

УДК 624.138.24:666.942.5  
DOI: 10.22213/2410-9304-2017-1-99-104

А. Н. Гуменюк, студент  
Т. Н. Иванова, магистрант  
Д. В. Агаев, магистрант  
П. А. Тайбахтина, магистрант  
В. В. Турчин, кандидат технических наук, доцент  
С. В. Сычугов, кандидат технических наук, доцент  
Л. В. Юдина, кандидат технических наук, профессор  
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## ИССЛЕДОВАНИЕ СУЛЬФАТОСТОЙКОСТИ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНЫХ ТАМПОНАЖНЫХ РАСТВОРОВ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР, СОДЕРЖАЩИХ ДОБАВКУ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА И УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

*Исследовано влияние добавок углеродных нанотрубок и микрокремнезема на сульфатостойкость тампонажных цементно-песчаных растворов в условиях комнатных и пониженных температур. Установлено, что добавка суспензии углеродных нанотрубок марки «Fulves 100» совместно с микрокремнеземом марки МК-85 позволяет сохранить коррозионную стойкость цементно-песчаного тампонажного раствора в агрессивных условиях в возрасте 30 суток при температурах 20 и 5 °С.*

*Механизм действия комплексной добавки заключается в способности микрокремнезема связывать свободную известь, выделяющуюся в результате гидратации твердых растворов цементного клинкера, а углеродных нанотрубок – в создании армирующего эффекта.*

*Микрокремнезем исключает возможность образования первичного этtringита и способствует образованию фаз CSH (I), что подтверждено ИК-спектральным анализом. Углеродные нанотрубки заполняют поровое пространство и выступают в качестве центров кристаллизации, на поверхности которых адсорбируются фазы CSH (I). За счет действия добавок повышается плотность цементного камня, а образцы не разрушаются в агрессивной среде.*

*Оптимальное содержание добавок микрокремнезема и углеродных нанотрубок в составе тампонажного раствора соответственно составляет (в частях от массы вяжущего): 0,05 и 0,0025. Установлено, что введение микрокремнезема улучшает технологические характеристики тампонажного раствора – исключает расслоение смеси при обеспечении требуемой подвижности.*

**Ключевые слова:** коррозионная стойкость, углеродные нанотрубки, тампонажные растворы, микрокремнезем.

### Введение

Общеизвестно, что тампонажные работы, проводимые с целью стабилизации структуры грунта, могут выполняться при различных температурах: при жарких – свыше 25 °С, при нормальных – менее 25 °С и до 20 °С и при температурах не ниже 5 °С [1, 2]. При пониженных температурах замедляется кинетика реакций гидратации цемента [3, 4]. Кроме температуры, на сроки схватывания тампонажного раствора и набор прочности в результате твердения влияет среда грунта. При избытке ионов  $SO_4^{2-}$  она становится агрессивной и цементный камень подвергается коррозии [5, 6]. Наличие сульфат-ионов в грунте обусловлено растворением сульфатных солей грунтовыми водами. Попадая в поры и капилляры цементного камня, соли способствуют образованию малорастворимых соединений, увеличивающихся в объеме. Происходит разрушение структуры цементного камня и снижается прочность и долговечность [7, 8]. Сульфат-ионы активно реагируют с фазами цемента, преимущественно с трехкальциевым алюминатом  $C_3A$ , гид-

роалюминатом кальция САН и образуют высокоосновную форму – этtringит  $C_3AC_3H_{[31-32]}$ .

Целью настоящей работы было установить влияние добавок микрокремнезема и суспензии углеродных нанотрубок на процессы схватывания и твердения цементно-песчаного тампонажного раствора в агрессивных условиях.

### Материалы и методы исследования

Для приготовления тампонажных растворов использовались: портландцемент марки ЦЕМ I 32,5Н Исктимского цементного завода; фракционированный кварцевый песок, соответствующий требованиям ГОСТ 8736–93 с модулем крупности  $M_k = 0,25$ ; дистиллированная вода с  $pH = 7,0 \pm 0,01$ ; высокодисперсная добавка – микрокремнезем марки МК-85, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 24211–2008; дисперсионный раствор углеродных нанотрубок «Fulves 100». Химический и минералогический составы исходных компонентов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Химический и минералогический составы исходных компонентов

Материал	Содержание компонентов, %												
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	FeO	Прочие примеси	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Цемент I 32,5Н	64–66	20,5–21,5	4,5–5,3	4,5–5,0	2,5–3,5	0,5–1,0	≤1,0	≤0,1	–	64,0–66,0	10,0–11,0	5,0–7,0	12,5–13,5
Песок фракционированный	98,7	–	–	–	–	–	–	–	1,3	–	–	–	–
Микрокремнезем М-85	0,4–0,6	86–90	0,6–0,8	0,4–0,7	0,8–1,0	–	0,6–0,8/1,2–1,4	–	1,1–1,3	–	–	–	–

Технологические и физико-технические свойства были определены согласно ГОСТ 26798.1–96 «Цементы тампонажные. Методы испытаний». Основными критериями эффективности использования добавок в составе тампонажного раствора выступали свойства: подвижность, однородность, прочность на сжатие, коррозионная стойкость, оцениваемая коэффициентом снижения прочности цементного камня после выдерживания его в агрессивных условиях. Затвердевшие образцы помещались в камеру воздушно-влажного хранения и выдерживались в течение 14 суток. Испытания опытных образцов на коррозионную стойкость (сульфатостойкость) выполняли согласно методике, подробно изложенной в [9, 10].

Свойства цементного камня тампонажного раствора, модифицированного различным содержанием добавок микрокремнезема и дисперсии углеродных нанотрубок, были изучены методом инфракрасной спектроскопии (ИК). Инфракрасный анализ образцов выполняли на ИК-Фурье-спектрометре IRAffinity-1 с рабочим интервалом частот от 4000 до 400 см<sup>-1</sup>. Спектры расшифровывались согласно [11].

Лазерный гранулометрический анализ компонентов тампонажного раствора был выполнен на лазерном анализаторе HORIBA LA-950.

Для определения сульфатостойкости образцов тампонажного раствора был использован метод титрования – анализ, основанный на измерении количества реагента, который полностью реагирует с анализируемым веществом – с Ca(OH)<sub>2</sub>. В качестве титранта использовалась 5%-я серная кислота (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Титрование выполняли каждые 2 дня, после чего фиксировали расход кислоты, который уходил на нейтрализацию щелочи.

Микроскопический анализ выполняли на электронном USB-микроскопе Dino-Lite Digital Microscope Pro с максимальным увеличением в 200 раз.

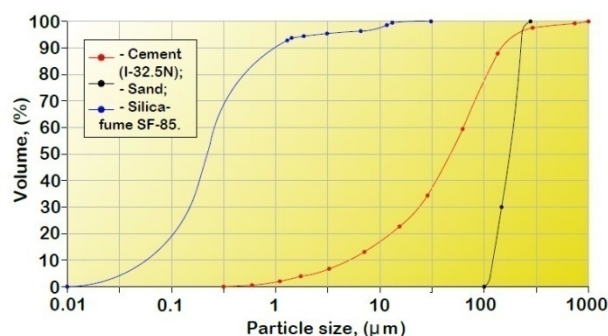
### Обсуждение результатов

Для оценки удельной поверхности частиц вяжущего, активной минеральной добавки – микрокремнезема и заполнителя – фракционированного кварцевого песка был проведен гранулометрический лазерный анализ, результаты которого представлены на рис. 1, а.

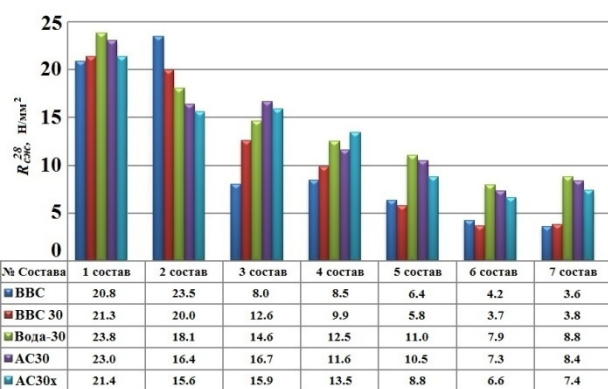
Установлено, что микрокремнезем представлен частицами от нанометрового размера до нескольких десятков микрон. Более 90 % добавки составляют частицы менее 2 микрон, максимальная крупность частиц не превышает 47 микрон. Кварцевый фракционированный песок представлен двумя фракциями: более 100 мкм – 30 % и более 250 мкм – 70 % (рис. 1, а).

Химический анализ заполнителя – фракционированного кварцевого песка и высокодисперсного наполнителя (микрокремнезема), которые предоставляют производитель ООО «Меркурий» и ООО «Алан-трейд», – показал, что в их составе не содержится активный аморфный кремнезем и его соединения (табл. 1), которые способны вызвать щелочную коррозию тампонажного раствора: кристобалит,

опал, кремний и его разновидности, кремнистые известняк и сланец. По данным [12, 13] указанные соединения существенно влияют на долговечность цементного камня при взаимодействии ультракислых пород с щелочами цемента.



а



б

Рис. 1. Физические свойства: а – лазерный гранулометрический анализ компонентов тампонажного раствора; б – зависимость прочности образцов при испытании в различных условиях (BBC – воздушно-влажная среда; BBC-30 – то же, но по истечении 30 суток; Вода-30 – то же, но в воде; AC-30 – агрессивная среда в течение 30 суток; AC-30x – то же, но при температуре не ниже 5 °С. За агрессивные условия принят 1N водный раствор Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Необходимость применения микрокремнезема МК-85 обусловлена его высокой пуццолановой активностью – связывать свободную известь в цементе. Кроме того, добавка улучшает технологические характеристики смеси: удобоукладываемость, обрабатываемость, исключая расслоение и водоотделение при повторном перемешивании [14]. Оптимальное содержание микрокремнезема составило 0,05 части от массы вяжущего. Дисперсия углеродных нанотрубок «Fulvec 100» использовалась в качестве добавки для повышения сульфатостойкости цементных составов. Оптимальное содержание углеродных нанотрубок в растворе составляло 0,0025 части от массы вяжущего.

Были изготовлены следующие составы тампонажных растворов, содержащих добавки микрокремнезема МК-85 и углеродных нанотрубок «Fulvec 100» (табл. 2).

Таблица 2. Составы тампонажных растворов и их свойства

Компоненты, в частях	Составы						
	1	2	3	4	5	6	7
Цемент I 32,5 Н	1	1	1	1	1	1	1
Песок 2K <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (M <sub>к</sub> = 0,25)	1	2	1	2	1	2	3
Микрокремнезем МК-85	–	–	5	5	5	5	5
УНТ «Fulvec 100»	–	–	0,25	0,25	–	–	0,25
В/Ц	0,63	0,74	0,70	0,80	0,70	0,80	0,90
Подвижность, мм	200	195	185	190	200	190	190
Плотность смеси, г/см <sup>3</sup>	1,93	2,07	1,73	1,88	1,83	1,92	1,76

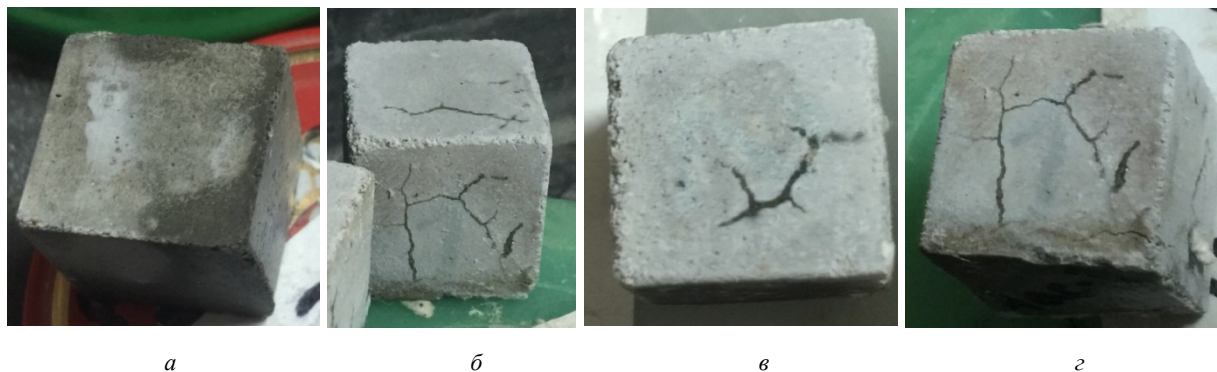


Рис. 2. Образцы после исследования тестом на сульфатостойкость в течение 30 дней (общие виды): а – 3-й состав; б – 1-й состав; в – 2-й состав; з – 4-й состав

Необходимое количество воды затворения для составов вводилось до получения требуемой подвижности, которая определялась с помощью осадки конуса АзНИИ с распылом смеси не менее 180–220 мм [15].

Анализ прочностных свойств образцов выполнялся по истечении ими возраста 28 суток, также 30 суток после погружения образцов в водную, воздушно-влажную и агрессивные среды (рис. 1, б).

По результатам испытаний образцов на прочность с выдерживанием опытных образцов в агрессивной среде в течение 30 дней можно сделать вывод, что наилучшие показания, по сравнению с контрольными образцами (составы 1 и 2) наблюдались у образцов 3-го состава, содержащего добавки микрокремнезема МК – 85 и УНТ «Fulvec 100».

Состав 3 показал снижение предела прочности на сжатие по сравнению с составами 1 и 2, не содержащими модифицирующих добавок, соответственно, в 2,6 и 2,9 раза в воздушно-влажной среде на 28-е сутки. Подобная ситуация наблюдается и при хранении образцов в течение 30 суток в воздушно-влажной и водной среде. Снижение пределов прочности на сжатие соответственно составило в первом случае на 41 и 37 %, а во втором – на 38 и 19 %.

У всех составов наблюдается бóльший рост прочности образцов при хранении их в воздушно-влажной и в водной средах.

Сравнительный анализ рис. 2, б показывает, что использование добавок УНТ «Fulvec 100» и микрокремнезема МК-85 положительно сказывается на наборе прочности у 3-го состава в воздушно-влажной и водной среде по сравнению с составами 1, 2 и 4. Скорость набора прочности 3-го состава выше по сравнению

с 1-м составом на 33 %, во 2-м составе по сравнению с 3-м происходит спад прочности на 23 %.

Снижение прочности у 2-го состава связано с пористостью образца. В результате увеличения доли песка в составе в два раза водоцементное отношение с 0,63 увеличилось до 0,74, что позволило сохранить технологические свойства раствора и достичь требуемой подвижности.

Выдерживание образцов исследуемых составов в агрессивной среде при нормальных (20 °С) и пониженных ( $\geq 5$  °С) температурах, привело к снижению прочностных показателей. Образцы 2-го состава снизили прочность в агрессивной среде при нормальных и пониженных температурах по сравнению с воздушно-влажной средой соответственно на 43 и 50 % в связи с пористостью. Отмечено некоторое повышение прочности 1-го состава в агрессивной среде по сравнению с воздушно-влажной на 10 %, однако это связано с формированием этtringита, который в начале кристаллизации упрочняет цементный камень. Дальнейшее выдерживание в агрессивной среде приводит к деструктивным процессам – образованию трещин на поверхности (рис. 2, б) и внутри образца (рис. 3, а).

Опытные образцы 3-го состава показали, что при выдерживании их в агрессивной среде при нормальных температурах (20 °С) достигается максимальная прочность 16,7 МПа. Наблюдается некоторое ее снижение на 5 % при выдерживании образцов (рис. 2) при пониженных температурах ( $\geq 5$  °С), однако в том и другом случае она выше в 2 раза по сравнению с показаниями образцов, выдержанных в воздушно-влажной среде.

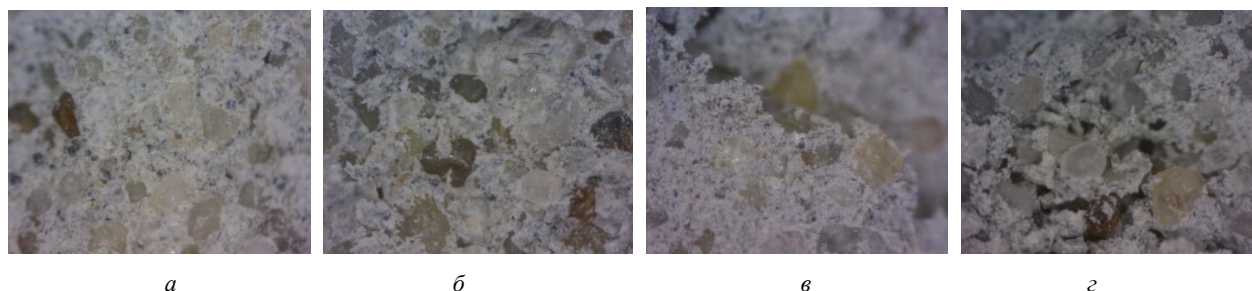


Рис. 3. Микроскопические снимки образцов тампонажных растворов, испытанных в 1N-м водном растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в возрасте 30 суток: а – 1-й состав; б – 2-й состав; в – 3-й состав; г – 6-й состав

Фотографии общего вида образцов 3-го состава (рис. 2, а) и микроструктуры при увеличении в 200 крат (рис. 3, в) не выявили протекания деструктивных процессов в цементном камне при выдерживании образцов в агрессивной среде при нормальных ( $20\text{ }^\circ\text{C}$ ) и пониженных температурах ( $\geq 5\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Составы с 4-го по 7-й имели низкую прочность и разрушались после выдерживания в агрессивных средах (рис. 2, з и 3, з).

Коэффициент снижения прочности (КС), оцениваемый снижением прочности образцов тампонажного раствора в агрессивных условиях (1N-м водном растворе сульфата натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), по отношению к прочности образцов, хранившихся в водной среде, показал, что все образцы показали положительную динамику сохранения прочности. Образец 3-го со-

става с добавками микрокремнезема МК-85 и УНТ «Fulvec 100» в количествах 0,05 и 0,0025 соответственно частей от массы вяжущего показал наилучшие результаты. Коэффициент снижения прочности определяли по формуле:

$$\text{КС} = \frac{AC_{30}}{B_{30}},$$

где  $AC_{30}$  – предел прочности  $R_{\text{сж}}$ , МПа, образца, испытанного после нахождения в агрессивной среде 1N-го водного раствора сульфата натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в течение 30 суток;  $B_{30}$  – предел прочности  $R_{\text{сж}}$ , МПа, образца, испытанного после нахождения в водной среде в течение 30 суток. Данные расчетов КС сведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения коэффициентов снижения прочности исследуемых составов

Состав	1	2	3	4	5	6	7
КС	0,97	0,90	1,14	0,93	0,95	0,92	0,96

Оценка сульфатостойкости образцов тампонажных растворов (рис. 3, а–з) проводилась в возрасте 30 суток по внешним признакам и показала наличие: незначительного изменения линейных размеров образцов у 3-го состава. У образцов состава 3 (рис. 2, а) были замечены незначительные «высолы» на поверхности граней, свидетельствующие о процессах карбонизации. У остальных составов наблюдались: шелушение поверхности, скол граней и дефекты цементного камня, связанного с образованием трещин (рис. 2, б–з).

Наибольшие разрушения были замечены у контрольных образцов 1 и 2 составов без добавок. По результатам внешнего осмотра можно сделать вывод, что составы 1 и 2 наиболее подвержены коррозии. Количественная оценка скорости сульфатной коррозии образцов тампонажных растворов проводилась на основании результатов титрования по поглощению ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  (рис. 4). Установлено, что во всех случаях скорость снижается с увеличением возраста образца и длительности воздействия агрессивной среды, что связано с более глубокой гидратацией твердых растворов цемента. Наиболее интенсивное поглощение у всех образцов наблюдается в началь-

ной стадии испытания (20–30 сут.), затем процесс коррозии приобретает затухающий характер.

Действие добавок микрокремнезема МК-85 и УНТ «Fulvec 100» было основано на связывании свободной извести, образующейся в результате гидратации цемента, количество поглощенных ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  (рис. 4) меньше.

Составы 4, 5, 6 и 7 показали низкую скорость поглощения ввиду низкой прочности цементного камня.

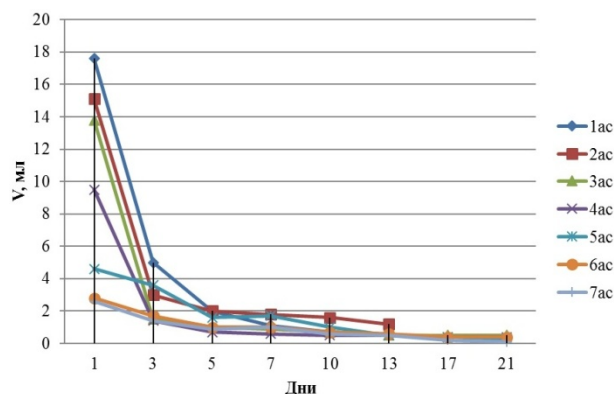


Рис. 4. Скорость поглощения ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  образцами тампонажного камня из безводного раствора  $\text{Na}_2\text{SO}_4$



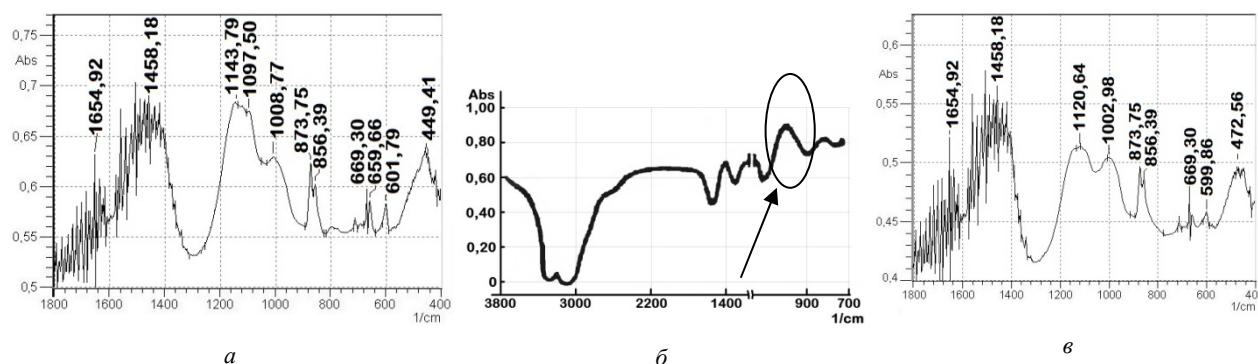


Рис. 5. ИК-спектры составов тампонажных растворов, хранившихся в агрессивной среде 1N-го водного раствора  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в течение 30 суток: а – 1-й состав; б – спектр поглощения  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$ , полученный автором [16]; в – 3-й состав

Сравнительный анализ ИК-спектров 1-го (контрольного) и 3-го составов, хранившихся в агрессивных условиях при пониженных температурах, имеют существенные различия (рис. 5, а, в). На ИК-спектре 3-го состава наблюдается увеличение деформационных колебаний гидроксильных групп  $\text{OH}^-$  на 13–14 % при частоте  $1458,18 \text{ см}^{-1}$ , кроме того, увеличивается количество связанной воды при сравнении интенсивностей отражений 1-го и 3-го составов при частоте  $1654,92 \text{ см}^{-1}$  на 36 %, что подтверждает образование новых фаз гидросиликатов кальция. Снижаются деформационные колебания в силикатах (связь  $\text{Si-O}$ ) при частоте  $699,30 \text{ см}^{-1}$  в 3 раза, что вызвано действием добавки микрокремнезема МК-85, который связывает образующийся в результате гидратации твердых растворов цемента гидроксид кальция. Данное положение подтверждено авторами [17]. При этом происходит понижение  $\text{pH}$ -среды в растворе, что является результатом действия микрокремнезема, который лимитирует условия образования высокоосновного гидросульфатоалюмината кальция. Снижаются колебания связи  $\text{SO}_4^{2-}$  в составе сульфатов и общая интенсивность пиков в 3-м составе при частотах  $1020,64 \text{ см}^{-1}$ ,  $1002,98 \text{ см}^{-1}$  по сравнению с 1-м составом, частоты  $1143,79 \text{ см}^{-1}$ ,  $1097,50 \text{ см}^{-1}$ ,  $1008,77 \text{ см}^{-1}$ . В 3-м составе образуется вторичный этtringит, который не разрушает структуру цементного камня, о чем свидетельствуют данные микроструктуры (рис. 2, а, рис. 3, в). Анализ ИК-спектра 1-го состава в области частот  $1100\text{--}1050 \text{ см}^{-1}$  показывает формирование первичного этtringита, который фиксируется «дуплетом» в указанной области частот со значениями  $1143,79 \text{ см}^{-1}$ ,  $1097,50 \text{ см}^{-1}$ . Подобные исследования цементного камня с образованием в нем этtringита были проведены В. С. Горшковым [18] (рис. 5, б, отмечено стрелочкой), где были зафиксированы отражения в этой же области частот. Этtringит разрушает структуру 1-го образца и снижает его прочность (рис. 2, б, рис. 1, б).

### Выводы

Наилучшие свойства показал состав 3 с содержанием УНТ «Fulvec 100» в количестве 0,0025 части от массы вяжущего и микрокремнезема МК-85 – 0,05 части от массы вяжущего. Механизм действия добавок заключается в том, что микрокремнезем ввиду

своей высокой пуццолановой активности связывает образующийся гидроксид кальция, исключая условия образования первичного этtringита, добавка УНТ «Fulvec 100» обладает эффектом «самозалечивания», благодаря которому трещины в цементном камне армируются, а поры заполняются продуктами гидратации. Происходит повышение средней плотности образцов, которые сохраняют прочность после испытаний в агрессивной среде при пониженных температурах ( $\geq 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ). У образцов этого состава снижается водопоглощение и повышается коррозионная стойкость.

Таким образом, введение вышеперечисленных добавок приводит к повышению сульфатостойкости тампонажных растворов. Комплексное действие УНТ «Fulvec 100» и МК-85 позволяет улучшить физико-механические свойства тампонажных растворов. Рецептура состава 3 может быть рекомендована для применения в условиях пониженных температур ( $\geq 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

### Библиографические ссылки

1. Батяновский Э. И., Голубев Н. М., Бабицкий В. В. и др. Технология и методы зимнего монолитного и объектного бетонирования : учеб. пособие. – М. : Изд-во АСВ, 2009. – 232 с.
2. Головнев С. Г., Красный Ю. М., Красный Д. Ю. Производство работ в зимних условиях. Обеспечение качества и эффективность : учеб. пособие. – М. : Инфра-Инженерия, 2012. – 336 с.
3. Ахмедов И. Н. Основы физики бетона. – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с. : ил.
4. Миронов С. А. Теория и методы зимнего бетонирования. – М. : Стройиздат, 1975. – 700 с.
5. Mehta P. K. Sulfate attack on concrete – A critical review // Materials Science of Concrete III, American Ceramic Society, Westerville, OH, 1993. – P. 105–130.
6. Stark J., Wicht B. Dauerhaftigkeit von Beton: Der Baustoff als Werkstoff / F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität, Weimar. – Basel; Boston; Berlin: Birkhäuser, 2001. – 340 p.
7. Штарк Й., Вихт Б. Долговечность бетона. – 1-е изд-е / пер. с нем. РИА Квинтет. – 2004. – 295 с.
8. Федосов С. В., Базанов С. М. Сульфатная коррозия бетона. – М. : Изд-во АСВ, 2003. – 193 с.
9. Соколов В. Е. О сульфатостойкости тампонажных растворов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1986. – № 5. – С. 21–24.
10. Турчин В. В., Юдина Л. В., Ибатуллина А. Р. и др. Повышение сульфатостойкости цементосодержащих ком-

позиций вследствие кристаллизации наночастиц // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2 (20). – С. 173–180.

11. Горшков В. С., Савельев В. Г., Абакумов А. В. Вяжущие, керамика и стеклокристаллические материалы: Структура и свойства: справочное пособие. – М.: Стройиздат, 1994. – 584 с.

12. Штарк Й., Вихт Б. Долговечность бетона. – 1-е изд-е / пер. с нем. РИА Квинтет. – 2004. – 295 с.

13. Рояк Г. С., Грановская, И. В., Тарасова, А. Ю. и др. Бетон для транспортного строительства // ALITinform: Цемент. Бетон. – Сухие смеси. – 2010. – № 4-5 (16). – С. 46–3.

14. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. – М.: АСВ, 1998. – 701 с.

15. Турчин В. В., Юдина Л. В., Ибатуллина А. Р. и др. Повышение сульфатостойкости цементосодержащих композиций вследствие кристаллизации наночастиц // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2 (20). – С. 173–180.

16. Горшков В. С., Савельев В. Г., Абакумов А. В. Вяжущие, керамика и стеклокристаллические материалы: Структура и свойства: справочное пособие. – М.: Стройиздат, 1994. – 584 с.

17. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in concrete? A review // Construction & building materials. – 2010. – № 24. – P. 2060–2071.

18. Горшков В. С., Савельев В. Г., Абакумов А. В. Вяжущие, керамика и стеклокристаллические материалы: Структура и свойства: справочное пособие. – М.: Стройиздат, 1994. – 584 с.

\*\*\*

A. N. Gumenyuk, Student, Kalashnikov ISTU

T. N. Ivanova, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU

D. V. Agaev, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU

P. A. Taibakhtina, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU

V. V. Turchin, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

S. V. Sychugov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

L. V. Yudina, PhD in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

#### Research of the Sulphate Resistance of Cement-Sand Grouts Containing Silica-Fume and Carbon Nano-Tubes Additives Under Low Temperature Conditions

*The influence of carbon nanotubes and silica-fume to the sulphate resistance of cement-sand grouts under the standard (20 °C) and low temperature (≤5 °C) conditions is investigated. It has been established that at the age of 30 days the additive of carbon nanotubes "Fulvec 100" with silica-fume "SF-85" allows for keeping the corrosion resistance of cement-sand grout within aggressive media at standard and low temperature conditions.*

*Silica-fume absorbs the calcium hydroxide as a result of hydration process of cement solid solutions and carbon nanotubes create the "reinforcing" effect. This is a mechanism of complex additive action.*

*Silica-fume excludes the formation of prime ettringite and provides the formation of C-S-H (I) phases. It has been confirmed with IR analysis. Carbon nanotubes fill the pore spaces acting as centers of crystal formation with the C-S-H (I) phases absorbed on their surfaces. The additives increase the density of the cement stone, and the check samples are not destructed in aggressive media.*

*The optimal concentrations of silica-fume and carbon nanotubes in formation of grout are 0.05 and 0.0025 weight per volume accordingly. The addition of silica fume boosts the technological properties of grout, such as the composition homogeneity and it excludes the demixture of mortar at keeping the required consistency.*

**Keywords:** corrosion resistance, silica-fume, carbon nanotubes, grouts.

Получено: 10.02.17