

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 691.539.216

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ

*В.В. Белов, П.В. Куляев, А.А. Артемьев**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Белов В.В., Куляев П.В.,
Артемьев А.А., 2021

Аннотация. Ультразвуковая дефектоскопия широко используется в строительной отрасли для проведения неразрушающего контроля физико-механических характеристик бетона в конструкциях. В то же время ультразвуковая обработка бетонной смеси и свежееуложенного бетона может быть использована и для изменения структуры и свойств последнего. Актуальность темы напрямую связана с решением вопросов, касающихся экономии в строительстве, поскольку благодаря ультразвуковой обработке можно снизить затраты на дорогостоящие цементы в составе бетона.

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, армирование на микроуровне, оптимальная гранулометрия, наплотнейшая упаковка частиц, программное моделирование упаковок.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-6-14

В строительной отрасли широкое применение получили ультразвуковые методы, используемые для проведения дефектоскопии и неразрушающего контроля физико-механических характеристик бетона в конструкциях. Ультразвуковая обработка бетонной смеси и свежееуложенного бетона может также применяться в целях модификации структуры и свойств [1, 2]. В акустическом ультразвуковом поле под влиянием волнового давления возникают очаги коагуляционного уплотнения цементного теста, и при слиянии его в сплошной слой вода вытесняется вместе со взвешенными в ней высокодисперсными фракциями цемента, образующимися в результате кавитационного разрушения крупных частиц. Кавитация активизирует силы внутреннего сцепления между частицами цемента и микрочастицами известняка, что способствует компактному пространственному взаиморасположению частиц твердой фазы и увеличению количества контактов между частицами – повышению координационного числа [2]. При этом следует ожидать и обратного эффекта – повышения эффективности самой ультразвуковой обработки, так как очевидно, что чем больше контактов между частицами и чем рациональнее их взаимное

распределение внутри исходной структуры, зависящее в том числе от гранулометрического состава минеральной части бетона, тем выше степень кавитационного схлопывания пузырьков внутри смеси и меньше дефектность структуры бетонной смеси и самого бетона. Кроме того, эффективность ультразвуковой обработки будет определяться и ее параметрами (режимом и временем).

На первом этапе работы производили оптимизацию зернового состава минеральной части мелкозернистого бетона (пескобетона), на котором проверяли влияние ультразвуковой обработки.

Чтобы заполнитель полностью выполнял отведенную ему роль твердого скелета мелкозернистого композита, необходимо распределить его частицы таким образом, чтобы более мелкие фракции располагались в промежутках между крупными частицами, не раздвигая их. Это возможно только при наличии в заполнителе в оптимальном количестве как минимум трех песчаных фракций, средние размеры которых должны соотноситься в определенной пропорции [3]. Данные по исходному грансоставу крупных песков, а также средней крупности показывают, что наиболее эффективным с точки зрения технологии и затрат на просеивание является разделение песка на фракции (с размерами частиц, мм: 0–0,5; 0,5–1,25; 1,25–3,2) и их смешение в оптимальном соотношении.

В данной работе определяли область соотношений указанных фракций песка, обеспечивающих наиболее плотную упаковку частиц заполнителя, как путем теоретических выкладок, так и экспериментальным способом, при этом критерием плотной упаковки служило максимальное значение насыпной плотности заполнителя. В расчетном способе использована физическая модель рассматриваемой смеси трех фракций и сделана попытка расчетным путем прийти к оптимальному гранулометрическому составу минеральной части.

Рассмотрение физических моделей упаковки сыпучих материалов удобно начинать с систем, составленных из геометрических тел шарообразной формы, поэтому ниже приведен расчет сухой сыпучей тернарной (т.е. состоящей из трех фракций) смеси, где частицы фракций приняты за шары. В процессе формирования сыпучих заполненных систем на основе нескольких фракций с различными диаметрами сфер фракция с максимальными размерами тел выбирается как скелетная, которой в первоочередном порядке условно заполняется единица объема сыпучей заполненной системы. Расчет составов сферозаполненных сыпучих систем произведен с учетом явлений раздвижки сфер сферами и заполнения межсферических пустот сферами меньших размеров. Объем монолитного материала в единице объема сферофракции равен 0,6, а объем пустот – 0,4.

Средние диаметры сфер для указанных выше трех фракций кварцевого песка, мм: $d_1 = 2,725$; $d_2 = 0,875$; $d_3 = 0,25$. Для приготовления 1 м³ состава тернарной сыпучей смеси расход указанных сферофракций определяется нижеследующим способом.

Устанавливают объемные коэффициенты $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ раздвижки сфер большого диаметра сферами меньших размеров и находят их произведение:

$$\alpha_1 = \left(1 + \frac{d_2}{d_1}\right)^3; \quad \alpha_2 = \left(1 + \frac{d_3}{d_1}\right)^3; \quad \alpha_3 = \left(1 + \frac{d_3}{d_2}\right)^3;$$

$$X_1 = \alpha_1 \alpha_2; \quad X_2 = \alpha_2 \alpha_3.$$

Расход каждой фракции в м³ определяется в последовательности:

$$V_1 = 1 \text{ м}^3 \cdot X_1^{-1}; V_2 = (X_1 - 0,6) \cdot (X_1 \cdot X_2)^{-1};$$

$$V_3 = (X_1 - 0,6) \cdot (X_2 - 0,6) \cdot (X_1 \cdot X_2)^{-1},$$

где V_1, V_2, V_3 – расход указанных фракций; X_1, X_2 – произведения коэффициентов раздвижки сфер большего диаметра сферами меньших размеров.

Объем монолитных сфер определяется по формуле

$$V_{\text{мон}} = V_{\text{нас}} - V_{\text{нас}} \cdot V_{\text{пус}},$$

где $V_{\text{нас}}$ – расход сферофракций, м³; $V_{\text{пус}}$ – объем пустот.

Окончательно насыпной объем сыпучей смеси трех фракций в м³ рассчитывается как

$$V_{\text{нас}} = V_{\text{мон1}} + V_{\text{мон2}} + V_{\text{мон3}} + V_3 \cdot V_{\text{пус}}.$$

На основе приведенного расчета получаем:

$$\alpha_1 = \left(1 + \frac{0,875}{2,725}\right)^3 = 2,306; \alpha_2 = \left(1 + \frac{0,25}{2,725}\right)^3 = 1,302; \alpha_3 = \left(1 + \frac{0,25}{0,875}\right)^3 = 2,126;$$

$$X_1 = 2,306 \cdot 1,302 = 3,002; X_2 = 1,302 \cdot 2,126 = 2,768; V_1 = 1 \cdot 3,002^{-1} = 0,333 \text{ м}^3;$$

$$V_2 = (3,002 - 0,6) \cdot (3,002 \cdot 2,768)^{-1} = 0,289 \text{ м}^3;$$

$$V_3 = (3,002 - 0,6) \cdot (2,768 - 0,6) \cdot (3,002 \cdot 2,768)^{-1} = 0,627 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{мон1}} = 0,333 - 0,333 \cdot 0,4 = 0,200 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{мон2}} = 0,289 - 0,289 \cdot 0,4 = 0,173 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{мон3}} = 0,627 - 0,627 \cdot 0,4 = 0,376 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{нас}} = 0,200 + 0,173 + 0,376 + 0,627 \cdot 0,4 = 1 \text{ м}^3.$$

Таким образом, рассчитан оптимальный гранулометрический состав, обеспечивающий максимальную упаковку зерен заполнителя: 26,7 % фракции 0–0,5 мм; 23,1 % фракции 0,5–1,25 мм; 50,2 % фракции 1,25–3,2 мм.

Для экспериментального подбора оптимального соотношения песчаных фракций в заполнителе мелкозернистого бетона был проведен нелинейный планированный эксперимент с одновременным варьированием содержания этих фракций в конкретных пределах (отношение фракции 0,5–1,25 мм к фракции 0–0,5 мм $X_1 = 0,67$ –4; отношение фракции 1,25–3,2 мм к фракции 0–0,5 мм $X_2 = 1,67$ –7) и измерением насыпной плотности полученных смесей в сухом состоянии. План эксперимента и полученные результаты приведены в таблице, а полученные по математическим моделям зависимости насыпной плотности заполнителя от его фракционного состава в виде линий равного уровня представлены на рис. 1.

Матрица планированного эксперимента и результаты определения насыпной плотности смесей в сухом состоянии

№	X_1	X_2	Насыпная плотность смеси фракций, кг/м ³
1	0,67	1,67	1 640
2	4,00	1,67	1 590
3	0,67	7,00	1 535
4	4,00	7,00	1 600
5	0,67	4,34	1 585
6	4,00	4,34	1 560
7	2,33	1,67	1 620
8	2,33	7,00	1 590
9	2,33	4,34	1 560

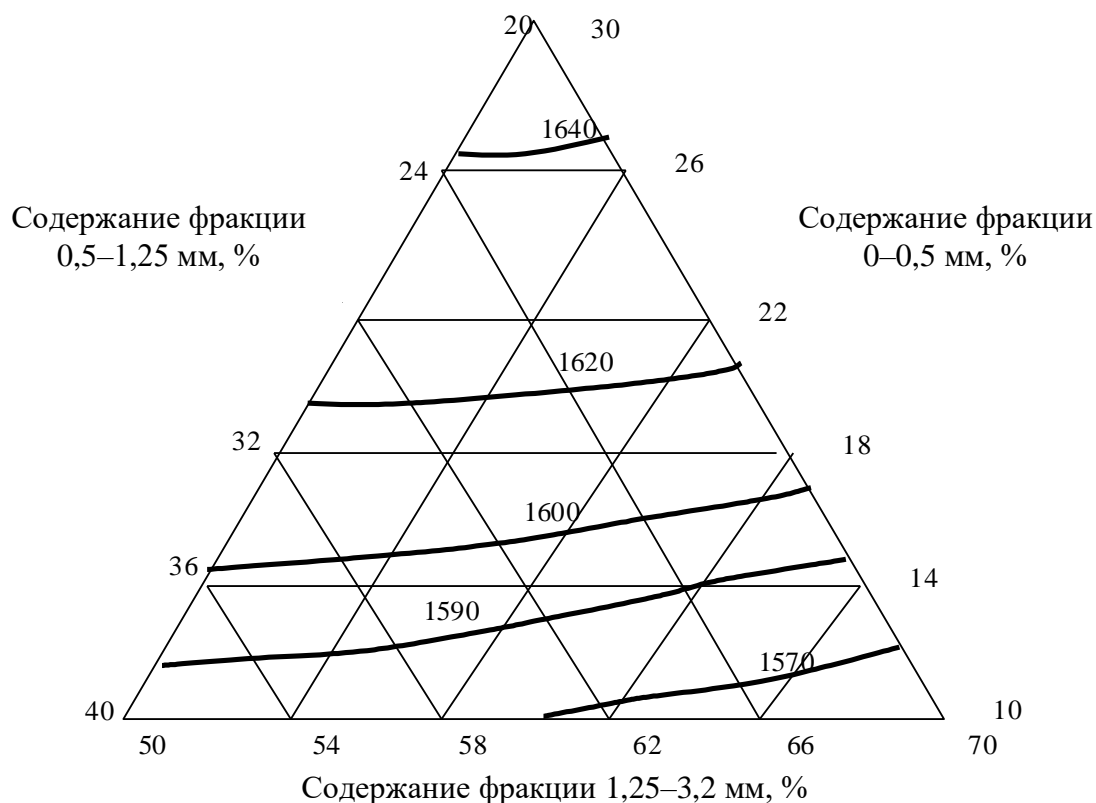


Рис. 1. Диаграмма линий равного уровня насыпной плотности заполнителя (кг/м³) в зависимости от его гранулометрического состава

Полученные данные позволяют наметить состав смеси оптимальной гранулометрии, соответствующий наибольшей насыпной плотности: 30 % фракции 0–0,5 мм; 20 % фракции 0,5–1,25 мм; 50 % фракции 1,25–3,2 мм. Приведенные выше теоретические расчеты согласуются с экспериментальными значениями, что свидетельствует о корректности используемой модели.

Более глубокую оптимизацию гранулометрического состава минеральной части мелкозернистого бетона можно получить за счет введения в оптимальном количестве различных тонкомолотых добавок – наполнителей [4]. Влияние наполнителей на свойства бетонов рассматривалось в предыдущих публикациях [5, 6], где было показано, что применение в качестве наполнителя цементных систем молотого известняка в сочетании с суперпластификатором позволяет целенаправленно регулировать свойства мелкозернистых бетонов. На основе этих предпосылок в данной работе поставлена задача проверить влияние ультразвуковой обработки оптимизированных по грансоставу мелкозернистых композиций, в состав тонкодисперсной части которых вводился карбонатный микронаполнитель в различном количестве (взамен соответствующей части цемента), на структуру твердеющих систем.

Использовались следующие параметры ультразвуковой обработки:

Полосы частот	0,62–1,8–2,5–5 МГц
Мощность	80–250 Вт
Время обработки	30 мин

Ультразвуковая обработка осуществлялась в процессе приготовления смеси (при частоте 0,62 МГц – уровень средней фракции) и твердения кубов-образцов 100x100x100 мм из мелкозернистого бетона, изготовленного на основе данной цементно-песчаной смеси (при частоте 1,8 МГц – уровень микрофракций) (рис. 2).



Рис. 2. Сканирование гомогенности внутренней структуры композита с помощью трансдюсера генератора УДМ в процессе твердения бетона

На рис. 3 приведены результаты ультразвукового сканирования трех образцов мелкозернистого бетона с содержанием в тонкодисперсной части 0,30 и 50 % известнякового молотого порошка с удельной поверхностью, равной $450 \text{ м}^2/\text{кг}$ (взамен соответствующей части цемента), и суперпластификатора СП-1 в дозировке 0,5 и 0,75 % от массы тонкодисперсной части (цемент и известняковый порошок) по сухому веществу для выяснения однородности глубинной структуры полученного материала.

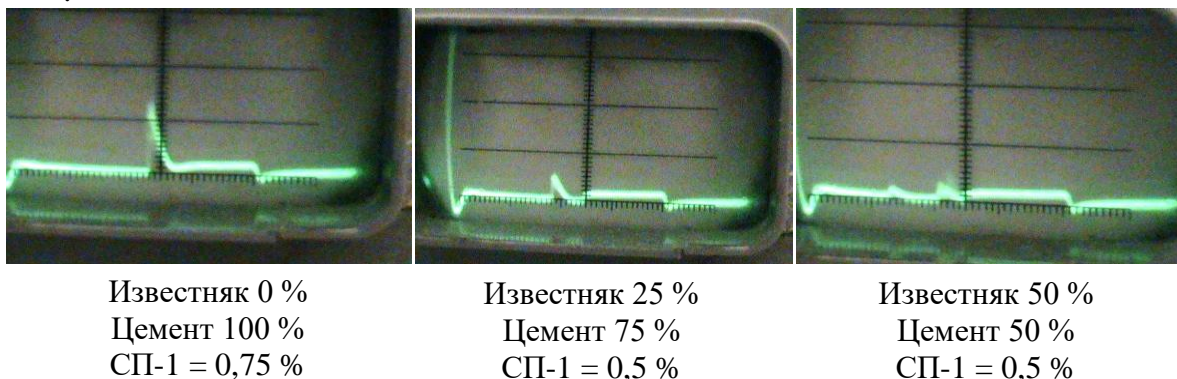


Рис. 3. Осциллограммы образцов бетона при средних значениях мощности и чувствительности сигнала и максимальном диапазоне прозвучивания 100 мм на частоте 1,8 МГц

Видно, что образцы с содержанием известнякового тонкодисперсного порошка в количестве 50 % в суммарном содержании цемента и наполнителя и суперпластификатора в количестве 0,5 % от массы тонкодисперсной части (цемент и известняковый тонкодисперсный порошок), подвергшиеся ультразвуковому воздействию, имеют более однородную структуру (строб выбран в пределах 8 % полосы мерной шкалы). Это свидетельствует о влиянии ультразвуковой обработки на более равномерное распределение частиц по массе композита. Имеет место кавитационный эффект разглобулирования смеси на микроуровне при оптимальной частоте для ультрадисперсных частиц наполнителя порядка 1,8 МГц. При этом следует ожидать улучшения эксплуатационных свойств такого бетона, в том числе трещиностойкости и долговечности, без существенной потери прочности (даже в случае обедненной по расходу цемента сырьевой смеси).

Анализ результатов, полученных на данном этапе исследований, показывает, что использование ультразвукового генератора-модификатора УДМ позволяет целенаправленно влиять на структуру мелкозернистого бетона и повышать его эксплуатационные свойства.

Механизм формирования однородной структуры цементного камня, содержащего добавку на основе микродисперсного карбонатного порошка и суперпластификатора, при ультразвуковом модифицировании связан преимущественно с процессом схлопывания газовых пузырьков при кавитации, что ведет к разглобулированию смеси на микро- и мезоуровне.

Синергетический эффект ультразвуковой обработки и оптимизации гранулометрического состава минеральной части мелкозернистого бетона может способствовать улучшению эксплуатационных свойств мелкозернистого бетона за счет активизации в смеси активных центров микрокавитации и наиболее равномерного распределения частиц в объеме смеси, что делает ее более однородной, гомогенной, связной и плотной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981. С. 47–51.
2. Балдев Р., Раджендран В., Паланичами П. Применение ультразвука. М.: Техносфера, 2006. 248 с.
3. Величко Е.Г., Белякова Ж.С. Физико-химические и методологические основы получения многокомпонентных систем оптимизированного состава // *Строительные материалы*. 1996. № 3. С. 27–30.
4. Калашников В.И., Демьянова В.С., Дубошина Н.М. Сухие строительные смеси на основе карбонатоцементного смешанного вяжущего // *Изв. вузов. Строительство*. 2000. № 6. С. 52–58.
5. Белов В.В., Образцов И.В., Смирнов М.А. Проектирование зерновых составов минеральных вяжущих систем // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 7–15.
6. Belov V., Kuliaev P. Limestone Filler As One of the Cheapest And Best Additive to Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering 21, Construction – The Formation of Living Environment*. 2018. pp. 032054.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

КУЛЯЕВ Павел Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

АРТЕМЬЕВ Алексей Анатольевич – доктор экономических наук, доцент, проректор по научной и инновационной деятельности, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: aaartemev@rambler.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В., Куляев П.В., Артемьев А.А. Влияние гранулометрического состава на эффективность ультразвуковой обработки мелкозернистых бетонов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 6–14.

**IMPACT OF GRANULOMETRIC COMPOSITION
ON ULTRASONIC PROCESSING EFFICIENCY
OF FINE-GRAINED CONCRETE**

V.V. Belov, P.V. Kulyaev, A.A. Artemyev
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Ultrasonic methods are widely used in the construction industry as methods of defectoscopy and non-destructive testing of physical and mechanical characteristics of concrete in structures. At the same time, ultrasonic treatment of concrete mix and freshly laid concrete can be used for the purpose of modifying its structure and properties as well. The relevance of the topic is directly related to the consideration of issues related to savings in construction, since it allows you to reduce the cost of introducing expensive cements into the concrete.

Keywords: ultrasonic processing, micro-level reinforcement, optimal particle size measurement, highest particle packing, software package modeling.

REFERENCES

1. Akhverdov I.N. *Osnovy Fiziki Betona [Fundamentals of Concrete Physics]*. Moscow: Stroyizdat, 1981. 460 p.
2. Baldev R., Rajendran V., Palanichami P. *Primenenie Ul'trazvuka [Application of Ultra-sound]*. Moscow: Technosphere, 2006. 248 p.
3. Velichko E.G., Belyakova J.S. Physicochemical and Methodological Foundations of Obtaining Multi-component Systems of Optimized Composition. *Construction Materials*. 1996. No. 3, pp. 27–30. (In Russian).
4. Kalashnikov V.I., Demyanova V.S., Duboshina N.M. Dry Building Mixtures Based on Carbonate Cement Mixed Binder. *Izv. Higher Education Institutions. Construction*. 2000. No. 6, pp. 52–58. (In Russian).
5. Belov V.V., Obratsov I.V., Smirnov M.A. Design of Grain Compositions of Mineral Binder Systems. *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering And Chemical Technology»*. 2020. No. 2 (6), pp. 7–15. (In Russian).
6. Belov V., Kuliaev P. Limestone Filler As One of the Cheapest And Best Additive to Concrete. In the Collection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 21, Construction – The Formation of Living Environment*. 2018, pp. 032054.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BELOV Vladimir Vladimirovich – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

KULIAEV Pavel Victorovitch – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

ARTEMYEV Alexey Anatolyevich – Ph.D., Associate Professor of the Department of Geodesy and Cadastre, Vice Rector on Scientific and Research, Tver State Technical University, Tver. E-mail: aartemev@rambler.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V., Kulyaev P.V., Artemyev A.A. Impact of Granulometric Composition on Ultrasonic Processing Efficiency of Fine-grained Concrete // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering and Chemical Technology». 2021. No. 1 (9), pp. 6–14.

УДК 69.003.13

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ВОЛОКОН В БЕТОНЕ, ИЗГОТОВЛЕННОМ С УТИЛИЗИРОВАННЫМИ ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ

П.Ю. Матар¹, Ж.-Ф.Ж. Зехиль², Ж.Ж. Асаад³, Т.Р. Баркая⁴

¹ Ливанский университет (г. Бейрут, Ливан)

² Университет Нотр Дам – Луайзе (г. Зук Мосбех, Ливан)

³ Баламандский университет (г. Аль Кура, Ливан)

⁴ Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Матар П.Ю., Зехиль Ж.-Ф.Ж.,
Асаад Ж.Ж., Баркая Т.Р., 2021

Аннотация. В статье представлен обзор двух исследовательских работ по изучению влияния полипропиленовых волокон на свойства бетона с утилизированными заполнителями (БУЗ) и, в частности, самоуплотняющегося бетона (СУБ), включающего утилизированные заполнители. Были изучены следующие свойства БУЗ: предел прочности при сжатии, предел прочности на растяжение при раскалывании, предел прочности на растяжение при изгибе, модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность, абсорбция и пустоты. Что касается СУБ, включающего утилизированные заполнители, то были исследованы его удобоукладываемость, предел прочности при сжатии и предел прочности при растяжении.

Ключевые слова: утилизированные заполнители, рециклированный бетон, самоуплотняющийся бетон, полипропиленовые волокна, физико-механические свойства, реологические свойства.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-14-24

ВВЕДЕНИЕ

Возможность использования полипропиленовых волокон (ППВ) в бетоне изучена в значительной степени. Гораздо меньшее количество научных исследований посвящено исследованию влияния ППВ на свойства бетона, включающего заполнители из рециклированного (вторичного) бетона (ЗРБ).

Установлено, что включение ЗРБ в состав смеси значительно влияет на прочность на сжатие, если процентное содержание ЗРБ составляет более 50 % от общего объема заполнителя, в то время как при содержании ЗРБ менее 30 % его влияние на прочность становится незначительным [1]. При увеличении процентного содержания ЗРБ происходит также падение прочности на растяжение при раскалывании и изгибе. Во