическим строением молекул, а, именно, наличием и типом функциональных групп, входящих в макромолекулу

полимера и их пространственного расположения [1]. В присутствии низкомолекулярных солей наблюдаются существенные изменения кривых течения растворов геллана: повышается эффективная вязкость, появляются ненулевые значения СНС (рисунок 1). С повышением концентрации соли вязкость растворов увеличивается, а затем происходит золь-гель переход. Ионы щелочных и щелочноземельных металлов по эффективности к гелеобразованию растворов геллана располагаются в следующей последовательности: $\text{BaCl}_2 > \text{CaCl}_2 \approx \text{MgCl}_2 > \text{KCl} > \text{NaCl}$. Растворы ксантана малочувствительны к изменению ионной силы раствора, температуры и pH среды [7]. Следовательно, дополнительное введение ксантана может обеспечить стабильность свойств буровых растворов в широком интервале концентраций солей.

Анализ кривых течения растворов полисахаридов при скоростях сдвига $0 \div 10 \text{ с}^{-1}$ позволил рассчитать значения CHC_1 , CHC_{10} (после 1 и 10 мин. нахождения раствора в неподвижности), которые указывают на сравнительно низкое значение эффективной вязкости раствора геллана по сравнению с ксантаном. Для большей части полученных данных отношения $2,5 > \text{CHC}_{10}/\text{CHC}_1 > 1$, что указывает на тиксотропное поведение растворов полисахаридов [6]. При этом тиксотропность растворов геллан/ксантан выражена слабее по сравнению с растворами геллана, что, по-видимому, связано с возможностью самоорганизации макромолекул геллана.

Низкие значения CHC_1 , CHC_{10} для 0,2 и 0,5% растворов геллана исключают возможность эффективного удержания дисперсной фазы (бентонита) при низкой концентрации солей в буровом растворе [6]. В этом случае более эффективными могут быть растворы смеси геллана и ксантана, поскольку ксантан обладает хорошими стабилизирующими свойствами полимер-глинистых дисперсных систем [7].

Из кривых течения растворов геллана и геллана/ксантана (при соотношениях [геллан]:[ксантан] = 1:1, 2:1, 4:1, 1:2 и 1:4) при суммарной концентрации полисахаридов от 0,1 до 1,0% и концентрации бентонита от 2 до 8% были рассчитаны значения τ_0 после 1 и 10 мин нахождения раствора в покое при скоростях сдвига $10 \div 100 \text{ с}^{-1}$. Анализ кривых течения растворов геллана и геллана/ксантана проведен с использованием моделей Бингама-Шведова (1), Оствальде-ДеВаале (2) и Хершеля-Балкли (3):

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

где τ – напряжение сдвига, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, τ_0 – предельное динамическое напряжение сдвига, K – показатель консистенции, n – показатель нелинейности.

Полученные результаты представлены в таблицах 1 и 2. Данные по анализу кривых течения с использованием модели Бингама-Шведова не приведены вследствие их некорректности, так как значения коэффициента корреляции $R^2 \ll 1$.

Найденные значения коэффициента корреляции (R^2) показывают, что модель Оствальде-ДеВаале и Хершеля-Балкли лучше всего описывают реологическое поведение водных растворов геллана и геллана/ксантана в отсутствие и в присутствии бентонита (до 8%).

Величина n для исследованных растворов в большинстве случаев меньше 0,3, что свидетельствует о хороших псевдопластичных свойствах и способности удерживать твердую фазу [6]. Следует отметить, что величина R^2 в случае высокой концентрации бентонита 6-8% заметно отличается от единицы. Это характерно для растворов, обогащенных гелланом. Причиной этого может быть снижение седиментационной устойчивости растворов с высоким содержанием дисперсной фазы.

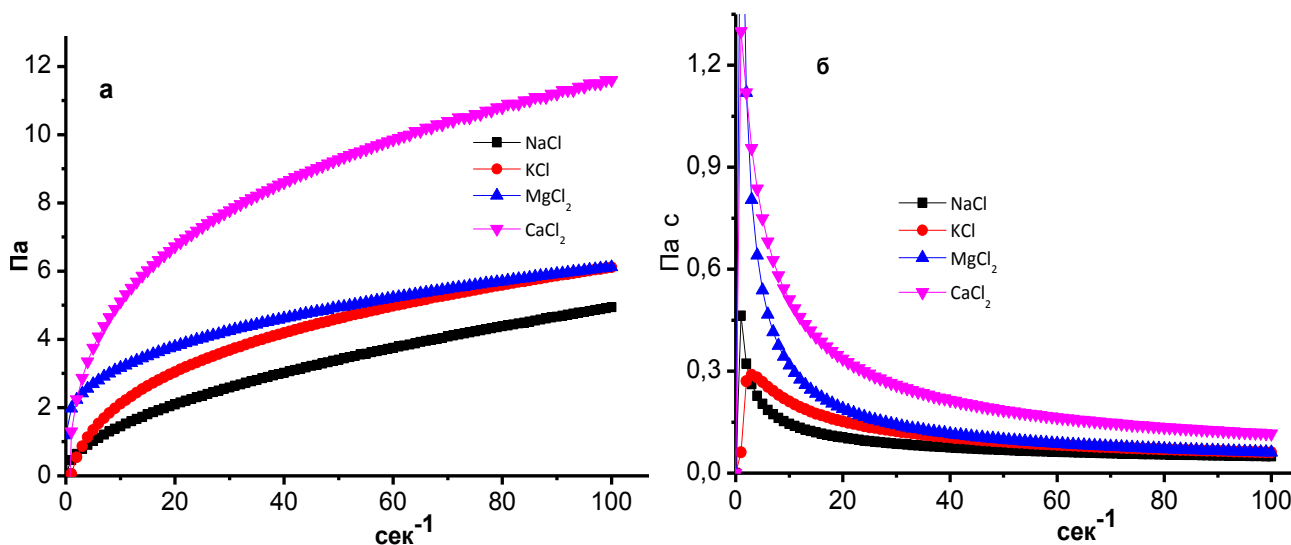


Рисунок 1 – Зависимости напряжения сдвига (а) и эффективной вязкости (б) от скорости сдвига для 0,5% раствора геллана для солей различной природы ($C_{\text{соли}} = 0,01 \text{ н}$)

Таблица 1 – Реологические параметры растворов полисахаридов в присутствии бентонита при 25°C

| Бентонит, % | С, % (геллан/ ксантан) | Реологические параметры | | | | | | | |
|-------------|------------------------------|---------------------------------|---------|-------|----------------|----------------------------------|-------|----------------|---------------|
| | | Модель Хершеля-Балкли, 1 мин | | | | Модель Хершеля-Балкли, 10 мин | | | |
| | | τ_0 , Па | K, Па·с | n | R ² | K, Па·с | n | R ² | τ_0 , Па |
| 2 | 1% (1/0) | - | 208,69 | 0,047 | 0,999 | 45,39 | 0,161 | 0,997 | - |
| 4 | 1% (1/0) | - | 20,29 | 0,207 | 0,999 | - | - | - | - |
| 6 | 1% (1/0) | - | 67,12 | 0,123 | 0,973 | - | - | - | - |
| 8 | 1% (1/0) | 6,841 | 8,87 | 0,364 | 0,956 | - | - | - | - |
| 2 | 1% (1/1) | - | 486,81 | 0,01 | 0,999 | 18,38 | 0,159 | 0,998 | - |
| 4 | 1% (1/1) | 1,286 | 15,52 | 0,207 | 0,998 | 8,90 | 0,278 | 0,995 | 13,815 |
| 6 | 1% (1/1) | - | 171,96 | 0,030 | 0,999 | 8,01 | 0,301 | 0,998 | 12,078 |
| 8 | 1% (1/1) | 7,333 | 10,05 | 0,260 | 0,994 | 6,92 | 0,426 | 0,989 | 7,796 |
| 2 | 1% (2/1) | - | 520,71 | 0,01 | 0,999 | 17,07 | 0,173 | 0,995 | - |
| 4 | 1% (2/1) | - | 17,08 | 0,188 | 0,999 | 11,17 | 0,258 | 0,998 | 2,765 |
| 6 | 1% (2/1) | 14,632 | 3,14 | 0,384 | 0,991 | 28,18 | 0,137 | 0,992 | - |
| 8 | 1% (2/1) | 4,892 | 13,61 | 0,180 | 0,988 | - | - | - | - |
| 2 | 1% (4/1) | - | 97,021 | 0,056 | 0,999 | 16 | 0,211 | 0,997 | - |
| 4 | 1% (4/1) | - | 14,99 | 0,221 | 0,999 | 13,36 | 0,257 | 0,998 | - |
| 6 | 1% (4/1) | 6,085 | 7,97 | 0,292 | 0,998 | 22,57 | 0,192 | 0,989 | - |
| 8 | 1% (4/1) | - | 68,94 | 0,086 | 0,990 | 2,30 | 0,645 | 0,935 | 12,337 |
| 2 | 1% (1/2) | 12,568 | 2,164 | 0,405 | 0,999 | 5,28 | 0,271 | 0,998 | 9,312 |
| 4 | 1% (1/2) | 11,278 | 4,604 | 0,319 | 0,998 | 7,12 | 0,266 | 0,997 | 8,766 |
| 6 | 1% (1/2) | 11,404 | 3,904 | 0,355 | 0,996 | 1,71 | 0,497 | 0,989 | 22,291 |
| 8 | 1% (1/2) | 13,878 | 1,944 | 0,461 | 0,996 | 3,93 | 0,308 | 0,985 | 21,677 |
| 2 | 1% (1/4) | 11,434 | 0,794 | 0,524 | 0,998 | 2,37 | 0,319 | 0,999 | 9,155 |
| 4 | 1% (1/4) | 11,634 | 1,02 | 0,491 | 0,997 | 2,06 | 0,394 | 0,998 | 10,78 |
| 6 | 1% (1/4) | 12,974 | 0,96 | 0,544 | 0,999 | 2,59 | 0,378 | 0,999 | 10,475 |
| 8 | 1% (1/4) | - | 0,94 | 0,563 | 0,999 | 4,01 | 0,335 | 0,998 | 9,923 |

В ходе исследования седиментационной устойчивости растворов геллана и геллана/ксантана. установлено, что в интервале концентраций полисахарида от 0,1 до 1% и концентраций бентонита от 0,1 до 6,0% полученные растворы обладают требуемой седиментационной устойчивостью. При концентрации бентонита 8% седиментационная устойчивость характерна для 1% растворов геллан/ксантан, в которых доля ксантана преобладает (1/4 и 1/2), что указывает на преобладающую роль ксантана, по сравнению с гелланом, в стабилизации дисперсной системы.

Коррозионная активность и реологические свойства буровых растворов на водной основе определяются значениями pH среды. В зависимости от химического состава буровые растворы могут быть слабощелочные $7,0 < \text{pH} < 8,5$, среднещелочные ($\text{pH}=8,5-10,5$), сильнощелочные ($\text{pH} > 11,5$). На рисунке 2 представлены кривые течения 1% растворов геллана и геллана/ксантана при различных pH среды, при этом значение pH изменяли введением раствора KOH. Как видно из рисунка 2, величина динамического

напряжения сдвига заметно увеличивается в интервале pH от 6,5 до 7,5, а в интервале pH от 7,5 до 8,5 резко снижается. Дальнейшее повышение pH незначительно понижает значения динамического напряжения сдвига. Наблюдаемый эффект от введения KOH сильнее проявляется в случае раствора геллана. Полученные результаты по влиянию pH среды согласуются с литературными данными [6], согласно которым оптимальное значение pH стандартного бурового раствора лежит в диапазоне 8-9. Этот диапазон обеспечивает низкую коррозионную активность буровых растворов.

Повышение температуры в интервале 25-70°C по разному влияет на реологическое поведение водных растворов геллана и ксантана, что наглядно иллюстрируется кривыми течения (рисунок 3). Для получения детальной информации о влиянии температуры на реологическое поведение растворов геллана и геллана/ксантана были проанализированы их кривые течения с использованием моделей Хершеля-Балкли и Оствальде-ДеВаале (таблица 3).

Таблица 2 – Реологические параметры растворов полисахаридов в присутствии бентонита при 25°C

| Бентонит, % | С, % (геллан/ ксантан) | Реологические параметры | | | | | |
|-------------|------------------------------|------------------------------------|-------|----------------|-------------------------------------|-------|----------------|
| | | Модель Оствальде-ДеВаале, 1 мин | | | Модель Оствальде-ДеВаале, 10 мин | | |
| | | К, Па·с | n | R ² | К, Па·с | n | R ² |
| 2 | 1% (1/0) | 20,038 | 0,243 | 0,996 | 20,667 | 0,263 | 0,988 |
| 4 | 1% (1/0) | 18,54 | 0,218 | 0,999 | 23,346 | 0,166 | 0,958 |
| 6 | 1% (1/0) | 13,781 | 0,307 | 0,967 | - | - | - |
| 8 | 1% (1/0) | 15,445 | 0,267 | 0,932 | 30,504 | 0,062 | 0,093 |
| 2 | 1% (1/1) | 14,809 | 0,179 | 0,997 | 16,129 | 0,173 | 0,998 |
| 4 | 1% (1/1) | 16,598 | 0,200 | 0,998 | 21,188 | 0,165 | 0,990 |
| 6 | 1% (1/1) | 14,732 | 0,195 | 0,996 | 18,527 | 0,185 | 0,995 |
| 8 | 1% (1/1) | 15,951 | 0,202 | 0,993 | - | - | - |
| 2 | 1% (2/1) | 11,032 | 0,220 | 0,991 | 11,156 | 0,225 | 0,992 |
| 4 | 1% (2/1) | 10,852 | 0,242 | 0,998 | 13,586 | 0,230 | 0,998 |
| 6 | 1% (2/1) | 14,399 | 0,178 | 0,986 | 21,494 | 0,165 | 0,992 |
| 8 | 1% (2/1) | 17,925 | 0,152 | 0,988 | 21,341 | 0,153 | 0,795 |
| 2 | 1% (4/1) | 10,734 | 0,252 | 0,996 | 10,023 | 0,277 | 0,993 |
| 4 | 1% (4/1) | 11,429 | 0,255 | 0,999 | 13,166 | 0,259 | 0,998 |
| 6 | 1% (4/1) | 12,638 | 0,231 | 0,997 | 16,102 | 0,236 | 0,985 |
| 8 | 1% (4/1) | 12,763 | 0,255 | 0,988 | 10,432 | 0,356 | 0,939 |
| 2 | 1% (1/2) | 11,803 | 0,174 | 0,994 | 13,651 | 0,151 | 0,992 |
| 4 | 1% (1/2) | 13,571 | 0,180 | 0,996 | 14,934 | 0,169 | 0,993 |
| 6 | 1% (1/2) | 12,608 | 0,197 | 0,992 | 20,893 | 0,129 | 0,953 |
| 8 | 1% (1/2) | 11,988 | 0,197 | 0,989 | 23,992 | 0,096 | 0,967 |
| 2 | 1% (1/4) | 9,248 | 0,166 | 0,987 | 10,599 | 0,128 | 0,987 |
| 4 | 1% (1/4) | 9,696 | 0,169 | 0,987 | 11,381 | 0,151 | 0,979 |
| 6 | 1% (1/4) | 10,116 | 0,191 | 0,988 | 11,605 | 0,164 | 0,985 |
| 8 | 1% (1/4) | 10,304 | 0,197 | 0,988 | 12,613 | 0,174 | 0,990 |

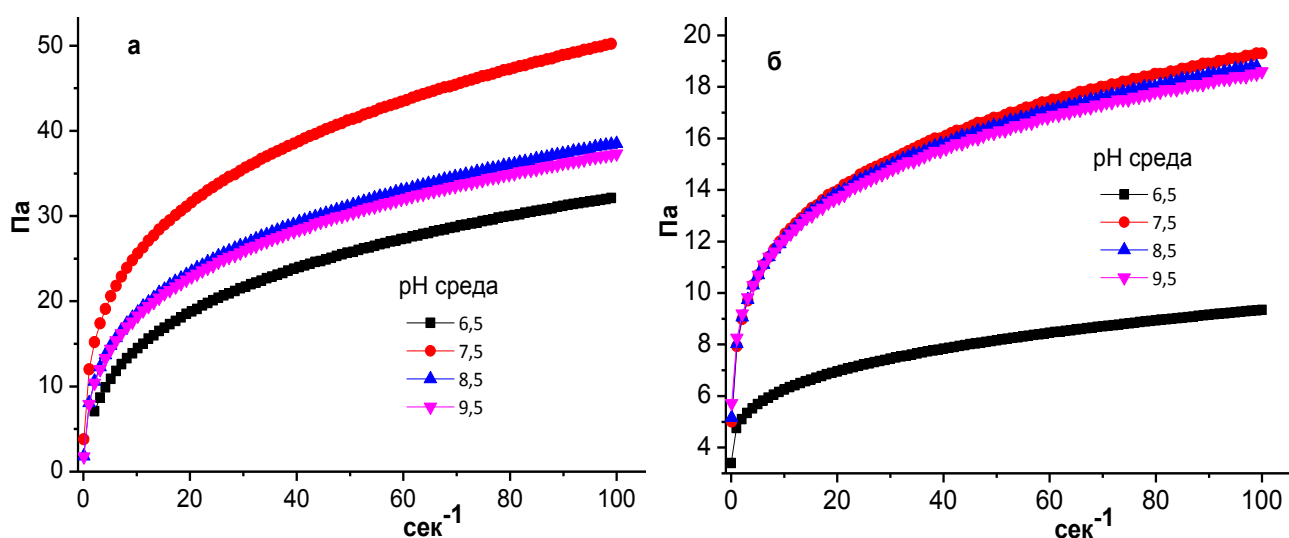


Рисунок 2 – Влияние pH среды на 1%-растворы геллана (а) и геллана/ксантана (1/1) (б)

Таблица 3 – Влияние температуры на реологические параметры растворов полисахаридов различного состава при среднем значении pH 6,5

| T, °C | C, % (геллан/ксантан) | Реологические параметры | | | | | | |
|-------|--------------------------|-------------------------|---------|-------|----------------|--------------------------|-------|----------------|
| | | Модель Хершеля-Балкли | | | | Модель Оствальде-ДеВаале | | |
| | | τ_0 , Па | K, Па·с | n | R ² | K, Па·с | n | R ² |
| 25 | 0,2% (1/0) | - | 0,004 | 0,981 | 0,997 | 0,002 | 1,096 | 0,997 |
| 30 | 0,2% (1/0) | - | 0,002 | 1,083 | 0,994 | 0,002 | 1,091 | 0,994 |
| 40 | 0,2% (1/0) | - | 0,001 | 1,234 | 0,990 | 0,001 | 1,171 | 0,990 |
| 50 | 0,2% (1/0) | - | 0,000 | 2,020 | 0,966 | 0,001 | 1,144 | 0,965 |
| 60 | 0,2% (1/0) | - | 0,000 | 1,668 | 0,959 | 0,002 | 1,026 | 0,958 |
| 70 | 0,2% (1/0) | - | 0,000 | 3,913 | 0,865 | 0,003 | 0,882 | 0,827 |
| 25 | 0,5% (1/0) | - | 0,049 | 0,737 | 0,999 | 0,031 | 0,829 | 0,999 |
| 30 | 0,5% (1/0) | - | 0,036 | 0,787 | 0,999 | 0,022 | 0,888 | 0,998 |
| 40 | 0,5% (1/0) | - | 0,021 | 0,841 | 0,998 | 0,014 | 0,918 | 0,998 |
| 50 | 0,5% (1/0) | - | 0,015 | 0,844 | 0,998 | 0,009 | 0,941 | 0,998 |
| 60 | 0,5% (1/0) | 0,003 | 0,005 | 0,991 | 0,995 | 0,006 | 0,967 | 0,995 |
| 70 | 0,5% (1/0) | 0,048 | 0,003 | 1,006 | 0,011 | 0,011 | 0,730 | 0,989 |
| 25 | 0,2% (0/1) | 0,587 | 0,147 | 0,513 | 0,999 | 0,491 | 0,317 | 0,997 |
| 30 | 0,2% (0/1) | 0,574 | 0,168 | 0,486 | 0,998 | 0,521 | 0,305 | 0,996 |
| 40 | 0,2% (0/1) | 0,319 | 0,256 | 0,412 | 0,998 | 0,459 | 0,321 | 0,997 |
| 50 | 0,2% (0/1) | - | 0,544 | 0,293 | 0,997 | 0,412 | 0,333 | 0,997 |
| 60 | 0,2% (0/1) | - | 0,697 | 0,261 | 0,997 | 0,332 | 0,369 | 0,996 |
| 70 | 0,2% (0/1) | - | 1,424 | 0,165 | 0,996 | 0,288 | 0,377 | 0,993 |
| 25 | 0,5% (0/1) | 4,265 | 0,014 | 1,054 | 0,997 | 2,924 | 0,150 | 0,936 |
| 30 | 0,5% (0/1) | 4,354 | 0,010 | 1,119 | 0,996 | 2,937 | 0,151 | 0,933 |
| 40 | 0,5% (0/1) | 4,292 | 0,008 | 1,139 | 0,995 | 3,029 | 0,134 | 0,921 |
| 50 | 0,5% (0/1) | 4,208 | 0,029 | 0,887 | 0,997 | 3,041 | 0,138 | 0,957 |
| 60 | 0,5% (0/1) | 3,633 | 0,161 | 0,576 | 0,998 | 2,841 | 0,156 | 0,985 |
| 70 | 0,5% (0/1) | 0,207 | 2,279 | 0,192 | 0,999 | 2,457 | 0,184 | 0,999 |
| 25 | 0,5% (1/1) | 1,352 | 0,257 | 0,536 | 0,999 | 1,059 | 0,304 | 0,995 |
| 30 | 0,5% (1/1) | 1,305 | 0,249 | 0,540 | 0,999 | 1,016 | 0,309 | 0,995 |
| 40 | 0,5% (1/1) | 1,103 | 0,298 | 0,494 | 0,999 | 0,971 | 0,304 | 0,997 |
| 50 | 0,5% (1/1) | 0,683 | 0,489 | 0,403 | 0,999 | 0,936 | 0,303 | 0,999 |
| 60 | 0,5% (1/1) | 0,471 | 0,647 | 0,350 | 0,999 | 0,974 | 0,289 | 0,999 |
| 70 | 0,5% (1/1) | - | 1,050 | 0,259 | 0,999 | 0,778 | 0,299 | 0,999 |
| 25 | 0,5% (2/1) | 0,474 | 0,077 | 0,674 | 0,999 | 0,283 | 0,439 | 0,995 |
| 30 | 0,5% (2/1) | 0,493 | 0,065 | 0,699 | 0,999 | 0,276 | 0,437 | 0,994 |
| 40 | 0,5% (2/1) | 0,384 | 0,075 | 0,652 | 0,999 | 0,248 | 0,436 | 0,996 |
| 50 | 0,5% (2/1) | 0,273 | 0,105 | 0,571 | 0,999 | 0,236 | 0,429 | 0,997 |
| 60 | 0,5% (2/1) | 0,174 | 0,130 | 0,518 | 0,999 | 0,219 | 0,428 | 0,998 |
| 70 | 0,5% (2/1) | - | 0,258 | 0,389 | 0,999 | 0,212 | 0,422 | 0,999 |
| 25 | 0,5% (3/1) | 0,744 | 0,155 | 0,627 | 0,999 | 0,505 | 0,417 | 0,995 |
| 30 | 0,5% (3/1) | 0,342 | 0,293 | 0,508 | 0,999 | 0,470 | 0,427 | 0,999 |
| 40 | 0,5% (3/1) | 0,259 | 0,266 | 0,495 | 0,999 | 0,402 | 0,425 | 0,999 |
| 50 | 0,5% (3/1) | 0,117 | 0,271 | 0,468 | 0,999 | 0,333 | 0,432 | 0,999 |
| 60 | 0,5% (3/1) | - | 0,287 | 0,419 | 0,999 | 0,287 | 0,419 | 0,999 |
| 70 | 0,5% (3/1) | - | 0,216 | 0,424 | 0,998 | 0,206 | 0,432 | 0,998 |

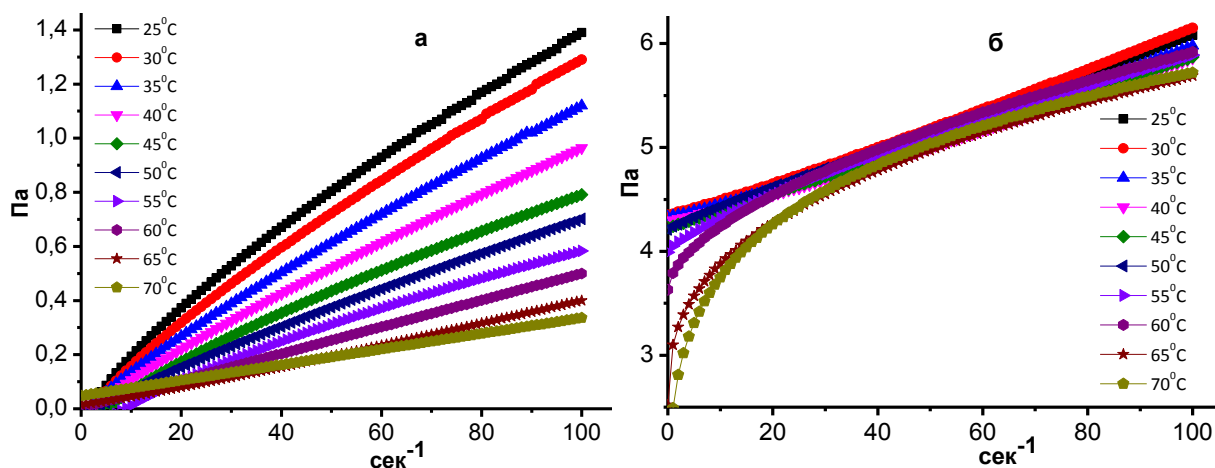


Рисунок 3 – Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для 0,5% водных растворов геллана (а) и ксантана (б) при различных температурах

Из представленных данных видно, что реологическое поведение растворов геллана при концентрациях 0,2 и 0,5% в исследованном интервале температур хорошо подчиняется степенному закону Оствальде-ДеВаала. Величина K , характеризующая вязкость раствора, имеет низкие значения, которые снижаются с ростом температуры. Показатель нелинейности, характеризующий отклонение поведения раствора от закона Ньютона ($n=1$), показывает, что при концентрации 0,2% в области температур 25÷60°C раствор геллана является ньютоновской жидкостью. При повышении концентрации геллана (0,5% и более), особенно в области температур выше 60°C раствор геллана становится псевдопластичной жидкостью. Такое поведение растворов связано с процессами самоорганизации.

Реологическое поведение растворов ксантана при концентрациях 0,2 и 0,5% в исследованном температурном диапазоне хорошо описывается законом Хершеля-Балкли. С ростом температуры и уменьшением концентрации снижаются предельное динамическое напряжение сдвига и показатель n , а показатель консистенции K растет.

Реологическое поведение растворов геллана/ксантана при концентрациях 0,2 и 0,5% в диапазоне температур 25÷70°C хорошо описывается уравнением Хершеля-Балкли и подобно поведению растворов ксантана. В отличие от последних, они имеют более низкие значения τ_0 и n , но более высокие значения K .

Таким образом, исследованы физико-химические, реологические и конформационные свойства растворов геллана и геллана/ксантана в воде и водно-солевых средах при варьировании состава и суммарной концентрации полисахаридов, ионной силы раствора, содержания дисперсной фазы, pH среды и температуры; показано, что их реологическое поведение в широком диапазоне варьируемых параметров подчиняется законам Хершеля-Балкли и Оствальде-ДеВаала; при варьировании

температуры, состава и концентрации полимеров, а также низкомолекулярных солей растворы проявляют выраженное тиксотропное поведение, связанное с процессами самоорганизации макромолекул геллана; установлено протекание обратимых золь-гель переходов макромолекул геллана, индуцируемых присутствием катионов щелочных и щелочноземельных металлов, а также изменением температуры.

4. Заключение

Полученные данные по поведению растворов полисахаридов (геллана и ксантана) позволяют разработать новые промывочные жидкости для бурения с высокой скоростью проходки в сложных горно-геологических условиях за счет автоматического укрепления стенок скважины.

Социально-экономический эффект полученных результатов состоит в том, что применение разрабатываемых буровых растворов существенно повысит скорость бурения, снизит вероятность аварий нефтепромыслового оборудования, сократит продолжительность тяжелого ручного труда и количество нефтешламов. Использование в качестве основы буровых растворов биodeградируемых геллана и ксантана снизит требуемый расход раствора и, соответственно, экологическое воздействие на окружающую среду.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РК (Грант № 4410/ГФ 4 2015-2017).

Список литературы

- 1 Nitta Y, Takahashi R., Nishinari K. Viscoelasticity and phase separation of aqueous Na-type gellan solution // *Biomacromolecules*. – 2010. – Vol. 11. – P. 187–191.
- 2 Moraes I.C.F., Fasolin L.H., Cunha R.L., Menegalli F.C. Dynamic and Steady-shear rheological properties of xanthan and guar gums dispersed in yellow passion fruit pulp // *Brazilian Journal of Engineering*. – 2011. – Vol. 28. — P. 483-494.
- 3 Валиева О.И., Шарова О.Ю., Клеттер В.Ю., Мулюков Р.А., Борисов И.М. Исследование эффектов синергетического взаимодействия ксантановой и гуаровой смол в водных растворах // *Вестник Башкирского университета*. — 2013. — Т. 18, № 1. — С. 52-55.
- 4 Максина Е.В., Гурьянова А.О., Ермаков В.В., Быков Д.Е., Лямин А.В. Исследование возможности биологической утилизации буровых шламов, содержащих полисахариды // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. — 2013. — Т. 15. № 3-6 — С. 1850-1852.
- 5 Минибаев В.В., Ильин И.А., Пестерев С.В. Эффективность полисахаридных реагентов в буровых растворах различной степени минерализации среды // *Бурение и нефть*. – 2009. – № 10. – С. 44-46.
- 6 Дудля Н.А., Хаиров Г.Б., Третьяк А.Я., Пинка Я.Н. Промысловые жидкости в бурении. – Алматы: Изд-во КБТУ, 2007. – Ч. 1. – 200 с.
- 7 Шарафутдинов З.З., Шарафутдинова Р.З. Буровые растворы на водной основе и управление их реологическими параметрами // *Нефтегазовое дело*. — 2004. — № 1. — С. 1-21.

References

- 1 Nitta Y, Takahashi R, Nishinari K (2010) *Biomacromolecules* 11:187-191.
- 2 Moraes ICF, Fasolin LH, Cunha RL, Menegalli FC (2011) *Brazilian Journal of Engineering* 28:483-494.
- 3 Valiev OI, Sharov O, Kletter VY, Mulyukov RA, Borisov IM (2013) *Bulletin of Bashkir University [Vestnik Bashkirskogo universiteta]* 18:52-55. (In Russian)
- 4 Maksina E, Guryanov AO, Ermakov VV, Bykov DE, Ljamin AV (2013) *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences [Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk]* 15:1850-1852. (In Russian)
- 5 Minibaev VV, Ilyin IA, Pesterev SV (2009) *Drilling and Oil [Bureniye i neft']* 10: 44-46.
- 6 Dudlya N, Hairrov GB, Tretyak AY, Pink YN (2007) *Flushing fluid drilling [Promyvochnyye zhidkosti v bureanii]*. Part 1. Publishing House of KBTU, Almaty, Kazakhstan. 200 p. (In Russian)
- 7 Sharafutdinov ZZ, Sharafutdinova RZ (2004) *Petroleum engineering [Neftegazovoye delo]* 1:1-21. (In Russian)