

## Совершенствование технологии тампонажа закрепных пустот

*Д. А. Леонова*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** Способом закрепления грунтов является инъекционное заполнение пустот, которое производят вяжущими материалами - цементами, глинами, битумами и т.д., а в качестве инертных наполнителей используют песок, опилки, суглинки, суспензии. Улучшить качество цементных композитных растворов можно за счет использования армирующих добавок, что в последующем обеспечит высокую степень надежности, безопасную эксплуатацию объектов. В работе рассмотрена возможность вовлечения нанодобавок в тампонажные композиции, такие, как алюмосиликаты, в частности, бемит. Проведены исследования процессов твердения композитных растворов в присутствии бентонита марки П1Т1 с различным содержанием бемита. Определена концентрация бемита, при которой скорость твердения композитного раствора максимальна. С целью цементосбережения исследовали влияние поверхностно-активного вещества на прочность композитного раствора. Установлено, что 20% введение поверхностно-активного вещества в композитные раствор дает прочность, практически совпадающую с нулевым образцом.

**Ключевые слова:** безопасная эксплуатация, тампонажные композиции, бемит, поверхностно-активные вещества, прочность, структурообразование, оптимальная концентрация, наносистема, модификатор, цемент.

Давно известна технология закрепления грунтов - инъекционное заполнение пустот. Данная рецептура позволяет сокращать притоки воды в выработку, увеличивать стойкость массива и обеспечивать высокую степень надежности и безопасную эксплуатацию, а также предотвращать угрозу разрушения, тяжелые экологические последствия, людские потери и тот ущерб, который может оказаться больше, чем затраты на строительство. Закрепление обводненных пород производят вяжущими материалами - цементами, глинами, битумами, а в качестве инертных наполнителей используют песок, опилки, суглинки, супеси и др. [1]. Формирование высококачественной структуры цементных бетонов решит задачу стабилизации грунта, которая определяется свойствами вяжущего (химического, и фазово-минералогического состава, тонкости помола, активности) и наполнителя (размер зерен, гранулометрический состав). Для

---

достижения необходимого результата (укрепления грунтов) могут использоваться мелкодисперсные цементы, силикатные и полимерные смолы, в том числе вспененные. Трансформация цементных систем поверхностно-активными веществами (ПАВ) считается одним из наиболее действенных направлений химизации в современном строительстве. Введение ПАВ благоприятно воздействует на составление структуры и технологические качества раствора: крепость, деформируемость, долговечность. Подобное воздействие позволяет им быть модификаторами цементных композитов. Однако введение ПАВ в композитный раствор уменьшает прочность цементного камня (что обусловлено слоем, непосредственно связанным с гидратирующейся поверхностью), но уменьшает расход цемента [2].

Внедрение нанотехнологий позволило поднять строительную отрасль на новую ступень развития. Б.В. Гусевым установлено, что введение наночастиц в бетон увеличивает устойчивость к агрессивным средам и механическим воздействиям [3, 4].

Улучшить качество цементных композитных растворов можно за счет использования армирующих добавок, с различными механизмами действия. Это может быть аллотропная модификация углерода- углеродные нанотрубки (УНТ). Такие модификаторы в растворе меняют структуру, формируют новообразования кристаллогидратов, улучшают механические показатели. Образование кристаллогидратов ускоряется, и также увеличивается скорость роста прочности цементного камня. Использование таких нанотрубок [3] приведет к увеличению прочности. Так, внедрение нанотрубок с длиной от одного до пятнадцати микрометров и внешним диаметром от десяти до пятнадцати нанометров в количестве 0,006% приводило к существенному увеличению прочности [3].

---

И.А. Пудовым изучены механизмы взаимодействия УНТ в водном растворе ПАВ [5].

Был предложен способ тонкого измельчения УНТ, что в дальнейшем обеспечивало повышение рабочих качеств бетона. Данная методика тонкого дробления УНТ в водном растворе ПАВ основана на эффекте гидродинамической кавитации и диспергирования УНТ. Данный процесс осуществляется в роторных смесителях, обладающих высокоскоростными характеристиками.

Иногда ПАВ измельчают вместе с цементом и другими вяжущими. ПАВ покрывают эти составные элементы слоем молекул, что приводит к локализации электрических зарядов на поверхности частиц, и понижению поверхностной энергии разрушаемого тела. Прекращается налипание материала на мелющие тела и пропадает эффект склеивания небольших элементов в более крупные частицы. Т.е. ПАВ являются хорошими диспергаторами [6, 7].

Целью настоящей работы является создание инъекционного вспененного раствора, модифицированного бентонитом, устойчивого к водоотделению, имеющего достаточную прочность и низкий коэффициент фильтрации. Его использование даст высокую степень безопасности при эксплуатации построенных объектов.

На первом этапе согласно [2, 7] были разработаны вспененные инъекционные композитные растворы на основе бентонита-аскангель (Грузия) и стабилизатора. В качестве пенообразователя было выбрано неионогенное поверхностно-активное вещество ОП-10, стабилизатор - щелочная модификация крахмала. Отрицательным свойством разработанной технологии являлась недостаточная прочность. Внедрение ПАВ и стабилизатора в КР уменьшило прочность приблизительно на 30%, по сравнению с контрольным образцом [2].

---

На втором этапе проводили исследования с инъекционными вспененными растворами на основе нанодобавок. В качестве последних, использовали бемит. Ранее проводились исследования по влиянию бемита на прочность композитных растворов [7 - 9].

### Методы и материалы

Резюмируя результаты ранее проведенных исследований, проанализировали возможность использования бемита в качестве модификатора композитного раствора (КР). Структурные характеристики бемита в таблице №1. Он является побочным продуктом технологии получения водорода способом гидротермального синтеза. Бемит - оксигидроксид алюминия, общая формула  $AlOOH$  [10].

В растворе также использовались: цемент, бентонит, жидкое стекло. Водоцементное соотношении в 2:1. Марка цемента - М500, марка бентонита- П1Т<sub>1</sub>А, марка жидкого стекла- "ТЕКС", изготовлено по ГОСТ 13078-81.

Таблица №1

#### Структурные характеристики бемита

Общая формула оксигидроксида алюминия	$AlOOH$
Активная удельная поверхность	55,90 м <sup>2</sup> /г
Пористость	30 %
Расчетный размер кристаллитов (FullProf)	10 нм
Размер частиц (ФЭК)	250 нм
Морфоструктурный тип	3D

Для определения данных характеристик использовали метод БЭТ.

Бемит представляет собой орторомбическую кристаллическую структуру с элементарными ячейками:  $a = 2.87$ ,  $b = 12.23$ ,  $c = 3.70$  Å (рис.1).

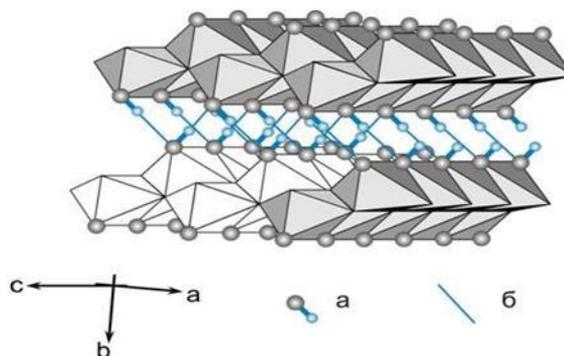


Рис.1. - Структура бемита: а-ОН; б-водородная связь

Вокруг иона алюминия находятся 6 ионов кислорода. Они расположены по вершинам неправильных октаэдров. Октаэдры связаны ребрами. На одной из осей октаэдры соединяются в двойные слои с водородными связями. Эти слои образуют зигзагообразные цепи. Кислородный анион, примыкающий к катиону водорода, связан с катионом алюминия, с другой стороны он связан с тремя катионами водорода. Достигается полное насыщение валентности иона  $O^{2-}$ . Заряд анионов  $O^{2-}$  внутри двойного слоя полностью насыщен долями валентности окружающих его четырех катионов  $Al^{3+}$  [11 - 13].

По морфоструктурной классификации наносистем бемит относится к 3D-нанокристаллическому типу веществ (3D-НКМ - нанокристаллический модификатор).

Рентгеновский анализ позволяет сделать вывод, что частицы бемита наноразмерные. Их размер 30-60 нм, размер агрегатов первичных частиц - 1-3 мкм (рис. 2). Этот модификатор обладает развитой поверхностью раздела фаз. Присутствие его может привести к получению более плотной упаковки системы и будет оказывать влияние на гидратацию.

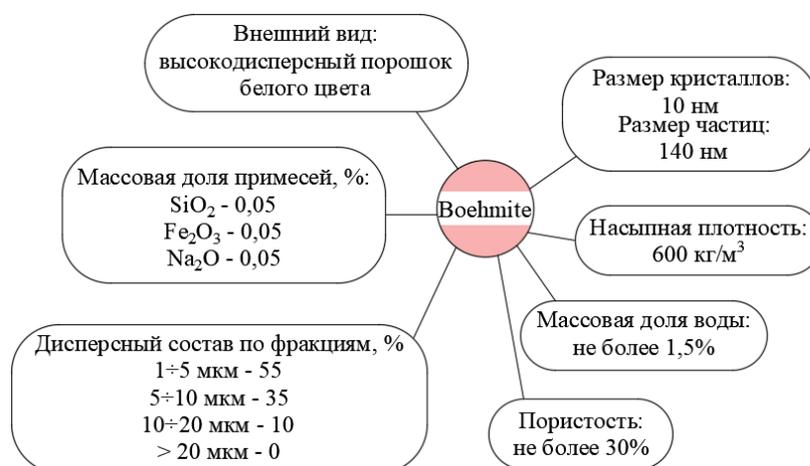


Рис. 2. - Технические характеристики бемита  
Методика экспериментальных работ

В качестве вяжущего инъекционного раствора применяется цемент. Установлено (для цемента марки М500), что удельная поверхность 450 см<sup>2</sup>/г, размер частиц от 1 до 90 мкм, а также до 88 % цемента состоят из частиц меньше 57 мкм, а около 12 % имели размер, не превышающий 2 мкм. Интегральное и дифференциальное распределение частиц по размерам цемента марки М500 представлено на рис. 3.

Кроме цемента, в составе композитного раствора содержится бентонит, назначение которого увеличение пластичности, вязкости, сопротивление к расслоению, одновременно сохраняя стабильность. Оксиды в этой глине (имеют химическое сродство с цементом) - это основа для гидравлических вяжущих веществ.

Состав бентонита П1Т1А определен методом полуколичественного рентгенофазового анализа (РФА) (табл. 2.).

Композитную систему готовили следующим образом: приготовили 5-й процентный раствор бентонита, перемешали. Далее при непрерывном перемешивании добавляли бемит, цемент, жидкое стекло. Содержание

бемита варьировали от 0,005% до 0,352% а жидкого стекла 10% к массе цемента [12, 14].

Interpolation Values... C:\Program Files'a22 32Witsch\HMNT 1.FPS					
0.000-	0.300µm=	***	0.300-	0.500µm=	2.41%
0.500-	1.000µm=	3.52%	0.500-	1.000µm=	3.52%
1.000-	2.000µm=	7.02%	2.000-	3.000µm=	5.54%
3.000-	4.000µm=	4.57%	3.000-	4.000µm=	4.57%
4.000-	5.000µm=	3.87%	5.000-	10.000µm=	13.77%
10.000-	20.000µm=	19.22%	10.000-	20.000µm=	19.22%
20.000-	30.000µm=	15.41%	30.000-	40.000µm=	10.93%
40.000-	50.000µm=	6.79%	40.000-	50.000µm=	6.79%
50.000-	60.000µm=	3.89%	60.000-	70.000µm=	2.21%
70.000-	80.000µm=	1.20%	70.000-	80.000µm=	1.20%
80.000-	90.000µm=	0.58%	90.000-	100.000µm=	0.08%
100.000-	120.000µm=	0.00%	100.000-	120.000µm=	0.00%
120.000-	150.000µm=	0.00%	150.000-	200.000µm=	0.00%

Interpolation Values... C:\Program Files'a22 32Witsch\10_90.FPV					
5.0 %	<=	1.010 µm	10.0 %	<=	1.699 µm
15.0 %	<=	2.522 µm	25.0 %	<=	4.752 µm
35.0 %	<=	8.036 µm	40.0 %	<=	10.140 µm
45.0 %	<=	12.504 µm	55.0 %	<=	17.781 µm
60.0 %	<=	20.630 µm	70.0 %	<=	26.909 µm
75.0 %	<=	30.529 µm	85.0 %	<=	39.728 µm
90.0 %	<=	46.348 µm	95.0 %	<=	56.828 µm
100.0 %	<=	99.534 µm			

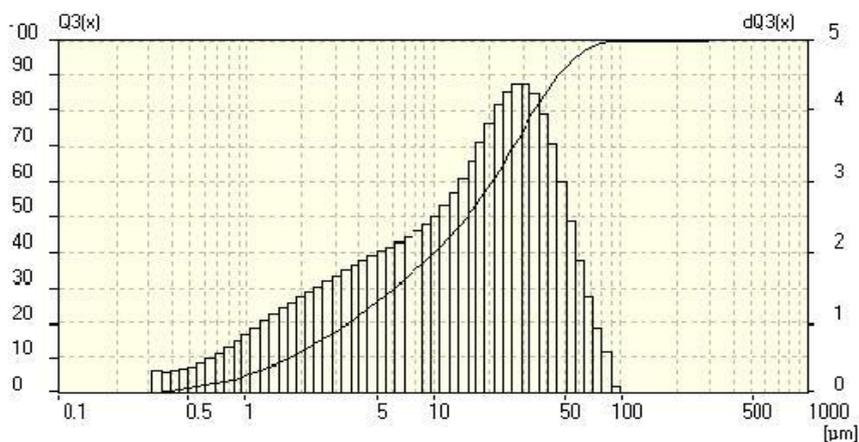


Рис. 3. - Интегральное и дифференциальное распределение частиц по размерам в образце цемента М500.

Таблица № 2

Состав бентонита П1Т1А

Кристобалит (Опал).	1-2%
Бентонит	90%
Кварц	3-4%,
Кальцит -	2-3%,
Плагиоклаз	2-3%,
Гематит	2-3%,
Монтморилонит	1-2%,

Прочностные характеристики полученных образцов определяли через 7,14 и 28 суток.

Анализ кинетики отверждения, без изменения прочности связующих композиций, был проведен на приборе Ребиндера-Гораздовского-коническом пластометре, позволяющий оценить изменение пластической прочности твердеющей массы во времени [12, 14].

В процессе испытания для каждой ступени нагружения строили графики зависимости прочности глиноцементной системы от времени хранения для различных концентраций нанотрубок к массе раствора. Было установлено, что при концентрации бемита 0,306% к массе цемента скорость набора прочности максимальна (рис.4.).

Из рис. 4 видно, что произошло повышение прочность КР на 10% при введении бемита в количестве 0,306% к массе цемента, по сравнению с образцом без добавок. Значит модификатор изменил кинетику структурообразования КР.

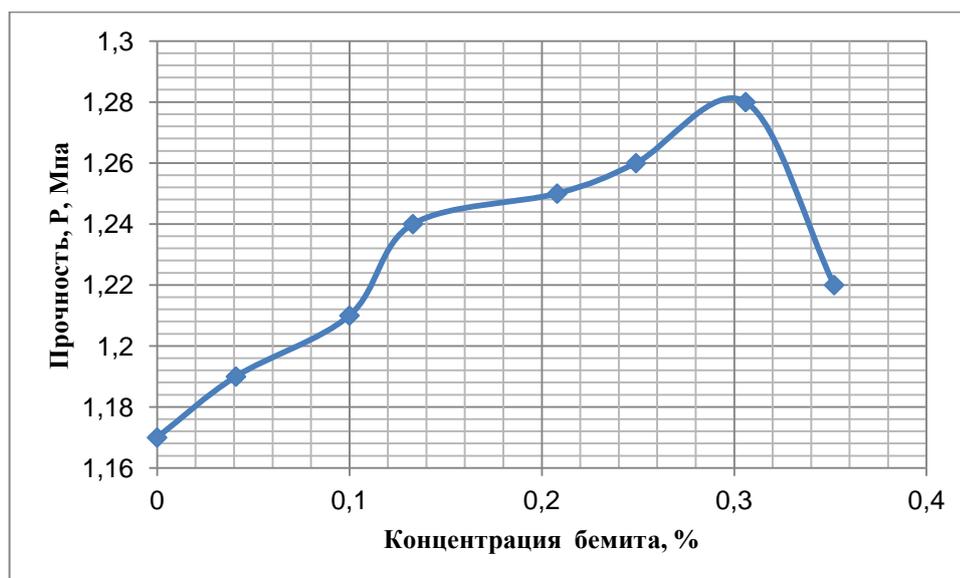


Рис.4. - Прочность КР на основе бентонита марки ПТ1 от концентрации бемита к массе цемента, %

Произошло структурирование цементной матрицы. Образовалась плотная бездефектная оболочка по поверхности твердых фаз [3]. Вероятно, введение модификатора повысило сцепление цемента и всех составляющих с поверхностью, привело к появлению новообразований, уменьшению размера трещин, увеличению числа контактных взаимодействий, и позволило сформировать пространственные каркасные ячейки в структуре цементной матрицы, модифицированной НТ-бемитом.

На третьем этапе изучали оместное влияние ПАВ и бемита на прочностные характеристики КР на основе П1Т1А.

Готовили и вспенивали раствор на основе ПАВ.

Процесс вспенивания раствора ПАВ состоял из 2 частей: формирование структуры и старением пены, что позволяло регулировать структурные характеристики вспененных глиноцементных систем [2, 7]. Для получения раствора применяли описанную выше рецептуру, только дополнительно после добавления бемита (0,306% к массе цемента) вводили ПАВ (готовили 5 %-ую суспензию).

Таблица № 3

Прочность отвержденных образцов

Марка бентонит а	Содержание ПАВ к массе раствора,%+	Прочность раствора Р, МПа					
		Продолжительность хранения, сутки					
		1	3	7	14	21	28
П1Т1А	0%	0,32	0,48	0,72	0,95	1,10	1,17
	0,30% (с бемитом)	0,37	0,59	0,78	1,03	1,17	1,23
	0,30% ( без бемита)	0,12	0,27	0,38	0,43	0,48	0,54

Прочность отвержденных образцов определяли по вышеуказанной методике. Результаты эксперимента приведены в таблице и на рисунке (таблица № 3, рис.5).

Анализ результатов показывает, что введение нанодобавки-бемит увеличивает прочность композитной системы. При введении бемита во вспененную систему прочность становится больше, чем без добавок.

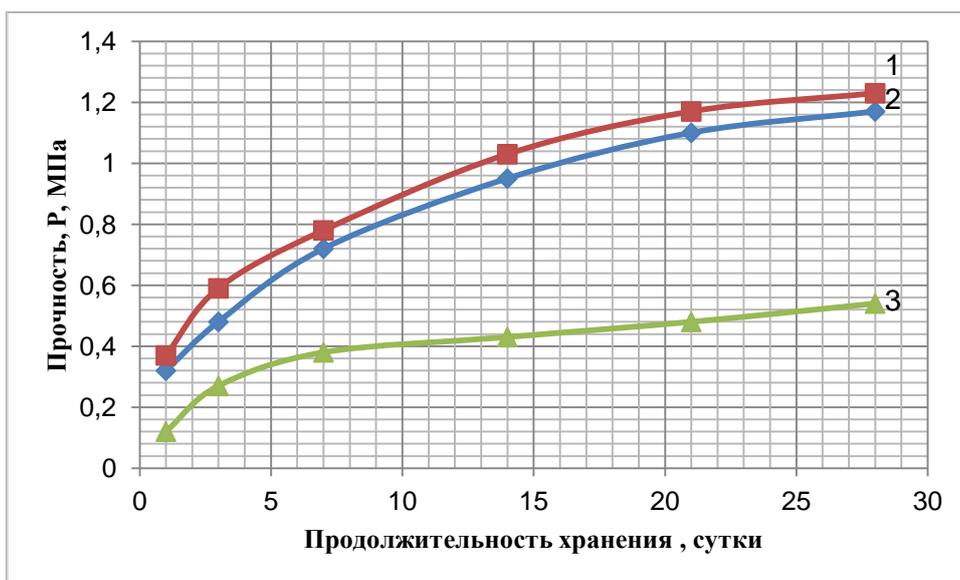


Рис.5. Прочность композитных растворов от продолжительности хранения при различном процентном содержании ПАВ и оптимальном содержании бемита к массе цемента, %

1-0,30 % ПАВ к массе раствора, 0,306% бемита к массе цемента

2-0,00% без добавок ПАВ

3-0,30% ПАВ к массе раствора

**Выводы:** По результатам исследований установлено, что нанодобавка, используемая во вспененной композитной системе приводит к увеличению прочности и практически достигает прочности контрольного образца без добавок, что позволяет сократить расход цемента.

Оптимизация структуры и свойств композитных систем, посредством введения добавок ПАВ и модификаторов – наиболее прогрессивное направление совершенствования процесса управления свойствами

цементных композитов с высокоразвитой пространственной мелкопористой и малодефектной структурой.

### Литература

1. Панфилова М.И., Зубрев Н.И., Леонова Д.А., Устинова М.В. Наномодифицированные цементно-бентонитовые композиты // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс, 2015, № 5 (27) - с. 95-98
2. Панфилова М.И. Физико-химические свойства вспененных глиноцементных систем: автореф. дис. канд. хим. наук: 02.00.04. - Тверь, 2004- с. 23
3. Гусев Б.В. Создание новых высокоэффективных материалов-одна из основных задач инженерной науки // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2009, № 2- с.17-20
4. Маева И.С., Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Бурьянов А.Ф., Пустовгар А.П. Структурирование ангидритовой матрицы нанодисперсными модифицирующими добавками // Строительные материалы, 2009, № 6 – с. 4-5
5. Пудов, И.А. Наномодификация портландцемента водными дисперсиями углеродных нанотрубок: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05. - Казань, 2013. – с. 22
6. Горбач, В.А. Получение нанодисперсных порошков кремнезема из природных гидротермальных растворов // Международный форум по нанотехнологиям Rusnanotech. – М., 2009. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)
7. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Бурьянов А.Ф., Кодолов В.И., Крутиков В.А., Фишер Ф.-Б., Керене Я. Модификация поризованных цементных матриц углеродными нанотрубками // Строительные материалы. 2009. №3. С.99-102.

8. Кожников Е.А. Оценка влияния водоцементного отношения на прочность бетона с активированным цементом // Инженерный вестник Дона, 2017, №1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2017/4074/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2017/4074/)
9. Дружинкин С.В. Немыкина Д.А. Влияние суперпластифицирующих добавок на прочность бетона // Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/50068/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/50068/)
10. Фастов И.С., Фастов С.А., Стахеев А.А. Исследование и разработка алюмосиликатных наноконтейнеров как перспективных материалов в качестве катализаторов. /Научная сессия МИФИ НИЯУ-2011, №171, т.1, с.171-171
11. Назаров В.В., Павлова-Веревкина О.Б. // Синтез и коллоидно-химические свойства гидрозолей бемита // Коллоидный журнал, 1998, Т. 60, № 6 - с. 797-807
12. Панфилова М.И., Зубрев Н.И., Ефремова С.Ю., Леонова Д.А., Леонов И.А. // Композиты на основе бемита для повышения комплексной безопасности в строительстве // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс, 2018, Т. 7, № 3 (43) - с. 157-160
13. Sakka S. Hand book of sol-gel science and technology processing characterization and applications. Boston: Kluwer academic publishers, 2005. 680 p.
14. Panfilova, M., Zubrev, N., Novoselova, O., &Efremova,S. Composite grouting mortar based on 3D-NKM - nanocrystalline inoculants // MATEC Web of Conferences, P.196. doi: 10.1051/matecconf/201819604061 2018

### References

1. Panfilova M.I., Zubrev N.I., Leonova D.A., Ustinova M.V XXI vek: itogi proshlogo i problemy` nastoyashhego plyus, 2015, № 5 (27), pp. 95-98.
-

2. Panfilova M.I. Fiziko-ximicheskie svojstva vspenenny`x glinocementny`x sistem [Physico-chemical properties of foamed clay cement systems]: avtoref. dis. kand. xim. nauk: 02.00.04. Tver`, 2004. p. 23
3. Gusev B.V. XXI vek: Stroitel`ny`ematerialy`, oborudovanie, texnologii, 2009, № 2. pp.17-20.
4. Maeva I.S., Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Bur`yanov A.F., Pustovgar A.P. Stroitel`ny`ematerialy`, 2009, № 6, pp. 4-5.
5. Pudov, I.A. Nanomodifikaciya portlandcementsa vodny`m i dispersiyami uglerodny`x nanotrubok [Nanomodification of Portland cement with aqueous dispersions of carbon nanotubes]: avtoref. dis. kand. texn. nauk: 05.23.05. Kazan`, 2013. p. 22.
6. Gorbach, V.A. Poluchenie nanodispersny`x poroshkov kremnezema iz prirodny`x gidrotermal`ny`x rastvorov [Preparation of nanodispersed silica powders from natural hydrothermalvsolnions]: Mezhdunarodny`j forum po nanotexnologiyam Rusnanotech. M., 2009. 1 e`lektron. opt. disk (SD-ROM).
7. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Bur`yanov A.F., Kodolov V.I., Krutikov V.A., Fisher F.-B., Kerene Ya. Modifikaciya porizovanny`x cementny`x matricz uglerodny`mi nanotrubkami. Stroitel`ny`e materialy`. 2009. №3. pp.99-102.
8. Kozhnikov E.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, № 1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2017/4074/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2017/4074/)
9. Druzhinkin S.V. Nemy`kina D.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/50068/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/50068/)
10. Fastov I.S., Fastov S.A., Staxeev A.A. Nauchnyasessiya MIFI NIYaU-2011, № 171, t.1, p.171.
11. Nazarov V.V., Pavlova-Verevkina O.B. Kolloidny`jzhurnal, 1998, T. 60, № 6, pp. 797-807.



12. Panfilova M.I., Zubrev N.I., Efremova S.Yu., Leonova D.A., Leonov I.A. XXI vek: itogi proshlogo i problemy` nastoyashhego plyus, 2018, T. 7, № 3 (43), pp. 157-160.
13. Sakka S. Hand book of sol-gel science and technology processing characterization and applications. Boston: Kluwer academic publishers, 2005. p. 680
14. Panfilova M., Zubrev N., Novoselova O., & Efremova S. MATEC Web of Conferences, P.196. doi: 10.1051/matecconf/201819604061 2018