

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-8-17

Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Чивикова Е.В.Брянский государственный инженерно-технологический университет***E-mail: natluk58@mail.ru*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПАЛ-КРИСТОБАЛИТ-ТРИДИМИТОВОГО МИКРОНАПОЛНИТЕЛЯ В ТЯЖЕЛОМ БЕТОНЕ

Аннотация. Рассмотрен опал-кристобалит-тридимитовый микронаполнитель (ОКТМН) для тяжелого бетона (ТБ), полученный диспергированием кремнистой породы осадочного происхождения – абиоморфного силицита фракции 0,315–0,63 мм. Определены химико-минеральный состав и микроструктура частиц ОКТМН. Представлен сравнительный анализ зависимости гранулометрического состава, среднего диаметра частиц и удельной поверхности ОКТМН от времени диспергирования в механоактиваторах ударно-стирающего и кавитационного типов действия. Кондуктометрическим экспресс-методом анализа исследовано влияние удельной поверхности ОКТМН на гидратационную активность цемента. Выявлено оптимальное значение удельной поверхности ОКТМН (880–900 м²/кг), достигаемое в результате кавитационного диспергирования в течение 5–10 минут, которое обеспечивает повышение гидратационной активности цемента на 52–54 %. Методом математического планирования эксперимента установлена зависимость прочности ТБ через 28 суток твердения от расхода его компонентов, что позволяет прогнозировать значение этого показателя при варьировании состава бетонной смеси. Выполнена оценка эффективности ОКТМН. Установлен максимальный эффект действия опал-кристобалит-тридимитового микронаполнителя при использовании его в количестве до 5 % от массы цемента с позиции повышения проектной (марочной) прочности на сжатие ТБ (до 126 %).

Ключевые слова: тяжелый бетон, опал-кристобалит-тридимитовый микронаполнитель, абиоморфный силицит, ударно-стирающее диспергирование, кавитационное диспергирование, гидратационная активность, прочность на сжатие.

Введение. В современных условиях рынок потребления бетонов на основе цементных вяжущих является одним из самых динамично развивающихся. Совершенствование строительных технологий, необходимость обеспечения долговечности и надежности работы конструкций и сооружений предъявляют все более высокие требования к качеству применяемых при их возведении бетонов. В связи с этим, разработка эффективных бетонов с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами является актуальным и перспективным научно-практическим направлением в области строительного материаловедения [1].

В настоящее время к наиболее распространенному технологическому приему целенаправленного регулирования структурой и свойствами цементных бетонов относится использование различных минеральных наполнителей [2–4], получаемых современными способами активации [5] природного и техногенного сырья силикатного (диатомиты, трепелы, опоки, пеплы, туфы, трассы, вулканические шлаки, биогенные кремнеземы, микрокремнезем, золы-уноса, доменные гранулированные шлаки, отвальные золошлаковые смеси, отсева дробления бетонного

лома и др.), алюмосиликатного (галлуазит, бентонит, глиежи, цеолиты, метакаолин и др.), углерод-силикатного (шунгитосодержащие породы), кальций-магний-силикатного составов (воластонит, диопсид, серпентинит и др.) [6–9].

Известно, что минеральные наполнители вместе с цементным вяжущим участвуют в формировании микроструктуры матричной основы и контактных зон бетона. Структурообразование наполненного композита основывается на процессах, происходящих при контакте жидкой и твердой фаз, сопровождается локализацией внутренних дефектов (микротрещин, макропор, капиллярных пор), уменьшением их количества и размеров, снижением концентрации напряжений. В случае, когда поверхностная активность частиц наполнителя равна или выше поверхностной активности вяжущего, достигается повышение степени гидратации цемента и упрочнение межчастичных контактов. При условии, когда поверхностная активность наполнителя ниже поверхностной активности вяжущего, происходит упорядочение структуры и увеличение прочности композита за счет снижения межчастичных деформаций на поверхности раздела фаз [10].

Цель данной работы заключается в оценке

эффективности опал-кристаллит-тридимитового микронаполнителя на основе абиморфного силицита по изменению прочности на сжатие тяжелого бетона (ТБ).

Абиморфный силицит представляет собой рыхлую, слабо цементированную, микропористую кремнистую осадочную породу, более чем на 50 % состоящую из опала (реакционно-активного аморфного кремнезема $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ с переменным содержанием воды), частично замещенного кристаллическими формами кремнезема (кристаллита, тридимита) с примесью кварца, полевых шпатов, глинистых минералов и др. [11].

Методика. При проведении исследования применялись следующие методы: рентгенофлуоресцентная спектрометрия на спектрометре ОР-ТИМ-Х, рентгенофазовый анализ на дифрактометре D8 Advance, сканирующая электронная микроскопия на микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU (химико-минеральный состав и микроструктура ОКТМН); лазерная гранулометрия на анализаторе Analysette 22 NanoTec Plus (гранулометрический состав, средний диаметр частиц, удельная поверхность ОКТМН); кондуктометрический экспресс-метод анализа гидратационной активности цемента на приборе ИАЦ-04М; стандартные методы испытаний подвижности бетонной смеси (по ГОСТ 10181-2014) и прочности на сжатие ТБ (по ГОСТ 26633-2015).

В качестве исходных сырьевых материалов использовались:

- цемент (Ц) ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108-2016 (АО «Мальцовский портландцемент», холдинг «Евроцемент групп»), химического состава (% по массе): $\text{CaO} - 65,8$, $\text{SiO}_2 - 21,8$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 4,9$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 4,3$, $\text{MgO} - 0,9$, $\text{SO}_3 - 0,8$, $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - 0,66$, минерального состава (% по массе): $\text{C}_3\text{S} - 63,5$, $\text{C}_2\text{S} - 13,2$, $\text{C}_3\text{A} - 5,8$, $\text{C}_4\text{AF} - 13$, удельной поверхности – $340 \text{ м}^2/\text{кг}$, нормальной плотности цементного теста – 24 %;

- природный кварцевый песок (П) с модулем крупности 1,67 по ГОСТ 8736-2014 и гранитный щебень (Щ) фракции 5-20 мм по ГОСТ 8267-93 (АО «Национальная нерудная компания»);

- абиморфный силицит – трепел месторождения «Гришина Слобода» Брянской области (АО «АИП-Фосфаты») фракции 0,315–0,63 мм, истинной плотностью $2250 \text{ кг}/\text{м}^3$, насыпной плотностью $860 \text{ кг}/\text{м}^3$, общей пористостью 64 %, микропористостью 14 %.

- вода затворения, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732-2011.

Научно-практический интерес к использованию трепела вызван особенностями его структуры и свойств. Микропористая структура, обладающая высокой термохимической стабильностью и содержащая активные обменные катионы,

предопределяет уникальные адсорбционные и катионообменные свойства трепела, имеющего способность к обратимому катионному обмену (восстановлению начальных сорбционных свойств) без разрушения кристаллической решетки [12]. При этом высокая пористость (50–70 %), низкие значения твердости (1–3), прочности (3–3,5 МПа), средней плотности ($600 - 1400 \text{ кг}/\text{м}^3$) обуславливают его использование в качестве абиморфного силицитового сырья многоцелевого назначения.

В строительной отрасли более 75 % добытого трепела используется в качестве активной пуццолановой добавки для цементной промышленности [13], а около 24 % – в производстве теплоизоляционных строительных материалов и изделий [12, 14].

Получение ОКТМН проводилось диспергированием исходного абиморфного силицита в течение 5-25 мин в механоактиваторах ударно-истирающего (в шаровой мельнице) и кавитационного (в ультразвуковом агрегате ПСБ-4035-04 с частотой ультразвука 35 кГц) типов действия.

Бетонные смеси (марка по подвижности П1) приготавливались следующим образом: загрузка в лабораторный бетоносмеситель принудительного действия щебня с 30 %-м расходом воды (для удаления пылеватых частиц); смешивание увлажненного Щ с песком; добавление портландцемента с предварительно введенным ОКТМН и остатка воды затворения; тщательное перемешивание массы до однородной смеси.

Состав тяжелого бетона проектировался методом ортогонального центрального трехфакторного математического планирования эксперимента с получением функции (уравнения регрессии) и номограмм отклика, связывающих прочность на сжатие ТБ через 28 суток нормального твердения (γ_1) с варьируемыми факторами – расходом компонентов на 1 м^3 , кг: Ц (x_1) – 200–400, П (x_2) – 700–900, ОКТМН – 0–30 (при Щ, равном 1100 кг).

Основная часть. Результаты рентгенофлуоресцентной спектрометрии показали, что химический состав усредненной пробы ОКТМН представлен содержанием, (% по массе): $\text{CaO} - 1,1$; $\text{SiO}_2 - 78,7$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 9,4$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 2,9$; $\text{MgO} - 0,9$; $\text{SO}_3 - 0,04$; $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - 1,6$; $\text{TiO}_2 - 0,5$; $\text{MnO} - 0,01$; $\text{P}_2\text{O}_5 - 0,3$; потери при прокаливании – 4,4. При этом, по данным рентгенофазового анализа, минеральный состав ОКТМН включает в себя следующие фазы (% по массе): опал-кристаллит-тридимит – 54; кварц – 15; кальцит – 2; сидерит – 1; смектит (смешанно-слоистый глинистый минерал, сложенный неупорядоченным чередованием разбухающих монтмориллонитовых и неразбухающих слюдяных

слоев) – 15; слюда – 10.

Методом сканирующей электронной микроскопии установлено, что микроструктура ОКТМН характеризуется наличием мельчайших

разобщенных глобул опал-кристобалит-тридимита сферической морфологии, контактирующих со слоисто-чешуйчатыми частицами других минеральных фаз (рис. 1).

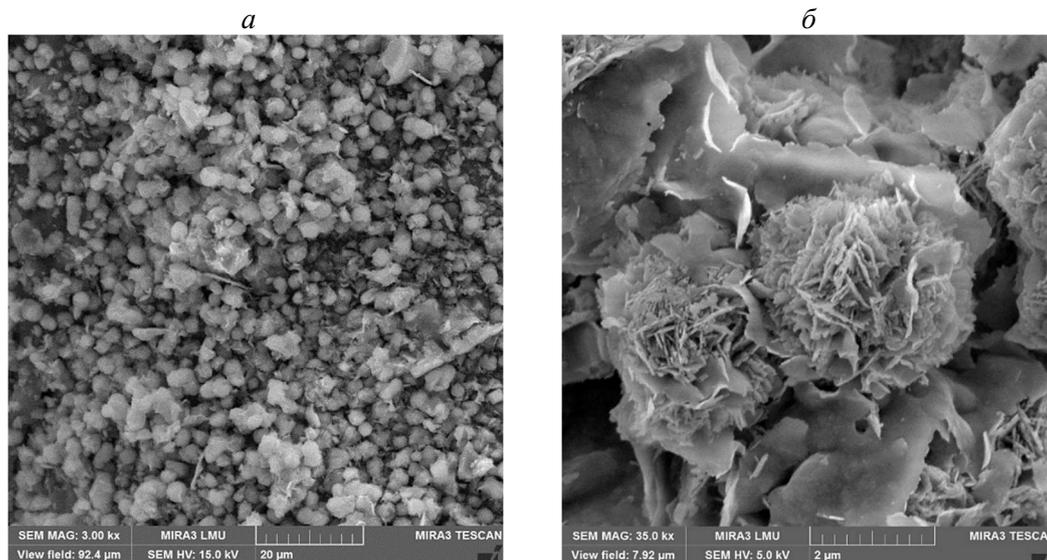


Рис. 1. Микроструктура частиц ОКТМН: *а* – увеличение в 3000 раз; *б* – увеличение в 35000 раз

С целью изучения влияния способа и времени диспергирования абиморфного силицита фракции 0,315–0,63 мм на изменение гранулометрического состава, удельной поверхности и среднего диаметра частиц ОКТМН были рассмотрены процессы его измельчения в механоактиваторах различных типов действия.

Известно, что диспергирование материала в шаровой мельнице происходит свободным ударом, в результате чего его разрушение производится по наиболее слабым связям и дефектам структуры в местах соединения кристаллов, зерен, слоев и др. В момент времени, когда структурная прочность каждой отдельной частицы достигает своего максимального предела, а ее масса становится ничтожно малой, свободный удар практически полностью заменяется на истирание. Крупные частицы, перемещаемые к стенкам мельницы, вытесняют более мелкие, которые, двигаясь от краев к центральной части, измельчаются исключительно в результате взаимного истирания в турбулентных потоках [5].

Диспергирование материала в интенсивном ультразвуковом поле, возбуждаемом в водной среде, объясняется эрозией (разрушением) его поверхности под действием кавитации – образования в воде пульсирующих пузырьков (каверн, полостей), заполненных паром и газом. Данный процесс сопровождается микроударным воздействием при захлопывании образующихся пузырьков и возникающими при их пульсациях акустическими микропотоками. Кавитационные

пузырьки концентрируются на неровностях поверхности и в микротрещинах материала. Многократные гидравлические удары, возникающие при захлопывании пузырьков, вызывают локальное разрушение поверхности. Под действием акустических микропотоков вода проникает внутрь образовавшихся углублений, где разрушающее действие ударных волн становится еще более эффективным [15].

Выявлено, что гранулометрический состав ОКТМН, полученного в результате ударно-истирающего диспергирования абиморфного силицита в шаровой мельнице, отличается бимодальным распределением частиц по размерам (рис. 2). При измельчении в течение 5 мин содержание частиц фракции 0,1–1 мкм составляет 1,41 %, 1–10 мкм – 31,49 %, 10–100 мкм – 46,28 %, более 100 мкм – 20,82 %, средний диаметр частиц – 94 мкм, удельная поверхность – 480 м²/кг.

Увеличение времени диспергирования от 5 до 25 мин приводит к повышению содержания в ОКТМН частиц фракции 0,1–1 мкм от 1,41 до 1,89 %, 1–10 мкм – от 31,49 до 49,53 %, 10–100 мкм – 46,28 до 47,86 %, а удельной поверхности – от 480 до 690 м²/кг. При этом доля частиц фракции более 100 мкм снижается от 20,82 до 0,72 %, средний диаметр – от 94 до 62 мкм. Наибольший прирост частиц фракций 0–1 мкм (на 19 %), 1–10 мкм (на 22 %), 10–100 мкм (на 7 %) и интенсивное возрастание величины удельной поверхности (на 18 %) происходит при

диспергировании абиморфного силицита в интервале от 5 до 10 мин.

Сравнительный анализ показал, что гранулометрический состав ОКТМН, полученного в ультразвуковом агрегате, характеризуется одномодальным распределением частиц по размерам.

После кавитационного диспергирования абиморфного силицита в течение 5 мин средний диаметр частиц равен 4 мкм, а удельная поверхность – 880 м²/кг. Содержание частиц фракции 0,1–1 мкм составляет 2,56 %, 1–10 мкм – 63,95 %, 10–100 мкм – 33,49 %, более 100 мкм – 0 % (рис. 3).

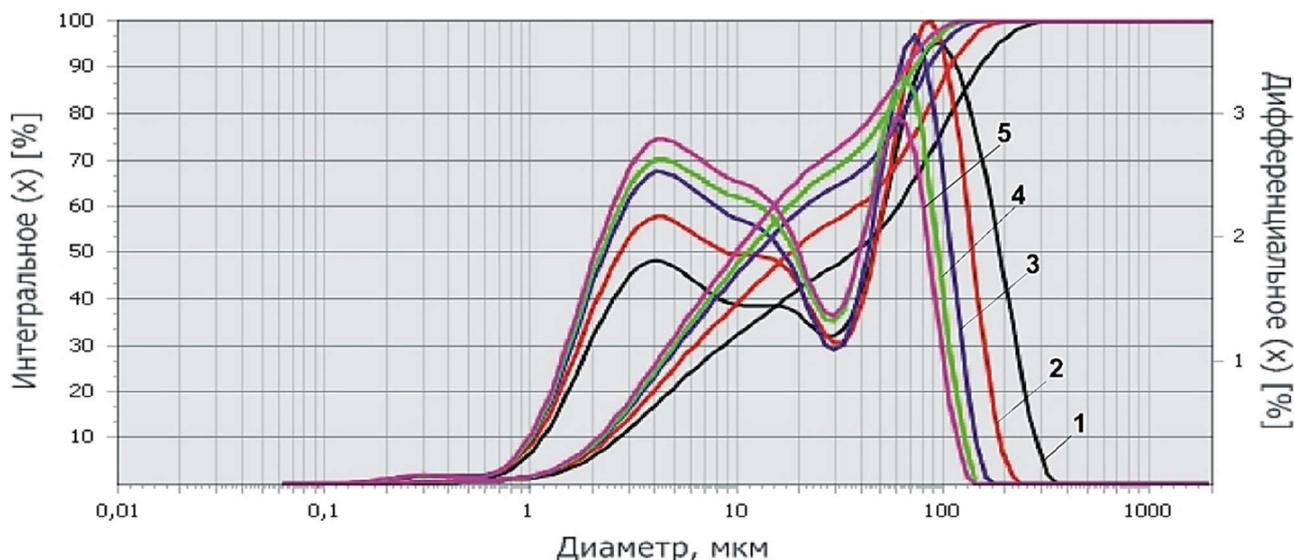


Рис. 2. Гранулометрический состав ОКТМН в зависимости от времени ударно-истирающего диспергирования: 1 – 5 мин; 2 – 10 мин; 3 – 15 мин; 4 – 20 мин; 5 – 25 мин

При увеличении времени кавитационного диспергирования от 5 до 25 мин удельная поверхность ОКТМН повышается от 880 до 990 м²/кг, а доля частиц фракций 0,1–1 мкм, 1–10 мкм – от 2,56 до 2,93 %, от 63,95 до 73,62 % соответственно. Содержание частиц фракции 10–100

мкм снижается от 33,49 до 23,45 %, средний диаметр – практически не изменяется. Наибольший прирост частиц фракций 0,1–1 мкм (на 7 %), 1–10 мкм (на 9 %) и интенсивное возрастание величины удельной поверхности (на 7 %) достигаются также при диспергировании абиморфного силицита в интервале 5–10 мин.

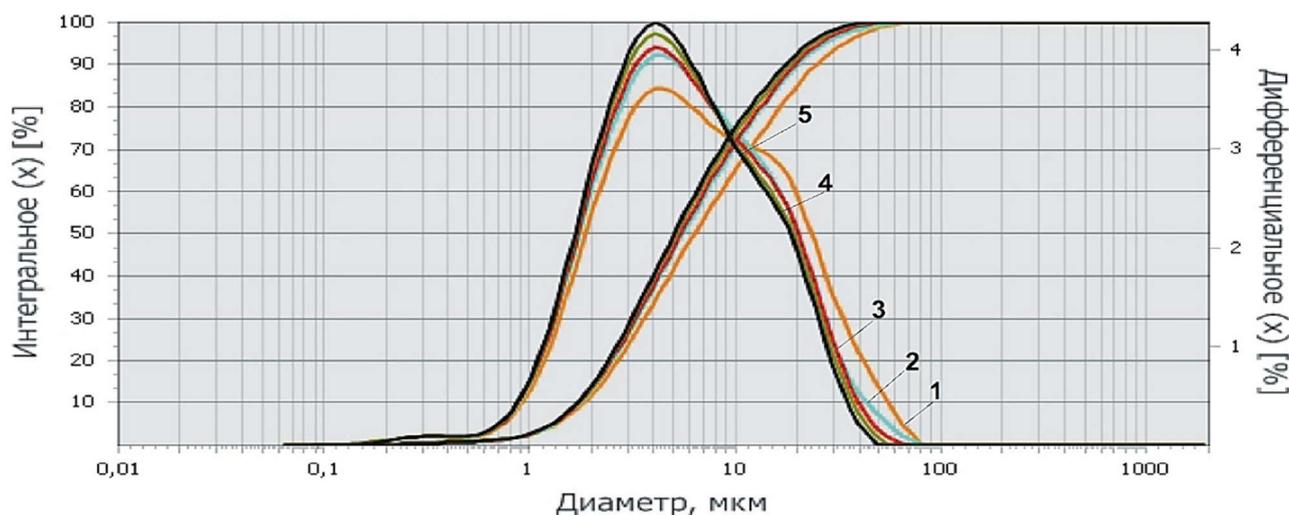
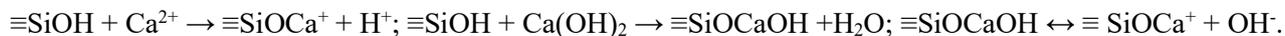


Рис. 3. Гранулометрический состав ОКТМН в зависимости от времени кавитационного диспергирования: 1 – 5 мин; 2 – 10 мин; 3 – 15 мин; 4 – 20 мин; 5 – 25 мин

Механизм действия активных минеральных добавок в цементных системах обусловлен в основном их химическим взаимодействием с гидроксидом кальция Ca(OH)₂, образующимся в результате гидролиза трехкальциевого силиката

C₃S. При этом происходит кристаллизация, преимущественно, низкоосновных гидросиликатов кальция CSH (В), которые, увеличивая гелевую составляющую цементного камня, улучшают прочностные свойства бетона.

Пуццолановый эффект действия высокодисперсных кремнеземистых добавок в цементных бетонах проявляется в химическом связывании $\text{Ca}(\text{OH})_2$ активным кремнеземом в дополнительное количество CSH (В) и определяется наличием свободных реакционноспособных силанольных групп ($\equiv\text{SiOH}$) на поверхности частиц



Известно, что ультра- и нанодисперсные кремнеземы заметно активнее влияют на концентрацию ионов Ca^{2+} и OH^- в наполняющей жидкой фазе цементной системы уже в первые минуты гидратации, что приводит к сокращению длительности индукционного периода (или он вовсе не наступает). В присутствии ультра- и наночастиц SiO_2 образование продуктов гидратации в ранний период происходит в непосредственной близости от их поверхности. При этом цементные зерна в меньшей степени блокируются новообразованиями, что способствует интенсификации процесса гидролиза и гидратации цементных фаз [16].

С учетом вышеизложенного, кондуктометрическим экспресс-методом анализа с помощью прибора ИАЦ-04М было исследовано влияние удельной поверхности ($S_{\text{уд}}$) опал-кristобалит-тридимитового микронаполнителя, используе-

SiO_2 , содержание которых зависит от их дисперсности [16]. На поверхности кремнезема в жидкой фазе системы «цемент – вода» происходит замена одного протона силанольной группы на ион кальция, что сопровождается протеканием реакций по следующим схемам:

мого в количестве 5 % (от массы Ц), на гидратационную активность (ГА) цемента (скорость изменения степени гидратации или концентрации новообразований во времени) через 40 с после смешивания с водой.

Данный метод основан на измерении величины удельной электрической проводимости водцементного раствора (концентрации 0,03 г/мл), ее преобразовании в данные, соответствующие гидратационной активности цемента, и их цифровой индикации на дисплее электронного блока [17].

Выявлено, что изменение гидратационной активности цемента с содержанием ОКТМН носит экстремальный характер (рис. 4). При введении микронаполнителя с $S_{\text{уд}} = 480\text{--}690 \text{ м}^2/\text{кг}$, полученного в шаровой мельнице, ГА повышается от 44,7 до 51,5–67,9 МПа, то есть на 15–52 % относительно исходного бездобавочного цемента с $S_{\text{уд}} 340 \text{ м}^2/\text{кг}$.

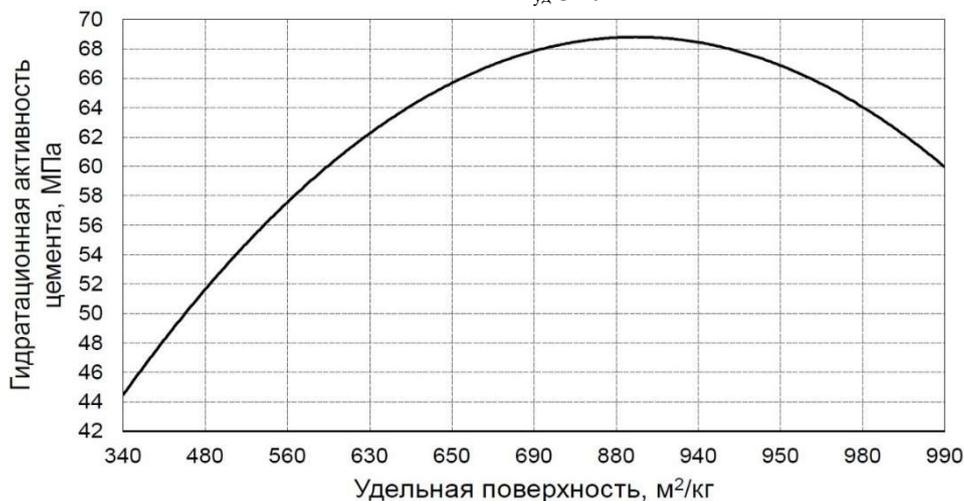


Рис. 4. Зависимость гидратационной активности цемента от удельной поверхности ОКТМН

Максимальное повышение ГА цемента (до 68,1–69 МПа, на 52–54 %) достигается при содержании ОКТМН с $S_{\text{уд}} = 880\text{--}900 \text{ м}^2/\text{кг}$, полученного в ультразвуковом агрегате. Данный результат, скорее всего, является следствием наиболее эффективного разрыва силоксановых связей и увеличения содержания реакционноспособных (по отношению к ионам Ca^{2+} и OH^- в водцементном растворе) силанольных групп ($\equiv\text{SiOH}$) на поверхности опал-кristобалит-тридимитовой фазы

микронаполнителя при кавитационном диспергировании.

Функция отклика прочности на сжатие тяжелого бетона через 28 суток нормального твердения с использованием ОКТМН ($S_{\text{уд}} = 880\text{--}900 \text{ м}^2/\text{кг}$) от заданных варьируемых факторов представлена следующим уравнением регрессии:

$$y_1 = 36,69 + 2,03 \cdot x_1 - 5,16 \cdot x_2 - 0,36 \cdot x_3 - 6,89 \cdot x_1^2 - 6,08 \cdot x_2^2 - 6,92 \cdot x_3^2 + 1,05 \cdot x_1 \cdot x_2 - 2 \cdot x_1 \cdot x_3 + 1,2 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (1)$$

Из уравнения (1) и номограмм (рис. 5) следует, что для получения ТБ с максимальным приростом прочности на сжатие наиболее оптимальным является состав, кг: Ц – 300, П – 750,

Щ – 1100, ОКТМН – 15 при водоцементном отношении, равном 0,45.

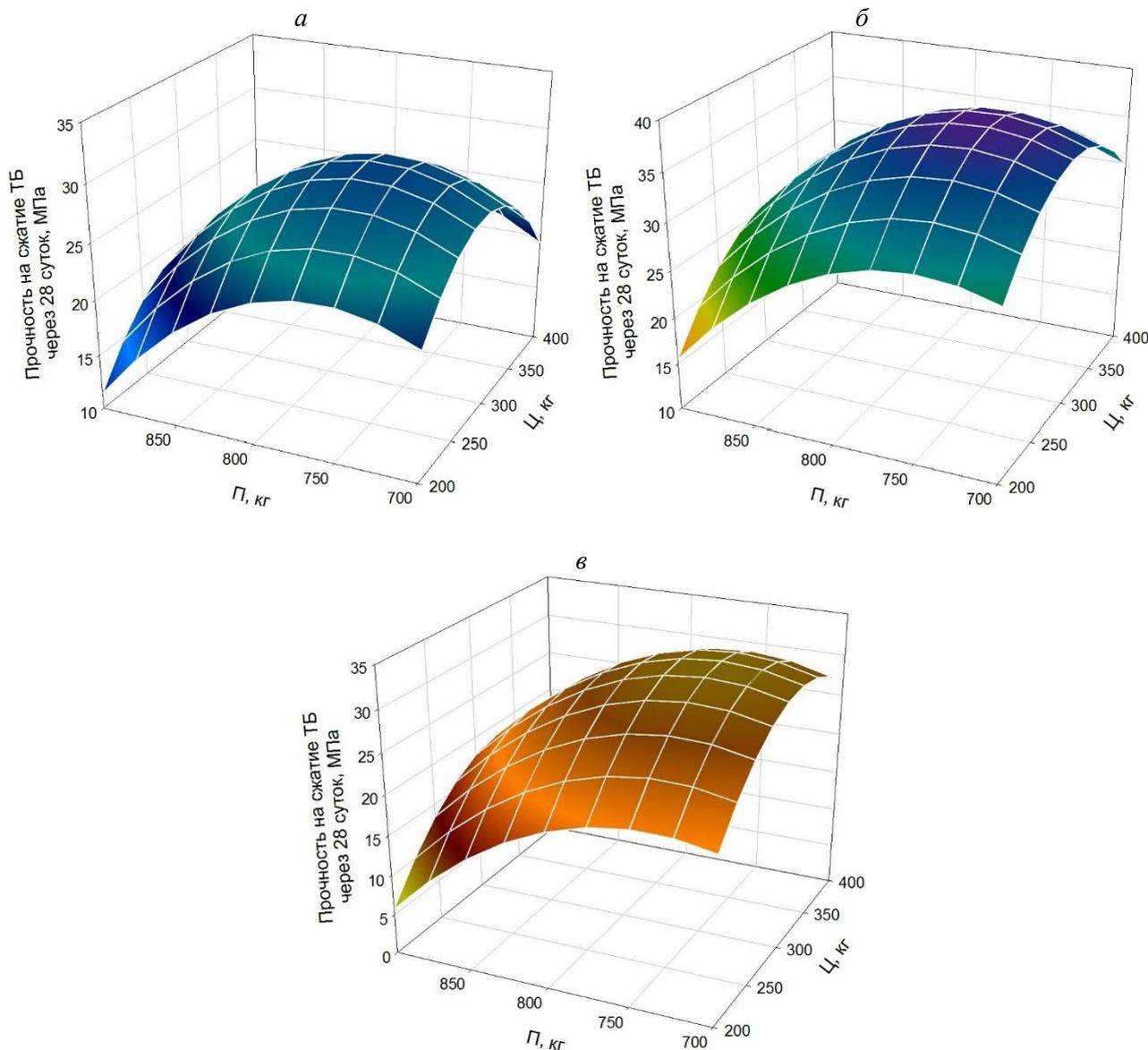


Рис. 5. Номограммы отклика прочности на сжатие тяжелого бетона через 28 суток твердения от варьируемых факторов: а – ОКТМН = 0 кг; б – ОКТМН = 15 кг; в – ОКТМН = 30 кг

Эффективность опал-кристаллит-тридимитового микронаполнителя оценивалась в соответствии с требованиями ГОСТ Р 56593-2015 «Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Методы испытаний» по формуле:

$$K = \frac{R_{\text{ОКТМН}}}{R_0} \cdot 100, \quad (2)$$

где K – эффективность, %; $R_{\text{ОКТМН}}$ – проектная (марочная) прочность на сжатие бетона с микронаполнителем; R_0 – проектная (марочная) прочность на сжатие бетона без микронаполнителя.

Установлено, что при введении ОКТМН в количестве 5 % от массы цемента вязкость системы существенно не увеличивается, поэтому для обеспечения необходимой подвижности бетонной смеси не требуется дополнительного расхода воды затворения (табл. 1). В этом случае проектная (марочная) прочность на сжатие

бетона возрастает от 29,9 до 37,8 МПа, эффективность микронаполнителя составляет 126 %.

Использование ОКТМН в количестве от 5 до 10 % является малоэффективным (106 %) и

сопровождается увеличением водопотребности бетонной смеси, что влечет за собой снижение прочности на сжатие бетона от 37,8 до 31,7 МПа (на 16 %).

Таблица 1

Результаты оценки эффективности опал-кристаллит-тридимитового микронаполнителя для тяжелого бетона

Состав бетонной смеси, кг/м ³				Расход воды для получения бетонной смеси марки по подвижности П1, л/м ³	Среднее значение проектной (марочной) прочности на сжатие бетона, МПа	Эффективность К ОКТМН, %
цемент	песок	щебень	ОКТМН			
300	750	1100	–	135	29,9	–
300	750	1100	15	135	37,8	126
300	750	1100	30	137	31,7	106

Выводы. В ходе проведения исследований выполнена оценка эффективности использования в тяжелом бетоне опал-кристаллит-тридимитового микронаполнителя, полученного диспергированием абиморфного силицита – трепела месторождения «Гришина Слобода» Брянской области. Показан характер зависимости гранулометрического состава микронаполнителя от времени диспергирования в механоактиваторах ударно-истирающего и кавитационного типов действия. Выявлены оптимальные значения удельной поверхности (880–900 м²/кг) и дозировки (до 5 % от массы цемента) микронаполнителя, при которых достигается его максимальная эффективность с позиции повышения проектной (марочной) прочности на сжатие тяжелого бетона (до 126 %).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов Ю.М., Фомичев В.Т., Ерофеев В.Т., Федосов С.В., Матвиевский А.А., Осипов А.К., Емельянов Д.В., Митина Е.А., Юдин П.В. Теоретическое обоснование получения бетонов на основе электрохимически- и электромагнитноактивированной воды затворения // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. 2012. № 2 (22). С. 4.
2. Ерофеев В.Т., Баженов Ю.М., Балатханова Э.М., Митина Е.А., Емельянов Д.В., Родин А.И., Карпушин С.Н. Получение и физико-механические свойства цементных композитов с применением наполнителей и воды затворения месторождений Чеченской Республики // Вестник МГСУ. 2014. № 12. С. 141–151.
3. Лесовик В.С., Шахова Л.Д., Кучеров Д.Е., Аксютин Ю.С. Классификация активных минеральных добавок для композиционных вяжущих с учетом генезиса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 10–14.
4. Saidumov M.S., Murtazaev S-A.Yu., Khadisov V.Kh., Murtazaeva T.S-A., Abumuslimov A.S., Duskaev M.Z. Hydraulic Activity of Mineral Fillers of Manufacturing Origin Mixed with Cement // Atlantis Highlights in Materials Science and Technology. 2019. Vol. 1. Pp. 496–499.
5. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С. Современные способы активации вяжущего и бетонных смесей (обзор) // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 4 (37). С. 85–99.
6. Lukutsova N.P., Soboleva G.N., Golovin S.N., Chivikova E.V., Ogloblina E.V. Fine-Grained High-Strength Concrete // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 131–135.
7. Нгуен Дык Винь Куанг, Баженов Ю.М., Александрова О.В. Влияние кварцевого порошка и минеральных добавок на свойства высокоэффективных бетонов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 1. С. 102–117.
8. Lukutsova N.P., Karpikov E.G., Golovin S.N. Highly-Dispersed Wollastonite-Based Additive and its Effect on Fine Concrete Strength // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. Pp. 1005–1011.
9. Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В. Структура и свойства бетонов с наномодификаторами на основе техногенных отходов. М.: МГСУ, 2013. 204 с.
10. Балатханова Э.М., Ерофеев В.Т., Баженов Ю.М., Митина Е.А., Родин А.И., Еремин А.В., Адамцевич А.О. Оптимизация состава цементных композитов с применением наполнителей месторождений Чеченской Республики // Вестник МГСУ. 2014. № 12. С. 121–130.
11. Смирнов П.В. Фазовые переходы кремнезема в опал-кристаллитовых породах как фактор качества кремнистого сырья // Известия

Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 9. С. 6–15.

12. Пятко Ю.Н., Ахметова Р.Т., Хацринов А.И., Фахрутдинова В.Х., Ахметова А.Ю., Губайдуллина А.М. Влияние ультразвуковой обработки на свойства трепела // Фундаментальные исследования. 2015. № 12-2. С. 320–324.

13. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Бикбаев Р.Р., Пиксайкина А.А. Исследование свойств портландцементов с активной минеральной добавкой на основе трепела // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». 2019. № 3. С. 7–17.

14. Ходырев В.М. Перспективы использования трепелов в производстве строительных материалов // Сухие строительные смеси. 2013. № 2.

С. 24–25.

15. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Чивикова Е.В., Моськина И.В. Структура и свойства наномодифицированного крупнопористого легкого бетона с кавитационно-обработанным заполнителем // Цемент и его применение. 2019. № 5. С. 52–56.

16. Брыков А.С., Камалиев Р.Т. Влияние кремнеземсодержащих добавок на гидратацию портландцемента в ранний период // Цемент и его применение. 2010. № 1. С. 146–148.

17. Головин В.В., Латышенко К.П., Цикунов В.С. Методы и приборы определения активности цемента // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. Т. 2. № 3 (17). С. 201–205.

Информация об авторах

Лукутцова Наталья Петровна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных конструкций. E-mail: natluk58@mail.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, проспект Станке Димитрова, д. 3.

Пыкин Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных конструкций. E-mail: alexem87@yandex.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, проспект Станке Димитрова, д. 3.

Чивикова Екатерина Владимировна, аспирант кафедры производства строительных конструкций. E-mail: yakovlev_yura72@mail.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, проспект Станке Димитрова, д. 3.

Поступила в декабре 2019 г.

© Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Чивикова Е.В., 2020

***Lukuttsova N.P., Pykin A.A., Chivikova E.V.**

Bryansk State Engineering Technological University

Russia, 241037, Bryansk, st. Stanke Dimitrova, 3

**E-mail: natluk58@mail.ru*

USE OF OPAL-CRYSTOBALITE-TRIDIMITE MICRO-FILLER IN DENSE AGGREGATE CONCRETE

Abstract. *Opal-cristobalite-tridimite micro-filler (OCTMF) as a component of dense aggregate concrete (DAC), obtained by grinding of sedimentary siliceous rock – abiomorphic silicite fractions of 0.315-0.63 mm was studied considered. The chemical-mineral composition and microstructure of the of OCTMF particles were determined. Comparative analysis of the relationship between particle size distribution, average particle diameter, specific surface area of OCTMF particle and grinding period in shock-abrasive and cavitation mills was carried out. The conductometric express method was applied to study the effect of the OCTMF specific surface area on hydration activity of cement system. The optimal value of OCTMF specific surface area was (880–900 m²/kg), achieved as a result of cavitation dispersion for 5–10 minutes, that provides increasing in t hydration activity of cement system by 52–54 %. The effect of the consumption of components on strength of the DAC after 28 days of hardening was determined using mathematical statistics method. That allows predicting this parameter by varying the component composition of the concrete mix. An assessment of the OCTMF efficiency was made. It was established, the maximal effect of the OCTMF is at concentration up to 5 % (by wt. of cement), that provides an increasing the design compressive strength of DAC up to 126 %.*

Keywords: *dense aggregate concrete, opal-cristobalite-tridymite microfiller, abiomorphic silicite, shock-abrasive dispersion, cavitation dispersion, hydration activity, compressive strength.*

REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M., Fomichev V.T., Yerofeyev V.T., Fedosov S.V., Matvieskiy A.A., Osipov A.K., Emelyanov D.V., Mitina E.A., Yudin P.V. Theoretical justification of getting concrete based on electrochemically and electro-magnetically activated water for making concrete [Teoreticheskoe obosnovanie polucheniya betonov na osnove elektrohimicheskoi i elektromagnitnoaktivirovannoy vody zatvoreniya]. *Internet-Vestnik VolgGASU*. 2012. No. 2 (22). Pp. 4. (rus)
2. Erofeev V.T., Bazhenov Yu.M., Balatkhanova E.M., Mitina E.A., Emelyanov D.V., Rodin A.I., Karpushin S.N. Obtaining and physical mechanical properties of cement composites with the use of fillers and mixing water from the Chechen Republic fields [Poluchenie i fiziko-mekhanicheskie svoystva cementnykh kompozitov s primeneniem napolnitelej i vody zatvoreniya mestorozhdenij Chechenskoj Respubliki]. *Vestnik MGSU*. 2014. No. 12. Pp. 141–151. (rus)
3. Lesovik V.S., Shakhova L.D., Kucherov D.E., Aksyutin Yu.S. Classification of active mineral additives for composite binders taking into account the Genesis [Klassifikaciya aktivnykh mineral'nykh dobavok dlya kompozicionnykh vyazhushchih s uchetom genezisa]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2012. No. 3. Pp. 10–14. (rus)
4. Saidumov M.S., Murtazaev S-A.Yu., Khadisov V.Kh., Murtazaeva T.S-A., Abumuslimov A.S., Duskaev M.Z. Hydraulic Activity of Mineral Fillers of Manufacturing Origin Mixed with Cement. *Atlantis Highlights in Materials Science and Technology*. 2019. Vol. 1. Pp. 496–499.
5. Fedyuk R.S., Mochalov A.V., Lesovik V.S. Modern activation methods for binder and concrete mixtures (review) [Sovremennyye sposoby aktivatsii vyazhushchego i betonnykh smesey (obzor)]. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2018. No. 4 (37). Pp. 85–99. (rus)
6. Lukutsova N.P., Soboleva G.N., Golovin S.N., Chivikova E.V., Ogloblina E.V. Fine-Grained High-Strength Concrete. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. Pp. 131–135.
7. Nguyen Duc Vinh Quang, Bazhenov Yu.M., Aleksandrova O.V. Effect of quartz powder and mineral admixtures on the properties of high-performance concrete [Vliyanie kvarcevogo poroshka i mineral'nykh dobavok na svoystva vysokoeffektivnykh betonov]. *Vestnik MGSU*. 2019. Vol. 14. No1. Pp. 102–117. (rus)
8. Lukutsova N.P., Karpikov E.G., Golovin S.N. Highly-Dispersed Wollastonite-Based Additive and its Effect on Fine Concrete Strength. *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 284. Pp. 1005–1011.
9. Bazhenov Yu.M., Alimov L.A., Voronin V.V. Structure and properties of concrete with nanomodifiers based on technogenic waste [Struktura i svoystva betonov s nanomodifikatorami na osnove tekhnogennykh othodov]. Moscow: MGSU, 2013. 204 p. (rus)
10. Balatkhanova E.M., Erofeev V.T., Bazhenov Yu.M., Mitina E.A., Rodin A.I., Eremin A.V., Adamtsevich A.O. Optimization of cement composites with the use of fillers from the Chechen Republic fields [Optimizaciya sostava cementnykh kompozitov s primeneniem napolnitelej mestorozhdenij Chechenskoj Respubliki]. *Vestnik MGSU*. 2014. No. 12. Pp. 121–130. (rus)
11. Smirnov P.V. Phase transitions of silica in opal-cristobalite rocks as a factor of quality of siliceous raw materials [Fazovye perekhody kremnezema v opal-kristobalitovykh porodakh kak faktor kachestva kremnistogo syr'ya]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017. Vol. 328. No. 9. Pp. 6–15. (rus)
12. Pyatko Y.N., Akhmetova R.T., Khatsrinov A.I., Fakhrutdinova V.K., Akhmetova A.Y., Gubaydullina A.M. Effect of ultrasonic treatment on the properties of Tripoli [Vliyanie ul'trazvukovoj obrabotki na svoystva trepela]. *Fundamental Research*. 2015. No. 12-2. Pp. 320–324. (rus)
13. Erofeev V.T., Rodin A.I., Bikbaev R.R., Piksaykina A.A. Research of properties of Portland cement with active mineral additive on the basis of Tripoli [Issledovanie svoystv portlandcementov s aktivnoj mineral'noj dobavkoj na osnove trepela]. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Materials. Constructions. Technologies"*. 2019. No. 3. Pp. 7–17. (rus)
14. Khodyrev V.M. Prospects of tripoli use in building materials manufacture [Perspektivy ispol'zovaniya trepelov v proizvodstve stroitel'nykh materialov]. *Suhie stroitel'nye smesi*. 2013. No. 2. Pp. 24–25. (rus)
15. Lukutsova N.P., Pykin A.A., Chivikova E.V., Moskina I.V. Structure and properties of nanomodified no-fines concrete with ultrasonic cavitation-treated aggregate [Struktura i svoystva nanomodifitsirovannogo krupnoporistogo legkogo betona s kavitacionno-obrabotannym zapolnitelem]. *Cement and its Applications*. 2019. No. 5. Pp. 52–56. (rus)
16. Brykov A.S., Kamaliev R.T. The effect of silica-containing additives on the hydration of Portland cement in the early period [Vliyanie kremnezemsoderzhashchih dobavok na gidratsiyu portlandcementsa v rannij period]. *Cement and its Applications*. 2010. No. 1. Pp. 146–148. (rus)
17. Golovin V.V., Latyshenko K.P., Cikunov V.S. Methods and apparatus for determining the ac-

tivity of cement [Metody i pribory opredeleniya aktivnosti cementa]. Izvestiya MGTU “MAMI”. 2013. Vol. 2. No 3 (17). Pp. 201–205. (rus)

Information about the author

Lukuttsova, Natalya P. DSc, Professor. E-mail: natluk58@mail.ru. Bryansk Technological University of Engineering. Russia, 241037, Bryansk, st. Stanke Dimitrova, 3.

Pykin, Alexey A. PhD, Assistant professor. E-mail: alexem87@yandex.ru. Bryansk Technological University of Engineering. Russia, 241037, Bryansk, st. Stanke Dimitrova, 3.

Chivikova, Ekaterina V. Postgraduate student. E-mail: aly-spodenejko@yandex.ru. Bryansk Technological University of Engineering. Russia, 241037, Bryansk, st. Stanke Dimitrova, 3.

Received in Desember 2019

Для цитирования:

Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Чивикова Е.В. Использование опал-кристобалит-тридимитового микронаполнителя в тяжелом бетоне // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-8-17

For citation:

Lukuttsova N.P., Pykin A.A., Chivikova E.V. Use of opal-crystobalite-tridimite micro-filler in heavy concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-8-17.