

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ АКТИВАЦИЯ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ СМЕСИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

В.А. Лотов, Е.А. Сударев, В.А. Кутугин

Василий Агафонович Лотов (ORCID 0000-0002-7569-5973)

Кафедра строительных материалов и технологий, Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная, 2, Томск, Российская Федерация, 634003

E-mail: valotov@tpu.ru

Евгений Александрович Сударев (ORCID 0000-0002-5596-4048)

Научно-образовательный центр Н.М. Кижнера, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, Томск, Российская Федерация, 634050

E-mail: sudarev@tpu.ru

Виктор Александрович Кутугин (ORCID 0000-0002-6847-6385)*

Научно-исследовательская лаборатория Тугоплавких неметаллических и силикатных материалов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр-т Ленина 30, Томск, Российская Федерация, 634050

E-mail: kutugin@gmail.com*

В статье рассматривается эффективная технология получения бетона с повышенной прочностью. С этой целью предлагается производить предварительное механическое активирование цемента песком с естественной влажностью (5-8%) в энергонапряженном аппарате, который представляет собой центробежный смеситель-дезинтегратор роторного типа. В процессе перемешивания происходит гидратация цемента с образованием на поверхности зёрен цемента нанодисперсных продуктов гидратации, которые сдираются песком и поступают в смесь. Таким образом, в микрообъемах цементно-песчаной смеси происходит равномерное распределение фракции нанодисперсных частиц – высокодисперсных продуктов, предварительной гидратации цемента. Активность полученной активированной смеси при последующей гидратации определялась с помощью дифференциального микрокалориметра при водотвердом отношении (В/Т) равном 0,2. Калориметрические исследования показали, что изменение температуры цементно-песчаной смеси протекает аналогично чистому цементу при контакте с водой, но после первого индукционного периода механизм взаимодействия цемента с водой в смеси с песком существенно изменяется, что сопровождается увеличением разности температур материала в ячейках до 0,87-0,88 °С, и такая разность поддерживается в течение длительного периода времени. Это объясняется тем, что образование продуктов гидратации цемента происходит не только за счёт протекания процессов гидратации цемента, но и дополнительно при протекании химических реакций образования гидросиликатов кальция при взаимодействии активированных нанодисперсных продуктов и кварцевого песка. Приготовление бетона с применением активированной цементно-песчаной смеси с крупным заполнителем и расчётным количеством воды позволяет значительно повысить прочность бетона и другие его эксплуатационные характеристики.

Ключевые слова: бетон, прочность, дезинтеграция, предварительное смешение, нанодисперсные продукты гидратации, центробежный смеситель, цементно-песчаная матрица, активность смеси, микрокалориметрия

Для цитирования:

Лотов В.А., Сударев Е.А., Кутугин В.А. Предварительная активация цементно-песчаной смеси с целью повышения прочности бетона. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 8. С. 94–101. DOI: 10.6060/ivkkt.20226508.6596.

For citation:

Lotov V.A., Sudarev E.A., Kutugin V.A. Preliminary activation of cement-sand mixture in order to increase the strength of concrete. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 8. P. 94–101. DOI: 10.6060/ivkkt.20226508.6595.

PRELIMINARY ACTIVATION OF CEMENT-SAND MIXTURE IN ORDER TO INCREASE THE STRENGTH OF CONCRETE

V.A. Lotov, E.A. Sudarev, V.A. Kutugin

Vasily A. Lotov (ORCID 0000-0002-7569-5973)

Department of Building Materials and Technologies, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Solyanaya sq., 2, Tomsk, 634003, Russia

E-mail: valotov@tpu.ru

Evgeny A. Sudarev (ORCID 0000-0002-5596-4048)

Kizhner Research Center, National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin ave., 30, Tomsk, 634050, Russia

E-mail: sudarev@tpu.ru

Viktor A. Kutugin (ORCID 0000-0002-6847-6385)*

Laboratory of Refractory Non-Metallic and Silicate Materials, National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina ave., 30, Tomsk, 634050, Russia

E-mail: kutugin@gmail.com*

The article discusses an effective technology for producing concrete with increased strength. For this purpose, it is proposed to perform preliminary mechanical activation of cement with sand with natural humidity (5-8%) in an energized apparatus, which is a rotary-type centrifugal mixer-disintegrator. During mixing, cement hydration occurs with the formation of nanodispersed hydration products on the surface of cement grains, which are stripped off with sand and enter the mixture. Thus, in the micro-volumes of the cement-sand mixture, there is a uniform distribution of the fraction of nanodispersed particles – highly dispersed products, preliminary hydration of cement. The activity of the resulting activated mixture during subsequent hydration was determined using a differential microcalorimeter with a water-solid ratio (V/T) equal to 0.2. Calorimetric studies have shown that the temperature change in the cement-sand mixture proceeds similarly to pure cement in contact with water, but after the first induction period. The mechanism of interaction of cement with water in the sand mixture changes significantly, which is accompanied by an increase in the temperature difference of the material in the cells to 0.87-0.88 °C and this difference is maintained for a long period of time. This is explained by the fact that the formation of cement hydration products occurs not only due to the processes of cement hydration, but also additionally during the chemical reactions of the formation of calcium hydrosilicates during the interaction of activated nanodisperse products and quartz sand. The preparation of concrete using an activated cement-sand mixture with a large aggregate and an estimated amount of water can significantly increase the strength of concrete and its other performance characteristics.

Key words: concrete, strength, disintegration, pre-mixing, nanodisperse hydration products, centrifugal mixer, cement-sand matrix, mixture activity, microcalorimetry

ВВЕДЕНИЕ

Прочностные свойства бетона в значительной мере предопределяются свойствами его цементно-песчаной матрицы, которые зависят от способа приготовления бетонной смеси, зернового

состава и степени однородности цементно-песчаной смеси [1-21].

Одним из возможных путей существенного повышения прочности бетона и других его технических характеристик является выделение в отдельную технологическую операцию процесса

предварительного высокоинтенсивного перемешивания смеси цемента и увлажненного песка.

Известные в литературных источниках многочисленные способы приготовления бетонных смесей можно разделить на две большие группы. К первой группе относятся способы, связанные с применением химических добавок различной природы и варьированием последовательности внесения компонентов в бетонную смесь. Введение различных суперпластификаторов, пластификаторов, ускорителей твердения на основе органических, неорганических соединений или их сочетания позволяют достичь повышения марочной прочности бетона. Вторая группа связана с совместным помолом цемента с небольшим количеством сухого песка в шаровой мельнице. Однако существенного увеличения прочности бетона в этом случае не наблюдается, так как такое измельчение не обеспечивает появления в смеси фракции частиц нанодисперсного размера, а необходимость предварительной сушки песка только увеличивает энергозатраты технологического процесса.

Известно, что при гидратации цемента образуются продукты гидратации нанодисперсного размера. Этот факт использован в настоящей работе при предварительной активации цемента увлажненным песком в таком энергонапряженном аппарате, как центробежный смеситель-дезинтегратор роторного типа [22].

При соприкосновении цемента с влажным песком (5-8% абс.) цемент адсорбирует влагу с поверхности частиц песка и связывает ее в нанодисперсные продукты гидратации, которые конденсируются на поверхности частиц цемента и песка в виде тонкой гелеобразной пленки. Преимуществом предварительного смешения цемента и песка при приготовлении бетонной смеси в центробежных роторных аппаратах принудительного действия является то, что при поступлении цементно-песчаной смеси в смеситель формируются два встречных вихревых потока смеси, движущихся со скоростью около 40 м/с, в которых частицы цемента и песка соударяются на скорости порядка 80 м/с и измельчаются до более тонкого состояния [22]. В результате образовавшиеся на цементных частицах первичные продукты гидратации сдираются абразивными частицами песка. Это приводит к обновлению поверхности частиц цемента и к практически полному связыванию воды, содержащейся в песке. Кроме того, в результате измельчения частиц песка, в нем появляется свежобразованная поверхность, на которую осаждаются нанодисперсные продукты

гидратации цемента, обеспечивая при этом однородность цементно-песчаной смеси в высшей степени. Только интенсивное комбинированное механическое и физико-химическое воздействие на смесь влажного песка и цемента позволяет обеспечить появление в смеси частиц нанодисперсного размера, что недостижимо при помолу и смешении цемента и песка в сухом состоянии. Исходя из объединенного уравнения термодинамики $\Delta G = \Delta H - T\Delta S = P\Delta V + \sigma\Delta s + \mu\Delta n + \phi\Delta q - T\Delta S$ при внешнем воздействии на систему цемент-песок-вода в ней возможно протекание процессов, которые приведут к изменению объема системы (ΔV) при механическом воздействии ($P\Delta V$), дисперсности (Δs) при физико-химическом воздействии ($\sigma\Delta s$), количества вещества (Δn) при химическом воздействии ($\mu\Delta n$), количества электричества (Δq) при электрическом воздействии ($\phi\Delta q$), степени беспорядка S (энтропии) и температуры ($T\Delta S$). Это уравнение является теоретической базой предлагаемого способа приготовления цементно-песчаной смеси.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Бетонные образцы готовили на основе портландцемента ООО «Топкинский цемент» марки ЦЕМ I 42,5 Б (ГОСТ 31108-2016) следующего химического и минералогического состава: $SiO_2 = 21,36$; $Al_2O_3 = 5,51$; $Fe_2O_3 = 4,15$; $CaO = 67,15$; $MgO = 1,35$; $SO_3 = 1,35$; $\Delta m_{np} = 0,24$; $C_3S = 65,4$; $C_2S = 14,5$; $C_3A = 7,5$; $C_4AF = 12,4$; $CaO_{cb} = 0,20$ (мас.%), крупного заполнителя (гравий) фракции 5-20 мм (ГОСТ 8267-93), мелкого заполнителя (песок) с модулем крупности $M_{кр} = 2,4$ (ГОСТ 8736-2014) и водопроводной воды. Подвижность бетонной смеси определялась по осадке конуса (ОК) и составляла 7-9 см. Состав бетона был рассчитан на проектную марку М300 (класс В22,5).

В центробежный смеситель-дезинтегратор роторного типа подавали портландцемент и песок с абсолютной влажностью 4%. Время активации составляло 30, 60 и 120 с. Активируемую смесь дополнительно увлажняли до абсолютной влажности 8% для наиболее полного смачивания всех частиц смеси водой. Переувлажнение песка нежелательно, так как это приводит к уменьшению сыпучести смеси и к увеличению ее налипания на ротор смесителя.

Удельную поверхность исходных порошков и продуктов активации определяли с помощью двух методик: воздухопроницаемость на приборе ПСХ-2 и адсорбции жидкого азота (метод БЭТ) на приборе Quantachrome NovaWin2 (США).

Микрокалориметрические исследования активированной цементно-песчаной смеси проводились на дифференциальном микрокалориметре [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментальных испытаний образцов бетона размером (10×10×10 см) на прочность при сжатии при различных значениях водоцементного отношения (В/Ц), подвижности бетонной смеси, определяемой по осадке конуса (ОК), времени активации цемента увлажненным песком и времени перемешивания бетонной смеси приведены в табл. 1-2.

В табл. 1 представлены составы бетонных смесей на основе которых получали тяжелые бетоны, путем предварительной активации цемента увлажненным песком, используя центробежный смеситель-дезинтегратор роторного типа полупромышленной конструкции.

Таблица 1

Составы бетонных смесей
Table 1. Compositions of concrete mixtures

Проектная марка бетона	M300					
	1	2	3	4	5	6
Составы бетона	1	2	3	4	5	6
Цемент	320	320	320	320	551	551
Песок	610	610	630	630	492	492
Гравий	1255	1255	1280	1280	1186	1186
Вода	170	170	150	150	220	220
В/Ц	0,53	0,53	0,45	0,45	0,40	0,40

Перемешивание бетонной смеси, состоящей из активированной цементно-песчаной смеси, гравия и остаточного количества воды происходило в лабораторном бетоносмесителе в течение 5 мин. После чего определяли подвижность бетонной смеси, которая составила 8-9 см. Из полученной бетонной смеси формовали образцы-кубы размером 10×10×10 см и определяли после их твердения прочность при сжатии.

Результаты испытаний тяжелого бетона, полученного с использованием полупромышленной установки для активации цемента увлажненным песком, представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, максимальная прочность бетона в 28 сут. составила 65,2 МПа (состав 3), а после пропаривания 39,5 МПа (состав 3). Известный состав 5, с повышенным расходом цемента и его домолом с 3% песка, не обеспечивает существенного повышения прочности бетона. Предварительная обработка смеси цемента и влажного песка (состав 6) по предлагаемому способу позволяет достичь более высокой прочности бетона.

Прочность бетона 65,2 МПа получена для состава с расчетной прочностью М 300 с содержанием цемента 320 кг на 1 м³ бетона. Состав 6 имеет прочность 68,5 МПа при содержании цемента 551 кг на 1 м³ бетона.

Таблица 2

Результаты прочности тяжелого бетона при сжатии
Table 2. Compressive strength results of heavy concrete

Состав	Время активации цемента песком в смесителе, с	После пропаривания, МПа	После 28-суточного твердения, МПа
1	-	28,6	36,7
2	30	39,1	51,1
3	60	39,5	65,2
4	120	37,5	64,5
5	Помол цемента с 3% песка	32,4	43,5
6	60	33,7	68,5

Анализ данных в представленной таблице позволяет сделать вывод о необходимости сохранения оптимальности соотношения между цементом и песком во всех расчетных составах бетона.

Причиной повышения прочности и предполагаемый механизм протекающих процессов заключается в следующем. При перемешивании смеси цемент взаимодействует с влагой песка с образованием продуктов гидратации. Образующийся поверхностный слой продуктов первичной гидратации легко удаляется абразивными частицами песка. Как следствие, поверхность зерен цемента обновляется и вновь становится активной по отношению к диполям воды. Кроме постоянного повышения концентрации высокоактивных наноразмерных частиц продуктов гидратации в результате интенсивного механического воздействия, вероятно происходит удаление из смеси адсорбированного воздуха, с последующей заменой его молекул на молекулы воды на поверхности частиц песка. Тем самым увеличивается вероятность контакта продуктов гидратации с поверхностью частиц песка. На этих поверхностях происходит осаждение преимущественно нанодисперсных частиц продуктов гидратации цемента за счет адгезионного взаимодействия и достигается весьма равномерное распределение цемента и воды на поверхности частиц песка во всех микрообъемах цементно-песчаной смеси. Отмеченные факторы приводят к интенсификации различных процессов, в том числе процессов гидратации цемента. Экспериментально выявлено, что интенсивное и концентрированное механическое воздействие на цементно-песчаную смесь, содержащую небольшое количество воды,

сопровождается быстрым ростом температуры смеси до 45-50 °С в течение 30-60 с.

Следует отметить, что при пропаривании прочность бетона значительно ниже, чем при нормальном твердении в течение 28 сут. Ускорение процессов твердения бетона, связанное с тепловлажностной (ТВО) обработкой при температуре 80-85 °С, приводит к изменениям в его химическом составе и структуре продуктов гидратации. При повышенных температурах минералы цемента образуют гидратные соединения с пониженным количеством молекул воды, уменьшение содержания которой в гидратах сопровождается одновременно увеличением их истинной плотности. ТВО способствует увеличению размеров частиц продуктов гидратации, повышает пористость цементно-песчаной матрицы и снижает прочность бетона.

При измельчении в процессе перемешивания смеси цемента и песка в центробежном смесителе достигается более равномерное распределение влаги по объему смеси, что создает благоприятные условия при перемешивании бетонной смеси на конечной стадии при добавлении расчетного количества воды и крупного заполнителя. Образующиеся при гидратации цемента частицы первичных продуктов имеют размер до 5-10 нм, обладают огромной свободной поверхностной энергией, которая расходуется на процессы адгезии, конденсации и осаждения гидратированных частиц на поверхности частиц песка (рис. 1). Таким образом поверхностная энергия расходуется на самоорганизацию первичной структуры цементно-песчаной матрицы. Уникальным свойством образовавшейся структуры является высокое значение полной свободной поверхностной энергии (U_F), которая складывается из энергии Гиббса (единицы поверхности) и скрытой теплоты образования единицы новой поверхности:

$$U_F = \sigma + q_F = G_F + T \cdot S_F,$$

где σ – удельная свободная поверхностная энергия, $\sigma = \frac{dG}{dF}$; G_F – энергия Гиббса единицы поверхности; q_F – скрытая теплота образования единицы новой поверхности, $q_F = T \cdot S_F$; S_F – избыточная энтропия единицы поверхности.

Чем выше будет дисперсность частиц, участвующих в самоорганизации первичной структуры, тем более совершенной будет образующаяся структура. Неиспользованная на самоорганизацию поверхностная энергия сохраняется в образовавшейся структуре и будет предопределять последующее течение процессов гидратации в цементно-

песчаной матрице на более высоком энергетическом уровне.

При этом формируется однородная цементно-песчаная смесь с минимальным количеством газовых включений в формируемой цементно-песчаной матрице. Площадь удельной поверхности такой смеси после активации в течение 1 мин увеличивается с 170 до 210 м²/кг (по ПСХ-2) и с 1260 до 1480 м²/кг (по БЭТ). При перемешивании полученной смеси с крупным заполнителем и расчетным количеством воды формируется плотная цементно-песчаная матрица в составе бетона, которая после твердения бетона приобретает прочность, предопределяющую прочность всего массива бетона, а использование в композиции прочного крупного заполнителя обеспечит сохранение высокого уровня прочности бетона.

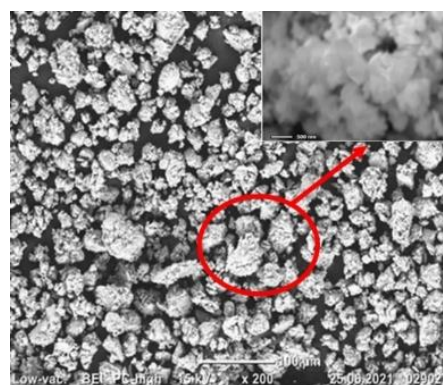


Рис. 1. Микрофотография конденсированных гидратных частиц цемента на поверхности частиц песка

Fig. 1. Micrograph of condensed hydrate cement particles on the surface of sand particles

Присутствие в цементно-песчаной матрице фракции нанодисперсных частиц, конденсирующихся на поверхности частиц песка, запускает формирование структуры цементного камня и гомогенной структуры цементно-песчаной матрицы по совершенно новому алгоритму, позволяющему поднять технологию рядового бетона на более высокий качественный уровень. Можно утверждать, что высокоинтенсивное перемешивание цемента и увлажненного песка приводит к возникновению и развитию в этой системе «золь-гель» процесса, позволяющего запустить формирование высокопрочной структуры цементно-песчаной матрицы бетона по-другому механизму [23]. При этом можно полностью отказаться от бесперспективного использования углеродных нанотрубок в технологии бетонов, а различные химические добавки, в том числе, микрокремнезем и суперпластификаторы, использовать для дальнейшего развития

предлагаемой технологии приготовления бетонных смесей. При этом следует помнить, что появление свободной, капиллярно-подвижной воды в составе песка или цементно-песчаной смеси, может полностью нейтрализовать процесс осаждения нанодисперсных частиц на поверхности частиц песка.

Активность полученной смеси при последующей гидратации определяли с помощью калориметрических исследований обработанной цементно-песчаной смеси на микрокалориметре новой конструкции [24]. Полученную смесь высушивали при 105 °С и засыпали по 1 г в калориметрические ячейки, а далее, в одну из ячеек вводилась вода в количестве 0,2 мл ($B/T = 0,2$). Изменение разности температур материала в ячейке при смачивании водой фиксировалось на компьютере. Чтобы масштабный фактор не влиял на точность записи последующих измерений, результаты измерений представлены отдельно на (рис. 2-3).

Калориметрические исследования показывают, что изменение температуры смеси протекает аналогично чистому цементу при контакте с водой, но после первого индукционного периода механизм взаимодействия цемента с водой в смеси с песком существенно изменяется, что сопровождается увеличением разности температур материала в ячейках до 0,87-0,88 °С и такая разность поддерживается в течение длительного времени.

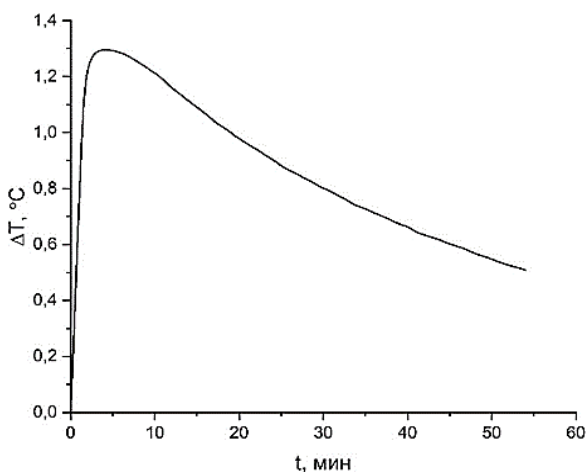


Рис. 2. Изменение температуры смеси в начальный период гидратации

Fig. 2. Change in the temperature of the mixture during the initial period of hydration

Объясняется это тем, что образование продуктов гидратации цемента происходит не только за счет протекания процессов гидратации цемента, но и дополнительно при протекании химических реакций образования гидросиликатов кальция при

взаимодействии активированных нанодисперсных продуктов и кварцевого песка.

Многочисленные исследования процесса тепловыделения цемента при контакте с водой показывают, что все основные процессы происходят в первые 7 сут. взаимодействия. В дальнейшем интенсивность и периодичность этих процессов снижается.

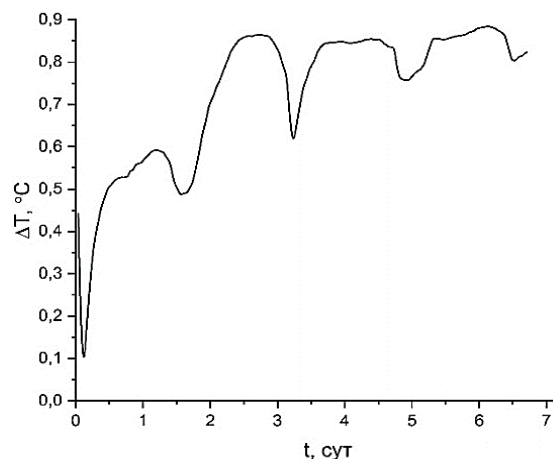


Рис. 3. Изменение температуры цементно-песчаной смеси при гидратации и твердении в течение 7 сут

Fig. 3. Temperature change in cement-sand mixture during hydration and hardening for 7 days

ВЫВОДЫ

Таким образом, использование предварительной активации цемента увлажненным песком позволяет увеличить прочность рядового бетона практически в 2 раза без применения каких-либо добавок. Применение такой технологии позволяет снизить расход цемента как минимум на 15% при производстве рядового бетона или получить высокопрочный бетон при использовании расчетного количества цемента. Можно предположить, что предварительная активация цемента влажным песком позволит более эффективно использовать лежалые цементы.

Предложенная технология приготовления бетонной смеси позволяет повысить прочность рядовых бетонов и создать высокопрочные бетоны нового поколения. Технология реализуема при выделении в отдельную технологическую стадию операции предварительного и интенсивного смешения расчетных количеств цемента и увлажненного песка. При таком воздействии на систему цемент-песок-вода, в условии отсутствия капиллярно-подвижной, свободной воды, можно обеспечить появление нанодисперсной фазы и ее осаждения на поверхности частиц песка в составе цементно-песчаной матрицы.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

1. **Баженов Ю.М.** Технология бетона. М.: Изд-во АСВ. 2003. 500 с.
1. **Bazhenov Yu.M.** Concrete technology. M.: Izd-vo ACB. 2003. 500 p. (in Russian).
2. **Babaian P.M., Wang K., Mishulovich A., Bhattacharja S., Shah S.P.** Effect of mechanochemical activation on reactivity of cement kiln dust-fly ash systems. *ACI Mater. J.* 2003. V. 100(1). P. 55-62. DOI: 10.1016/s0140-6701(03)92655-5.
2. **Babaian P.M., Wang K., Mishulovich A., Bhattacharja S., Shah S.P.** Effect of mechanochemical activation on reactivity of cement kiln dust-fly ash systems. *ACI Mater. J.* 2003. V. 100(1). P. 55-62. DOI: 10.1016/s0140-6701(03)92655-5.
3. **Калашников В.И.** Терминология науки о бетоне нового поколения. *Строит. материалы.* 2011. № 3. С. 103-106.
3. **Kalashnikov V.I.** The terminology of the science of the new generation concrete. *Stroit. Materialy.* 2011. N 3. P. 103-106 (in Russian).
4. Nanops Nano Polymer Solutions. Нанотехнологии для бетонной промышленности. CPI. Международное бетонное производство. 2013. № 4. С. 64-65.
4. Nanops Nano Polymer Solutions. Nanotechnology for concrete industries. CPI. International concrete production. 2013. N 4. P. 64-65 (in Russian).
5. **Калашников В.И.** Перспективы использования реакционно-порошковых сухих бетонных смесей в строительстве. *Строит. материалы.* 2009. № 7. С. 59-61.
5. **Kalashnikov V.I.** Prospects for the use of reaction-powder dry concrete mixes in construction. *Stroit. Materialy.* 2009. N 7. P. 59-61 (in Russian).
6. **Калашников В.И.** От практики к теории, а от теории к практике, или ответ на полемические заметки (№ 2 (2009 г.)). *Строит. материалы.* 2010. № 3. С. 54-58.
6. **Kalashnikov V.I.** From practice to theory, but from theory to practice, or response to polemical notes. (N 2 (2009)). *Stroit. Materialy.* 2010. N 3. P. 54-58 (in Russian).
7. **Калашников В.И.** Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения. *Бетон и железобетон.* 2012. № 1. С. 82-89.
7. **Kalashnikov V.I.** How to turn the old generation concrete into highly efficient new generation concrete. *Beton Zhelezobeton.* 2012. N 1. P. 82-89 (in Russian).
8. **Ibragimov R., Fediuk R.** Improving the early strength of concrete: Effect of mechanochemical activation of the cementitious suspension and using of various superplasticizers. *Construct. Build. Mater.* 2019. V. 226. P. 839-848. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.313.
8. **Ibragimov R., Fediuk R.** Improving the early strength of concrete: Effect of mechanochemical activation of the cementitious suspension and using of various superplasticizers. *Construct. Build. Mater.* 2019. V. 226. P. 839-848. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.313.
9. **Fediuk R.S., Mochalov A.V., Bituev A.V., Zayakhanov M.E.** Structuring Behavior of Composite Materials Based on Cement, Limestone, and Acidic Ash. *Inorg. Mater.* 2019. 55(10). P. 1079-1085. DOI: 10.1134/S0020168519100042.
9. **Fediuk R.S., Mochalov A.V., Bituev A.V., Zayakhanov M.E.** Structuring Behavior of Composite Materials Based on Cement, Limestone, and Acidic Ash. *Inorg. Mater.* 2019. 55(10). P. 1079-1085. DOI: 10.1134/S0020168519100042.
10. **Stemmermann P., Garbev K., Gasharova B., Haist M., Divoux T.** Chemo-mechanical characterization of hydrated calcium-hydrosilicates with coupled Raman-and nanoindentation measurements. *Appl. Geochem.* 2020. V. 118. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104582.
10. **Stemmermann P., Garbev K., Gasharova B., Haist M., Divoux T.** Chemo-mechanical characterization of hydrated calcium-hydrosilicates with coupled Raman-and nanoindentation measurements. *Appl. Geochem.* 2020. V. 118. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104582.
11. **Zagorodnyuk L.K., Lesovik V.S., Sums koy D.A., Eli stratkin M.Y., Makhortov D.S.** Peculiarities of binding composition production in vortex jet mill. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng.* 2018. N 327(4). P. 042128. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042128.
11. **Zagorodnyuk L.K., Lesovik V.S., Sums koy D.A., Eli stratkin M.Y., Makhortov D.S.** Peculiarities of binding composition production in vortex jet mill. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng.* 2018. N 327(4). P. 042128. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042128.
12. **Fediuk R.S., Lesovik V.S., Mochalov A.V., Lashina I.V., Timokhin R.A.** Composite binders for concrete of protective structures. *Mag. Civil Eng.* 2018. V. 82(6). P. 208-218. DOI: 10.18720/MCE.82.19.
12. **Fediuk R.S., Lesovik V.S., Mochalov A.V., Lashina I.V., Timokhin R.A.** Composite binders for concrete of protective structures. *Mag. Civil Eng.* 2018. V. 82(6). P. 208-218. DOI: 10.18720/MCE.82.19.
13. **Fediuk R., Mochalov A., Timokhin R.** Review of methods for activation of binder and concrete mixes. *AIMS Mater. Sci.* 2018. V. 5(5). P. 916-931. DOI: 10.3934/mat.2018.5.916.
13. **Fediuk R., Mochalov A., Timokhin R.** Review of methods for activation of binder and concrete mixes. *AIMS Mater. Sci.* 2018. V. 5(5). P. 916-931. DOI: 10.3934/mat.2018.5.916.
14. **Balczár I., Korim T., Hullár H., Boros A., Makó É.** Manufacture of air-cooled slag-based alkali-activated cements using mechanochemical activation. *Construct. Build. Mater.* 2017. V. 137. P. 216-223. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.121.
14. **Balczár I., Korim T., Hullár H., Boros A., Makó É.** Manufacture of air-cooled slag-based alkali-activated cements using mechanochemical activation. *Construct. Build. Mater.* 2017. V. 137. P. 216-223. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.121.
15. **Ibragimov R., Pimenov S., Kiyamov I., Mingazov R., Kiyamova L.** Comparison of the effect of superplasticizing admixtures on the processes of cement hydration during mechanochemical activation. *East.-Eur. J. Enterprise Technol.* 2016. V. 4 (6-82). P. 56-63. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.74855.
15. **Ibragimov R., Pimenov S., Kiyamov I., Mingazov R., Kiyamova L.** Comparison of the effect of superplasticizing admixtures on the processes of cement hydration during mechanochemical activation. *East.-Eur. J. Enterprise Technol.* 2016. V. 4 (6-82). P. 56-63. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.74855.
16. **Ibragimov R.A., Pimenov S.I.** Influence of mechanochemical activation on the cement hydration features. *Mag. Civil Eng.* 2016. V. 62(2). P. 3-12. DOI: 10.5862/MCE.62.1.
16. **Ibragimov R.A., Pimenov S.I.** Influence of mechanochemical activation on the cement hydration features. *Mag. Civil Eng.* 2016. V. 62(2). P. 3-12. DOI: 10.5862/MCE.62.1.

17. **Mataalkah F., Xu L., Wu W., Soroushian P.** Mechanochemical synthesis of one-part alkali aluminosilicate hydraulic cement. *Mater. Struct./Mater. Construct.* 2017. V. 50(1). P. 97. DOI: 10.1617/s11527-016-0968-4.
18. **Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Izotov V.S.** Effect of mechanochemical activation of binder on properties of fine-grained concrete. *Mag. Civil Eng.* 2015. V. 54(2). P. 63-69. DOI: 10.5862/MCE.54.7.
19. **Mucsi G., Rácz Á., Mádai V.** Mechanical activation of cement in stirred media mill. *Powder Technol.* 2013. V. 235. P. 163-172. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.10.005.
20. **Поляков И.В., Баранников М.В., Степанова Е.А.** Добавки для тяжелого бетона на основе техногенных отходов химических производств. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 4. С. 104-109. DOI: 10.6060/ivkkt.20216404.6330.
21. **Слизнева Т.Е., Акулова М.В., Разговоров П.Б.** Влияние механомагнитной активации растворов CaCl_2 и $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ на фазовый состав цементного камня. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 12. С. 101-107. DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.6114.
22. **Лотов В.А., Сударев Е.А., Кутугин В.А.** Физико-химические процессы при активации цементно-песчаной смеси в центробежном смесителе. *Изв. вузов. Физика.* 2011. Т. 54. № 11/3. С. 346-349.
23. **Артамонова О.В.** Синтез наномодифицирующих добавок для технологии строительных композитов. Воронеж.: Изд-во Воронеж. ГАСУ. 2016. 100 с.
24. **Лотов В.А., Сударев Е.А., Иванов Ю.А.** Тепловыделение в системе цемент-вода при гидратации и твердении. *Строит. материалы.* 2011. № 11. С. 35-37.
17. **Mataalkah F., Xu L., Wu W., Soroushian P.** Mechanochemical synthesis of one-part alkali aluminosilicate hydraulic cement. *Mater. Struct./Mater. Construct.* 2017. V. 50(1). P. 97. DOI: 10.1617/s11527-016-0968-4.
18. **Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Izotov V.S.** Effect of mechanochemical activation of binder on properties of fine-grained concrete. *Mag. Civil Eng.* 2015. V. 54(2). P. 63-69. DOI: 10.5862/MCE.54.7.
19. **Mucsi G., Rácz Á., Mádai V.** Mechanical activation of cement in stirred media mill. *Powder Technol.* 2013. V. 235. P. 163-172. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.10.005.
20. **Polyakov I.V., Barannikov M.V., Stepanova E.A.** Additives for heavy concrete based on industrial waste from chemical industries. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2021. V. 64. N 4. P. 104-109 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216404.6330.
21. **Slizneva T.E., Akulova M.V., Razgovorov P.B.** Influence of mechanomagnetic activation of solutions CaCl_2 and $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ on phase structure of cement stone. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2019. V. 62. N 12. P.101-107 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.6114.
22. **Lotov V.A., Sudarev E.A., Kutugin V.A.** Physico-chemical processes when activating cement-sand mixture in a centrifugal mixer. *Izv. Vuzov. Fizika.* 2011. V. 54. N 11/3. P. 346-349 (in Russian).
23. **Artamonova O.V.** Synthesis of nationodifying additives for technology of building composites. Voronezh.: Izd-vo Voronezh. GASU. 2016. 100 p. (in Russian).
24. **Lotov V.A., Sudarev E.A., Ivanov Yu.A.** Heat dissipation in the cement-water system during hydration and hardening. *Stroit. Materialy.* 2011. N 11. P. 35-37 (in Russian).

Поступила в редакцию 01.02.2022
Принята к опубликованию 11.05.2022

Received 01.02.2022
Accepted 11.05.2022