

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-4-325-335>

УДК 666.972; 693.54

Нормализация гранулометрии мелкого заполнителя для конструкционных бетонов

Магистр техн. наук П. Л. Федорович¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Необходимо констатировать, что строительная отрасль Республики Беларусь вынужденно использует мелкий заполнитель для бетона низкого качества из-за отсутствия во многих регионах страны качественных природных песков. При использовании данного заполнителя при приготовлении бетонных смесей и строительных растворов требуется увеличение расхода цемента для подтверждения качества бетона. Результаты данных исследований могут быть использованы для повышения качества мелкого заполнителя в бетонах. Технология получения нормализованного (обогащенного) песка требуемой гранулометрии теоретически и экспериментально зарекомендовала себя положительно за счет введения в природный (тонкий, мелкий, средний) песок фракций гранитного отсева размером $\geq(0,5-0,6)$ мм, образующихся на РУПП «Гранит» Брестской области при производстве крупного заполнителя для бетона. Разработана компьютерная программа Normalization (регистрационный номер 022 от 07.03.2024) для расчета требуемого соотношения исходного материала – природного песка (характеризующегося модулем крупности $0,9 < M_k < 2,5$) и переработанного (подготовленного) гранитного отсева размером $\geq(0,5-0,6)$ мм для обеспечения требуемой гранулометрии обогащенного песка с $M_k = 3,25-3,50$. Выявлены все условия для получения материала любого гранулометрического состава, характеризующегося (при наличии такой потребности) модулем крупности в пределах рекомендуемых действующими ТНПА $2,0 < M_k < 3,5$. Эффективность технологии нормализации гранулометрии мелкозернистых природных песков экспериментально подтверждена и обуславливается ростом прочности бетона на сжатие до 25–40 %, прочности на осевое растяжение и срез до 35–45 %, снижением показателя расслаиваемости (раствороотделения и водоотделения) на 30–47 %, а также повышением упругодеформативных характеристик, эксплуатационных свойств (водонепроницаемости, водо-, соле- и морозостойкости) и защитной способности бетона по отношению к стальной арматуре, с оценкой степени ее коррозионного поражения. Производственной апробацией подтверждена возможность снижения содержания цемента в бетоне на 10–20 % без ухудшения его физико-механических свойств. По совокупности результатов исследований определено, что прием обогащения природного песка крупными фракциями гранитного отсева может применяться для бетонов различного назначения без ограничений.

Ключевые слова: бетон, заполнитель, песок, гранитный отсев, переработка, гранулометрический состав, нормализация, обогащенный песок

Для цитирования: Федорович, П. Л. Нормализация гранулометрии мелкого заполнителя для конструкционных бетонов / П. Л. Федорович // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 4. С. 325–335. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-4-325-335>

Normalization of Fine Aggregate Granulometry for Structural Concrete

P. L. Fedarovich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. It must be noted that the construction industry of the Republic of Belarus is forced to use fine aggregate for low-quality concrete due to the lack of high-quality natural sand in many regions of the country. When using this aggregate in the preparation of concrete mixtures and mortars, an increase in cement consumption is required to confirm the quality of the concrete. The research results of this work can be used to improve the quality of fine aggregate when used in concrete. The technology for producing normalized (enriched) sand of the required granulometry has theoretically and experimentally proven itself positively due to the introduction into natural (fine, medium) sand of fractions of granite screenings $\geq(0.5-0.6)$ mm in size, formed at the RUPP “Granit” of the Brest region Belarus in the production of coarse aggregate for concrete. A computer program “Normalization” (registration number 022 dated 03/07/2024) has been developed to calculate the required ratio

Адрес для переписки

Федорович Павел Леонидович
Белорусский национальный технический университет
ул. Ф. Скорины, д. 25/1,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 215-24-22
fedorovich@bntu.by

Address for correspondence

Fedarovich Pavel L.,
Belarusian National Technical University
25/1, F. Skaryna str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 215-24-22
fedorovich@bntu.by

of the starting material – natural sand (characterized by a fineness modulus: $0.9 < M_k < 2.5$) and processed (prepared) granite screenings of size $\geq (0.5-0.6)$ mm to ensure the required granulometry of enriched sand with $M_k = 3.25-3.50$. All conditions have been identified for obtaining a material of any granulometric composition, characterized (if there is such a need) by a particle size modulus within the limits recommended by the current technical regulatory legal acts (TNPA): $2.0 < M_k < 3.5$. The effectiveness of the technology for normalizing the granulometry of fine-grained natural sands has been experimentally confirmed and is determined by an increase in concrete compressive strength up to 25–40 %, axial tensile and shear strength up to 35–45 %, a decrease in the delamination rate (solution separation and water separation) by 30–47 %, as well as increasing the elastic-deformation characteristics and operational properties (waterproofness, water, salt and frost resistance) and the protective ability of concrete in relation to steel reinforcement, with an assessment of the degree of its corrosion damage. Industrial testing has confirmed the possibility of reducing the cement content in concrete by 10–20 % without deteriorating its physical and mechanical properties. Based on the totality of research results, it was determined that the method of enriching natural sand with large fractions of granite screenings can be used for concrete for various purposes without restrictions.

Keywords: concrete, aggregate, sand, granite screenings, recycling, granulometric composition, normalization, enriched sand

For citation: Fedarovich P. L. (2024) Normalization of Fine Aggregate Granulometry for Structural Concrete. *Science and Technique*. 23 (4), 325–335. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-4-325-335> (in Russian)

Введение

Известно [1–5], что качество конструкционного тяжелого бетона во многом предопределяется гранулометрическим составом заполнителей, в частности составом многофракционного мелкого заполнителя – песка. Однако необходимо констатировать, что строительная отрасль Республики Беларусь в современных условиях вынужденно использует мелкий заполнитель для бетона низкого качества – природный песок. Например, используют (классификация по ГОСТ 8736–2014 [6]):

– в Витебской области – очень мелкие пески (речные) с $M_k \sim 1,2-1,6$, песок мелкий и очень мелкий с $M_k \sim 1,3-1,8$ карьера «Скуловичи», песок мелкий с $M_k < 2,0$ карьера «Крулевщизна» и т. д.;

– в Минской области – песок мелкий с $M_k < 2,0$ карьера Филиал КУП «Минскоблдорстрой» «ДРСУ № 125», очень мелкие речные пески с $M_k \sim 1,0-1,2$ и т. д.;

– в г. Гомеле и Гомельской области – очень мелкие речные пески с $M_k \sim 1,0-1,2$ р. Сож; с $M_k \leq 2,0$ карьера «Березинский» и т. д.;

– в Брестской области – тонкие и очень мелкие речные пески с $M_k \sim 0,9-1,4$ Филиала РТУП «Белорусское речное пароходство» речного порта Микашевичи и р. Пины и т. д.;

– в Гродненской области – очень мелкий песок с $M_k \sim 1,2-1,5$ карьера № 142 «Дьяки», песок мелкий с $M_k \sim 1,5-1,8$ карьера № 1 «Скура-ты» и т. д.;

– в Могилевской области – песок мелкий с $M_k \sim 1,6-2,0$ карьера «Охотичи», очень мелкие речные пески с $M_k \sim 1,0-1,2$; с $M_k \leq 2,0$ карьера «Березинский» и т. д.

Как следствие всего выше сказанного, при изготовлении различных конструкций и изделий с повышенными требованиями в части физико-механики, коррозионной стойкости и непроницаемости предприятия – изготовители бетонных смесей и бетонных и железобетонных изделий (конструкций) вынужденно осуществляют доставку более качественного мелкого заполнителя (песка) из различных районов и областей Республики Беларусь, что приводит к повышению стоимости их продукции. Отсутствие качественного природного мелкого заполнителя вынуждает использовать мелко- и тонкодисперсные речные пески (модуль крупности $M_k < 1,5$, а зачастую $M_k < 1,0$) или материал местных карьеров с повышенным содержанием загрязняющих примесей (преимущественно глины), что приводит к ухудшению качества бетона, несмотря на достаточно существенное увеличение вяжущего вещества (до 20 %).

Материал данной работы отражает результаты исследований, направленных на решение важной научно-технической задачи по повышению физико-механических свойств, а в результате и качества мелкого заполнителя для бетона (песка) путем разработки технологии нормализации гранулометрии природного мелкозернистого песка недостающими крупными фракциями гранитного отсева, который является побочным продуктом при производстве щебня из плотных горных пород (гранита) для строительных работ на предприятии РУПП «Гранит» и составляет около 35 % от массы исходной горной породы, идущей на производство гранитного щебня, и накапливается в отвалах промышленной площадки этого предприятия.

Технология получения нормализованного мелкого заполнителя требуемой granulometрии (модуля крупности)

На начальном этапе исследований оценили постоянство granulометрического состава [7] и других свойств технологического отхода производства щебня на предприятии строительной отрасли РУПП «Гранит» – отсева из материалов дробления горных пород (гранита). Оценка зернового состава, отобранного из исходного материала разными способами отделения (ситовым рассевом и сегрегацией в воздушном потоке), показала их практическую идентичность и возможность практического применения.

Исследуя свойства фракций гранитного отсева более 0,5 мм установили истинную плотность зерен ($\sim 2700 \text{ кг/м}^3$), прочность при сжатии в цилиндре ($\geq 60,0 \text{ МПа}$), содержание пылевидных фракций ($\leq 3,0 \%$), щелоче- и солеустойчивость при переменном насыщении в растворах солей (5%-й р-р NaCl и Na_2CO_3) и щело-

чи (NaOH) и высушивании, провели рентгенофазовые и дериватографические испытания проб, создав тем самым необходимые предпосылки для исследований в конструкционном бетоне. На основе анализа фактических данных об использовании природных песков Беларуси определили их разновидности для проведения исследований, в частности характеризующиеся диапазоном модуля крупности $0,9 \leq M_k \leq 2,0$.

Последующими исследованиями разработана методика ведения расчетов количественного соотношения фракций различной крупности зерен в исходном природном песке и вводимых крупных фракций гранитного отсева (размерами 0,5–5,0 мм) [8, 9], которое обеспечивает получение мелкого заполнителя заданной (требуемой) granulометрии, определяемой по величине модуля крупности продукта их смешивания. Для автоматизации расчетов разработан алгоритм (рис. 1) и программа Normalization (регистрационный номер 022 от 07.03.2024), обеспечивающие получение обогащенного мелкого заполнителя с заданным (требуемым) модулем крупности (рис. 2).



Рис. 1. Структурная схема алгоритма программы Normalization

Fig. 1. Block diagram of the “Normalization” program algorithm

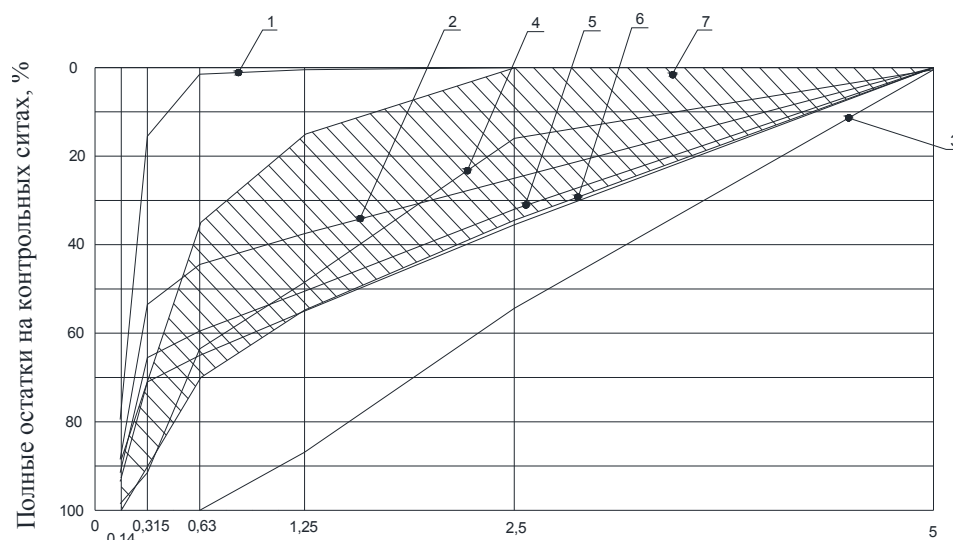
Проверка (представлена примерами на рис. 2 и 3) обогащенного заполнителя путем отсева по стандартному набору сит показала, что отклонение фактических величин модуля крупности от рассчитанных по программе Normalization составило от 0 до 2,4 %, что свидетельствует о его пригодности для ведения практических расчетов.

В результате проведенных многочисленных экспериментов предложена к реализации тех-

нология нормализации гранулометрии мелкозернистого заполнителя путем отдельного дозирования и смешивания расчетного количества исходного песка и гранитного отсева (его крупных фракций). В процессе перемешивания бетонной смеси имеют место самопроизвольное смешивание всех фракций мелкого заполнителя и равномерное распределение последнего в объеме приготавливаемого бетона.

Рис. 2. Пример расчета с использованием программы Normalization

Fig. 2. Example of calculation using the "Normalization" program



Размеры контрольных отверстий:

1 – $M_k = 1,0$ – природный; 2 – $M_k = 3,2$ – природный; 3 – $M_k = 4,4$ – гранитный отсев; 4 – $M_k = 2,5$ – обогащенный; 5 – $M_k = 3,0$ – обогащенный; 6 – $M_k = 3,25$ – обогащенный; 7 – область рекомендуемых значений по ГОСТ 8736–2014

Рис. 3. Изменения гранулометрического состава обогащенного песка на основе природного с $M_k \sim 1,0$

Fig. 3. Changes in the granulometric composition of enriched sand based on natural sand with $M_k \sim 1,0$

Технологические свойства бетонных смесей и физико-механические свойства тяжелого бетона с использованием нормализованного мелкого заполнителя (песка)

При исследовании тенденций влияния нормализованного (обогащенного) мелкого заполнителя разных групп по крупности на формовочные свойства бетонных смесей, динамику роста и уровень прочности бетона и других его физико-механических свойств применяли один номинальный состав бетона для испытаний по ГОСТ 30459–96 [10], принимаемый для определения эффективности химических добавок для бетонов: цемент – 350 кг; щебень гранитный фр. 5–20 мм – 1150 кг; песок – 700 кг; вода – 175 кг ($B/C_0 = 0,5$). В процессе исследований закономерности изменений формуемости бетонных смесей, приготовленных на природных заполнителях, и после их обогащения гранитным отсевом установили, что при их равной подвижности, например на уровне осадка конуса (ОК) ~ 3 –4 см (рис. 4), нормализованный заполнитель обеспечивает снижение начального водосодержания бетона в сопоставлении с использованием речного природного песка с $M_k \sim 0,9$ до 8,6 %; природного песка с $M_k \sim 1,5$ – до 5,7 %, а с $M_k \sim 2,0$ – на 3,0 %, при практической идентичности изменений подвижности бетонных смесей во времени.

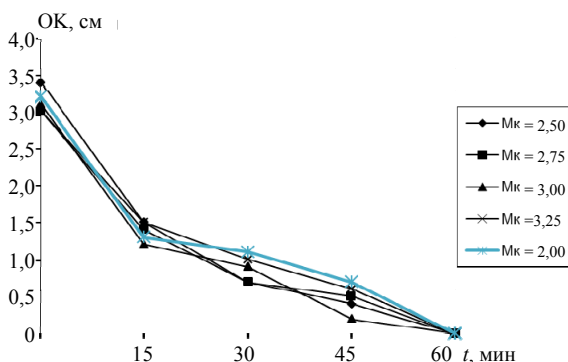


Рис. 4. Тенденция изменений осадки конуса во времени ($M_{k,неч} \sim 2,0$)

Fig. 4. Trend of changes in cone settlement over time ($M_{k,ref} \sim 2.0$)

Экспериментально выявлено, что улучшение гранулометрии нормализованного мелкого заполнителя в сочетании со снижением

начального водосодержания способствует росту на 2,0–4,5 % средней плотности бетонных смесей, отформованных вибрированием со стандартными параметрами ($A = 0,5$ мм; $f = 50$ Гц); при большем значении, соответствующем обогащенному песку (с $M_k \sim 3,0$ –3,25).

Оценка влияния нормализованной гранулометрии мелкого заполнителя на устойчивость бетонных смесей к расслоению при использовании природного мелкого заполнителя крупностью $M_k \sim 0,9$; 1,5; 2,0 после обогащения гранитным отсевом до $M_k \sim 2,5$; 3,0; 3,25 выполнена для с марок по удобоукладываемости П1 и П2, которые обычно готовят без применения химических пластифицирующих добавок, снижающих водоцементное отношение бетона. Установлено снижение раствороотделения в равноподвижных бетонных смесях под воздействием вибрации до 34,5–47,5 %, а водоотделения в статическом состоянии до 32,8–47,8 %, что является основой повышения однородности структуры и качественных характеристик бетона.

На следующем этапе работы исследовали зависимость прочности бетона на сжатие (рис. 5) [11, 12], осевое растяжение и срез, изменения усадки и упругодеформативных свойств в зависимости от гранулометрии примененного мелкого заполнителя – исходного ($M_k \sim 0,9$; 1,0; 1,5 и 2,0) и нормализованного, характеризующегося модулем крупности $M_k \sim 2,0$ –3,25.

Для сравнения изготавливали и испытывали образцы бетона с использованием высококачественного (мытого) крупнозернистого песка с $M_k \sim 3,2$. С целью получения сравнительных результатов во всех случаях использовали равноподвижные бетонные смеси марки П1 (осадка конуса составляла 2–4 см) при прочих равных условиях как при формовании и твердении, так и при испытаниях образцов. Результаты экспериментов частично представлены в виде графических зависимостей (рис. 5а) прочности бетона на сжатие от крупности использованного песка после тепловлажностной обработки (по режиму: предварительная выдержка 2 ч; подъем температуры до 80 °С за 3 ч; изотермическая выдержка 6 ч и остывание в формах более 2 ч, при испытании образцов не позднее 1 сут. от момента их изготовления) и дальнейшего твердения 28 сут. в камере с «нормальными условиями» (рис. 5б).

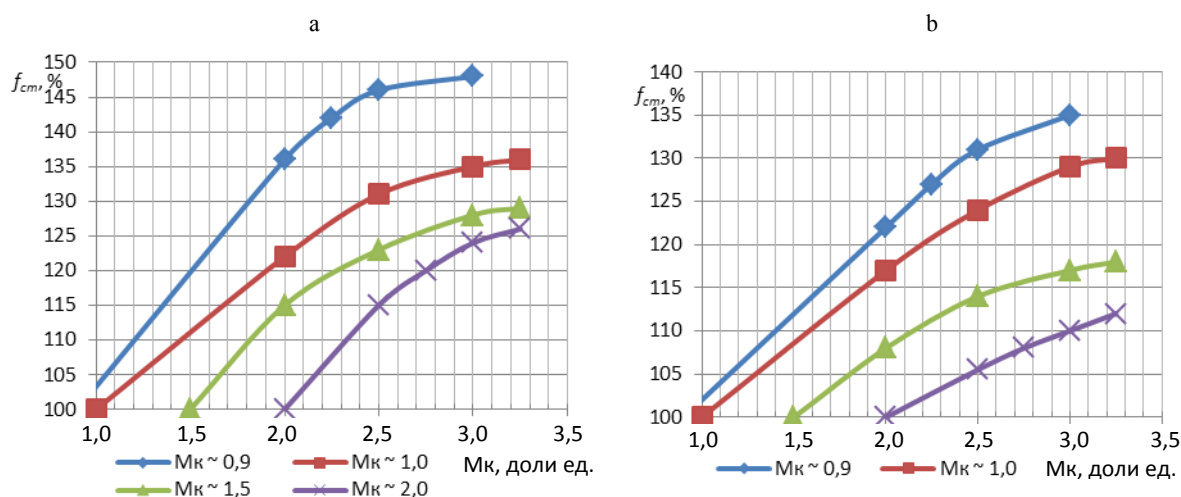


Рис. 5. Прочность бетона на сжатие: а – тенденция изменений относительной прочности после пропаривания бетона на нормализованном мелком заполнителе в зависимости от модуля крупности исходного песка; б – тенденция роста прочности бетона к 28 сут. твердения в нормальных условиях на нормализованном мелком заполнителе в зависимости от исходной крупности песка

Fig. 5. Compressive strength of concrete: a – trend of changes in relative strength after steaming concrete on normalized fine aggregate depending on the particle size modulus of the original sand; b – trend of increasing concrete strength by 28 days of hardening under normal conditions using normalized fine aggregate depending on the initial sand size

Эти данные отражают общую закономерность ее роста во взаимосвязи со степенью обогащения исходного песка, выраженной величиной модуля крупности. При этом наибольший прирост прочности (до 36–48 %) характерен для групп исходного песка тонкого и очень мелкого. С улучшением гранулометрии исходного песка, отраженной повышением модуля крупности до Mk = 1,5 и 2,0, прирост прочности бетона проектного возраста составляет до 30 и 25 % соответственно. Экспериментально подтверждена возможность снижения расхода цемента до 20 %, а для тонких и очень мелких песков – и более при сохранении уровня прочности бетона, обеспечиваемого при использовании исходного, необогащенного мелкого заполнителя.

Прочность на осевое растяжение бетона путем раскалывания образцов (по методике Ахвердова И. Н. – Ицковича С. М [13]), приготовленного на исходном песке с Mk = 0,9 и 2,0, и после его обогащения до Mk = 2,5–3,25 возросла соответственно на 30–45 %. При этом усадка мелкозернистого бетона, приготовленного на приведенных вариантах мелкого заполнителя и твердеющего в воздушно-сухих условиях, снизилась в 1,5–2 раза (рис. 6), что предопределяет более высокую степень устойчивости бетона к трещинообразованию на нормализованном мелком заполнителе в процессе как его твердения, так и эксплуатации железобетонных изделий и конструкций.

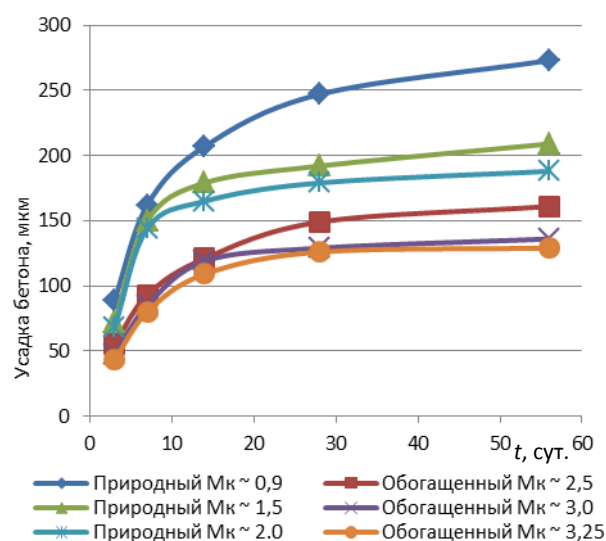


Рис. 6. Влияние технологии обогащения мелкого заполнителя на усадку мелкозернистого бетона

Fig. 6. Influence of fine aggregate enrichment technology on the shrinkage of fine-grained concrete

Деформативность бетона оценили путем испытаний образцов-балочек (40×40×160 мм) на изгиб, а его упругие свойства – при сжатии таких же балочек по продольной оси в варианте сравнения при соответствующих испытаниях образцов бетона, приготовленного на исходном природном песке с Mk ~ 0,9 и после его обогащения до Mk ~ 2,5 (рис. 7а, б).

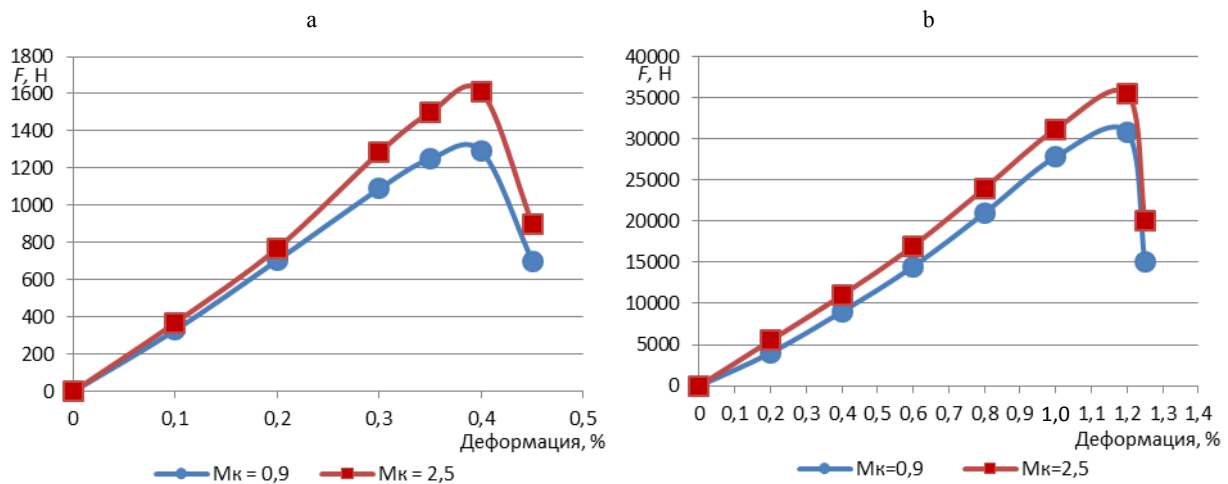


Рис. 7. Деформативность мелкозернистого бетона: а – «нагрузка-деформация» образцов при испытании на изгиб; б – то же при испытании на осевое сжатие

Fig. 7. Deformability of fine-grained concrete: a – “load-strain” of samples during bending tests; b – the same for axial compression testing

По результатам эксперимента можно оценить рост нагрузки: при испытаниях образцов балок на изгиб (деформативность) – на 25 %; при осевом сжатии к началу необратимых пластических деформаций (упругие свойства) – на 15 %. Этот результат логичен, так как повышение качества сцепления (рост сил сцепления) между цементным камнем и поверхностью зерен обогащенного гранитным отсевом мелкого заполнителя в большей мере проявляется при «работе» бетона на растяжение (в данном эксперименте – на растяжение при изгибе).

Эксплуатационные свойства и составы конструкционного тяжелого бетона общестроительного назначения на нормализованном мелком заполнителе

Эксплуатационные свойства бетона, приготовленного на природном мелком заполнителе, определяли в сравнении с бетоном на заполнителе нормализованной гранулометрии после обогащения крупными фракциями гранитного отсева. Исследования проведены на образцах бетона «стандартизированного» состава (по ГОСТ 30459–96 [10]), приготовленных из равноподвижных бетонных смесей при изменяемом соотношении исходного песка $M_k = 1,0$ и обогащающих фракций отсева (табл. 1), а также на составах классов С8/10 – С40/50, что соответствует прочности бетона на сжатие ориентировочно от 13 до 65 МПа, т. е. включает основной диапазон значений прочности бетона,

который в основном применяют в общестроительном производстве, в том числе классы С35/45 и С40/50, относящиеся по действующему на территории Республики Беларусь стандарту СТБ 1544–2005 [14] к высокопрочным.

Таблица 1

Количественное соотношение исходного природного песка и гранитного отсева в составе мелкого заполнителя
Quantitative ratio of the original natural sand and granite screenings in the composition of fine aggregate

Mk, доли ед., применяемого мелкого заполнителя	Содержание, кг	
	Песок	Отсев
1,0	700	–
2,0	492	208
2,5	389	311
3,0	288	412
3,5	185	515

Результаты испытаний, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о непосредственной взаимосвязи изменений свойств бетона с качеством мелкого заполнителя при прочих равных условиях. Очевидно, что уменьшение доли природного тонкого (с развитой удельной поверхностью) песка в обогащаемом мелком заполнителе и, как следствие, более рациональное сочетание фракций разных размеров с увеличением доли крупных фракций отсева в обогащенном материале способствует более плотной взаимной укладке зерен заполнителя в бетоне и росту качества (плотности) его структуры.

Эксплуатационные свойства бетона
Performance properties of concrete

Мк, доли ед., применяемого мелкого заполнителя	$W_m, \%$	$W_0, \%$	Марка по водонепроницаемости	Марка по морозостойкости	Стойкость в воде (циклы)	Стойкость в 5%-м растворе NaCl (циклы)
					при циклическом насыщении-высушивании к началу снижения прочности	
1,0	4,55	10,6	W2	150	50	30
2,0	3,40	8,0	W6	200	Более 70	50
2,5	3,25	7,6	W6	300	Более 70	70
3,0	2,60	6,2	W8	300	Более 70	70
3,5	2,45	5,9	W6	400	Более 70	70

Графические зависимости рис. 8 отражают изменение прочности бетона на сжатие при испытаниях на морозостойкость (рис. 8а) и солестойкость (рис. 8б; насыщение в 5%-м растворе NaCl – высушивание). Очевидна общность тенденции изменений прочности бетона, приготовленного с одинаковым расходом цемента при неизменности подвижности бетонной смеси и прочих равных условиях, в процессе испытаний коррозионной стойкости (морозо- и солестойкости) и общий рост этих его характеристик после обогащения (нормализации) исходного песка (мелкозернистого), базирующийся на повышении плотности и непроницаемости бетона, снижении усадочных деформаций (повышении трещиностойкости под действием знакопеременных деформаций), повышении прочности к началу испытаний как

фактора, усиливающего способность бетона к восприятию циклических температурных колебаний и накопления усталостных деформаций, приводящих к трещинообразованию.

Для оценки эффективности разрабатываемой технологии в железобетоне проведены комплексные сравнительные испытания по СТБ 1168–99 [15] характеристики коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне на исходном (Мк = 1,0) и обогащенном (с Мк = 2,0 и 3,5) мелком заполнителе в «среде – воде» (направление 1) и в агрессивной среде – 5%-м растворе NaCl (направление 2). На рис. 9 частично приведены анодные поляризационные кривые, отражающие защитную способность бетона по отношению к стальной арматуре (после 10 циклов с 5%-м раствором NaCl).

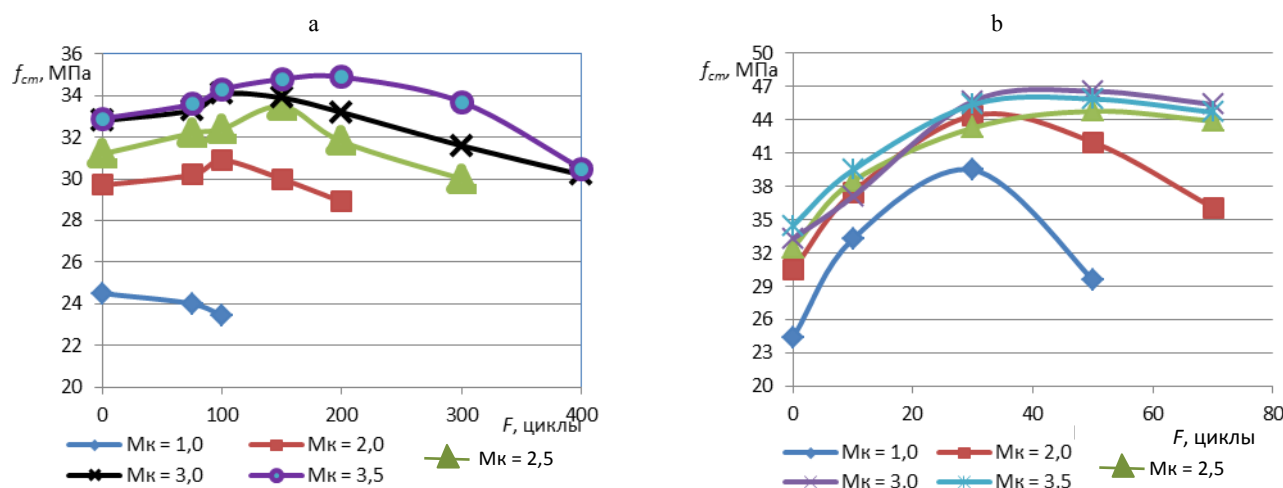


Рис. 8. Результаты циклических испытаний бетона: а – изменение прочности бетона при определении морозостойкости; б – то же в процессе испытаний на солестойкость

Fig. 8. Results of cyclic tests of concrete: а – changes in concrete strength when determining frost resistance; б – the same during salt resistance tests

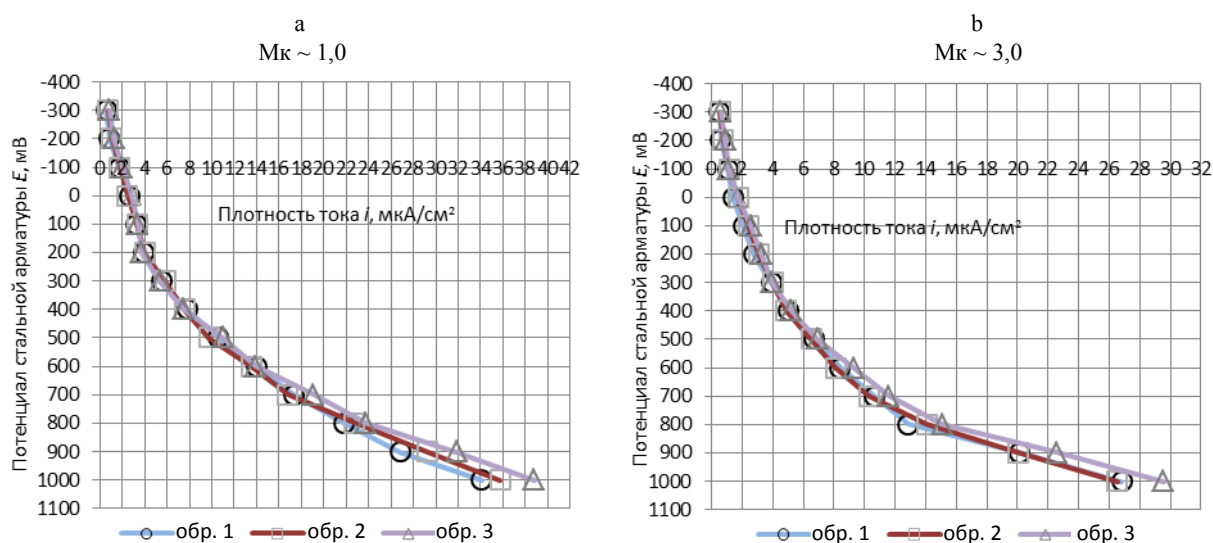


Рис. 9. Результаты ускоренных электрохимических испытаний при воздействии агрессивной среды: а – анодные поляризационные кривые для образцов с $M_k \sim 1,0$; б – то же с $M_k \sim 3,0$

Fig. 9. Results of accelerated electrochemical tests when exposed to aggressive environments: а – anodic polarization curves for samples with $M_k \sim 1.0$; б – the same with $M_k \sim 3.0$

Обобщение полученных результатов циклических испытаний показало, что бетон на обогащенном (нормализованном) мелком заполнителе обеспечивает необходимый уровень защиты по отношению к стальной арматуре (включая преднапрягаемую) при воздействии агрессивной среды (5%-й раствор NaCl); бетон на тонком природном песке с модулем крупности $M_k \leq 1,0$ не в полной мере обеспечивает сохранность стальной арматуры, так как присутствуют признаки ее активизации и возможного развития процесса коррозии, что недопустимо для преднапряженных изделий и конструкций.

Результаты исследований физико-механических характеристик тяжелого бетона классов C8/10 – C40/50, приготовленного на обогащенном до $M_k = 3,0$ мелком заполнителе (от исходного $M_k = 1,0$), частично приведены в табл. 3. На примере сопоставления величин характеристик бетона одного класса C25/30 по прочности на сжатие, но приготовленного на исходном песке с $M_k = 1,0$ и после его обогащения до $M_k = 3,0$, очевиден рост прочности и упругости: E_b , E_g и G_g , несмотря на снижение расхода цемента на 20 % в составе бетона на обогащенном (нормализованном) песке.

Таблица 3

Сравнительные характеристики бетона

Comparative characteristics of concrete

Класс бетона (модуль крупности песка)	Прочность на сжатие в 28 сут., МПа		Модуль упругости бетона, ГПа			Динамический коэффициент Пуассона M_g , доли ед.	Логарифмический декремент затухания δ , доли ед.
	f_{cm}	f_{ck}	статический E_b (ориентировочный)	Динамический E_g	сдвига, G_g		
C25/30* ($M_k = 1,0$)	39,2	31,0	35,6	38,1	15,8	0,206	0,04467
C25/30** ($M_k = 3,0$)	41,5	33,6	37,8	41,2	17,2	0,198	0,03249
C32/40** ($M_k = 3,0$)	52,8	42,2	38,5	42,0	17,6	0,193	0,03167
C40/50** ($M_k = 3,0$)	65,0	53,3	40,9	43,5	18,5	0,176	0,02888

* Бетон на исходном песке с $M_k = 1,0$ при расходе цемента 420 кг/м^3 .
 ** Бетон на обогащенном песке с $M_k = 3,0$ при расходах цемента: для C25/30 – 350 кг/м^3 , для C32/40 – 400 кг/м^3 , для C40/50 – 550 кг/м^3 .

При этом для бетона на обогащенном (нормализованном) песке существенно снижается логарифмический декремент затухания колебаний (δ), который отражает его предрасположенность к пластическим деформациям под нагрузкой, что взаимосвязано с уменьшением объема «дефектных» зон в структуре бетона на нормализованном заполнителе.

Кроме изложенного, обобщение результатов испытаний образцов тяжелого конструкционного бетона, приведенных в табл. 3, классов в части величин модуля упругости (отметим – приближенных, так как получены по нестандартизированной методике) показывает, что тем не менее они соответствуют (удовлетворяют) требованиям действующих на территории Беларуси СП 5.03.01–2020 ([16], табл. 6.2).

ВЫВОДЫ

1. Разработаны научно-практические основы технологии обогащения (нормализации) гранулометрии мелкого заполнителя (песка) для тяжелого конструкционного бетона на основе рационально подобранной смеси природных мелкозернистых песков и крупных фракций гранитного отсева и применения его с целью повышения качественных характеристик бетона.

2. Экспериментально, путем многолетней выборки проб, обоснованы стабильность гранулометрического состава гранитного отсева на предприятии РУПП «Гранит» и технология его первичной переработки с целью отделения фракций размерами 0,5–5,0 мм путем воздушной сегрегации или ситового отсева, определены свойства этих фракций, необходимые для использования в качестве обогащающей составляющей природных мелкозернистых песков с целью нормализации их гранулометрии.

3. Предложена и экспериментально обоснована методика расчета соотношения массовых долей (количества) природного песка, характеризующегося гранулометрическим составом с модулем крупности $0,9 \leq M_k \leq 2,0$, и крупных фракций переработанного гранитного отсева для изготовления обогащенного мелкого заполнителя с заданной величиной модуля крупности в диапазоне $2,0 \leq M_k \leq 3,5$ для конкретных условий использования бетона; разработа-

на программа Normalization (регистрационный номер 022 от 07.03.2024) для реализации этих расчетов технологическими службами производящих бетон предприятий.

4. Разработана технология нормализации гранулометрического состава мелкозернистых природных песков путем обогащения мелких природных песков, которая осуществляется непосредственно в процессе приготовления бетонных смесей путем отдельного дозирования и введения в бетоносмеситель расчетных массовых долей (количественного соотношения) обогащаемого песка и крупных фракций гранитного отсева и экспериментально обоснована ее эффективность, обусловленная ростом прочности бетона на сжатие до 25–40 %, прочности на осевое растяжение и срез до 35–45 %, снижением раствора- и водоотделения на 30–47 %, а также повышением упругих и деформативных характеристик и эксплуатационных (водонепроницаемости, водо-, соле- и морозостойкости) свойств бетона и защитной способности бетона по отношению к стальной арматуре.

ЛИТЕРАТУРА

- Ахвердов, И. Н. Высокопрочный бетон / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1961. 106 с.
- Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1981. 404 с.
- Баженов, Ю. М. Технология бетона: учеб. для студ. вузов строит. спец. / Ю. М. Баженов. 3-е изд. М.: Изд-во АСВ, 2003. 500 с.
- Блещик, Н. П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и пресс-вакуум бетона / Н. П. Блещик. Минск: Наука и техника, 1977. 230 с.
- Барташевич, А. Я. Исследование структурно-технических свойств бетонной смеси, уплотненной прессованием и вакуумированием: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / А. Я. Барташевич, ИСиА Госстрой БССР. Минск, 1973. 37 с.
- Песок для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8736–2014. Введ. 01.04.2015. М.: Стандартинформ, 2015. 10 с.
- Теоретические и практические основы минимизации содержания цемента в бетоне путем формирования оптимального зернового состава / П. Л. Федорович [и др.] // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства: сб. науч.-техн. ст. (материалы науч.-метод. семинара), 29 мая 2012 г. Минск, 2012. Ч. 2. С. 155–165.
- Федорович, П. Л. О технологии обогащения мелкого заполнителя для бетона / П. Л. Федорович, Н. М. Голубев // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. Минск: Изд. центр БГУ, 2016. Вып. 8. С. 290–306.

9. Федорович, П. Л. Эффективность нормализации гранулометрического состава мелкого заполнителя для тяжелого бетона / П. Л. Федорович // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. Минск: Изд. центр БГУ, 2018. Вып. 10. С. 273–288.
10. Добавки для бетонов. Методы определения эффективности: ГОСТ 30459–96. Введ. 01.07.98. Минск: М-во архитектуры и строительства Реп. Беларусь, 1998. 39 с.
11. Смоляков, А. В. Научно-технические основы технологии полного использования гранитного отсева в бетонах / А. В. Смоляков, П. Л. Федорович, Э. И. Батыновский // Строительная наука и техника. 2011. № 6. С. 35–41.
12. Батыновский, Э. И. Обеспечение качества бетона при использовании цемента с гранитным отсевом и обогащении песка его крупными фракциями / Э. И. Батыновский, П. Л. Федорович, А. В. Смоляков // Технологии бетонов. 2014. № 6. С. 37–39.
13. Ахвердов, И. Н. Исследование метода испытания бетона на растяжение посредством раскалывания образцов / И. Н. Ахвердов // Бетон и железобетон. 1961. № 1. С. 19–23.
14. Бетоны конструкционные тяжелые. Общие технические условия. СТБ 1544–2005. Введ. 01.07.2005. Минск: М-во архитектуры и строительства Реп. Беларусь, 2005. 24 с.
15. Методы контроля коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне и защитных свойств бетона: СТБ 1168–99. Введ. 01.01.2000. Минск: М-во архитектуры и строительства Реп. Беларусь, 1999. 23 с.
16. Бетонные и железобетонные конструкции. СП 5.03.01–2020. Введ. 16.11.2020. Минск: Минстройархитектуры, 2020. 244 с.
7. Fedorovich P. L., Korsun A. M., Titkov D. L., Grebenek N. O. (2012) Theoretical and Practical Basis for Minimizing the Cement Content in Concrete by Forming an Optimal Grain Composition. *Voprosy Vnedreniya Norm Proektirovaniya i Standartov Evropeiskogo Soyuz v Oblasti Stroitel'stva: Sb. Nauch.-Tekhn. St. (Materialy Nauch.-Metod. Seminara)*, 29 Maya 2012 g. Ch. 2 [Issue of Implementation of Design Norms and Standards of the European Union in the Field of Construction. Collection of Scientific and Technical Articles (Materials of a Scientific and Methodological Seminar), May 29, 2012. Part 2]. Minsk, 155–165 (in Russian).
8. Fedorovich P. L., Golubev N. M. (2016) About the Technology of Enrichment of Fine Aggregate for Concrete. *Problemy Sovremennogo Betona i Zhelezobetona: Sb. Nauch. Tr.* [Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete. Collection of Scientific Papers]. Minsk, BSU Publishing Center, Iss. 8, 290–306 (in Russian).
9. Fedorovich P. L. (2018) Efficiency of Normalization of the Granulometric Composition of Fine Aggregate for Heavy Concrete. *Problemy Sovremennogo Betona i Zhelezobetona: Sb. Nauch. Tr.* [Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete. Collection of Scientific Papers]. Minsk, BSU Publishing Center, Iss. 10, 273–288 (in Russian).
10. State Standard 30459–96. *Additives for Concrete. Methods for Determining Effectiveness*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 1998. 39 (in Russian).
11. Smolyakov A. V., Fedorovich P. L., Batoryanskiy E. I. (2011) Scientific and Technical Basis of the Technology for the Full Use of Granite Screenings in Concrete. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technology], (6), 35–41 (in Russian).
12. Batoryanskiy E. I., Fedorovich P. L., Smolyakov A. V. (2014) Ensuring the Quality of Concrete when Using Cement with Granite Screenings and Enriching Sand with its Large Fractions. *Tekhnologii Betonov* [Concrete Technologies], (6), 37–39 (in Russian).
13. Akhverdov I. N. (1961) Study of a Method for Testing Concrete Tensile Strength by Splitting Samples. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*, (1), 19–23 (in Russian).
14. STB 1544–2005. *Heavy Structural Concrete. Technical Specifications*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2005. 24 (in Russian).
15. STB 1168–99. *Methods for Monitoring the Corrosion State of Steel Reinforcement in Concrete and the Protective Properties of Concrete*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 1999. 23 (in Russian).
16. SP 5.03.01–2020. *Concrete and Reinforced Concrete Structures*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2020. 244 (in Russian).

Поступила 09.04.2024

Подписана к печати 10.06.2024

Опубликована онлайн 31.07.2024

REFERENCES

1. Akhverdov I. N. (1961) *High-Strength Concrete*. Moscow, Stroizdat Publ. 106 (in Russian).
2. Akhverdov I. N. (1981) *Fundamentals of Concrete Physics*. Moscow, Stroizdat. 404 (in Russian).
3. Bazhenov Yu. M. (2003) *Technology of Concrete*. 3rd ed. Moscow, Publishing House "ASV". 500 (in Russian).
4. Bleshchik N. P. (1977) *Structural-Mechanical Properties and Rheology of Concrete Mixture and Press-Vacuum of Concrete*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 230 (in Russian).
5. Bartashevich A. Ya. (1973) Study of the Structural and Technical Properties of Concrete Mixture Compacted by Pressing and Vacuuming [Dissertation]. Minsk (in Russian).
6. State Standard 8736–2014. *Sand for Construction Works. Specifications*. Minsk, Standartinform Publ., 2015. 10 p. (in Russian).

Received: 09.04.2024

Accepted: 10.06.2024

Published online: 31.07.2024