

УДК 622.245.422.2

ОЦЕНКА УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНО-ЭПОКСИДНЫХ СИСТЕМ

Блинов Павел Александрович¹,

Blinov_PA@pers.spmi.ru

Садыков Марат Ильдарович¹,

s205064@stud.spmi.ru, maratsadykov96@gmail.com

¹ Санкт-Петербургский горный университет,

Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2.

Актуальность исследования определена условиями эксплуатации и заканчивания скважин в современных условиях. В процессе строительства скважин тампонажный материал, используемый при креплении обсадных колонн, испытывает динамические нагрузки, в результате которых теряет свою целостность, что приводит к нарушению герметичности затрубного пространства и последующим перетокам пластовых флюидов. К динамическим нагрузкам относится динамика работы бурового инструмента при нормализации, операции по вторичному вскрытию, гидравлическому разрыву пласта, опрессовки обсадной колонны после срока ожидания затвердевания цементного камня. Упругие свойства цементного камня из различных составов определены с помощью ультразвуковых методов оценки, прочностные свойства определены разрушающими методами контроля по стандартам API 10B-2/ISO 10426-2. Существует ряд трудов и отраслевых решений подрядчиков по цементированию скважин, относящихся к созданию упругих цементных систем, однако во многом данные разработки не в полной мере решают обозначенные проблемы и являются зависимыми от импортных компонентов.

Цель: разработка состава цементного раствора с повышенными упруго-прочностными свойствами из российских компонентов.

Объект: объектом исследования является цементный камень и его упруго-прочностные свойства.

Результаты. В ходе экспериментальных исследований отмечается повышение прочности на изгиб и улучшение упругих свойств цементно-эпоксидного камня при использовании эпоксидной смолы в составе цементной системы, определено распределение смолы в составе цементного камня с помощью методов 3D рентгеновского сканирования, отмечены достоинства и недостатки добавок-эластификаторов, подобраны концентрации добавок, улучшающих технологические свойства цементного раствора и камня.

Ключевые слова:

цементный камень, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, ультразвук, прочность на сжатие, прочность на изгиб, проницаемость, эластичные цементы, эластификаторы.

Введение

В настоящее время на рынке энергоресурсов все большее распространение получают зеленые технологии. Использование и внедрение данных технологий обусловлено мировой тенденцией снижения потребления ископаемых видов топлива [1–5].

Однако, согласно отчетам международной нефтесервисной компании Baker Hughes, каждый год увеличивается количество буровых установок, так, с 2021 по 2022 гг. количество буровых установок в мире увеличилось на 430 единиц, преимущественно в азиатском регионе, что говорит об увеличении объемов эксплуатационного бурения. Факт увеличения объемов бурения скважин подтверждается также увеличением стоимости нефти марки Brent, так, с ноября 2019 г. по октябрь 2022 г. стоимость нефти увеличилась с 60 до 90 долларов за баррель, что говорит о растущем спросе на энергоносители [3, 6, 7].

С каждым годом увеличиваются глубины бурения и усложняются геологические условия проводки скважин, вместе с тем усложняются и условия заканчивания скважин [6–11].

Успешность продуктивной эксплуатации скважин во многом определяется надежностью изоляции пластов, т. к. основная цель цементирования – разобщение пластов и создание герметичного барьера. Самым распространенным тампонажным материалом является цементный раствор на основе портландцемента

различных классов, а класс портландцемента подбирается исходя из геологических условий проведения работ [12–16].

Улучшение упругих свойств цементного камня во многом обосновано современными реалиями методов освоения и строительства скважин, т. к. на крепь оказываются динамические нагрузки, например, удары КБТ (колонны буровых труб) и КНБК (компоновки низа буровой колонны) при бурении и разбуривании цементного стакана, нагрузки, вызванные операциями вторичного вскрытия, ГРП (гидравлический разрыв пласта), а также МГРП (многостадийный гидроразрыв пласта) и т. д. [14–22].

Учитывая современные тенденции жизненного цикла скважины во время бурения и освоения, необходимо проводить исследования по разработке упругих цементных систем, которые могут быть устойчивыми к динамическому воздействию [12, 17–19].

Материалы и методы исследования

Методика приготовления цементного раствора базируется на стандартах API 10B-2 и ISO 10426, которые включают в себя рекомендации по времени приготовления, кондиционированию и подготовке образцов. Температура испытаний соответствует средним забойным температурам эксплуатационных колонн и хвостовиков Западной Сибири как одной из основных нефтегазоносных провинций [23–25].

Время ОЗЦ выбрано на отметке 10 суток, как среднее время от окончания процесса цементирования до проведения операций ГРП/МГРП, учитывая время на нормализацию цементного стакана, подъем и разборку КНБК, ГИС и т. д.

С целью определения прочностных свойств цементный раствор помещался в призмы $40 \times 40 \times 160$ мм, где происходило формирование цементного камня при определенных термических условиях в водной среде. Использование призм позволяет провести испытания по определению прочностных свойств цементного камня разрушающим методом и определить упругие свойства ультразвуковым – неразрушающим методом [25, 26].

Ультразвуковой метод определения деформационных характеристик цемента – это способ неразрушающей оценки свойств цементного камня, который основывается на зависимости косвенных показателей, таких как скорость и время распространения ультразвуковой волны, от упругих характеристик цемента.

Ультразвуковые испытания цементного камня проводились на приборах Пульсар-2.2 и A1220 Monolith. Пульсар-2.2 использовался для определения продольных волн в образце цементного камня, а для измерения поперечных волн в цементе с помощью наклонных пьезометрических преобразователей в работе использовался ультразвуковой прибор A1220 Monolith [27].

На основании полученных данных (времени волны, скорости продольной и поперечной волн, а также плотности образца) рассчитывается модуль упругости в Па по формуле:

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)},$$

где ρ – плотность образца, кг/м^3 ; V_s – скорость поперечной волны, м/с ; V_p – скорость продольной волны, м/с .

Коэффициент Пуассона рассчитывается по формуле:

$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)},$$

Испытания по определению прочностных свойств производились на прессе CONTROLS Pilot 3 (рис. 1).



Рис. 1. Гидравлический пресс CONTROLS Pilot 3
Fig. 1. Hydraulic press CONTROLS Pilot 3

Обработка результатов и схема нагружения определялась в соответствии с методиками API 10 B-2/ISO-10426 и ГОСТ [25, 26].

Результаты исследования и их обсуждение

Тампонажный раствор на основе портландцемента – это хорошо изученный материал, технологические свойства которого можно регулировать в широких диапазонах, используя специальные химические добавки. Основным недостатком цементных растворов являются низкие упругие свойства цементного камня и низкая восприимчивость динамических нагрузок, на что указывают относительно высокие значения модуля Юнга и низкие значения коэффициента Пуассона [12, 17].

Модуль Юнга – физическая величина, которая характеризует свойство тела сопротивляться приложенной нагрузке при упругой деформации, а коэффициент Пуассона – это механическая характеристика материала, характеризующая отношение поперечной деформации элемента к продольной. Таким образом, характеристиками материала, описывающими его упругие свойства, являются коэффициент Пуассона и модуль Юнга.

Цементный камень нормальной плотности без добавок-эластификаторов является твердым телом с характерным динамическим модулем Юнга в диапазоне 18–19 ГПа и динамическим коэффициентом Пуассона – 0,13–0,15. Динамические модуль Юнга и коэффициент Пуассона, как правило, определяются ультразвуковыми методами оценки упругих свойств материала [12, 17, 28, 29].

Улучшать упругие свойства цементного камня можно использованием различных добавок, которые обладают рядом ограничений и недостатков:

- 1) эластомеры на основе продуктов переработки резины характеризуются возможностью кольматации кольцевых пространств поплавкового оборудования обсадных колонн при превышении определенной концентрации (по производственным данным, свыше 6 %), как следствие, при превышении опасной концентрации возможно получение преждевременного момента «Стоп», обнаружение ненормативного цементного стакана и недоподъема цементного раствора до плановой глубины;
- 2) диспергируемые эластификаторы на основе латексов ограниченно применимы из-за необходимости использования осреднительной емкости для цементирования, а также при превышении концентрации 3 % цементный раствор ухудшает свою стабильность, отмечается быстрый набор структурных свойств раствора, снижение времени загустевания;
- 3) смолы отличаются необходимостью использования осреднительной емкости для цементирования, также требуется прогрев смолы в холодное время года на участке производства работ перед цементованием.

Проведя оценку ограничивающих факторов по использованию реагентов-эластификаторов в составе

цементных растворов, эпоксидная смола выбрана как наиболее подходящий эластикатор для проведения исследований, т. к. применение смолы в качестве эластикатора отличается большей вариативностью концентраций, меньшими рисками при проведении работы и большей степенью однородности цементной системы [12, 14, 17, 20, 21].

Операции вторичного вскрытия, ГРП, МГРП и динамика работы бурильного инструмента оказывают

динамическое воздействие на цементный камень, находящийся за обсадной колонной, которые, как правило, могут приводить к ухудшению целостности крепи, вызывая радиальное растрескивание цементного камня, образование микрозазоров или необратимые деформации (рис. 2), что впоследствии приводит к значительным зонам заколонной циркуляции и увеличению обводненности скважинного продукта [9, 17–20, 22, 28].

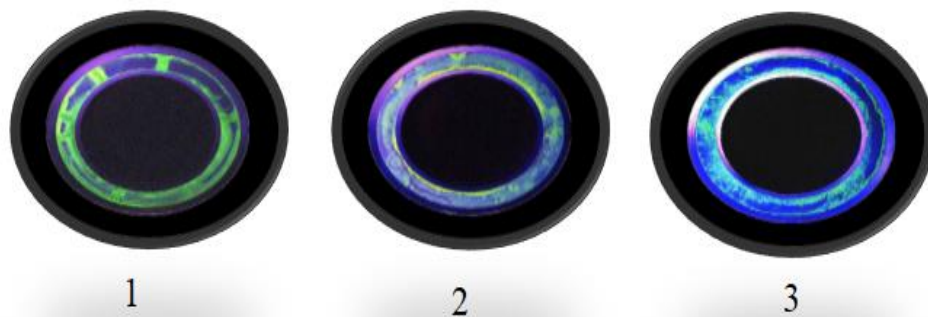


Рис. 2. Изображение дефектов цементного камня за обсадной колонной в ультрафиолетовом свете (1 – радиальное растрескивание; 2 – необратимые деформации; 3 – микрозазоры)

Fig. 2. Image of defects in the cement stone behind the casing string in ultraviolet light (1 – radial cracking; 2 – irreversible deformations; 3 – micro clogs)

Для проведения исследований разработаны цементные составы с вариативной концентрацией смолы в составе смеси, в качестве эталонного образца для оценки изменения упругих свойств выбран состав цементной смеси, наиболее часто используемый подрядчиками по цементированию, – цементная смесь, содержащая 5 % эластомеров на основе переработки резины. Также для сопоставления результатов экспериментов оценивались свойства базового цементного раствора нормальной плотности без добавок, влияющих на упругие свойства цементного раствора.

Плотность цементных растворов (ЦР 1-6) выбрана на отметке $1,84 \text{ г/см}^3$, что соответствует плотности цементных растворов нормальной плотности, используемых для цементирования ГРП/МГРП скважин, размещаемых, как правило, в интервалах продуктивных горизонтов [11, 22–24]. Для придания цементным растворам технологических свойств использовались следующие химические реагенты:

- 1) цемент – портландцемент тампонажный ПЦТ 1–G–СС (Сухоложский цементный завод, Россия);
- 2) замедлитель – лигносульфонатный замедлитель для умеренных температур (Россия);
- 3) регулятор водоотдачи – полимер проп-2-еновой кислоты с 2-метил-2-[(1-оксопроп-2-енил)амино]-1-пропансульфоновой кислотой (Россия);
- 4) пеногаситель – смесь диоксида кремния, минерального масла, n-Деканола и 1-Гептанола (Россия);
- 5) смола – диглицидиловый эфир бисфенола А (Россия);
- 6) отвердитель – полиэтиленполиамин (Россия);
- 7) эластомер – смесь резиновых компонентов 30–60 меш (пр-во США);
- 8) латекс – диспергируемый в воде латекс (Россия).

Составы цементных растворов с добавками-эластикаторами создавались на основе базового

цементного раствора (ЦР-1) плотностью $1,84 \text{ г/см}^3$. В экспериментах учитывалось, что некоторые добавки снижают плотность цементного раствора, поэтому плотность растворов рассчитывалась с учетом плотности добавок-эластикаторов путем регулирования ВЦ (водоцементного отношения). Плотность цементных растворов проверялась на герметизированных рычажных весах. Составы цементных растворов и полученные результаты экспериментов находятся в таблице, наглядно результаты отражены на рис. 3–5.

По результатам экспериментальных исследований проведено изучение образцов цементного камня на рентгеновском сканере. Для исследований выбран образец № 1 (рис. 6), как базовый состав, и № 5 (рис. 7), как состав, показавший наилучшие результаты.

По результатам, интерпретации рис. 6, 7 видно, что поровое пространство базового цементного камня представлено цементным камнем высокой пористости. Поровое пространство цементно-эпоксидного камня равномерно заполнено эпоксидной смолой. Эпоксидная смола внутри порового пространства цементного камня образует связную решетку [30], за счет которой улучшаются упруго-прочностные свойства цементного камня, т. к. прочность цементно-эпоксидного камня будет определяться синергетическим действием клинкерных минералов, эпоксидной смолы и диспергируемого в воде латекса.

По исследованиям компании Халлибуртон Интернэшнл ГмбХ использование смол в составе цементного камня снижает его проницаемость до $0,015 \text{ мД}$ при открытой пористости по газу около 22 %, что благоприятно сказывается на герметичности крепи, особенно в условиях цементирования скважин с высокой вероятностью флюидопроявления [31, 32].

Таблица. Результаты экспериментальных исследований

Table. Results of experimental studies

Состав цементного раствора Slurry design	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	Водоотдача API, мл Fluid loss API, ml	Прочность на сжатие/изгиб, МПа Compressive/flex ural strength, MPa	Динамический модуль Юнга, ГПа Dynamic Young's modulus, GPa	Динамический коэффициент Пуассона Dynamic Poisson's ratio
ЦР-1 ВЦ 0,5; замедлитель – 0,2%; регулятор водоотдачи – 0,25%; пеногаситель – 0,2% Slurry 1, WR 0,5; retarder – 0,2%; fluid loss agent – 0,25 %, defoamer – 0,2 %	1,84	48	27,45/6,03	18,43	0,15
ЦР-2 ВЦ 0,47; замедлитель – 0,2%; регулятор водоотдачи – 0,25%; пеногаситель – 0,2%; смола – 4,11%; отвердитель – 0,41% Slurry 2, WR 0,47; retarder – 0,2%; fluid loss agent – 0,25 %, defoamer – 0,2 %; epoxy resin – 4,11 %; hardener – 0,41 %	1,84	51	24,14/5,31	13,89	0,23
ЦР-3 ВЦ 0,44; замедлитель – 0,2%; регулятор водоотдачи – 0,25%; пеногаситель – 0,2%; смола – 7,92%; отвердитель – 0,79% Slurry 3, WR 0,44; retarder – 0,2%; fluid loss agent – 0,25 %, defoamer – 0,2 %; epoxy resin – 7,92 %; hardener – 0,79 %	1,84	56	34,45/6,88	11,31	0,27
ЦР-4 ВЦ 0,43; замедлитель – 0,2%; регулятор водоотдачи – 0,25%; пеногаситель – 0,2%; смола – 11,9%; отвердитель – 1,19% Slurry 4, WR 0,43; retarder – 0,2%; fluid loss agent – 0,25 %, defoamer – 0,2 %; epoxy resin – 11,9 %; hardener – 1,19 %	1,84	55	26,05/8,07	9,83	0,25
ЦР-5 ВЦ 0,47; замедлитель – 0,2%; регулятор водоотдачи – 0,25%; пеногаситель – 0,2%; смола – 4,11%; отвердитель – 0,41%; латекс – 1% Slurry 5, WR 0,47; retarder – 0,2%; fluid loss agent – 0,25 %, defoamer – 0,2 %; epoxy resin – 4,11 %; hardener – 0,41 %; latex – 1 %	1,84	47	32,81/7,86	9,52	0,28
ЦР-6 ВЦ 0,44; замедлитель – 0,2%; регулятор водоотдачи – 0,25%; пеногаситель – 0,2%; эластомер – 5% Slurry 6, WR 0,44; retarder – 0,2%; fluid loss agent – 0,25 %, defoamer – 0,2 %; elastomer – 5 %	1,84	49	24,67/6,54	11,12	0,26

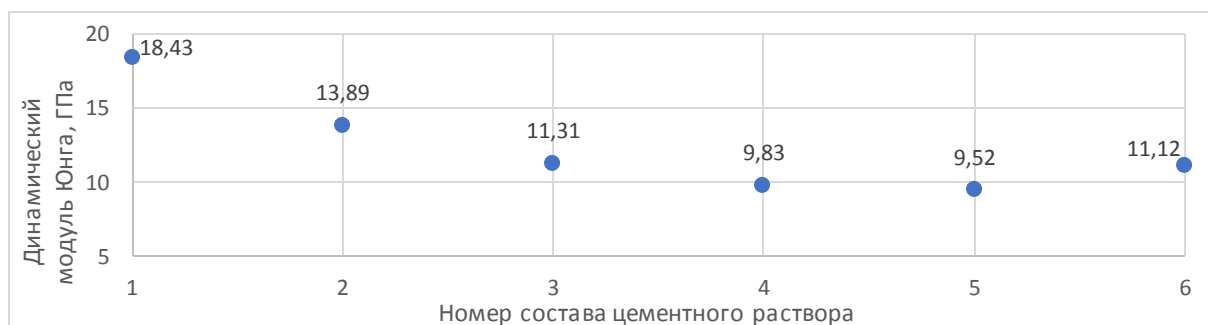


Рис. 3. Изменение динамического модуля Юнга

Fig. 3. Changing the dynamic Young's modulus

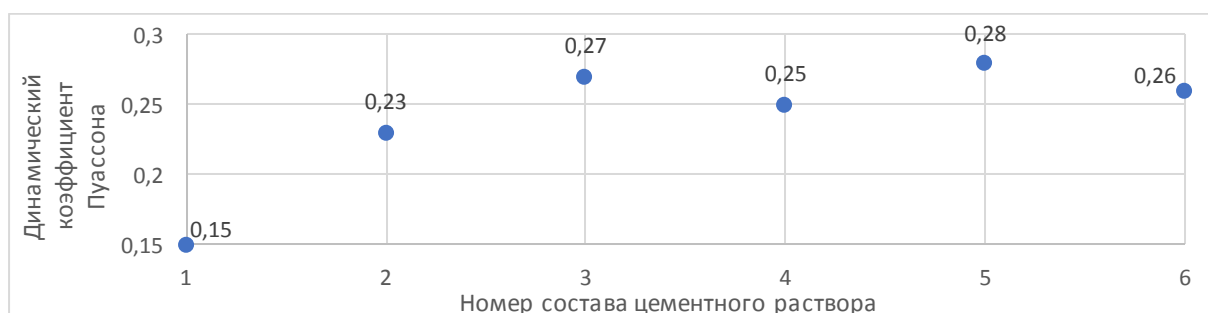


Рис. 4. Изменение динамического коэффициента Пуассона

Fig. 4. Changing the dynamic Poisson's ratio

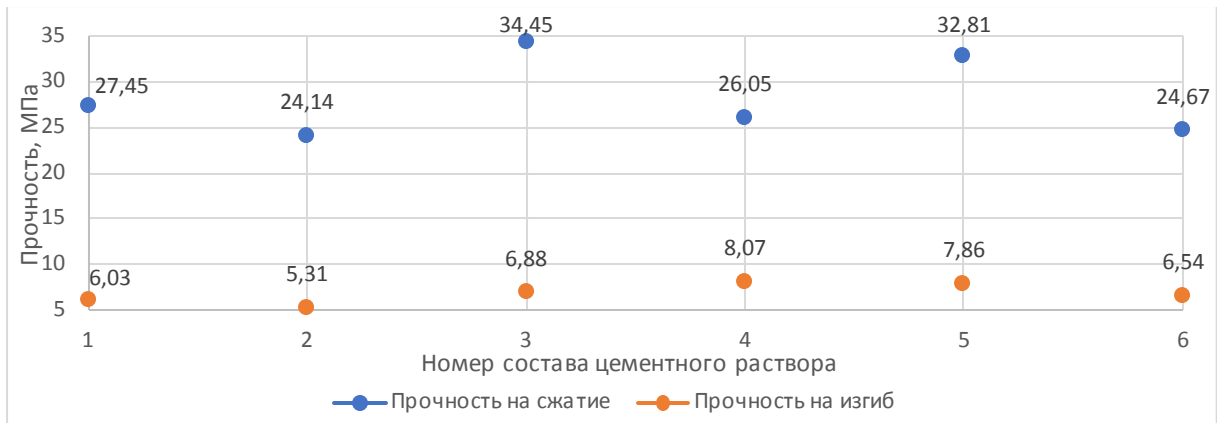


Рис. 5. Прочностные свойства состава цементных камней

Fig. 5. Strength properties of the composition of cement stones

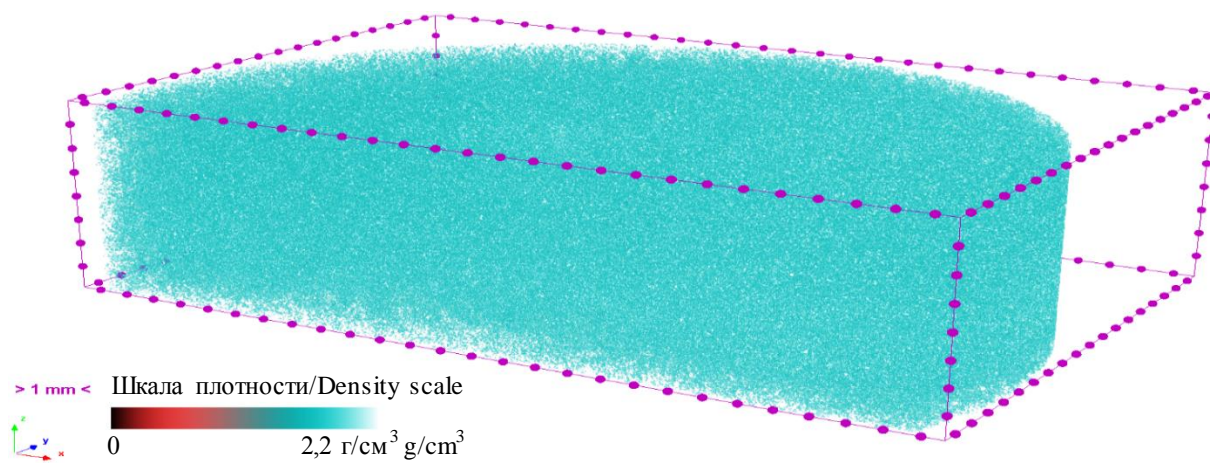


Рис. 6. Поревое пространство базового цементного камня № 1 (ЦР-1)

Fig. 6. Pore space of the base cement stone no. 1 (Cement Slurry-1)

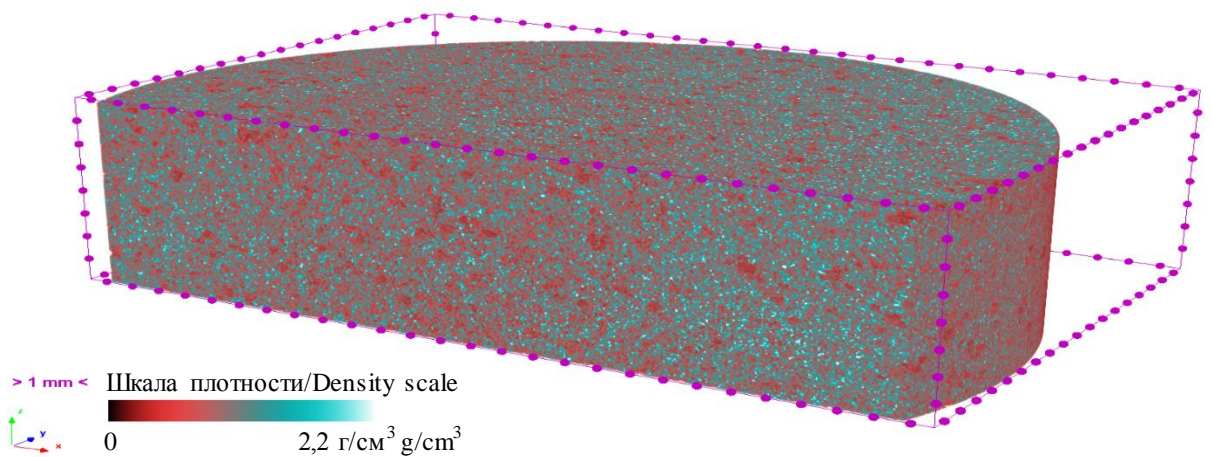


Рис. 7. Поревое пространство базового цементного камня № 1 (ЦР-5)

Fig. 7. Pore space of the base cement stone no. 1 (Cement Slurry-5)

Выводы

К выводам работы можно отнести:

- 1) эпоксидная смола эффективно улучшает упругие свойства цементного камня, при этом увеличивая прочность образца на изгиб, до концентрации 10 % (ЦР-2, ЦР-3, ЦР-5);
- 2) при превышении концентрации 10 % смолы в составе цементного раствора отмечается частичное ухудшение прочностных свойств цементного камня на сжатие и увеличение прочностных свойств цементного камня на изгиб, при этом отмечается увеличение упругих свойств (ЦР-4);

- 3) наилучшими показателями обладает ЦР-5, в котором прослеживается совместное действие смолы и диспергируемого латекса в минимальных концентрациях, так, динамический модуль Юнга снижен на 14 %, коэффициент Пуассона незначительно снижен на 7,5 % относительно существующего отраслевого решения (ЦР-6); относительно базового цементного раствора без эластификаторов (ЦР-1) можно отметить снижение динамического модуля Юнга на 51,65 % и увеличение динамического коэффициента Пуассона на 53,57 %;
- 4) использование смолы в составе цементного раствора также снижает проницаемость цементного камня, благоприятно сказываясь на герметичности крепи. Дальнейшая работа сосредоточена на создании модели, базирующейся на методе конечных элементов, для проверки применимости разработанных цементных смесей.

Особую благодарность авторский коллектив выражает центру «Геомеханики и проблем горного производства» Санкт-Петербургского горного университета за содействие экспериментальным исследованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики / В.С. Литвиненко, П.С. Цветков, М.В. Двойников, Г.В. Буслев // Записки Горного института. – 2020. – Т. 244. – С. 428–438.
2. Tsvetkov P.S., Cherepovitsyn A.E., Makhovikov A.B. Economic assessment of heat and power generation from small-scale liquefied natural gas in Russia // Energy Reports. – 2020. – V. 6. – P. 391–402.
3. Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V., Trushko V.L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas International // Journal of Mining Science and Technology. – 2021. – V 32. – P. 113–119.
4. Litvinenko V.S. The role of hydrocarbons in the global energy agenda: the focus on liquefied // Natural Gas Resources. – 2020. – V. 5. – P. 59–81.
5. Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Molodtsov K.V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector EURASIAN MINING // Business and International Management. – 2020. – V. 1. – P. 36–41.
6. Литвиненко В.С., Двойников М.В. Методика определения параметров режима бурения наклонно-прямолнейных участков скважины винтовыми забойными двигателями // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 105–112.
7. Литвиненко В.С., Двойников М.В. Обоснование выбора параметров режима бурения скважин роторными управляемыми системами // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. – С. 24–29.
8. Dynamic response of multi-scale geophysical systems: waves and practical applications / A.A. Yakovleva, I.B. Movchan, Z.I. Shaygallyamova // Philosophical Transaction of Royal Society A. – 2022. – V. 380. – P. 20210403.
9. Modelling of seismic assessment for large geological systems / I.B. Movchan, A.A. Yakovleva, V. Frid, A.B. Movchan, Z.I. Shaygallyamova // Philosophical Transaction of Royal Society A. – 2022. – V. 380. – P. 20210393.
10. Features of fracture height propagation in cross-layer fracturing of shale oil reservoirs / Y. Wang, B. Hou, D. Wang, L.A. Zhenhua // Petroleum Exploration and Development. – 2021. – V. 48. – P. 469–479.
11. Николаев Н.И., Леушева Е.Л. Тампонажные составы пониженной плотности для цементирования скважин в условиях аномально низких пластовых давлений // Записки Горного института. – 2019. – Т. 236. – С. 194–200.
12. Анализ и выбор тампонажной смеси устойчивой к динамическим нагрузкам, с целью повышения качества герметичности крепи в затрубном пространстве / П.А. Блинов, А.В. Шаньширов, Д.М. Черемшанцев, Н.Ю. Кузнецова, В.В. Никишин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – С. 115–123.
13. Гендлер С.Г., Фазылов И.Р., Абашин А.Н. Результаты экспериментальных исследований теплового режима нефтяных шахт при термическом способе добычи нефти // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – Т. 6. – С. 248–262.
14. Effects of confinement pressure on the mechanical behavior of an oil well cement paste / V.N. Lima, F. Silva, H.J. Skadsem, K. Beltrán-Jiménez, J.K. Sunde // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – V. 208. – P. 109769.
15. The influence of fine aggregates on Portland cement mortar compressive strength / A. Muciño, S. Vargas, N.A. Pérez, L. Bucio, E. Orozco // Results in Materials. – 2021. – V. 10. – P. 100182.
16. Physio-chemical interaction of Ethylene-Vinyl Acetate copolymer on bonding ability in the cementing material used for oil and gas well / S.T. Lanka, N.G. Anak Moses, R.R. Suppiah, B.T. Maulianda // Petroleum Research. – 2021. – V. 7. – P. 341–349.
17. Elastic and thermodynamic properties of the major clinker phases of Portland cement: insights from first principles calculations / N.L. Mai, N.H. Hoang, H.T. Do, M. Pilz, T.T. Trinh // Construction and Building Materials. – 2021. – V. 287. – P. 122873.
18. Shen X., Zhang P. A calculation method for the allowable fracturing injection pressure of preventing casing deformation // Natural Gas Industry B. – 2019. – V. 6. – P. 384–393.
19. Hydraulic fracturing induced casing shear deformation and a prediction model of casing deformation / Q. Lu, Z. Liu, J. Guo, L. He, Y. Li, J. Zeng, S. Ren // Petroleum Exploration and Development. – 2021. – V. 48. – P. 460–468.
20. Impact of down hole pressure and fluid-access on the effectiveness of wellbore cement expansion additives / T.K.T. Wolterbeek, E.K. Cornelissen, S.J.T. Hangx, C.J. Spiers // Cement and Concrete Research. – 2021. – V. 147. – P. 106514.
21. Effect of epoxy resin emulsion on the mechanical properties of oil well cement-based composites / M. He, J. Song, M. Xu, L. He, P. Xu // Advances in Civil Engineering. – 2020. – V. 2020. – P. 1–9.
22. Губайдуллин А.Г., Моргучев А.И. Расчет упруговязкопластического перемещения стенок скважин в трансверсально-изотропных горных породах // Записки Горного института. – 2019. – Т. 236. – С. 180–184.
23. Агзамов Ф.А., Белоусов А.О. Комплексный подход к предупреждению нарушения герметичности затрубного пространства скважин при вторичном вскрытии и ГРП // Нефтяная провинция. – 2019. – Т. 1. – С. 197–214.
24. Агзамов Ф.А., Белоусов А.О., Комлев Я.К. Применение упругого цементного камня для повышения устойчивости крепи скважин при ударных и динамических нагрузках // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – Т. 2. – С. 9–19.
25. 10B-2/ISO 10426-2. Recommended Practice for Testing Well Cements. – R.: API, 2005. – 11 p.
26. ГОСТ 1581-2019 Портландцементы тампонажные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2020. – 11 с.
27. ГОСТ 17624-2012 Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
28. A study on the hydraulic aperture of microannuli at the casing-cement interface using a large-scale laboratory setup / A. Moghadam, K. Castelein, J. Heege, B. Orlie // Geomechanics for Energy and the Environment. – 2022. – V. 29. – P. 100269.
29. Mechanical properties and enhancement mechanism of oil-well cement stone reinforced with carbon fiber surfaces treated by concentrated nitric acid and sodium hypochlorite / Y. Ye, F.J. Zhang, C. Qi, F. Li, M. Yang, J. Yang // International Journal of Polymer Science. – 2020. – V. 2020. – P. 1–10.
30. Zhang M., Jivkov A.P. Micro mechanical modelling of deformation and fracture of hydrating cement paste using X-ray computed tomography characterization // Composites Part B: Engineering. – 2016. – V. 88. – P. 64–72.
31. Applying a resin-cement system to help prevent fluid migration in the annulus: case study, Western Siberia / M. Baklushin,

- N. Velikaya, V. Zyryanov, D. Vologdin // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, 2019. – P. 1–10.
32. Sadykov M.I., Blinov P.A., Nutskova M.V. Use of the water-swelling polymers (WSP) for wellbore stabilization in intensely fractured rock intervals // E3S Web of Conferences. – 2021. – V. 266. – P. 01013.

*Поступила 09.11.2022 г.
Прошла рецензирование 07.12.2022 г.*

Информация об авторах

Блинов П.А., кандидат технических наук, доцент кафедры бурения скважин Санкт-Петербургского горного университета.

Садыков М.И., аспирант кафедры бурения скважин Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 622.245.422.2

EVALUATION OF ELASTIC-STRENGTH PROPERTIES OF CEMENT-EPOXY SYSTEMS

Pavel A. Blinov¹,
Blinov_PA@pers.spmi.ru

Marat I. Sadykov¹,
s205064@stud.spmi.ru, marat.sadykov96@gmail.com

¹ St. Petersburg Mining University,
21 line 2, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.

The relevance of the study is determined by the conditions of operation and completion of wells in modern conditions. In the process of well construction, the plugging material used to fasten casing strings experiences dynamic loads, as a result of which it loses its integrity, which leads to leakage of the annulus and subsequent crossflows of formation fluids. Dynamic loads include the dynamics of the drilling tool during normalization, operations for secondary opening, hydraulic fracturing, casing pressure testing after the waiting period for the cement stone to harden. The elastic properties of cement stone from various compositions were determined using ultrasonic evaluation methods, the strength properties were determined by destructive testing methods according to API 10B-2 / ISO 10426-2 standards. There are a number of works and industry solutions of well cementing contractors related to the creation of elastic cement systems, however, in many respects, these developments do not fully solve the identified problems and are dependent on imported components.

The main aim: development of the composition of a cement slurry with increased elastic-strength properties from Russian components.

Object: cement stone and its elastic-strength properties.

Results. In the course of experimental studies, an increase in the bending strength and improvement in the elastic properties of cement-epoxy stone are noted when using epoxy resin as part of the cement system, the distribution of the resin in the composition of the cement stone using 3D X-ray scanning methods is determined, the advantages and disadvantages of additives-elasticizers are noted, concentrations of additives that improve the technological properties of cement mortar and stone are selected.

Key words:

cement stone, Young's modulus, Poisson's ratio, ultrasound, compressive strength, flexural strength, permeability, elastic cements, elasticizers.

The team of authors is especially grateful to the Center for Geomechanics and Mining Problems of St. Petersburg Mining University for their assistance in experimental research.

REFERENCES

- Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Dvoynikov M.V., Buslaev G.V. Barriers to the implementation of hydrogen initiatives in the context of sustainable development of global energy. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 244, pp. 428–438. In Rus.
- Tsvetkov P.S., Cherepovitsyn A.E., Makhovikov A.B. Economic assessment of heat and power generation from small-scale liquefied natural gas in Russia. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 391–402.
- Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V., Trushko V.L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, vol. 32, pp. 1–1.
- Litvinenko V.S. The role of hydrocarbons in the global energy agenda: the focus on liquefied. *Natural Gas Resources*, 2020, vol. 5, pp. 59–81.
- Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Molodtsov K.V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector EURASIAN MINING. *Business and International Management*, 2020, vol. 1, pp. 36–41.
- Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V. Method for determining the parameters of the drilling mode of inclined straight sections of the well with screw downhole motors. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 241, pp. 105–112. In Rus.
- Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V. Justification of the choice of parameters for drilling wells with rotary controlled systems. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 235, pp. 24–29. In Rus.
- Yakovleva A.A., Movchan I.B., Shaygallyamova Z.I. Dynamic response of multi-scale geophysical systems: waves and practical applications. *Philosophical Transaction of Royal Society A*, 2022, vol. 380, pp. 20210403.
- Movchan I.B., Yakovleva A.A., Frid V., Movchan A.B., Shaygallyamova Z.I. Modelling of seismic assessment for large geological systems. *Philosophical Transaction of Royal Society A*, 2022, vol. 380, pp. 20210393.
- Wang Y., Hou B., Wang D., Zhenhua L.A. Features of fracture height propagation in cross-layer fracturing of shale oil reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, vol. 48, pp. 469–479.
- Nikolaev N.I., Leusheva E.L. Low-density cementing compositions for well cementing under conditions of abnormally low formation pressures. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 236, pp. 194–200. In Rus.
- Blinov P.A., Shansherov A.V., Cheremshantsev D.M., Kuznetsova N.Yu., Nikishin V.V. Analysis and selection of a cement mixture resistant to dynamic loads, in order to improve the quality of the tightness of the lining in the annulus. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, pp. 115–123. In Rus.
- Gendler S.G., Fazylov I.R., Abashin A.N. The results of experimental studies of the thermal regime of oil mines in the thermal method of oil production. *Mining informational and analytical bulletin*, 2022, vol. 6, pp. 248–262. In Rus.
- Lima V.N., Silva F., Skadsem H.J., Beltrán-Jiménez K., Sunde J.K. Effects of confinement pressure on the mechanical behavior of an oil well cement paste. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208, pp. 109769.
- Muciño A., Vargas S., Pérez N.A., Bucio L., Orozco E. The influence of fine aggregates on Portland cement mortar compressive strength. *Results in Materials*, 2021, vol. 10, pp. 100182.
- Lanka S.T., Anak Moses N.G., Suppiah R.R., Maulianda B.T. Physio-chemical interaction of Ethylene-Vinyl Acetate copolymer on bonding ability in the cementing material used for oil and gas well. *Petroleum Research*, 2021, vol. 7, pp. 341–349.
- Mai N.L., Hoang N.H., Do H. T., Pilz M., Trinh T.T. Elastic and thermodynamic properties of the major clinker phases of Portland cement: insights from first principles calculations. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 287, pp. 122873.
- Shen X., Zhang P. A calculation method for the allowable fracturing injection pressure of preventing casing deformation. *Natural Gas Industry B*, 2019, vol. 6, pp. 384–393.

19. Lu Q., Liu Z., Guo J., He L., Li Y., Zeng J., Ren S. Hydraulic fracturing induced casing shear deformation and a prediction model of casing deformation. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, vol. 48, pp. 460–468.
20. Wolterbeek T.K.T., Cornelissen E.K., Hangx S.J.T., Spiers C.J. Impact of downhole pressure and fluid-access on the effectiveness of wellbore cement expansion additives. *Cement and Concrete Research*, 2021, vol. 147, pp. 106514.
21. He M., Song J., Xu M., He L., Xu P. Effect of epoxy resin emulsion on the mechanical properties of oil well cement-based composites. *Advances in Civil Engineering*, 2020, vol. 2020, pp. 1–9.
22. Gubaydullin A.G., Moguchev A.I. Calculation of elastoviscoplastic displacement of borehole walls in transversally isotropic rocks. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 236, pp. 180–184. In Rus.
23. Agzamov F.A., Belousov A.O. An integrated approach to the prevention of violations of the integrity of the annular space of wells during the secondary opening and hydraulic fracturing. *Oil province*, 2019, vol. 1, pp. 197–214. In Rus.
24. Agzamov F.A., Belousov A.O., Komlev Ya.K. The use of elastic cement stone to increase the stability of well lining under shock and dynamic loads. *Problems of collection, preparation and transportation of oil and oil products*, 2020, vol. 2, pp. 9–19. In Rus.
25. 10B-2/ISO 10426-2. *Recommended Practice for Testing Well Cements*. R., API, 2005, 11 p.
26. *GOST 1581-2019. Portland cementy tamponazhnye. Tekhnicheskie usloviya* [State Standart 1581-2019. Portland cements are grouting. Specifications]. Moscow, StandartInform Publ., 2020. 11 p.
27. *GOST 17624-2012 Betony. Ultrazvukovoy metod opredeleniya prochnosti* [State Standart 17624-2012. Concrete. Ultrasonic method for determining strength]. Moscow, StandartInform Publ., 2014. 20 p.
28. Moghadam A., Castelein K., Heege J., Orlic B. A study on the hydraulic aperture of microannuli at the casing–cement interface using a large-scale laboratory setup. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2022, vol. 29, pp. 100269.
29. Ye Y., Zhang F.J., Qi C., Li F., Yang M., Yang J. Mechanical properties and enhancement mechanism of oil-well cement stone reinforced with carbon fiber surfaces treated by concentrated nitric acid and sodium hypochlorite. *International Journal of Polymer Science*, 2020, vol. 2020, pp. 1–10.
30. Zhang M., Jivkov A. P. Micromechanical modelling of deformation and fracture of hydrating cement paste using X-ray computed tomography characterization. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 88, pp. 64–72.
31. Baklushin M., Velikaya N., Zyryanov V., Vologdin D. Applying a resin-cement system to help prevent fluid migration in the annulus: case study, Western Siberia. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, 2019. pp. 1–10.
32. Sadykov M.I., Blinov P.A., Nutskova M.V. Use of the water-swelling polymers (WSP) for wellbore stabilization in intensely fractured rock intervals. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 266, pp. 01013.

Received: 9 November 2022.

Reviewed: 7 December 2022.

Information about the authors

Pavel A. Blinov, Cand. Sc., associate professor, St. Petersburg Mining University.

Marat I. Sadykov, post-graduate student, St. Petersburg Mining University.