

Наука — виробництву

УДК 622.692.4

DOI: 10.31471/1993-9973-2021-3(80)-60-67

УЛУЧШЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЕОПОЛИМЕРОВ ЩЕЛОЧНОЙ АКТИВАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ НА БЕЗВОДНОЙ ОСНОВЕ

А. А. Алиев

НИПИ Нефтегаз, ГНКАР

e-mail: Aliyev.azizaga@gmail.com, office.ogpi@socar.az

Геополімерні системи цілком успішно застосовуються в таких операціях, як промислове і громадянське будівництво, виготовлення вогнетривкого бетону, ізолювання і захоронення радіоактивних відходів тощо. Не стала винятком і нафтогазова галузь. Вона стала однією з найбільш перспективних альтернатив портландцементу при тампонажних роботах і дозволяють досягти досить високих показників міцності конструкції свердловин, стійкості до корозійного впливу, а в деяких складах ці показники значно перевищують показники портландцементу. За останні роки було проведено значну кількість досліджень, спрямованих на розроблення геополімерних складів для цементування нафтових і газових свердловин, які показали, що дані системи мають порівнянні з портландцементом міцності, низьку проникність, стійкість до впливу бурового розчину і пластових умов, здатність до самовідновлення. Однак, незважаючи на всі переваги застосування даних систем, найбільш істотним їх недоліком є погана керованість реологічними властивостями. Геополімери (ДП) з низьким вмістом легкого попелу не забезпечують належних реологічних характеристик для застосування в операціях кріплення та ізоляції. Низькі значення прокачуваності розчинів все ще є серйозною перешкодою для широкого практичного впровадження. Застосування геополімерних розчинів при правильному підборі композиційного складу, здатних продемонструвати значні поліпшення міцнісних і реологічних показників у результаті змішування з безводними буровими розчинами, є досить багатобічним рішенням даного завдання. В роботі представлені результати досліджень добавок до технологічних рідин на безводній основі (ТЖБО), таких як бурові розчини на нафтовій і синтетичній основі, інвертні емульсійні бурові розчини, на реологію геополімери. Отримані результати дозволяють констатувати поліпшення реологічних показників геополімерного складів до порівнянних з портландцементом значень, що значно розширює сучасний діапазон застосування даних розчинів до використання в операціях первинного цементування, цементування під тиском і капітальному ремонті свердловин.

Ключові слова: портландцемент, реологія, лужно-активованій цемент, зольний пил, технологічні рідини на безводній основі, інвертно-емульсійні розчини.

Геополімерные системы вполне успешно применяются в таких операциях, как промышленное и гражданское строительство, изготовление огнестойкого бетона, изоляция и захоронения радиоактивных отходов и т.д. Не исключением явилась и нефтегазовая отрасль. Она стала одной из наиболее перспективных альтернатив портландцементу при тампонажных работах и позволяют достичь достаточно высоких показателей прочности конструкции скважин, устойчивости к коррозионному воздействию, а в некоторых случаях эти показатели существенно превосходят показатели портландцемента. В последние годы было проведено значительное количество исследований, направленных на разработку геополімерных составов для цементирования нефтяных и газовых скважин, показавших, что данные системы обладают сопоставимыми с портландцементом прочностными характеристиками, низкой проницаемостью, устойчивостью к воздействию бурового раствора и пластовых условий, способностью к самовосстановлению. Однако, несмотря на все преимущества применения данных систем, наиболее существенным их недостатком является плохая регулируемость реологических свойств. Геополімеров (ГП) с низким содержанием

зольной пыли не обеспечивают должных реологических характеристик для применения в операциях крепления и изоляции. Низкие значения прокачиваемости растворов все еще являются серьезным препятствием для широкого практического внедрения. Применение геопалимерных растворов при правильном подборе композиционного состава, способных продемонстрировать значительные улучшения прочностных и реологических показателей в результате смешения с безводными буровыми растворами, является весьма многообещающим решением данной задачи. В работе представлены результаты исследований добавок технологических жидкостей на безводной основе (ТЖБО), таких как буровые растворы на нефтяной и синтетической основе, инвертных эмульсионных буровых растворов на реологию геопалимеров. Полученные результаты позволяют констатировать улучшение реологических показателей геопалимерных составов до сравнимых с портландцементом значений, что значительно расширяет современный диапазон применения данных растворов до использования в операциях первичного цементирования, цементирования под давлением и капитальном ремонте скважин.

Ключевые слова: портландцемент, реология, щелочно-активированный цемент, зольная пыль, технологические жидкости на безводной основе, инвертно-эмульсионные растворы.

Geopolymer systems are quite successfully used in such operations as industrial and civil construction, production of fire-resistant concrete, isolation and disposal of radioactive waste, etc. The oil and gas industry is no exception. She became one of the most promising alternatives to Portland cement in plugging operations. They allow achieving sufficiently high performances of well construction strength, corrosion resistance, and in some compositions these parameters significantly exceed those of Portland cement. In recent years, a significant amount of research has been carried out aimed at the development of geo polymer compositions for cementing oil and gas wells, which showed that these systems have strength characteristics comparable to Portland cement, low permeability, resistance to drilling mud and reservoir conditions, and the ability to self-repair. However, despite all the advantages of the geopolymer systems, their most significant disadvantage is poor regulation of rheological properties. Geopolymers (GP) with low ash content do not provide the proper rheological characteristics for the use in insulation operations. Low values of pumpability of solutions are still a serious restriction for wide practical implementation. The use of geopolymer solutions with the correct selection of the compositional combination capable of demonstrating significant improvements in strength and rheological parameters as a result of mixing with anhydrous drilling fluids is a very promising solution to this problem. The paper presents the results of the research on the additives of non-aqueous fluids such as oil-based and synthetic-based drilling fluids and inverted emulsion drilling fluids on rheology of geopolymers. The obtained results allow stating that the rheological parameters of geopolymer compositions improve up to comparable values with Portland cement, which considerably extends the range of application of these solutions to use in operations of primary plugging operations, under-pressure cementing and well workover.

Keywords: portland cement, rheology, alkali activated cement, fly ash, non-aqueous fluids, invert-emulsion fluid.

Введение

На сегодняшний день бурное развитие технологий и науки открывает перед исследователями все большее количество возможностей для создания новых композиционных материалов, превосходящих по своим физико-химическим показателям имеющиеся [1-9]. Геопалимеры щелочной активации относятся именно к этой категории материалов и в последние десятилетия многими специалистами рассматриваются в качестве альтернативы обычному портландцементу в целом ряде технологических операций [10-13]. К примеру, геопалимеры вполне успешно применяются в таких операциях, как промышленное и гражданское строительство, изготовление огнестойкого бетона, изоляция и захоронение радиоактивных отходов и т.д. [14-17]. Исключением не явилась и нефтегазовая отрасль. В последние годы было проведено значительное количество исследований, направленных на разработку геопалимерных составов для цементирования нефтяных и газо-

вых скважин [18-21]. Их результаты показали, что данные системы обладают сопоставимыми с портландцементом прочностными характеристиками, низкой проницаемостью, устойчивостью к воздействию бурового раствора и пластовых условий, способностью к самовосстановлению [22-28].

Следует отметить, что в операциях крепления, связанных с гражданским строительством, где геопалимеры давно и достаточно успешно применяются, не требуется наличия высоких значений текучести раствора, потому данный параметр не является критическим. Абсолютно противоположной является ситуация в операциях, связанных с нефтегазовой индустрией, в частности с креплением скважин. Низкие значения прокачиваемости геопалимерных растворов значительно ограничивают их применение в подобных операциях.

Пребывание тампонажного раствора в текучем состоянии необходимо как для обеспечения эффективного вытеснения бурового рас-

Таблица 1 – Химический состав зольной пыли

Образец	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+0.658K ₂ O	SO ₃
ЗП1	49.8	24.6	15.2	2.9	0.85	0.74	0.42
ЗП2	48.6	20.1	16.4	6.2	1.2	0.48	2.04
ЗП3	52.4	26.8	10.8	2.8	0.95	0.6	0.18

творы из кольцевого пространства, так и для закачки рассчитанного объема тампонажного раствора в скважину.[29-32]. В случае с портландцементом существует два основных подхода, позволяющих решить вопрос прокачиваемости цементного раствора. Это увеличение водоцементного соотношения и применение замедлителей схватывания. Оба метода малоэффективны в случае геополимеров.

Увеличение содержания воды в геополимерных композициях негативно сказывается на прочности и пористости затвердевшего раствора, хотя и несколько улучшает реологические их показатели [33-34].

Применение замедлителей схватывания на основе лигносульфонатов, полинафталина и поликарбоскилата, весьма эффективных для портландцемента, практически неэффективно для геополимерных растворов щелочной активации. Основной причиной является химическая нестабильность замедлителей схватывания при значениях pH выше 13 [35-36]. Стоит отметить, что все же были разработаны геополимерные составы, демонстрирующие улучшение реологических показателей при добавке суперпластификаторов, но ни одна из этих суспензий не показала удовлетворительных для практического применения значений вязкости [37-39]

Наиболее приоритетным и многообещающим направлением исследований для улучшения реологических свойств геополимерных растворов является применение в качестве добавок технологических жидкостей на безводной основе, таких как буровые растворы на нефтяной и синтетической основе, инверсионно эмульсионные буровые растворы.

Загрязнение тампонажного раствора буровым в процессе вытеснения является неизбежным. Данному вопросу посвящено достаточно большое количество исследований, но все они сводятся, лишь к уменьшению негативного эффекта [40-43]. Однако применение геополимерных растворов при правильном подборе композиционного состава, способных продемонстрировать значительные улучшения прочностных и реологических показателей в результате смешения с безводными буровыми растворами, является весьма многообещающим решением

данной задачи. В представленной работе основным предметом исследования является улучшение реологических и прочностных свойств геополимерных растворов щелочной активации при смешении с безводными буровыми растворами.

Материалы

Синтез геополимера

Геополимер был получен путем смешения порошка прекурсора алюмосиликата с щелочным активатором. В качестве прекурсора алюмосиликата было выбрано три различных состава зольной пыли (ЗП) с низким содержанием кальция, соответствующих ASTM C618-18 (табл. 1).

Образцы суспензии геополимера, синтезированные из образцов зольной пыли ЗП1-ЗП3 с применением в качестве активатора водного раствора оксида натрия (8 моль/л) в жидком виде, далее будут обозначаться как О1, О2 и О3 соответственно. Соотношение раствора активатора и зольной пыли составило 0,485. Массовое соотношение Na₂O/ЗП составило 0,1.

Раствор портландцемента

Раствор портландцемента (ПЦ) был приготовлен из цемента класса Н в соответствии со стандартом API RP 10B-2. В качестве замедлителя схватывания применялся реагент на основе лигносульфонатов в дозировке 0,02 по весу сухого цемента.

Добавка технологических жидкостей на безводной основе (ТЖБО)

В качестве ТЖБО применялся состав инвертно-эмульсионного бурового раствора (ИБ) с соотношением вода/нефтяная основа 75/25 с добавкой 20% CaCl₂. Для стабилизации суспензии добавлялась известняковая пыль (ИП) с d₅₀ 5 мкм до 3 %. Для улучшения читабельности текста в случае замены 5% суспензии О1 на ИБ и 3% добавки ИП было принято следующее обозначение: О1ИБ-5-ИП. Перемешивание суспензий осуществлялось на лопастной мешалке при скорости 480 об/мин в течение 30 секунд.

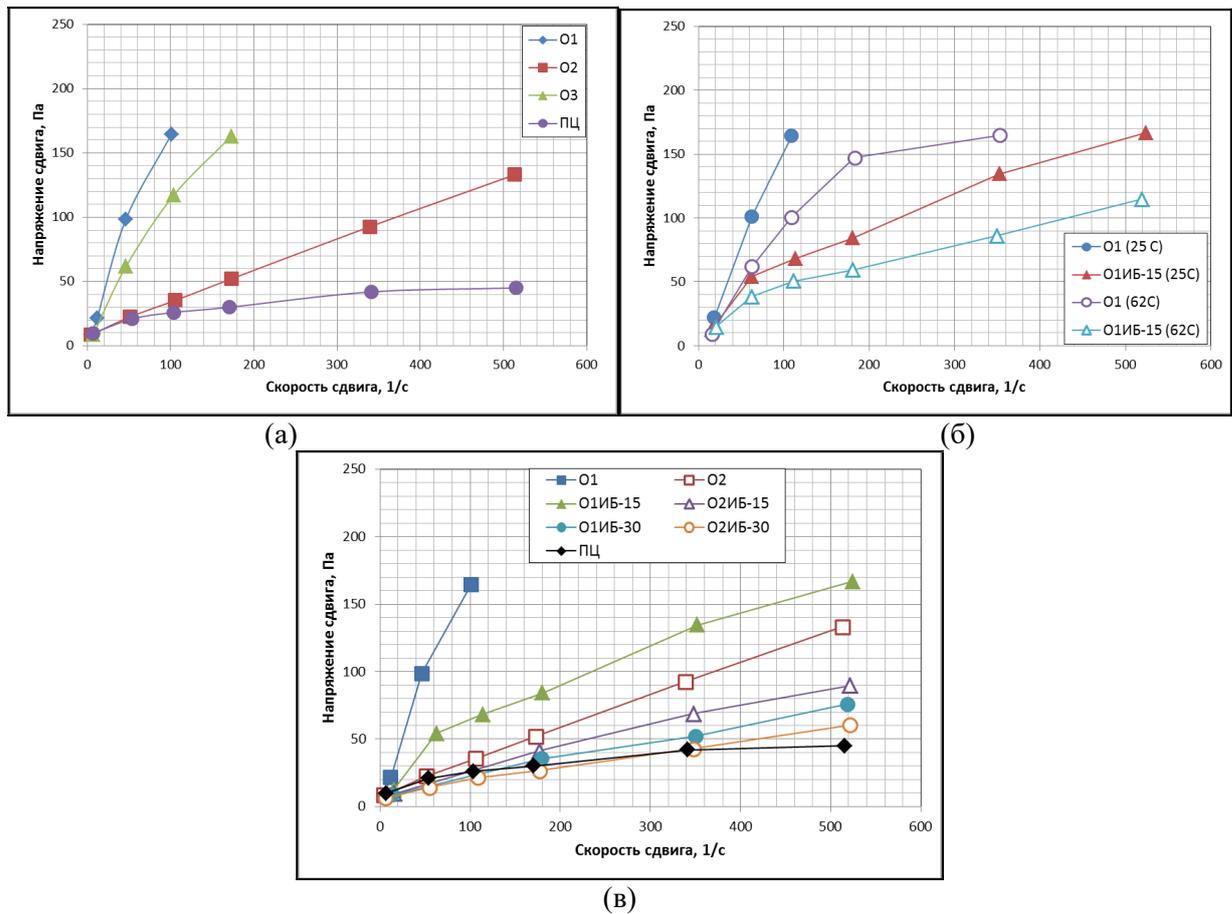


Рисунок 1 – Кривые течения растворов геополимера и портландцемента

Реология

Реологические свойства суспензий измерялись при комнатной температуре с помощью ротационного вискозиметра в соответствии со стандартом API RP 10B-2 (2010). При измерении реологических свойств образцов в пластовых условиях суспензии для предварительного кондиционирования помещались в ячейку консистометра высокого давления и температуры (НРНТ). Далее растворы при постоянном перемешивании нагревались до циркуляционной температуры на забое – 62 °С при давлении в 4000 psi. на протяжении 90 минут и перемешивали еще 30 минут. В конце периода предварительного кондиционирования суспензии перемещали в предварительно нагретую чашку вискозиметра для определения реологических свойств.

Время загустевания раствора

Время загустевания раствора определялось в НРНТ консистометре в соответствии со стандартом API RP 10B-2 (2010). Значения температуры и давления поддерживались на уровне соответственно 62 °С и 4000 psi.

Прочность на сжатие

Прочность на сжатие для образцов геополимера определялась по стандартной процедуре, описанной в стандарте API RP 10B-2. Температура проведения испытаний составляла 76 °С (т.е. статическая температура на забое), а давление – 4000 psi. Все указанные значения прочности на сжатие основаны на результатах минимум восьми испытаний.

Результаты и обсуждение

Геополимеры активированные водным раствором оксида натрия

Как показано на рис. 1 (а), по мере увеличения скорости сдвига значения напряжения сдвига раствора портландцемента постепенно увеличивались и достигли 48 Па. Все образцы растворов геополимера вне зависимости от состава показали более высокие реологические показатели по сравнению с раствором портландцемента.

Добавка инвертно-эмульсионного бурового раствора (ИБ) значительно улучшила реологические показатели суспензий геополимеров. Уже при концентрации 15% ИБ (О1ИБ-15) на-

блюдалось улучшение реологических показателей, а при 30% ИБ (О2ИБ-30) данные показатели практически совпадали с аналогичными у портландцемента. Образец О3ИБ показал нестабильное поведение при увеличении содержания ИБ до 25%, в связи с чем дальнейшие измерения не проводились.

Данная серия экспериментов также показала, что с увеличением температуры улучшаются реологические показатели растворов геополимера в отличие от раствора портландцемента, так как процесс гидратации, протекающий в цементном растворе, неминуемо ведет к увеличению вязкости.

Время загустевания раствора

Данная серия экспериментов была проведена на образцах О1ИБ-20 и О2ИБ-20. Первоначальная консистенция обоих образцов была практически идентична и составляла около 20 Вс. Через 18 часов суспензия О1ИБ-20 начала загустевать, и к 21 часу достигла консистенции 70 Вс. Суспензия Ж2ИБ-20 показала гораздо более длительное время загустевания - 42 часа. Учитывая распределение частиц зольной пыли обоих образцов, практически не имеет различий, полученные результаты объясняются различиями в химическом составе зольной пыли. Так, в О2 содержание алюминия ниже – 20,1%, а в О1 – выше 24,6% (см. таблицу 1). По всей видимости, увеличение содержания алюминия ускоряет скорость твердения геополимеров, что согласуется с результатами предыдущих исследований [45].

Прочность на сжатие

Результаты испытаний представлены таблице 2. Как видно, вне зависимости от состава зольной пыли и количества ИБ затвердевшие геополимеры существенно не отличались по прочности по истечении 24 часов. Через 72 часа образец О2 показал существенно большие значения прочности в сравнении с другими, но при добавлении ИБ подобных различий не наблюдалось.

Результаты прочности на сжатие, представленные на табл. 3, показали, что для суспензий О2 и О2ИБ-20 значения прочности были почти одинаковыми вне зависимости от концентрации добавки стабилизатора. Для суспензий О2ИБ-30 и О2ИБ-40 значения прочности на сжатие увеличились при концентрации ИП 1,5% и 5%. Таким образом, при добавлении известковой пыли не только увеличивается стабильность суспензии, но и при высоких концентрациях ИБ увеличивает прочность затвердевших суспензий.

Таблица 2 – Динамика изменения показателей прочности на сжатие в зависимости от концентрации ИБ

Образец	ИБ	ИБ 20%	ИБ 30%	ИБ 40%
а) после 24 часов				
О1	1100	600	300	175
О2	1300	400	185	90
О3	1050	550	230	120
б) после 72 часов				
О1	2400	1750	900	510
О2	3700	1600	630	420
О3	1850	1650	610	470

Таблица 3 – Динамика изменения показателей прочности на сжатие в зависимости от концентрации ИБ

Образец	ИБ	ИБ 20%	ИБ 30%	ИБ 40%
а) после 24 часов				
О2	1350	650	290	160
О2 + 1,5% ИП	1650	750	445	350
О2 + 5% ИП	2050	800	580	470
б) после 72 часов				
О2	3550	1650	850	510
О2 + 1,5% ИП	4350	1850	1110	590
О2 + 5% ИП	4850	2100	1050	580

Изучение влияния добавки стабилизатора на реологические свойства суспензии геополимеров было проведено на образце О2 ввиду наиболее низкой вязкости данного образца позволяющей охватить больший диапазон измерений (рис. 2 (а,б)). При комнатной температуре измерений образцы продемонстрировали ожидаемое увеличение вязкости, ввиду крупно дисперсности известняковой пыли ($d_{50} = 3$ мкм). Синергический эффект воздействия добавки стабилизатора и ТЖБО был изучен на примере суспензии О2ИБ-40 при концентрации стабилизатора в 1%, 1,5% и 3% (рис. 2в). Повышение температуры привело к снижению значения вязкостей данных суспензий, сопоставимых с значениями вязкости цементного раствора, содержащего замедлитель схватывания.

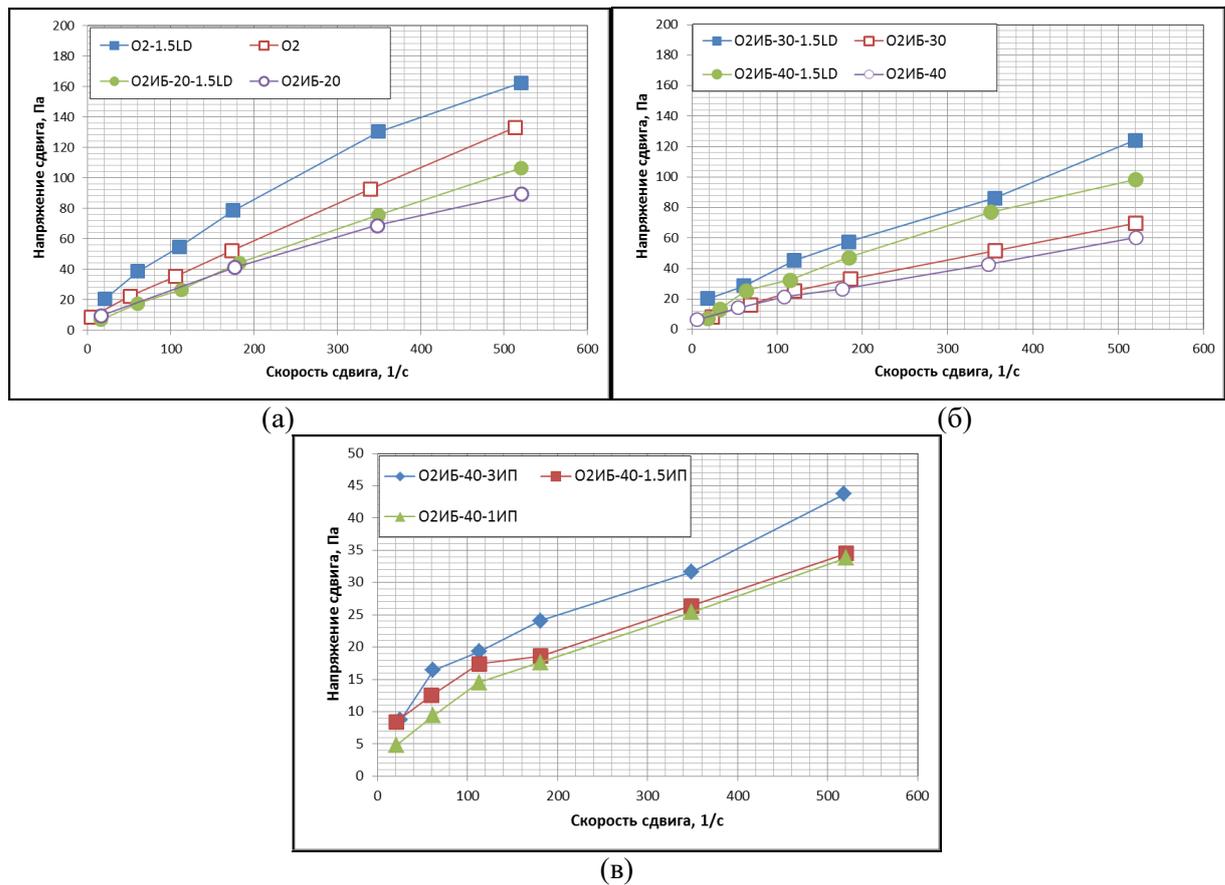


Рисунок 2 – Кривые течения растворов геополимера при (а), (б) – 25° С и (в) – 62° С

Выводы

В работе предложен новый подход к улучшению реологических свойств геополимеров с применением инвертно-эмульсионных буровых растворов. В результате исследования были получены следующие результаты.

Добавка инвертно-эмульсионных буровых растворов привела к улучшению прокачиваемости суспензий геополимеров, позволив рассматривать предложенные составы в качестве альтернативы цементным растворам, применяемым при креплении скважин.

Затвердевшие суспензии геополимеров обеспечивают достаточные значения прочности на сжатие и приемлемые реологические свойства для цементирования скважин.

Различный состав трех испытанных образцов зольной пыли, составляющий основу геополимеров, не повлиял на прочностные характеристики затвердевших суспензий, но показал значительное влияние на вязкость, а также стабильность суспензий, содержащих добавку инвертно-эмульсионных буровых растворов.

Добавка известняковой пыли увеличивает стабильность суспензии геополимеров и улучшает прочностные характеристики.

Литература / References

1. Vishnyakov V., Suleimanov B., Salmanov A., Zeynalov E. Primer on Enhanced Oil Recovery. *Gulf Professional Publishing*. 2019.
2. Veliyev E. F., Aliyev A.A., Mammadbayli T. EMachine Learning Application to Predict the Efficiency of Water Coning Prevention Techniques Implementation. *SOCAR Proceedings*. 2021. No 1, P. 104-113.
3. Veliyev E. F. Review of modern in-situ fluid diversion technologies. *SOCAR Proceedings*. 2020. No 2, P. 50-66.
4. Suleimanov B. A., Guseynova N. I., Veliyev E. F. Control of displacement front uniformity by fractal dimensions. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. OnePetro. 2017, October.
5. Veliyev E. F. Mechanisms of polymer retention in porous media. *SOCAR Proceedings*. 2020. No 3, 126-134.
6. Suleimanov B. A., Veliyev E. F., Naghiyeva N. V. Preformed particle gels for enhanced oil recovery. *International Journal of Modern Physics*. 2020. B, 34(28), 2050260.
7. Suleimanov B. A., Veliyev E. F., Naghiyeva N. V. Colloidal dispersion gels for in-depth permeability modification. *Modern Physics Letters*. 2021. B, 35(01), 2150038.

8. Suleimanov B. A., Latifov Y. A., Veliyev E. F. Softened water application for enhanced oil recovery. *SOCAR Proceedings*. 2019. No 1, P. 19-29.
9. Veliyev E. F. Polymer dispersed system for in-situ fluid diversion. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2021. (1(78), P. 61-72. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2021-1\(78\)-61-72](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2021-1(78)-61-72)
10. Duxson P., Fernández-Jiménez A., Provis J. L., Lukey G. C., Palomo A., van Deventer J. S. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*. 2007. No 42(9), P. 2917-2933.
11. Zhao R., Sanjayan J. G. Geopolymer and Portland cement concretes in simulated fire. *Magazine of Concrete research*. 2011. No 63(3), P. 163-173.
12. Davidovits J. Geopolymer cement. A review. *Geopolymer Institute, Technical papers*. 2013. No 21, P. 1-11.
13. Bakharev T. Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and concrete research*. 2005. No 35(4), P. 658-670.
14. Singh B., Ishwarya G., Gupta M., Bhat-tacharyya S. K. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*. 2015. No 85, P. 78-90.
15. Aleem M. A., Arumairaj P. D. Geopolymer concrete – a review. *International journal of engineering sciences & emerging technologies*. 2012. No 1(2), 118-122.
16. Duxson P., Provis J. L., Lukey G. C., Mallicoat S. W., Kriven W. M., Van Deventer J. S. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A: Physico-chemical and Engineering Aspects*. 2005. No 269(1-3), P. 47-58.
17. Van Chanh N., Trung B. D., Van Tuan D. Recent research geopolymer concrete. In *The 3rd ACF International Conference-ACF/VCA*, Vietnam 2008, November. Vol. 18, P. 235-241.
18. Salehi S., Khattak M. J., Ali N., Ezeakacha C., Saleh F. K. Study and Use of Geopolymer mixtures for Oil and Gas well cementing applications. *Journal of Energy Resources Technology*. 2018. No 140(1), 012908.
19. Ahdaya M., Imqam A. Fly ash Class C based geopolymer for oil well cementing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. No 179, P. 750-757.
20. Rahman S. H. A., Zulkarnain N. N., Shafiq N. Experimental study and design of experiment using statistical analysis for the development of geopolymer matrix for oil-well cementing for enhancing the integrity. *Crystals*. 2021. No 11(2), 139.
21. Paiva M. D., Silva E. C., Melo D. M., Martinelli A. E., Schneider J. F. A geopolymer cementing system for oil wells subject to steam injection. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018. No 169, P. 748-759.
22. Suppiah R. R., Rahman S. H. A., Irawan S., Shafiq N. Development of new formulation of geopolymer cement for oil well cementing. In *International Petroleum Technology Conference*. OnePetro. 2016, November.
23. Sugumaran M. Study on effect of low calcium fly ash on geopolymer cement for oil well cementing. In *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. OnePetro. 2015, October.
24. Ridha S., Yerikania U. The Strength Compatibility of Nano-SiO₂ Geopolymer cement for oil well under HPHT conditions. *Journal of Civil Engineering Research*. 2015. No 5(4A), P. 6-10.
25. Kimanzi R., Wu Y., Salehi S., Mokhtari M., Khalifeh M. Experimental Evaluation of Geopolymer, Nano-Modified, and Neat Class H Cement by Using Diametrically Compressive Tests. *Journal of Energy Resources Technology*. 2020. No 142(9), 092101.
26. Alvi M. A. A., Khalifeh M., Agonafir M. B. Effect of nanoparticles on properties of geopolymers designed for well cementing applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. No 191, 107128.
27. Ridha S., Abd Hamid A. I., Halim A. A., Zamzuri N. A. Elasticity and expansion test performance of geopolymer as oil well cement. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018, April. Vol. 140, No. 1, P. 012147.
28. Khalifeh M., Saasen A., Hodne H., Godøy R., Vrålstad T. Geopolymers as an alternative for oil well cementing applications: A review of advantages and concerns. *Journal of Energy Resources Technology*. 2018. No 140(9).
29. Suleimanov B. A., Veliyev E. F. The effect of particle size distribution and the nano-sized additives on the quality of annulus isolation in well cementing. *SOCAR proceedings*. 2016. No 4, P. 4-10.
30. Haut R. C., Crook R. J. Primary cementing: The mud displacement process. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. OnePetro. 1979, September.
31. Renteria A., Frigaard I. A. Primary cementing of horizontal wells. Displacement flows in eccentric horizontal annuli. Part 1. Experiments. *Journal of Fluid Mechanics*. 2020. 905.

32. Maleki A., Frigaard I. Primary cementing of oil and gas wells in turbulent and mixed regimes. *Journal of Engineering Mathematics*. 2017. No 107(1), P. 201-230.
33. Zuhua Z., Xiao Y., Huajun Z., Yue C. Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science*. 2009. No 43(2), P. 218-223.
34. Patankar S. V., Jamkar S. S., Ghugal Y. M. Effect of water-to-geopolymer binder ratio on the production of fly ash based geopolymer concrete. *Int. J. Adv. Technol. Civ. Eng.* 2013. No 2(1), P. 79-83.
35. Umniati B. S., Risdanareni P., Zein F. T. Z. Workability enhancement of geopolymer concrete through the use of retarder. In *AIP Conference Proceedings*. 2017, September. Vol. 1887, No. 1, P. 020033. AIP Publishing LLC
36. Huajun Z., Xiao Y. Effect of retarder on reaction process of metakaolin-slag-based geopolymer. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2013. No 48(3), P. 1384-1390.
37. Koutnik P., Soukup A., Bezucha P., Šafář J., Kohout J. Low viscosity metakaolinite based geopolymer binders. *Construction and Building Materials*. 2020. No 230, 116978.
38. Romagnoli M., Leonelli C., Kamse E., Gualtieri M. L. Rheology of geopolymer by DOE approach. *Construction and Building Materials*. 2012. 36, P. 251-258.
39. Pilehvar S., Szczotok A. M., Carmona M., Pamies R., Kjøniksen A. L. The effect of microencapsulated phase change materials on the rheology of geopolymer and Portland cement mortars. *Journal of the American Ceramic Society*. 2020. No 103(10), P. 5852-5869.
40. Ahdaya M., Imqam A. Investigating geopolymer cement performance in presence of water based drilling fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. No 176, P. 934-942.
41. Eid E., Tranggono H., Khalifeh M., Salehi S., Saasen A. Impact of Drilling Fluid Contamination on Performance of Rock-Based Geopolymers. *SPE Journal*, 2021. P. 1-8.
42. Ahdaya M. S. The development of a new formulation of fly ash class C based geopolymer and assessing its performance in presence of drilling fluid contamination. Missouri University of Science and Technology. 2018.
43. Kanesan D., Chandran D., Azhar N. A. B. Contamination Effect Of Synthetic Based Mud On Fly ASH Based Geopolymer Cement Slurry. 2006.
44. Liu X., Nair S., Aughenbaugh K., van Oort E. Mud-to-cement conversion of non-aqueous drilling fluids using alkali-activated fly ash. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. No 182, 106242.
45. Weng L., Sagoe-Crentsil K., Brown T., Song S. Effects of aluminates on the formation of geopolymers. *Materials Science and Engineering*. 2005. B, No 117(2), P. 163-168.