

КОМПОЗИЦИОННЫЕ СМЕСИ ЛИГНОСУЛЬФОНАТНЫХ РЕАГЕНТНЫХ СИСТЕМ С СОЕДИНЕНИЯМИ КРЕМНИЯ

Г.А. Тептерева, Л.З. Рольник, Н.В. Пугачев, И.А. Бахтигареев

Галина Алексеевна Тептерева (ORCID 0000-0003-2328-6761)*, Любовь Зелиховна Рольник (ORCID 0000-0002-8402-1516), Ильшат Амиргалиевич Бахтигареев (ORCID 0009-0000-1155-4138)

Кафедра общей, аналитической и прикладной химии, Уфимский государственный нефтяной технический университет, ул. Космонавтов, 1, Уфа, Российская Федерация, 450062

E-mail: teptereva.tga@yandex.ru*, rolnik@mail.ru, ibakhtigareev@inbox.ru

Никита Викторович Пугачев (ORCID 0009-0006-7183-176X)

АО «Транснефть-Урал», ул. Крупской, 10, Уфа, Российская Федерация, 450008

E-mail: nikita-pugachev@mail.ru

Актуальность статьи связана с исследованием возможности улучшения качества лигносульфонатных систем, применяемых при прохождении интервалов набухающих глинистых пород. Особенностью реагентных систем на основе лигносульфонатов является их способность ингибировать процессы гидратации глинистых минералов и этим снижать риски осложнений при строительстве нефтегазовых скважин. Исследование свойств композиции проведено на основе смеси лигносульфонатных систем и соединений кремния на примере феррохромлигносульфоната (ФХЛС-М) и силиката натрия Na_2SiO_3 (СН). Задачей исследования являлся поиск оптимальных соотношений компонентов смеси методом планирования эксперимента, как средства построения математических моделей и регрессионного анализа для оценки величины и направления воздействия различных факторов на выходные параметры промысловой жидкости. Методика исследования заключается в определении стабильности параметров раствора при варьировании температур от 20 до 190 °С в ячейке старения в течение 5 ч и проведении не менее трех параллельных определений по каждому соотношению реагентов в композиции по отношению к исходному глинистому раствору. Выполненный регрессионный анализ композиции ФХЛС-М: СН показал, что наибольшее влияние на вязкостные и фильтрационные свойства раствора оказывает содержание ФХЛС-М, однако, в интервале температур 80-190 °С обосновано соотношение ФХЛС-М: СН, равное 3%:5% (добавка СН усиливает воздействие композиции более, чем на 40%). В диапазоне температур 20-120 °С, для поддержания условной вязкости раствора (УВ) не менее 60 с, требуется содержание силиката натрия порядка 4%, ФХЛС-М – в пределах 3-5%. При температурах 80-120 °С и величине УВ=60 с, состав композиции ФХЛС-М: СН равен 3%:4% соответственно; при повышении температуры более 120 °С появляется необходимость увеличения расхода ФХЛС-М. При этом в интервале температур 80-190 °С соотношение ФХЛС-М: СН обосновано на уровне 3%:4% соответственно. Установлено, что оптимальным в интервале температур 20-190 °С, в композиции ФХЛС-М: СН является соотношение, равное 0,75%:0,75% соответственно, однако, при этом условная вязкость (УВ) раствора составляет не более 35 с. Снижение показателя фильтрации (ПФ) раствора при температурах до 80 °С обеспечивается использованием в составе композиции менее 2% силиката натрия, а ФХЛС-М в пределах 2-5%.

Ключевые слова: феррохромлигносульфонат, силикат натрия, условная вязкость, показатель фильтрации, регрессионный анализ

Для цитирования:

Тептерева Г.А., Рольник Л.З., Пугачев Н.В., Бахтигареев И.А. Композиционные смеси лигносульфонатных реагентных систем с соединениями кремния. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 2. С. 96–103. DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6855.

For citation:

Teptereva G.A., Rolnik L.Z., Pugachev N.V., Bakhtigareev I.A. Composite mixtures of lignosulfonate reagent systems with silicon compounds. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 2. P. 96–103. DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6855.

COMPOSITE MIXTURES OF LIGNOSULFONATE REAGENT SYSTEMS WITH SILICON COMPOUNDS

G.A. Teptereva, L.Z. Rolnik, N.V. Pugachev, I.A. Bakhtigareev

Galina A. Teptereva (ORCID 0000-0003-2328-6761)*, Lyubov Z. Rolnik (ORCID 0000-0002-8402-1516), Ilshat A. Bakhtigareev (ORCID 0009-0000-1155-4138)

Department of General, Analytical and Applied Chemistry, Ufa State Petroleum Technological University, Cosmonavtov st., 1, Ufa, 450062, Russia

E-mail: teptereva.tga@yandex.ru*, rolnikk@mail.ru, ibakhtigareev@inbox.ru

Nikita V. Pugachev (ORCID 0009-0006-7183-176X)

Transneft Ural JSC, Krupskaya st., 10, Ufa, 450008, Russia

Email: nikita-pugachev@mail.ru

The relevance of the article is related to the study of the possibility of improving the quality of lignosulfonate systems used during the passage of intervals of swelling clay rocks. A feature of reagent systems based on lignosulfonates is their ability to inhibit the hydration processes of clay minerals and thereby reduce the risks of complications during the construction of oil and gas wells. The properties of the composition were studied on the basis of a mixture of lignosulfonate systems and silicon compounds using the example of ferrochromolignosulfonate (FHLS-M) and sodium silicate Na_2SiO_3 (SS). The objective of the study was to find optimal ratios of the components of the mixture by the method of experimental planning, as a means of constructing mathematical models and regression analysis to assess the magnitude and direction of the impact of various factors on the output parameters of the flushing fluid system. The research method consists in determining the stability of the solution parameters with varying temperatures from 20 to 190 °C in the aging cell for 5 h and conducting at least three parallel determinations for each ratio of reagents in the composition relative to the initial clay solution. The performed regression analysis of the composition of FHLS-M: SS showed that the greatest influence on the viscosity and filtration properties of the solution is exerted by the content of FHLS-M. However, in the temperature range of 80-190 °C, the ratio of FHLS-M: SS is justified, equal to 3%:5% (the addition of SS enhances the effect of the composition by more than 40%). In the temperature range of 20-120 °C, to maintain the conditional viscosity of the solution (CV) at least 60 s, a sodium silicate content of about 4 % is required, FHLS-M – within 3-5%. At temperatures of 80-120 °C and a value of CV = 60 s, the composition of the composition of FHLS-M: SS is 3%:4%, respectively; with an increase in temperature of more than 120 °C, there is a need to increase the consumption of FHLS-M. At the same time, in the temperature range of 80-190 °C, the ratio of FHLS-M: SS is justified at the level of 3%:4%, respectively. It was found that the optimal ratio in the temperature range of 20-190 °C, in the composition of FHLS-M: SS, is 0.75%:0.75 %, respectively, however, the conditional viscosity (CV) of the solution is no more than 35 s. A decrease in the filtration index (FI) of the solution at temperatures up to 80 °C is ensured by the use of less than 2% sodium silicate in the composition, and FHLS-M in the range of 2-5%.

Key words: ferrochromolignosulfonate, sodium silicate, conditional viscosity, filtration index, regression analysis

ВВЕДЕНИЕ

Востребованность в лигносульфонатных реагентах, как продуктах модификации фенилпропановых звеньев матрицы, на протяжении нескольких десятков лет обусловлена их выраженными

комплексообразующими свойствами, стабильностью в условиях повышенных забойных температур и минерализации, поверхностной активностью и высокими адсорбционными характеристиками на границе раздела фаз [1-13]. В нефтепромысловой

химии при создании реагентов для бурения скважин используется, как правило, модификация лигносульфонатной матрицы поливалентными катионами железа и хрома [14, 15-22]. На этом основано получение феррохромлигносульфонатных реагентов (ФХЛС), особенностью которых и определяющим основанием их востребованности в буровой технологии является не только способность к снижению вязкости и фильтрации глинистых суспензий, но и высокая эффективность их работы в известковых и гипсовых системах буровых растворов, превосходящая параметры работы альтернативных реагентов, например, полисахаридных.

Интересным представляется дальнейшее совершенствование свойств лигносульфонатных систем за счет создания композиций с соединениями кремния, характерными свойствами которых является способность увеличивать термостойкость различных буровых систем в условиях высокой минерализации пластовых вод.

Вопросы совместного воздействия лигносульфонатных систем и соединений кремния на эффективность подавления процессов гидратации глинистых минералов на сегодня изучены недостаточно.

Целью работы, в этой связи, является исследование свойств композиции на основе лигносульфонатных реагентов и соединений кремния на примере феррохромлигносульфоната (ФХЛС-М) и силиката натрия (СН).

Задачей исследования является поиск оптимальных соотношений ФХЛС и силиката натрия (СН) методом планирования эксперимента.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Известно, что метод планирования эксперимента используется как средство построения математических моделей и регрессионного анализа, что позволяет оценить величину воздействия и направление влияния различных факторов на выходные параметры системы бурового раствора и, в определенной степени, оптимизировать соотношение компонентов в исследуемой дисперсной системе [4, 14-17].

В ходе трехфакторного эксперимента исследовались соотношения ФХЛС-М: СН; влияние термообработки на показатель фильтрации (ПФ) и условную вязкость (УВ) глинистого раствора. Выбрана методика проведения полнофакторного эксперимента (по Боксу-Уилсону) плана типа 2^k ($k = 3$, число факторов)» (табл. 1).

Методика исследования заключается в определении стабильности параметров раствора

при варьировании температур от 20 до 190 °С в ячейке старения в течение 5 ч, и проведении не менее трех параллельных определений по каждому соотношению реагентов в композиции по отношению к исходному глинистому раствору (ИГР). Минимальный объем пробы – 300 мл. (табл. 2, 3).

Таблица 1

Вариации и уровни выбранных факторов
Table 1. Variations and levels of selected factors

Уровень варьируемых факторов	Кодовое обозначение	ФХЛС-М, %	Силикат натрия, %	T, °С
		X_1	X_2	X_3
Основной уровень	0	1,875	2,875	105
Среднее значение интервала варьирования	Δx_i	1,125	2,125	105
Верхний уровень	+1	3	5	190
Нижний уровень	-1	0,75	0,75	20

Обработка результатов экспериментов с помощью программы STATISTICA 10 позволила получить следующие уравнения регрессии:

– для условной вязкости (1):

$$y = 14,363 - 1,756 \cdot x_1 + 14,384 \cdot x_2 - 0,016 \cdot x_3 - 2,181 \cdot x_1 x_2 + 0,085 \cdot x_1 x_3 + 0,035 \cdot x_2 x_3 - 0,013 \cdot x_1 x_2 x_3 \quad (1)$$

где x_i – натуральное текущее значение фактора. И установить:

- однородность дисперсий по критерию Кохрена;
- статистическую значимость всех коэффициентов по критерию Стьюдента;
- адекватность уравнения регрессии выбранной модели по критерию Фишера.

Обработка результатов экспериментов с помощью программы STATISTICA 10 позволила получить следующие уравнения регрессии:

– для показателя фильтрации (2):

$$y = 12,295 - 0,955 \cdot x_1 - 0,075 \cdot x_2 + 0,029 \cdot x_3 + 0,308 \cdot x_1 x_2 + 0,003 \cdot x_1 x_3 + 0,004 \cdot x_2 x_3 - 0,005 \cdot x_1 x_2 x_3 \quad (2)$$

где x_i – натуральное текущее значение фактора. Дальнейшую оценку результатов экспериментов по программе STATISTICA 10 проводили на:

- однородность дисперсий полученных параллельных опытов;
- значимость коэффициентов уравнения регрессии;
- адекватность выбранной модели.

Таблица 2

Параметры глинистого раствора при варьировании уровней факторов (ИГР – исходный глинистый раствор; СН – силикат натрия)

Table 2. Parameters of clay solution with varying levels of factors (ICS - initial clay solution; SS - sodium silicate)

Состав раствора	ρ , г/см ³	Условная вязкость (УВ ₁ , с)	Условная вязкость (УВ ₂ , с)	Условная вязкость (УВ ₃ , с)	Условная вязкость (УВ _{ср} , с)
ИГР: Вода+ 12% Бентонит ПБМВ	1,09	32	31	32	31,67
ИГР+0,75% ФХЛС-М + 0,75% СН (20 °С)	1,09	24	24	24	24
ИГР + 3% ФХЛС-М + 5% СН (20 °С)	1,09	51	53	54	52,67
ИГР + 3% ФХЛС-М + 5% СН (190 °С)	1,1	90	92	89	90,33
ИГР + 3% ФХЛС-М + 0,75% СН (190 °С)	1,1	60	59	61	60,00
ИГР + 3% ФХЛС-М + 0,75% СН (20 °С)	1,09	20	20	19	19,67
ИГР+0,75% ФХЛС-М+0,75% СН (190 °С)	1,09	36	35	35	35,33
ИГР+ 0,75% ФХЛС-М + 5% СН (20 °С)	1,09	80	81	80	80,33
ИГР+ 0,75% ФХЛС-М + 5% СН (190 °С)	1,1	110	111	109	110,0

Таблица 3

Влияние различных сочетаний уровней факторов на величину показателя фильтрации (ПФ)

Table 3. Influence of various combinations of factor levels on the value of the filtration index (FI)

Состав раствора	ρ , г/см ³	ПФ ₁ , см ³ /30 мин	ПФ ₂ , см ³ /30 мин	ПФ ₃ , см ³ /30 мин	ПФ _{ср} , см ³ /30 мин
ИГР: Вода + 12% Бентонит ПБМВ	1,09	20	21	20	20,33
ИГР + 0,75% ФХЛС-М + 0,75% СН (20 °С)	1,09	13	12	12,0	12,33
ИГР + 3% ФХЛС-М + 5% СН (20 °С)	1,09	13	14	13,0	13,33
ИГР + 3% ФХЛС-М + 5% СН (190 °С)	1,1	10	11	10,0	10,33
ИГР + 3% ФХЛС-М + 0,75% СН (190 °С)	1,1	15	17	15,0	15,67
ИГР + 3% ФХЛС-М + 0,75% СН (20 °С)	1,09	10	11	11,0	10,67
ИГР + 0,75% ФХЛС-М + 0,75% СН (190 °С)	1,09	17	18	18,0	17,67
ИГР+ 0,75% ФХЛС-М + 5% СН (20 °С)	1,09	13	13	15,0	13,67
ИГР + 0,75% ФХЛС-М + 5% СН (190 °С)	1,1	18	20	18,0	18,67

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Графическое изображение результатов табл. 2 позволяет решить две задачи:

– поиск оптимальных соотношений компонентов смеси при сохранении значений УВ с ростом температуры (рис. 1);

– определение оптимальной температуры, при которой соотношение компонентов смеси обеспечивает стабильность параметров раствора (рис. 2).

Выходными параметрами для рис. 1 являются: $t = UB = 35,5$ с, концентрации ФХЛС 0,75-3%, силиката натрия 0,75-5,0%, интервал температуры $T = 20-190$ °С.

По данным рис. 1 видно, что оптимальным в исследуемой композиции является соотношение ФХЛС-М: СН, равное 0,75%:0,75% соответственно, при котором получены удовлетворительные рабочие параметры глинистого раствора в интервале температур (20-190 °С), при этом условная вязкость (УВ) раствора составляет 35 с.

Выходными параметрами для рис. 2 являются: $UB = 60$ с, концентрации ФХЛС $\omega = 0,75-3\%$, силиката натрия 3-6%, интервал температуры $T = 20-190$ °С.

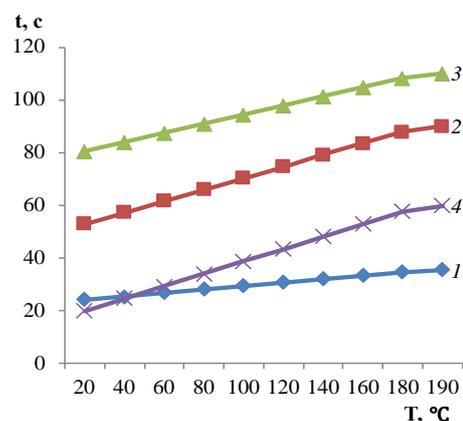


Рис. 1. Определение оптимальных соотношений компонентов смеси «ФХЛС-силикат натрия» по отношению к исходному глинистому раствору при сохранении значений условной вязкости (УВ) с ростом температуры: 1 – 0,75% ФХЛС-М+0,75% силиката натрия; 2 – 3% ФХЛС-М+5% силиката натрия; 3 – 0,75% ФХЛС-М+5% силиката натрия; 4 – 3% ФХЛС-М+ 0,75% силиката натрия

Fig. 1. Determination of the optimal ratios of the components of the "FHLS-sodium silicate" mixture with respect to the initial clay solution while maintaining the values of the conditional viscosity (CV) with increasing temperature: 1 – 0.75% FHLS-M + 0.75% sodium silicate; 2 – 3% FHLS-M + 5% sodium silicate; 3 – 0.75% FHLS-M + 5% sodium silicate; 4 – 3% FHLS-M + 0.75% sodium silicate

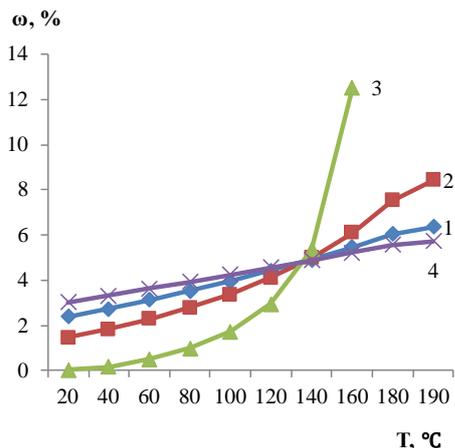


Рис. 2. Выбор температуры, при которой достигается оптимальное соотношение компонентов ФХЛС-М: силикат натрия: 1 – 5% силиката натрия; 2 – 4% силиката натрия; 3 – 3% силиката натрия; 4 – 6% силиката натрия
 Fig. 2. Selection of the temperature at which the optimal ratio of the components of FHLS-M is achieved: sodium silicate: 1 – 5% sodium silicate; 2 – 4% sodium silicate; 3 – 3% sodium silicate; 4 – 6% sodium silicate

По рис. 2 видно, что во всем диапазоне температур содержание СН должно быть не менее 4%, но с ростом температуры выше 120 °С возникает необходимость увеличения концентрации ФХЛС-М в составе композиции до 8%, что снижает экономическую привлекательность предлагаемой композиции (стоимость тонны ФХЛС превышает цену тонны силиката натрия на порядок).

Приемлемыми при температуре до 120 °С можно считать условия, при которых соотношение компонентов ФХЛС-М: СН составляет менее 4%:4% соответственно.

Оптимальной температурой можно считать величину 80-120 °С при сохранении величины УВ на уровне 60 с, соотношении реагентов в составе композиции ФХЛС-М: СН 3%:4% соответственно. Дальнейшее повышение температуры связано с резким увеличением расхода ФХЛС-М.

По уравнению регрессии (2) получены значения μ – показателя фильтрации (ПФ), построены графические зависимости изменения выходного параметра при различных температурах (рис. 3).

Видно, что показатель фильтрации ПФ достигает наименьшего значения (11 см³/30 мин) при соотношении компонентов композиции ФХЛС-М: СН, равном 3%:5% и максимальной температуре 190 °С.

Выходным параметром здесь принято наименьшее значение показателя фильтрации ПФ 11 см³/30 мин в диапазоне температур 20-190 °С (рис. 4).

По рис. 4 видно, что оптимальным в диапазоне 80-190 °С является соотношение реагентов в составе композиции ФХЛС-М: СН 3%:5%, при котором обеспечивается минимальная величина показателя фильтрации, следовательно, указанное соотношение можно считать приближенным к оптимальному значению.

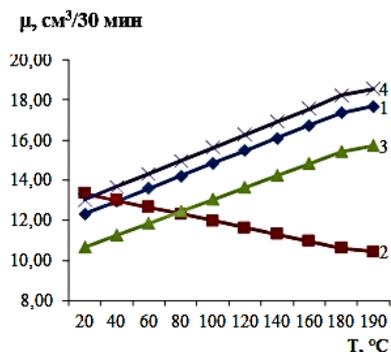


Рис. 3. Влияние соотношения компонентов композиции ФХЛС-М: силикат натрия на величину показателя фильтрации глинистого раствора: 1 – 0,75% ФХЛС-М + 0,75% силиката натрия; 2 – 3% ФХЛС-М + 5% силиката натрия; 3 – 3% ФХЛС-М + 0,75% силиката натрия; 4 – 0,75% ФХЛС-М + 5% силиката натрия
 Fig. 3. The effect of the ratio of the components of the composition FHLS-M: sodium silicate on the value of the filtration index of the clay solution: 1 – 0.75% FHLS-M + 0.75% sodium silicate; 2 – 3% FHLS-M + 5% sodium silicate; 3 – 3% FHLS-M + 0.75% sodium silicate; 4 – 0.75% FHLS-M + 5% sodium silicate

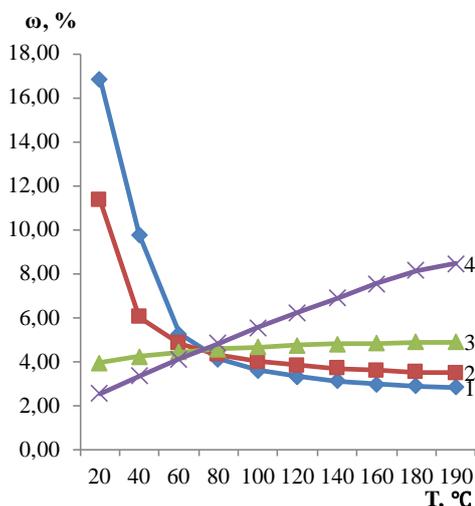


Рис. 4. Влияние температуры на показатель фильтрации 11 см³/30 мин при вариативности соотношения компонентов композиции ФХЛС-М: силикат натрия: 1 – 5% силиката натрия; 2 – 3,5% силиката натрия; 3 – 2% силиката натрия; 4 – 0,75% силиката натрия
 Fig. 4. The effect of temperature on the filtration rate of 11 cm³/30 min with the variability of the ratio of the components of the composition FHLS-M: sodium silicate: 1 – 5% sodium silicate; 2 – 3.5% sodium silicate; 3 – 2% sodium silicate; 4 – 0.75% sodium silicate

Таким образом, предложена композиция на основе модифицированного лигносульфоната ФХЛС-М и неорганического реагента – силиката натрия, состав которой позволяет сохранить рабочие параметры при повышении температуры в диапазоне 80-190 °С.

Оптимальным выбрано соотношение компонентов 3%:4% для ФХЛС-М: СН в отличие от исследований, где содержание силикатных материалов составляет 2-5% [23-25].

ВЫВОДЫ

Выполненный регрессионный анализ композиции ФХЛС-М: СН (силикат натрия) позволил установить:

- однородность дисперсий в составе композиции по критерию Кохрена;
- статистическую значимость всех коэффициентов по критерию Стьюдента;
- адекватность уравнения регрессии выбранной модели по критерию Фишера.

Установлено, что оптимальным в композиции ФХЛС-М: СН при условной вязкости (УВ) не

более 35 с, в интервале температур 20-190 °С, является соотношение 0,75%:0,75% соответственно.

Выявлено, что для поддержания условной вязкости раствора (УВ) не менее 60 с, при температурах 20-190 °С содержание силиката натрия должно быть порядка 4%, содержание ФХЛС-М находится в пределах 3-5%.

Установлено, что для УВ = 60 с оптимальной температурой можно считать величину 80-120 °С. При этом соотношение реагентов в составе композиции ФХЛС-М: СН должно составлять 3%:4% соответственно; в интервале температур 80-190 °С обосновано соотношение ФХЛС-М: СН, равное 3%:5%.

Установлено, что для снижения показателя фильтрации раствора при температурах до 80 °С до допустимых величин достаточно содержания ФХЛС-М в пределах 2-5%, а силиката натрия – менее 2%.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилов Б.М. Лигно-полимерные реагенты для буровых растворов. Краснодар: Просвещение-ЮГ. 2004. 398 с.
2. Тептерева Г.А., Конесев Г.В., Исмаков Р.А., Кантор Е.А., Дихтырь Т.Д. Получение буровых реагентов модификацией нейтрально-сульфитных щелоков фосфонными соединениями. *Изв. Томск. политехн. ун-та. Инженеринг георесурсов*. 2017. Т. 328. № 9. С. 94–101.
3. Bruscato C., Malvessi E., Brandalise R.N., Camassola M. High performance of macrofungi in the production of mycelium-based biofoams using sawdust – sustainable technology for waste reduction. *J. Clean. Prod.* 2019. V. 234. P. 225–232. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.150.
4. Girometta C., Picco A.M., Baiguera R.M., Dondi D., Babbini S., Cartabia M., Pellegrini M., Savino E. Physico-mechanical and thermodynamic properties of mycelium-based bio-composites: a review. *Sustainability*. 2019. V. 11. N 1. P. 281. DOI: 10.3390/su11010281.
5. Логинова М.Е., Конесев Г.В., Тептерева Г.А., Баулин О.А., Мовсумзаде Э.М., Бабушкин Э.В., Буянова М.Г. Применение метода планированного эксперимента для обоснования рецептуры модифицированного бурового раствора. *Промышл. произв. и использ. эластомеров*. 2021. № 4. С. 27-34. DOI: 10.24412/2071-8268-2021-4-27-34.
6. Боголицын К.Г., Аксенов А.С., Паламарчук И.А., Бойцова Т.А., Бровко О.С., Хвиюзов С.С., Левандовская Т.В., Варламов В.П. Модификация лигносульфонатов и оценка возможности их комплексообразования с хитозаном. *Изв. вузов. Лесной журн.* 2012. Т. 325. № 1. С. 80–87.

REFERENCES

1. Gavrilov B.M. Ligno-polymer reagents for drilling fluids. Krasnodar: Prosveshchenie-YUG. 2004. 398 p. (in Russian).
2. Teptereva G.A., Konesev G.V., Ismakov R.A., Kantor E.A., Dikhtyar' T.D. Preparation of drilling reagents by modification of neutral-sulfite liquors with phosphonic compounds. *Izv. Tomsk. Politekhn. Univ. Inzhiniring Georesursov*. 2017. V. 328. N 9. P. 94–101 (in Russian).
3. Bruscato C., Malvessi E., Brandalise R.N., Camassola M. High performance of macrofungi in the production of mycelium-based biofoams using sawdust – sustainable technology for waste reduction. *J. Clean. Prod.* 2019. V. 234. P. 225–232. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.150.
4. Girometta C., Picco A.M., Baiguera R.M., Dondi D., Babbini S., Cartabia M., Pellegrini M., Savino E. Physico-mechanical and thermodynamic properties of mycelium-based bio-composites: a review. *Sustainability*. 2019. V. 11. N 1. P. 281. DOI: 10.3390/su11010281.
5. Loginova M.E., Konesev G.V., Teptereva G.A., Baulin O.A., Movsumzade E.M., Babushkin E.V., Buyanova M.G. Application of the planned experiment method to substantiate the formulation of modified drilling mud. *Prom. Proizvod. Ispol'z. Elastomero*. 2021. N 4. P. 27-34 (in Russian). DOI: 10.24412/2071-8268-2021-4-27-34.
6. Bogolitsyn K.G., Aksenov A.S., Palamarchuk I.A., Boitsova T.A., Brovko O.S., Khviyuzov S.S., Levandovskaya T.V., Varlamov V.P. Modification of lignosulfonates and evaluation of the possibility of their complexation with chitosan. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Lesnoy Zhurn.* 2012. V. 325. N 1. P. 80–87 (in Russian).

7. Appels F.V.W., Camere S., Montalti M., Karana E., Jansen K.M.B., Dijksterhuis J., Krijgsheld P., Wösten H.A.B. Fabrication factors influencing mechanical, moisture-and water-related properties of mycelium-based composites. *Mater. Design*. 2019. V. 161. P. 64–71. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.11.027.
8. Yang Z., ASCE M., Zhang F., Still B., ASCE S.M., White M., Amstislavski P. Physical and mechanical properties of fungal mycelium-based biofoam. *J. Mater. Civil Eng.* 2017. V. 29. N. 7. P. 04017030. DOI: 0.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001866.
9. Никишина М.Б., Переломов Л.В., Атрощенко Ю.М., Минкина Т.М., Иванова Е.В., Мухторов Л.Г. Адсорбционные процессы на глинистых минералах с участием фульвокислот и ионов тяжелых металлов. *Агрохимия*. 2022. № 7. С. 66–75. DOI: 10.31857/S0002188122070092.
10. Veluswamy H.P., Kumar A., Seo Y., Lee J.D., Linga P. A review of solidified natural gas (SNG) technology for gas storage via clathrate hydrates. *Appl. Energy*. 2018. V. 216. P. 262–285. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.02.059.
11. Журавлев И.С. Химическая модификация лигносульфонатов. Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: матер. X Всерос. науч.-техн. конф. студ. и асп. и конкурса по прогр. «Умник». Екатеринбург: УГЛУТУ. 2014. Ч. 2. С. 206–208.
12. Тарасевич Ю.Ю. Механизмы и модели дегидратационной самоорганизации биологических жидкостей. *Усп. физич. наук*. 2004. Т. 174. № 7. С. 779–791. DOI: 10.1070/PU2004v047n07ABEH001758.
13. Долгополова А.В., Кушнарев Д.Ф., Кин Ен Хва Исследование структурообразования и ассоциации воды в системе вода – нефтепродукт. *Нефтехимия*. 2004. Т. 36. № 4. С. 371–375.
14. Пивоварова Н.А., Кириллова Л.Б., Такаева М.А., Мусаева М.А., Мухамбетова З.А., Щугорев В.Д. О свойствах и строении нефтяных дисперсных систем. *Вестн. АГТУ*. 2008. № 6 (47). С. 138–144.
15. Васюкова А. Т., Кривошонов К. В., Алексеев А. Е., Мошкин А. В., Талби М. Влияние вида жидкости на вязкость суспензии. *Вестн. Марииск. гос. ун-та. Сер. «Сельскохозяйств. науки. Эконом. науки»*. 2022. Т. 8. № 1. С. 9–18. DOI: 10.30914/2411-9687-2022-8-1-9-18.
16. Малков А.В., Боголицын К.Г., Айзенштадт А.М., Косьяков Д.С. Влияние электролитов на кинетику окисления родственных лигнину фенолов системой $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-} - [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$. *Лесной журн*. 2002. № 6. С. 114 – 120.
17. Тептерева Г.А., Пахомов С.И., Четвертнева И.А., Каримов Э.Х., Егоров М.П., Мовсумзаде Э.М., Евстигнеев Э.И., Васильев А.В., Севастьянова М.В., Волошин А.И., Нифантьев Н.Э., Носов В.В., Докичев В.А., Бабаев Э.Р., Роговина С.З., Берлин А.А., Фахреева А.В., Баулин О.А., Колчина Г.Ю., Воронов М.С., Староверов Д.В., Козловский И.А., Козловский Р.А., Тарасова Н.П., Занин А.А., Кривобородов Е.Г., Каримов О.Х., Флид В.Р., Логинова М.Е. Возобновляемые природные сырьевые ресурсы, строение, свойства, перспективы применения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 9. С. 4–121. DOI: 10.6060/ivkkt.20216409.6465.
18. Zhang J., Chen G., Yang N.-W., Wang Y.-G. Preparation of Nitration-oxidation Lignosulfonate as an Eco-friendly Drilling Fluid Additive. *J. Petrol. Sci. Technol.* 2014. V. 32. P. 1661 – 1668. DOI: 10.1080/10916466.2011.652334.
19. Asina F.N.U., Brzonova I., Kozliak E., Kubatova A., Ji Yun. Microbial treatment of industrial lignin: Successes, problems and challenges. *Renew. Sust. Energy Rev.* 2017. V. 77. P. 1179–1205. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.098.
7. Appels F.V.W., Camere S., Montalti M., Karana E., Jansen K.M.B., Dijksterhuis J., Krijgsheld P., Wösten H.A.B. Fabrication factors influencing mechanical, moisture-and water-related properties of mycelium-based composites. *Mater. Design*. 2019. V. 161. P. 64–71. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.11.027.
8. Yang Z., ASCE M., Zhang F., Still B., ASCE S.M., White M., Amstislavski P. Physical and mechanical properties of fungal mycelium-based biofoam. *J. Mater. Civil Eng.* 2017. V. 29. N. 7. P. 04017030. DOI: 0.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001866.
9. Nikishina M.B., Perelomov L.V., Atroshchenko YU.M., Minkina T.M., Ivanova E.V., Mukhtorov L.G. Adsorption processes on clay minerals involving fulvic acids and heavy metal ions. *Agrokhimiya*. 2022. N 7. P. 66-75 (in Russian). DOI: 10.31857/S0002188122070092.
10. Veluswamy H.P., Kumar A., Seo Y., Lee J.D., Linga P. A review of solidified natural gas (SNG) technology for gas storage via clathrate hydrates. *Appl. Energy*. 2018. V. 216. P. 262–285. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.02.059.
11. Zhuravlev I.S. Chemical modification of lignosulfonates. Nauchnoe tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii: materialy X Vseros. nauch.-tekhn. konf. studentov i aspirantov i konkursa po programme «Umnik». Ekaterinburg: UGLTU. 2014. Ch. 2. P. 206–208 (in Russian).
12. Tarasevich Y.Y. Mechanisms and models of the dehydration self-organization in biological fluids. *Usp. Fiz. Nauk*. 2004. V. 174. N 7. P. 779-791 (in Russian). DOI: 10.1070/PU2004v047n07ABEH001758.
13. Dolgopolova A.V., Kushnarev D.F., Kin En Khva. Investigation of the structure formation and association of water in the water – oil product system. *Neftekhimiya*. 2004. V. 36. N 4. P. 371–375 (in Russian).
14. Pivovarova N.A., Kirillova L.B., Takaeva M.A., Musaeva M.A., Mukhambetova Z.A., Shchugorev V.D. On the properties and structure of oil dispersed systems. *Vestn. AGTU*. 2008. N 6 (47). P. 138-144 (in Russian).
15. Vasyukova A.T., Krivosonok K.V., Alekseev A.E., Moshkin A.V., Talbi M. Influence of the type of liquid on the viscosity of the suspension. *Vestn. Mariisk. Gos. Univ. Ser. Sel'skokhoz. Nauki. Ekonom. Nauki*. 2022. V. 8. N 1. P. 9–18 (in Russian). DOI 10.30914/2411-9687-2022-8-1-9-18.
16. Malkov A.B., Bogolitsyn K.G., Aizenshtadt A.M., Kosyakov D.S. The effect of electrolytes on the kinetics of oxidation of phenols related to lignin by the system $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-} - [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$. *Lesnoy Zhurn*. 2002. N 6. P. 114 – 120 (in Russian).
17. Teptereva G.A., Pakhomov S.I., Chetvertneva I.A., Karimov Eh.Kh., Egorov M.P., Movsumzade Eh.M., Evstigneev Eh.I., Vasil'ev A.V., Sevast'yanova M.V., Voloshin A.I., Nifant'ev N.Eh., Nosov V.V., Dokichev V.A., Babaev Eh.R., Rogovina S.Z., Berlin A.A., Fakhreeva A.V., Baulin O.A., Kolchina G.Yu., Voronov M.S., Staroverov D.V., Kozlovskii I.A., Kozlovskii R.A., Tarasova N.P., Zanim A.A., Krivoborodov E.G., Karimov O.Kh., Flid V.R., Loginova M.E. Renewable natural raw materials. Structure, properties, application prospects. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 9. P. 4–121 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216409.6465.
18. Zhang J., Chen G., Yang N.-W., Wang Y.-G. Preparation of Nitration-oxidation Lignosulfonate as an Eco-friendly Drilling Fluid Additive. *J. Petrol. Sci. Technol.* 2014. V. 32. P. 1661 – 1668. DOI: 10.1080/10916466.2011.652334.
19. Asina F.N.U., Brzonova I., Kozliak E., Kubatova A., Ji Yun. Microbial treatment of industrial lignin: Successes, problems and challenges. *Renew. Sust. Energy Rev.* 2017. V. 77. P. 1179–1205. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.098.

20. **Гаймалетдинова Г.Л., Мулюков Р.А., Исмаков Р.А.** Изучение влияния адсорбции поверхностно-активных веществ на частицах твердой фазы с целью создания комплексной добавки для сохранения продуктивности пласта. *Строит-во нефт. и газ. скважин на суше и на море*. 2023. № 2. С. 26-31. DOI: 10.33285/0130-3872-2023-2(362)-26-31.
21. **Игнат'ев А.Н., Пряхин А.Н., Лунин В.В.** Математические модели кинетики озонирования модельных соединений лигнина. Физикохимия растительных полимеров: матер. IV Междунар. конф. Архангельск. 2011. С. 36-39.
22. **Хабаров Ю.Г., Вешняков В.А., Кузяков Н.Ю.** Получение и применение комплексов лигносульфоновых кислот с катионами железа. *Изв. вузов Лесной журн.* 2019. № 5. С. 167-187. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.167.
23. **Бадикова А.Д., Шарипов Т.В., Алехина И.Е., Федина Р.А., Хрипунова Р.А., Сахибгареев С.Р.** Ингибирующие добавки для получения силикатных буровых реагентов. *Вестн. Башкир. Ун-та*. 2018. Т. 23. № 1. С. 52-55. DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2018.1.9.
24. **Ли Ц.** Перспективы и современный опыт применения силикатов щелочных металлов при бурении скважин. *Эл. науч. журн. «Нефтегаз. дело»*. 2012. № 3. С. 81-91.
25. **Тептерева Г.А., Конесев В.Г., Загидуллин Ю.И.** Этапы развития и применения кремнийорганических соединений в нефтедобыче. *Совр. наука: Актуал. пробл. теории и практики. Сер.: Гуманитар. науки*. 2018. № 1. С. 43-46.
20. **Gaimaletdinova G.L., Mulyukov R.A., Ismakov R.A.** Studying of a surfactant adsorption influence on solid phase particles in order to create a complex additive to preserve a reservoir's productivity. *Stroit-vo Neft. Gaz. Skvazhin Sushe More*. 2023. N 2. P. 26-31 (in Russian). DOI: 10.33285/0130-3872-2023-2(362)-26-31.
21. **Ignat'ev A.N., Pryakhin A.N., Lunin V.V.** Mathematical models of the kinetics of ozonation of model lignin compounds. *Fizikokhimiya rastitel'nykh polimerov: materialy IV Mezhdunarodnoi konferentsii*. Arkhangel'sk. 2011. P. 36-39 (in Russian).
22. **Khabarov Yu.G., Veshnyakov V.A., Kuzyakov N.Yu.** Preparation and application of complexes of lignosulfonic acids with iron cations. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Lesnoy Zhurn.* 2019. N 5. P. 167-187 (in Russian). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.167.
23. **Badikova A.D., Sharipov T.V., Alekhina I.E., Fedina R.A., Khripunova R.A., Sakhigareev S.R.** Inhibitory additives for the production of silicate drilling reagents. *Vestn. Bashkir. univ.* 2018. V. 23. N 1. P. 52-55 (in Russian). DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2018.1.9.
24. **Li J.** Experimental study and application prospect on alkali metal silicate in process of drilling. *Elektron. Nauch. Zhurn. Neftegaz.Ddelo*. 2012. N 3. P. 81-91 (in Russian).
25. **Teptereva G.A., Konesev V.G., Zagidullin Yu.I.** Stages of development and application of organosilicon compounds in oil production. *Sovr. Nauka: Aktual. Problem. Teor. Praktiki. Ser.: Gumanitar. Nauki*. 2018. N 1. P. 43-46 (in Russian).

Поступила в редакцию 03.04.2023

Принята к опубликованию 09.10.2023

Received 03.04.2023

Accepted 09.10.2023