## УДК 691.32

#### Ибрагимов Руслан Абдирашитович

кандидат технических наук, доцент

Email: rusmag007@yandex.ru

Потапова Людмила Ильинична

кандидат химических наук, доцент Email: ludmilapo@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Королев Евгений Валерьевич

доктор технических наук, профессор

Email: korolev@nocnt.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет Адрес организации: 190005, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4

# Исследование структурообразования активированного наномодифицированного цементного камня методом ИК-спектроскопии

#### Аннотация

Постановка задачи. Целью исследования является определение влияния углеродных нанотрубок различной структуры на фазовый состав цементного камня методом ИК-спектроскопии, полученного традиционным способом и активацией в аппарате вихревого слоя.

Результаты. По анализу полученных спектрограмм выявлено, что модификация цементного камня углеродными нанотрубками, полученного из портландцемента, активированного в аппарате вихревого слоя, приводит к повышению количества силикатной фазы портландцемента (на 12-39 %), что подтверждается снижением количества портландита в данных составах на 8 % по сравнению с контрольным составом. Кроме того, модификация углеродными нанотрубками приводит к снижению содержания группы гидросульфоалюминатов кальция на 21-23 % в составах цементного камня, полученных без активации. Активация портландцемента в аппарате вихревого слоя совместно с углеродными нанотрубками не способствует снижению количества гидросульфоалюминатов кальция, по сравнению с немодифицированным составом, полученным активацией.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что впервые предложено диспергировать углеродные нанотрубки в исходном портландцементе путем их совестной активации в аппарате вихревого слоя. Данный способ позволяет повысить содержание силикатной фазы по сравнению с традиционным введением углеродных нанотрубок, а также физико-механические свойства модифицированного цементного камня.

Ключевые слова: активация, углеродные нанотрубки, ИК-спектр, модификация

Для цитирования: Ибрагимов Р. А., Потапова Л. И., Королев Е. В. Исследование структурообразования активированного наномодифицированного цементного камня методом ИК-спектроскопии. // Известия КГАСУ. 2021. № 3 (57). С. 41–49. DOI: 10.52409/20731523\_2021\_3\_41.

#### 1. Введение

Модификация строительных материалов различного рода химическими добавками, в том числе наноразмерного типа, активными минеральными добавками имеет огромное значение в практике их производства [1].

Введение углеродных нанотрубок (УНТ) в строительные композиты позволяет повысить их физико-механические свойства, трещиностойкость [2-4]. Однако, одной из главнейших проблем модификации УНТ – равномерное распределение в объеме строительного композита [5-6].

Авторами в статье [7] дана оценка эффективности диспергирования углеродных первичных наноразмерных материалов в воздушной дисперсии портландцемента и

пластификатора посредством обработки в аппарате вихревого слоя (ABC). В то же время отсутствуют данные о структурообразовании таких систем.

Одним из эффективных методов оценки параметров структурообразования является метод ИК-спектроскопии. Так, данным методом в работе [8] дана оценка эффективности добавок наноразмерного масштаба на процессы структурообразования модифицированного материала. Установлено, что модификация комплексным наноразмерным модификатором «BisNanoActivus» приводит к повышению количества активных центров на поверхности дисперсных фаз.

В работе [9] методом ИК-спектроскопии определена степень термического поражения бетонов, подвергнутых воздействию температур в интервале 200-800 °С.

Авторами [10] проведены исследования по идентификации некоторых фаз цементного камня методом ИК-спектроскопии при модифицировании портландцемента частицами микроразмерных гидросиликатов бария. Согласно полученным данным наблюдается увеличение содержания гидросиликатов кальция и уменьшение количества портландита в модифицированных составах.

Кроме того, в работе [11] методом ИК-спектроскопии показано влияние добавки СП-2ВУ на изменение структуры бетонных композиций. Установлено, что модификация добавкой СП-2ВУ приводит к формированию более упорядоченной и стабильной структуры цементного камня.

Химическое взаимодействие компонентов комплексной добавки из суперпластификатора на основе эфира поликарбоксилата и органосиланов с глинистыми минералами установлено с помощью ИК-спектроскопии [12].

ИК-спектроскопия позволяет установить влияние гидратирующих кристаллических и аморфных новообразований на структурообразование цементного камня, идентифицировать кристаллические фазы как контрольных составов, так и исследуемых.

Целью данного исследования является исследование структурообразования активированного наномодифицированного цементного камня методом ИКспектроскопии.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. изучить химический состав образцов цементного камня методом ИКспектроскопии, полученных традиционным способом и активированных в аппарате вихревого слоя;

2. изучить влияние УНТ на фазовый состав цементного камня, полученным активацией в АВС.

#### 2. Материалы и методы

Для исследований использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5 Б/ПЦ 500-Д0-Н Новотроицкого цементного завода, соответствующего требованиям ГОСТ 31108-2016 (далее – ПЦ). Химический состав использованного портландцемента приведен в табл. 1.

Таблица 1

-							
Химический состав	CaO	SiO <sub>2</sub>	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	MgO	$SO_3$	Alkalis
Содержание, %	65,2	22,55	4,75	4,7	1,73	0,21	0,62

Химический состав использованного портландцемента

Для исследований применялись углеродные нанотрубки: «TUBALL<sup>TM</sup>» – однослойные углеродные нанотрубки производства компании «OCSiAl» (удельная поверхность 500-1000 м<sup>2</sup>/г) и «Graphistrength» – многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ) производства компании «Arkema».

Для получения наномодифицированной добавки агломераты УНТ измельчались в среде изопропилового спирта с помощью ультразвукового диспергатора марки 1-0,063/22 с выходной мощностью 63 Вт и рабочей частотой 22 кГц. Технология диспергации состояла в том, что в изопропиловый спирт вводили УНТ, затем в ультразвуковом диспергаторе производили приготовление суспензии. Продолжительность ультразвукового диспергирования составляла 5-7 мин. Изопропиловый спирт применялся

с целью функционализации поверхности углеродной нанотрубки путем прививки карбоксильных групп, которая меняет природу их поверхности с гидрофобной на гидрофильную.

Распределение частиц УНТ по размерам приводится в табл. 2.

Таблица 2

	Доля частиц УНТ, %			
диапазон размеров, мкм	$TUBALL^{TM}$	Graphistrength		
1-10	0,1	0,2		
10-100	34	8,5		
100-1000	65,7	90,8		
1-3	0,2	0,5		

#### Распределение частиц УНТ по размерам

Обработку портландцемента производили в аппарате вихревого слоя модель 297, производитель ООО «Регионметтранс». В работе [13] приводятся данные по основным конструктивным элементам аппарата вихревого слоя (ABC) и режимам его работы.

Диспергацию расчетного количества УНТ проводили в аппарате вихревого слоя совместно с портландцементом в соответствии с методикой, представленной в работе [14]. Время обработки в АВС составило 5 минут. Для исследований образцов методом ИК-спектроскопии изготавливались кубы размером  $2 \times 2 \times 2$  см из цементного теста, которые твердели в течении 28 суток в нормально-влажностных условиях. Содержание углеродных нанотрубок в исследуемых составах составило 0,005 % от массы цемента.

Регистрация ИК-спектров образцов производилась на Фурье ИК-спектрофотометре фирмы Perkin-Elmer, модель Spectrum 65, с помощью приставки НПВО Miracle ATR (кристалл ZnSe) в области 4000-600 см-1, как правило, при 30 сканах. Запись и вычитание фонового спектра производилась автоматически. Изучаемые образцы предварительно измельчались в агатовой ступке до частиц микронного размера, после чего образовавшийся порошок прижимался к кристаллу НПВО специальным прижимом, входящим в комплект приставки. После регистрации автоматически осуществлялась НПВО-коррекция и сохранение спектра.

#### 3. Результаты

Спектрограмма исходных образцов УНТ представлена на рис. 1.



(иллюстрация авторов)

Спектрограммы образцов цементного камня, полученных модификацией УНТ, представлены на рис. 2.

Количественный состав фаз можно анализировать по площадям отражения при одинаковой длине волны. Уменьшение или увеличение площади под наблюдаемой полосой отражения может свидетельствовать об изменении фазового состава гидратируемого цементного камня. Для сравнительной оценки и анализа количества образующихся гидратных фаз цементного камня, полученного как традиционным способом, так и посредством обработки в АВС проведены дополнительные исследования методом ИК-спектроскопии. Обработанные данные представлены в табл. 3.

ИК-спектрограммы образцов цементного камня, полученных активацией портландцемента в АВС совместно с УНТ представлены на рис. 3. Рассчитанные аномалии по данным рис. 3 представлены в табл. 4.



Рис. 2. Спектрограммы образцов цементного камня: 1 – состав без добавок; 2 – состав, модифицированный УНТ TUBALL; 3 – состав, модифицированный УНТ Graphistrength (иллюстрация авторов)

Таблица З	
-----------	--

Площади аномалий в соответствии с рис. 2

N₂	Hamkeyeperine	Волновое число, см <sup>-1</sup>						
состава	паименование	3642	3400	1415	1102	950	874	
1	Состав без добавок	0,12	5,11	8,34	0,51	3,62	0,48	
2	Состав, модифицированный УНТ TUBALL	0,11	3,14	7,71	0,75	2,84	0,51	
3	Состав, модифицированный УНТ Graphistrength	0,11	3,43	6,86	0,71	2,79	0,58	



Рис. 3. Спектрограммы образцов цементного камня, полученного активацией портландцемента в ABC: 1 – состав без добавок; 2 – состав, модифицированный УНТ TUBALL; 3 – состав, модифицированный УНТ Graphistrength (иллюстрация авторов)

Таблица 4

Площади аномалий в соответствии с рис. 3

No coctano	Наименорацие	Волновое число, см <sup>-1</sup>						
Nº COCTABA	Паименование	3642	3400	1415	1105	950	874	
4	Состав без добавок	0,13	4,94	11,42	0,71	2,83	0,55	
5	Состав, модифицированный УНТ TUBALL	0,12	4,85	8,66	0,62	2,72	0,58	
6	Состав, модифицированный УНТ Graphistrength	0,13	4,98	9,56	0,91	2,74	0,83	

# 4. Обсуждение

Химический состав продуктов гидратации исследуемых образцов цементного камня, полученных различными способами, имеют отклики при 3642; 3400; 1415; 1102; 950; 874 см<sup>-1</sup>.

Полоса поглощения при 3642 см<sup>-1</sup> вызвана колебаниями ОН-групп и идентифицирует гидросиликаты кальция различной структуры (портландит, ксонолит и другие гидросиликаты аналогичной структуры). Количество портландита в составах цементного камня с УНТ, полученных без активации, уменьшается на 8 %. Модификация цементного камня УНТ TUBALL и активация в АВС также снижает количество портландита на 8 %, по сравнению с немодифицированным составом. Модификация УНТ Graphistrength не оказывает влияния на снижение количества портландита (состав № 6 в табл.4).

Наличие аномалий при отражениях 1400-1600 см<sup>-1</sup>, а также широкая полоса спектра в области 3400-3500 см<sup>-1</sup> свидетельствует о наличии субмикрокристаллов гидросиликатов тоберморитоподобной структуры [15]. Количество данных гидросиликатов в составах № 2 и № 3 (табл. 3) уменьшается по сравнению с контрольным составом, при этом активация портландцемента совместно с УНТ в АВС не уменьшает количество гидросиликатов тоберморитоподобной структуры (составы № 4-6 табл. 4).

Более четкая разрешенность спектра в данной области указывает на более высокую степень закристаллизованности указанных гидросиликатов в составах: № 3, № 6.

Полосы поглощения при 1415-1473 см<sup>-1</sup> свидетельствуют о колебаниях ОН-групп в вершинах кремнекислородных тетраэдров, либо принадлежат карбонату кальция, либо могут свидетельствовать о присутствии обоих компонентов [16]. Введение УНТ при различных способах получения цементного камня незначительно уменьшает количество силикатной фазы по сравнению с составами без добавок. При этом активация портландцемента в ABC способствует образованию силикатной фазы в большем количестве, чем при традиционном получении цементных составов (на 12-39 %).

Содержание гидросиликатов кальция двухмерной структуры и одномерных в виде цепей v(SiO), наблюдаемое при полосах поглощения 1000-1100 см<sup>-1</sup> увеличивается в составах, модифицированных УНТ и полученных традиционным образом (на 39 % при модификации УНТ Graphistrength, и на 47 % при модификации УНТ TUBALL). При активации портландцемента в ABC введение УНТ TUBALL вызывает снижение гидросиликатов кальция двухмерной структуры, а введение УНТ Graphistrength – их повышение на 28 %, при этом в контрольном составе, полученном активацией, данных гидросиликатов больше на 39 % чем в составе, полученном без активации.

Валентные колебания Si(OH), а также группы гидросульфоалюминатов кальция происходит при 950 см<sup>-1</sup> [16]. При модификации цементного камня УНТ происходит снижение интенсивности указанной полосы отражения, следовательно, модификация УНТ приводит к снижению содержания группы ГСАК на 21-23 % в составах, полученных без активации. Активация портландцемента в аппарате вихревого слоя совместно с углеродными нанотрубками не способствует снижению количества ГСАК, по сравнению с составом, полученным активацией, но без исследуемых добавок.

Слабые отражения при 874 см<sup>-1</sup> характерны для –(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)-групп, то есть силикатной фазы [17]. Введение УНТ несущественно увеличивает количество силикатной фазы, имеющей –(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)-группы. Так, модификация цементного камня исследуемыми УНТ увеличивает количество данной силикатной фазы на 6-21 % у неактивированных составов, и на 5-51 % у составов, полученных активацией в АВС. Наибольшее увеличение данной фазы наблюдается у состава № 6 (табл. 4).

# 5. Заключение

1. Исследован химический состав цементного камня методом ИК-спектроскопии, полученным как традиционным способом, так и активацией в АВС.

2. Модификация цементного камня УНТ, полученного из портландцемента, активированного в АВС, приводит к повышению количества силикатной фазы портландцемента (на 12-39 %), что подтверждается снижением количества портландита в данных составах на 8 % по сравнению с контрольным составом.

3. Введение УНТ позволяет повысить содержание гидросиликатов кальция двухмерной структуры на 20-28 % в зависимости от способа получения цементного камня, кроме УНТ TUBALL. Кроме того, введение УНТ несущественно увеличивает содержание силикатной фазы, имеющей –(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)-группы.

4. Модификация УНТ приводит к снижению содержания группы ГСАК на 21-23 % в составах цементного камня, полученных без активации. Активация портландцемента в аппарате вихревого слоя совместно с углеродными нанотрубками не способствует снижению количества ГСАК, по сравнению с немодифицированным составом, полученным активацией.

5. Для повышения степени эффективности влияния углеродных нанотрубок на структурообразование строительных композитов на основе минеральных вяжущих (в частности, портландцемента) необходим поиск новых технологических решений их введения в минерально-вяжущие системы, повышение их гидрофильности посредством функционализации, определение эффективных пластификаторов, обеспечивающих получение высокодисперсных суспензий УНТ и незначительное «отравление» вяжущего, а также диспергирование и активацию в эффективных помольных агрегатах.

# Список библиографических ссылок

- 1. Изотов В. С., Соколова Ю. А. Химические добавки для модификации бетона. М. : Палеотип, 2009. 244 с.
- Nochaiya T., Chaipanich A. Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials // Appl. Surf. Sci. 2011. Vol. 257 (6). P. 1941–1945. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.09.030.
- Konsta-Gdoutos M. S., Metaxa Z. S., Shah S. P. Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement-based materials // Cem. Concr. Res. 2010. Vol. 40 (7). P. 1052–1059. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.02.015.
- Li G. Y., Wang P. M., Zhao X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes // Carbon. 2015. Vol. 43 (6). P. 1239-1248. DOI: 10.1016/j.carbon.2004.12.017.
- Stephens C., Brown L., Sanchez F. Quantification of the re-agglomeration of carbon nanofiber aqueous dispersion in cement pastes and effect on the early age flexural response // Carbon. 2016. Vol. 107. P. 482–500. DOI: 10.1016/j.carbon.2016.05.076.
- Brown L., Sanchez F. Influence of carbon nanofiber clustering on the chemomechanical behavior of cement pastes // Cem. Concr. Compos. 2016. Vol. 65. P. 101–109. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.008.
- 7. Ибрагимов Р. А., Королев Е. В. Прочность композитов на основе модифицированного портландцемента, активированного в аппарате вихревого слоя // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 1. С. 35-41. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.35-41.
- Иноземцев А. С. Методы ИК- и КР-спектроскопии для исследования процессов структурообразования наномодифицированных высокопрочных легких бетонов: в сб.: Наука и технологии: шаг в будущее. М.: Материалы X Международной научнопрактической конференции. 2014. С. 26-29.
- 9. Зырянов В. С., Кузнецов К. Л., Шеков А. А. Определение степени термического поражения бетонов на основе цемента ОАО «Ангарскцемент» методом ИКспектроскопии // Вестник Восточно-Сибирского института Министерства внутренних дел России. 2015. № 3 (74). С. 36-42.
- 10.Гришина А. Н., Королев Е. В. Исследование химического состава цементного камня, модифицированного гидросиликатами бария // Вестник МГСУ. 2015. № 10. С. 66-74.
- 11.Виноградова Л. А., Русакова Ю. П. ИК-спектры суперпластификатора СП-2ВУ и цементного раствора с добавкой // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2019. Т. 81. № 1 (79). С. 289-293.

- 12.Bulanov P. E., Mavliev L. F., Vdovin E. A., Yagund E. M. The interaction between the kaolinite or bentonite clay and plasticizing surface-active agents // Magazine of Civil Engineering. 2017. № 7. P. 171–179. DOI: 10.18720/MCE.75.17.
- Mischenko M., Bokov M., Grishaev M. Activation of technological processes of materials in the device rotary electromagnetic field // Technical Sciences. 2015. Vol. 2. P. 3508-3512.
- 14.Способ приготовления бетонной смеси: пат. 2667180 Рос. Федерация. № 2017129482; заявл. 18.08.2017; опубл. 17.09.2018, Бюл. № 26. 5 с.
- 15.Краснобаева С. А., Медведева И. Н., Брыков А. С., Стафеева З. В. Свойства материалов на основе портландцемента с добавкой метакаолина МКЖЛ // Цемент и его применение. 2015. № 1. С. 50-55.
- 16.Чукин Г. Д. Химия поверхности и строение дисперсного кремнезема. М.: Типография Паладин, ООО «Принта», 2008. 172 с.
- 17. Дубровин В. К., Заславская О. М., Чесноков А. А. Механизм гидратации кристаллогидратных формовочных смесей на основе силикатов кальция // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2010. № 13 (189). С. 59-63.

## Ibragimov Ruslan Abdirashitovich

candidate of technical sciences, associate professor Email: rusmag007@yandex.ru

Potapova Lyudmila Ilinichna

candidate of chemical sciences, associate professor

Email: ludmilapo@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Korolev Evgeny Valerievich** 

doctor of Technical Sciences, Professor

Email: korolev@nocnt.ru

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

The organization address: 190005, Russia, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4

# Investigation of structure formation of activated nanomodified cement stone by IR spectroscopy

# Abstract

*Problem statement.* The aim of the study is to determine the effect of carbon nanotubes of various structures on the phase composition of a cement stone by IR spectroscopy obtained by a traditional method and by activating in a vortex layer apparatus.

*Results.* According to the analysis of the obtained spectrograms, it was revealed that the modification of cement stone with carbon nanotubes obtained from Portland cement, activated in the vortex layer apparatus, leads to an increase in the amount of the silicate phase of Portland cement (by 12-39 %), which is confirmed by a decrease in the amount of Portlandite in these compositions by 8% compared with the control composition. In addition, modification with carbon nanotubes leads to a decrease in the content of the group of calcium hydrosulfoaluminates by 21-23 % in the compositions of the cement stone obtained without activation. The activation of Portland cement in the vortex layer apparatus together with carbon nanotubes does not contribute to a decrease in the amount of calcium hydrosulfoaluminates, in comparison with the unmodified composition obtained by activation.

*Conclusions*. The significance of the results obtained for the construction industry is that for the first time it was proposed to disperse carbon nanotubes in the original Portland cement by means of their joint activation in a vortex layer apparatus. This method makes it possible to increase the content of the silicate phase in comparison with the traditional introduction of carbon nanotubes, as well as the physical and mechanical properties of the modified cement stone.

Keywords: activation, carbon nanotubes, IR spectrum, modification.

**For citation**: Ibragimov R. A., Potapova L. I., Korolev E. V. Investigation of structure formation of activated nanomodified cement stone by IR spectroscopy. Izvestiya KGASU. 2021. No. 3 (57). P. 41–49. DOI: 10.52409/20731523\_2021\_3\_41.

# References

- 1. Izotov V. S., Sokolova Yu. A. Chemical additives for concrete modification. M. : Paleotype, 2009.244 p.
- Nochaiya T., Chaipanich A. Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials // Appl. Surf. Sci. 2011. Vol. 257 (6). P. 1941–1945. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.09.030.
- Konsta-Gdoutos M. S., Metaxa Z. S., Shah S. P. Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials // Cem. Concr. Res. 2010. Vol. 40 (7). P. 1052–1059. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.02.015.
- Li G. Y., Wang P. M., Zhao X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes // Carbon. 2015. Vol. 43 (6). P. 1239-1248. DOI: 10.1016/j.carbon.2004.12.017.
- 5. Stephens C., Brown L., Sanchez F. Quantification of the re-agglomeration of carbon nanofiber aqueous dispersion in cement pastes and effect on the early age flexural response // Carbon. 2016. Vol. 107. P. 482–500. DOI: 10.1016/j.carbon.2016.05.076.
- Brown L., Sanchez F. Influence of carbon nanofiber clustering on the chemomechanical behavior of cement pastes // Cem. Concr. Compos. 2016. Vol. 65. P. 101–109. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.008.
- 7. Ibragimov R. A., Korolev E. V. Strength of composites based on modified Portland cement activated in a vortex layer apparatus // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2021. No. 1. P. 35-41. DOI: 10.33622 / 0869-7019.2021.01.35-41.
- 8. Inozemtsev A. S. Methods of IR and Raman spectroscopy for studying the processes of structure formation of nanomodified high-strength lightweight concretes: in the collection: Science and technology: a step into the future. M. : Materials of the X International Scientific and Practical Conference. 2014. P. 26-29.
- Zyryanov V. S., Kuznetsov K. L., Shekov A. A. Determination of the degree of thermal damage to concretes based on cement of JSC "Angarskcement" by the method of IR spectroscopy // Bulletin of the East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2015. No. 3 (74). P. 36-42.
- 10.Grishina A. N., Korolev E. V. Investigation of the chemical composition of cement stone modified with barium hydrosilicates // Vestnik MGSU. 2015. No. 10. P. 66-74.
- 11. Vinogradova L. A., Rusakova Yu. P. IR spectra of the superplasticizer SP-2VU and cement mortar with an additive // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2019. Vol. 81. No. 1 (79). P. 289-293.
- 12.Bulanov P. E., Mavliev L. F., Vdovin E. A., Yagund E. M. The interaction between the kaolinite or bentonite clay and plasticizing surface-active agents // Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 7. Pp. 171-179. DOI: 10.18720 / MCE.75.17
- 13.Mischenko M., Bokov M., Grishaev M. Activation of technological processes of materials in the device rotary electromagnetic field // Technical Sciences. 2015. Vol. 2. P. 3508-3512.
- 14.Method for preparing concrete mixture: US Pat. 2667180 Rus. Federation. No. 2017129482 ; app. 08/18/2017; publ. 17.09.2018, Bul. No. 26. 5 p.
- 15.Krasnobaeva S. A., Medvedeva I. N., Brykov A. S., Stafeeva Z. V. Properties of materials based on Portland cement with the addition of MKZhL metakaolin // Cement and its application. 2015. No. 1. Pp. 50-55.
- 16. Chukin G. D. Surface chemistry and structure of dispersed silica. M. : Paladin Printing House, Printa LLC, 2008. 172 p.
- 17.Dubrovin V. K., Zaslavskaya O. M., Chesnokov A. A. The mechanism of hydration of crystalline hydrate molding mixtures based on calcium silicates // Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy. 2010. No. 13 (189). P. 59-63.