



UDC 691.327:620.3

Author: MAKEEV Alexey Ivanovich, Ph.D. in Engineering, Associate Professor of Department of Building Materials, Products and Structures Technology, Voronezh State Technical University, 20-letiya Oktayabrya St., 84, Voronezh, Russia, 394006, e-mail: makeev@vgasu.vrn.ru;

Author: CHERNYSHOV Evgeny Mihailovich, Doctor of Engineering, Academician of RAACS, Professor, Director of the Academic Center, Voronezh State Technical University; 20-letiya Oktayabrya St., 84, Voronezh, Russia, 394006, e-mail: chem@vgasu.vrn.ru

DUST FRACTION OF GRANITE CRUSHING SCREENINGS AS A MEDIUM OF MICRO/NANOPARTICLES ENGAGED IN STRUCTURAL FORMATION OF CEMENT CONCRETE

EXTENDED ABSTRACT:

The dust fraction of the granite crushing screenings is considered and evaluated as a carrier of microsize and nanosized components engaged in the structure formation of cement stone and concrete. The genesis of the pulverized fraction and the identification of its composition and specific properties are given. The paper also analyzes the nature of mechanical, mechanochemical, physical and chemical activity and the role of the pulverized fraction of screening in the processes of cement hydration and structure formation of cement stone. The micro-sized component is regarded as a filler in the cement that is a part of the fine-grained concrete mixture. The nanoscale component is analyzed as a silica-containing additive capable to provide nanomodification of the hydrated cement structure. Experimental data and quantitative estimates of the



influence of the dust fraction on the hardening dynamics and the strength of fine-grained concrete are presented.

Keywords: stone crushing screenings, microsize and nanosized SiO₂ particles, modification of the concrete structure.

DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-20-38](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-20-38)

MACHINE-READABLE INFORMATION ON CC-LICENSES (HTML-CODE) IN METADATA OF THE PAPER

```
<a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/"></a><br /><span xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://purl.org/dc/dcmitype/Text" property="dct:title" rel="dct:type">Dust fraction of granite crushing screenings as a medium of micro/nanoparticles engaged in structural formation of cement concrete</span> by <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2018, Vol. 10, no. 4, pp. 20–38. DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-20-38. " property="cc:attributionName" rel="cc:attributionURL">Makeev A.I., Chernyshov E.M. </a> is licensed under a <a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">Creative Commons Attribution 4.0 International License</a>. <br />Based on a work at <a xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-4-2018/" rel="dct:source">http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-4-2018/</a>. <br />Permissions beyond the scope of this license may be available at <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="mailto:makeev@vgasu.vrn.ru" rel="cc:morePermissions">makeev@vgasu.vrn.ru</a>.
```

References:

1. *Khara O.Ye., Levkova N.S., Lopatnikov M.I., Gornostayeva T.A.* Ispol'zovaniye otkhodov pererabotki gornyx porod pri proizvodstve nerudnykh stroitel'nykh materialov [The use of rock processing wastes in production of nonmetallic building materials]. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2003. № 9. p. 18–19. (In Russian).
2. *Butkevich G.R.* Sostoyaniye i napravleniya razvitiya gornoy otrasli promyshlennosti stroitel'nykh materialov [The states and directions for development of mining industry of building materials]. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2006. № 7. p. 4–6. (In Russian).
3. *Lesovik R.V.* K vyboru tekhnogennykh peskov dlya polucheniya kompozitsionnykh vyazhushchikh i melkozernistykh betonov [The selection of technogenic sands for production of composite binders and fine-grained concretes]. *Tekhnologii betonov [Concrete Technologies]*. 2015. № 1–2. p. 60–63. (In Russian).
4. *Rana A., Kalla P., Verma H.K., Mohnot J.K.* Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2016. V. 135. p. 312–331.



5. *Dvorkin L.I., Zhitkovskiy V.V.* Vysokoprochnyye melkozernistyye betony s ispol'zovaniyem granitnykh otsevov [High-strength fine-grained concretes with the use of granite screenings]. *Tekhnologii betonov [Concrete Technologies]*. 2017. № 5–6 (130–131). p. 21–25. (In Russian).
6. *Medina G., Sáez del Bosque I.F., Frías M., Sánchez de Rojas M.I., Medina C.* Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (scm): scientific and technical considerations. *Journal of Cleaner Production*. 2017. V. 148. pp. 467–476.
7. *Yegorychev A.S., Kalgin Yu.I.* Feasibility of application of bituminous binder in cast asphalt concrete mixtures for laying and repairing roadway surfacing of a highway bridge. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2018. V. 2. № 38. p. 38–46.
8. *Makeev A.I.* Glubokaya pererabotka otsevov drobleniya granitnogo shchebnaya dlya ikh kompleksnogo ispol'zovaniya v proizvodstve stroitel'nykh materialov [Deep processing of screenings for crushing granite crushed stone for their integrated use in the production of building materials]. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury [Russian Journal of building construction and architecture]*. 2010. № 1 (17). p. 92–99. (In Russian).
9. *Makeev A.I.* Nauchno-tekhnicheskoye obosnovaniye tekhnologii glubokoy pererabotki ot-sevov drobleniya granitnogo shchebnaya [Scientific and technical justification of the technology of deep processing of screenings of granite crushed stone crushing]. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury [Russian Journal of building construction and architecture]*. 2011. № 3 (23). p. 56–67.
10. *Chernyshov Ye.M., Artamonova O.V., Slavcheva G.S.* Nanomodifitsirovaniye sistem tverdeniya v strukture stroitel'nykh kompozitov [Nanomodification of hardening systems in structure of building composites]. Voronezh, Publishing house «Nauchnaya kniga», 2016. 132 p. (In Russian).
11. *Makeev A.I., Chernyshov Ye.M.* Granite Crushing Screenings as a Component Factor of Concrete Structure Formation. Part 1. Problem Definition. Identification of Screenings as a Component Factor of Structure Formation. *Stroitel'nyye materialy [Construction Materials]*. 2018. № 4, pp. 56–60. (In Russian).
12. *Vettegren' V.I., Shcherbakov I.P., Mamalimov R.I., Kulik V.B.* Izmeneniye struktury geterogennogo tverdogo tela (granita) pod vliyaniyem udarnoy volny [Transformation of the structure of heterogeneous solid state (granite) under air blast]. *Fizika tverdogo tela [Solid State Physics]*. 2016. Vol. 58. № 4. p. 681–684. (In Russian).
13. *Mansurov V.A., Sul'tonov U., Rustamova M.Z., Kuksenko V.S., Makhmudov KH.F.* Strukturnyye izmeneniya pri deformatsii prirodnykh geterogennykh materialov [Changes in structure of natural heterogenous materials under deformation]. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh [Journal of Mining Science]*. 2009. № 4. pp. 55–59. (In Russian).
14. *Sharkov M.D. et al.* Rentgenovskiy issledovaniya formirovaniya domenov v gornyykh porodakh pod vzryvnym vozdeystviyem [X-ray research of domain formation in rocks under



- explosion]. Fizika tverdogo tela [Solid State Physics]. 2016. Vol. 58. № 11. p. 2248–2251. (In Russian).
15. Vinogradov YU.I., Khokhlov S.V. K voprosu ob obrazovanii «otseva» pri dobyche granitnogo shchebnaya [Formation of screenings in winning granite macadam]. Vzryvnoye delo [Blasting work]. 2015. № 113–70, p. 118–125. (In Russian).
 16. Adushkin V.V., Popel' S.I. Melkodispersnyye chastitsy v prirodnykh i tekhnogennykh geosistemakh [Fine particles in natural and technogenic geosystems]. Fizika Zemli [Izvestiya, Physics of the Solid Earth]. 2012. № 3, p. 81–92. (In Russian).
 17. Sokolova YU.V., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A., Lesovik V.S. Soderzhaniye dioksida kremniya i energeticheskiye kharakteristiki tonkodispersnykh sistem gornyykh porod [Content of silica dioxide and energy characteristics of fine-dispersed systems of rocks]. Aktual'nyye problemy sovremennoy stroitel'noy nauki i obrazovaniya: Matly vseross. nauch-prakt. konf [Proc. of All-Russian scientific conference «The problems of modern construction and education»]. 2017, pp. 236–243. (In Russian).
 18. Korotkikh D.N., Artamonova O.V., Chernyshov Ye.M. Substantiation of requirements to nanomodifying additives for high-strength cement concrete. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2009, Vol. 1, no. 2, p. 42–49. URL: http://nanobuild.ru/ru_RU (accessed: 12.07.2018).
 19. Pacheco-Torgal F., Jalali S. Nanotechnology: advantages and drawbacks in the field of construction and building materials. Construction and Building Materials. – 2011. Vol. 25. № 2. pp. 582–590.
 20. Khaloo A., Mobini M.H., Hosseini P. Influence of different types of nano-SiO₂ particles on properties of high-performance concrete. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 113. pp. 188–201.
 21. Asgari H., Ramezani-pour A., Butt H.-J. Effect of water and nano-silica solution on the early stages cement hydration. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 129. pp. 11–24.
 22. Zhang P., Wan J., Li Q., Wang K. Influence of nano-SiO₂ on properties of fresh and hardened high performance concrete: a state-of-the-art review. Construction and Building Materials. 2017. V. 148. pp. 648–658.
 23. Li L.G., Huang Z.H., Zhu J., Chen H.Y., Kwan A.K.H. Synergistic effects of micro-silica and nano-silica on strength and microstructure of mortar. Construction and Building Materials. 2017. V. 140. pp. 229–238.
 24. Bernal J., Reyes E., León N., Massana J., Sánchez E. Fresh and mechanical behavior of a self-compacting concrete with additions of nano-silica, silica fume and ternary mixtures. Construction and Building Materials. 2018. V. 160. pp. 196–210.
 25. Dem'yanova V.S., Kalashnikov V.I., Kazina G.N. Dispersno-napolnennyye klinker-nyye tsementy na osnove otkhodov kamnedrobleniya [Disperse-filled clinker cements based



- on stone crushing wastes]. *Izv. Vuzov. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction]. 2008. № 5. pp. 30-37. (In Russian).
26. *Mármol I., Ballester P., Cerro S., Monrós G., Morales J., Sánchez L.* Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. *Cement and Concrete Composites*. 2010. V. 32. № 8. pp. 617–622. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2010.06.003.
 27. *Mashaly A.O., Shalaby B.N., Rashwan M.A.* Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement. *Construction and Building Materials*. 2018. V. 169. pp. 800–818.
 28. *Medina G., Sáez del Bosque I.F., Frías M., Sánchez de Rojas M.I., Medina C.* Mineralogical study of granite waste in a pozzolan/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ system: influence of the activation process. *Applied Clay Science*. 2017. V. 135. pp. 362–371. DOI: 10.1016/j.clay.2016.10.018.
 29. *Singh S., Nande N., Bansal P., Nagar R.* Experimental investigation of sustainable concrete made with granite industry by-product. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017. V. 29. № 6. pp. 04017017. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001862.

DEAR COLLEAGUES!**THE REFERENCE TO THIS PAPER HAS THE FOLLOWING CITATION FORMAT:**

Makeev A.I., Chernyshov E.M. Dust fraction of granite crushing screenings as a medium of micro/nanoparticles engaged in structural formation of cement concrete. *Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*. 2018, Vol. 10, no. 4, pp. 20–38. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-20-38](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-20-38). (In Russian).





УДК 691.327:620.3

Автор: МАКЕЕВ Алексей Иванович, к.т.н., доц., доц. каф. технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Воронежский государственный технический университет; г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, Россия, 394006, e-mail: makeev@vgasu.vrn.ru;

Автор: ЧЕРНЫШОВ Евгений Михайлович, д.т.н., проф., академик РААСН, директор академического центра «Архстройнаука», Воронежский государственный технический университет; ул. 20-летия Октября, 84, Воронеж, 394006, e-mail: chem@vgasu.vrn.ru

ПЫЛЕВИДНАЯ ФРАКЦИЯ ОТСЕВОВ ДРОБЛЕНИЯ ГРАНИТА КАК НОСИТЕЛЬ МИКРОНАНОЧАСТИЦ, УЧАСТВУЮЩИХ В СТРУКТУРООБРАЗОВАНИИ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ

АННОТАЦИЯ К СТАТЬЕ (АВТОРСКОЕ РЕЗЮМЕ, РЕФЕРАТ):

Пылевидная фракция отсева дробления гранита рассматривается и оценивается в качестве носителя микроразмерной и наноразмерной составляющих структурообразования цементного камня и бетона. Даны генезис пылевидной фракции и идентификация ее состава и специфических свойств. Анализируется природа механической, механохимической, физико-химической активности и роли пылевидной фракции отсева в процессах гидратации цемента и структурообразования цементного камня. Микроразмерная составляющая квалифицируется как наполнитель в цементе, входящем в мелкозернистую бетонную смесь. Наноразмерная составляющая анализируется как кремнеземсодержащая добавка, способная наномодифицировать структуру гидратируемого цемента. Представлены экспериментальные данные и коли-



чественные оценки влияния пылевидной фракции на динамику твердения и прочность мелкозернистого бетона.

Ключевые слова: отсеvy камнедробления, микроразмерные и наноразмерные частицы SiO₂, модифицирование структуры бетона.

DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-20-38

МАШИНОЧИТАЕМАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СС-ЛИЦЕНЗИИ В МЕТАДАННЫХ СТАТЬИ (HTML-код):

```
<a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/"></a><br /><span xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://purl.org/dc/demitype/Text" property="dct:title" rel="dct:type">Dust fraction of granite crushing screenings as a medium of micro/nanoparticles engaged in structural formation of cement concrete</span> by <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2018, Vol. 10, no. 4, pp. 20–38. DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-20-38. " property="cc:attributionName" rel="cc:attributionURL">Makeev A.I., Chernyshov E.M. </a> is licensed under a <a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">Creative Commons Attribution 4.0 International License</a>.<br />Based on a work at <a xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-4-2018/" rel="dct:source">http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-4-2018/</a>.<br />Permissions beyond the scope of this license may be available at <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="mailto:makeev@vgasu.vrn.ru" rel="cc:morePermissions">makeev@vgasu.vrn.ru</a>.
```

Предисловие

Имеющиеся исследования отсеvов камнедробления [1–7] показывают, что в их оценке следует отказаться от квалификации данного продукта как отхода производства заполнителей. Скорее его следует считать [8, 9] самостоятельным компонентным фактором управления формированием структуры систем твердения конгломератных строительных композитов. Основанием к этому является многоплановая роль полифракционного по составу данного продукта в процессах формирования структуры бетонов.

С этой точки зрения, целесообразно иметь в виду три присутствующих в отсеve «компонента»: 1) щебень с размером частиц свыше 5 мм; 2) песок с размером частиц от 5 до 0,16 мм и 3) пылевидную составляющую с частицами мельче 0,16 мм. В обогащенном отсеve содержатся два из этих компонентов, в рядовом – три.



Многоплановая роль рядового отсева, в отличие от обогащенного, реализуется на всех масштабных уровнях строения конгломератных строительных композитов. В зависимости от размера частиц отсевов во всем диапазоне их разностей можно прогнозировать присущее этим разностям свое специфическое закономерное влияние на формирование структуры матричной субстанции и структуры «каркасной» части композита.

Действительно, входящие в рядовой отсев дробления макро-, мезо-, микро- и нанофракции зернистых частиц определяют одновременно механическую, механохимическую, физико-химическую и в том числе нанохимическую их активность и роль.

Если иметь в виду микроразмерный и более мелкий (наномасштабный) размер пылевидных зернистых частиц, то проявление свойственной им активности следует соотносить с формированием структуры цементного камня – матричной субстанции композита.

При этом, во-первых, можно говорить об эффекте «появления» в составе бетонной смеси так называемого наполненного цемента, который будет «образовываться» из собственно портландского цемента и части отсевов дробления, отвечающей зернам микроразмерного масштаба. В итоге, при использовании рядового, необогащенного отсева, содержащего частицы данного размера, «стихийно» будет реализовываться технология «получения и применения» наполненного цемента. В составе бетонной смеси, по нашим расчетам, количественное содержание «образовавшегося» наполненного цемента может в 1,2...1,3 раза превышать содержание израсходованного на ее получение портландского цемента.

Во-вторых, если же иметь в виду, что в совокупности частиц размером менее 0,16 мм содержатся зерна нанометрового диапазона, то дополнительно можно рассматривать и учитывать вероятное наномодифицирующее влияние последних как нанодобавки на формирование структуры матричной субстанции. Поскольку в данном случае речь может идти уже об учете изменения кинетических характеристик гидратации цемента – скорости гидратации, температурного коэффициента скорости, достигаемой степени гидратации и др. [10], одновременно должно анализироваться возможное качественное изменение морфологии и дисперсности продуктов гидратации, объема и структуры порового пространства и т.п.



Таким образом, присутствие в бетонной смеси пылевидной составляющей отсева будет сопровождаться соответствующими количественными и качественными изменениями структуры получаемого бетона, упруговязкопластических и прочностных характеристик матричной субстанции и в целом композиционного материала.

Все сказанное подчеркивает важность исследований вопроса о значении объективно присутствующих в отсевах камнедробления микро-нанодисперсных частиц для механизма формирования структуры материала.

Именно по этой причине авторы публикации, которые осуществляют системные исследования отсевов дробления гранита как компонентного фактора структурообразования бетонов [8–9, 11], сочли необходимым обратиться к этому вопросу.

Генезис микронаноразмерных частиц при образовании отсевов камнедробления

Получение полифракционного состава частиц дробления гранита в диапазоне от макро- (щебень) до наноразмерного их состояния происходит при механическом разрушении горной породы под действием взрывных, ударных, истирающих и других нагрузок (рис. 1). Это сопровождается не только размерно-геометрическими, но и структурными изменениями исходной монолитной субстанции породы [12–14]. Получаемые в итоге разноразмерные частицы отличаются по форме, минералогии, дефектности структуры [15], и, соответственно этому, характеризуются разным состоянием и мерой придаваемой им активности – механической, механохимической, физико-химической.

Понятно, что наиболее глубоко измененное состояние получают микро- и нанодисперсные частицы [16, 17], претерпевающие максимальную степень разрушения при энергетических воздействиях на горную породу.

Уместно здесь подчеркнуть, что подготовка и обработка наполнителей, заполнителей для цементных бетонов связана с сутью нанотехнологического принципа «сверху-вниз». Действительно, в результате реализации этого принципа и в зависимости от достигаемой дисперсности частиц сырьевые материалы приобретают способность проявлять нанохимические свойства. Данный вывод имеет прямое отношение к ге-



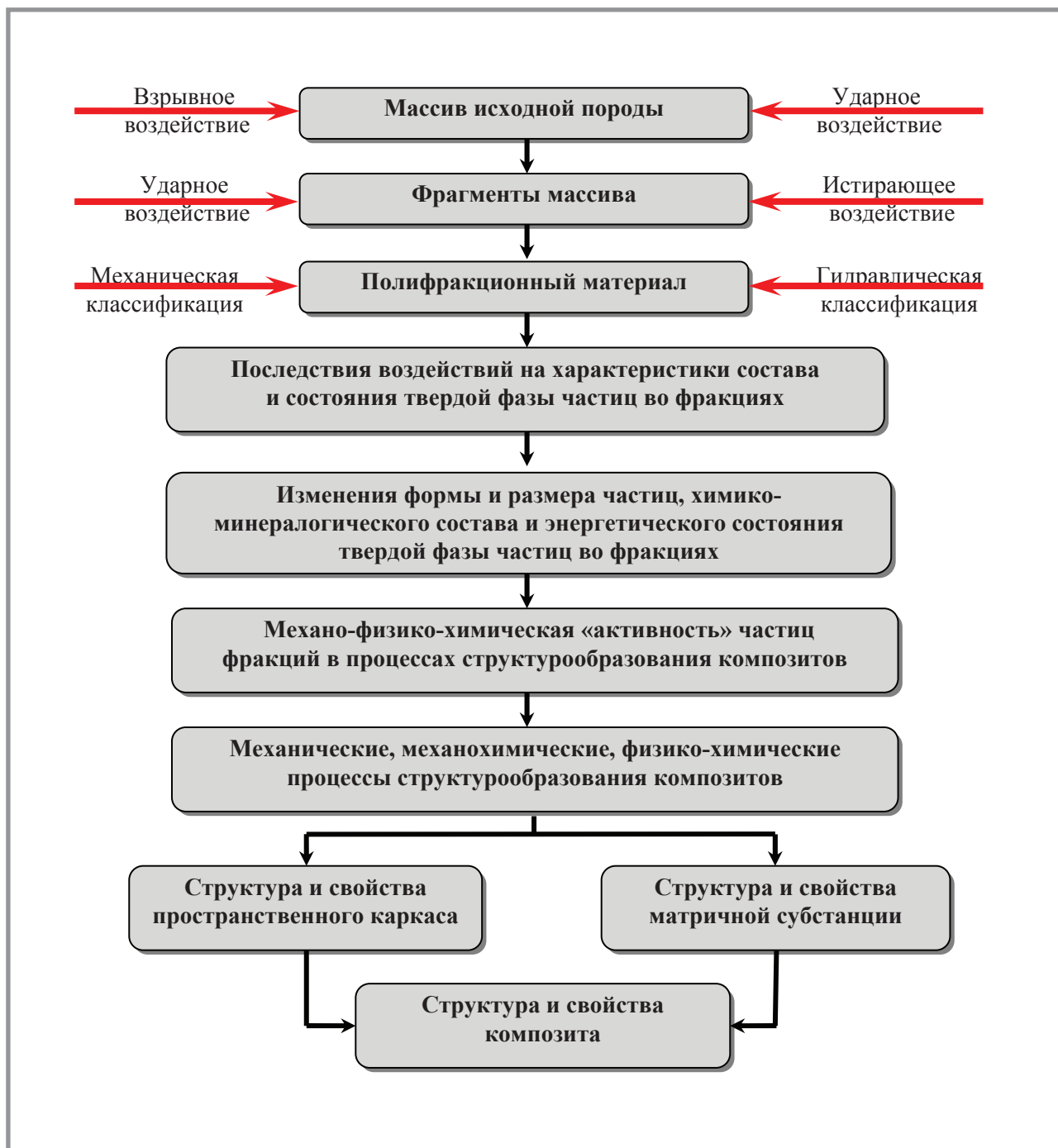


Рис. 1. Геометрические и субстанциональные превращения и изменения в горной породе при механическом ее измельчении

незису и идентификационным характеристикам пылевидной фракции отсевов дробления гранита.



В рядовом отсеке дробления гранита на ОАО «Павловск Неруд» содержится до 10% пылевидных частиц размером менее 0,16 мм, а в обогащенном (обогащение отсека проведено промывкой рядового отсека с помощью спирального классификатора [8]) – менее 2%. Доля наноразмерных частиц в пылевидной фракции, по нашим оценкам, определяется величиной до 0,5% от ее массы или до 0,05% в пересчете на массу рядового отсека в целом. В килограмме пылевидной фракции отсека может содержаться до 5 г, а в килограмме рядового отсека – до 0,5 г наноразмерных частиц.

Идентификационные характеристики пылевидной фракции как носителя кремнеземсодержащей нанодобавки

Как показали исследования, наноразмерные частицы пылевидной фракции по идентификационным их характеристикам принципиально отличаются от входящих в нее (пылевидную фракцию) микрочастиц. Прежде всего, это касается вещественного состава: по экспериментальным данным, наноразмерные частицы в пылевидной фракции отсека дробления представлены в основном диоксидом кремния SiO_2 (рис. 2, 3).

Нельзя не указать также на закономерное изменение формы микро-наночастиц по величине соотношения их продольного и поперечного размеров, которая может находиться в интервале значений от 1,7 до 3,5 и более. Оказалось, что чем мельче фракция, тем больше в ней частиц пластинчатой и игловидной формы (табл. 1).

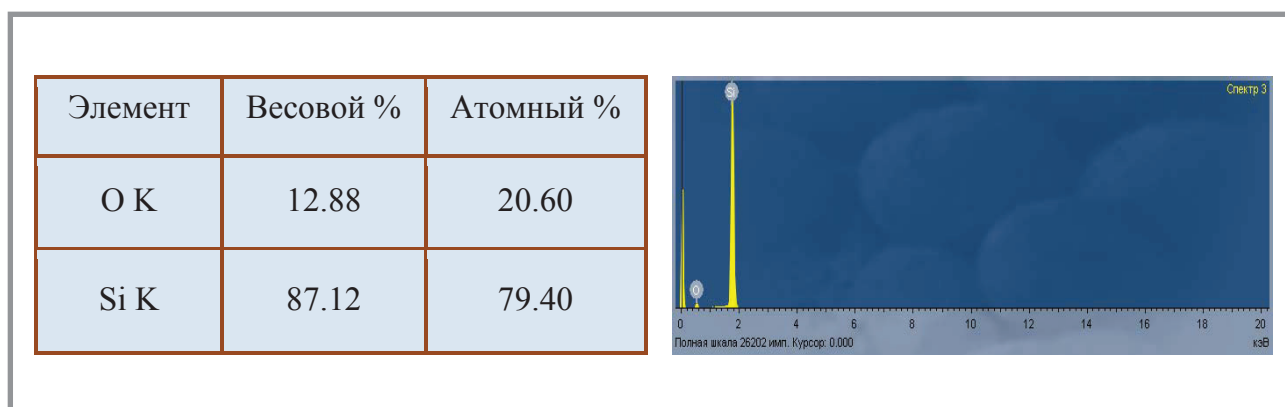


Рис. 2. Элементный состав (энергодисперсионная приставка сканирующего электронного микроскопа JSM-6380 LV) частиц с размером 0,5...15 мкм, выделенных седиментацией из пылевидной фракции

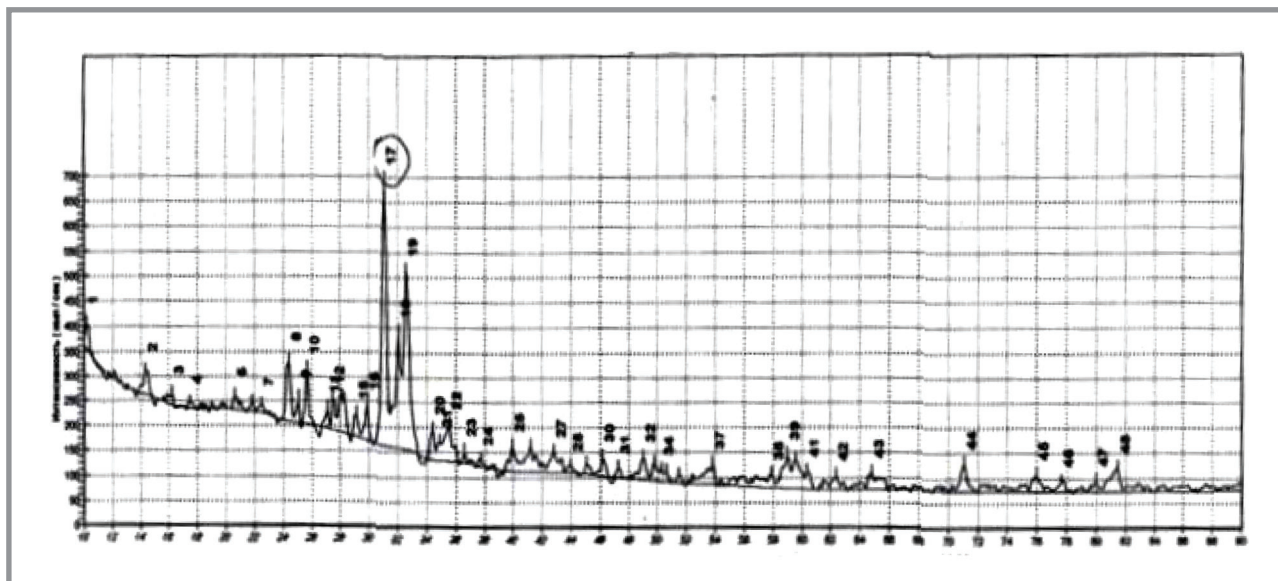


Рис. 3. Рентгенограмма (рентгеновский дифрактометр ДРОН-4М) частиц с размером 0,5...15 мкм, выделенных седиментацией из пылевидной фракции

Таблица 1

Характеристика размера и формы частиц (лазерный дифрактометр Analysette 22 NanoTec) пылевидной фракции отсева дробления гранитного щебня Шкурлатовского месторождения

Наименование показателя	Значение показателей			
Размер седиментированных частиц – расчетный по Стоксу, мкм	50...150	10...50	5...10	1...5
Размер седиментированных частиц – средний по эксперименту, мкм	37,8	28,5	10,5	3,4
Среднее соотношение габаритных размеров седиментированных частиц	1,7	2,2	2,5	3,5

Пылевидная фракция отсевов дробления гранита оказывается, таким образом, носителем нанокремнеземистой составляющей, частицы которой можно рассматривать в качестве нанодобавки для структурообразования цементных бетонов, если их получение предусматривает применение рядовых отсевов дробления гранита.



Механизм влияния микро- и наносоставляющей пылевидной фракции на процессы структурообразования

Согласно [18–24], наноразмерные частицы диоксида кремния SiO_2 как центры кристаллизации могут влиять на кинетику фазообразования гидратных соединений, снижая энергию активации гетерогенных процессов. Наряду с этим, являясь родственными по кристаллохимической структуре продуктам гидратации цемента, наноразмерные частицы могут выполнять функцию подложек для кристаллизации новообразований, зонирова и кластеризуя одновременно объем структуры твердения. К отмеченным кристаллохимическим наномодифицирующим эффектам добавляется физическое влияние фактора пластинчатой и/или игловидной формы частиц. Такое влияние может приводить к анизотропии структуры цементного камня, к его «наномикроармированию».

В совокупности эффекты, во-первых, от роли «фактора наполнения» цемента микрочастицами пылевидной фракции и, во-вторых, от роли «фактора наномодифицирования» кремнеземистыми наночастицами, в целом определяют положительное влияние рядового отсева на прочностные свойства получаемого материала. Подтверждением сказанному являются результаты специальных исследований на образцах мелкозернистого бетона, изготовленного с использованием отсева.

В экспериментах получали бетон с двумя видами заполнителя: рядовым отсевом и обогащенным отсевом, характеристики которых представлены в табл. 2. Для образцов-кубов с длиной ребра 5 см применяли бетонную смесь с варьируемым соотношением в ней «вяжущее : заполнитель». Варьирование вели в границах, обеспечивающих различную цементацию структуры бетона – от контактно-пленочной (при расходе цемента 210...230 кг/м³) до порово-базальной (при расходе цемента 530...580 кг/м³). При этом для всех варьируемых соотношений «вяжущее : заполнитель» значение В/Ц-отношения принималось из условия обеспечения постоянной консистенции бетонной смеси (105...110 мм расплыва конуса на встряхивающем столике).

Для «отслеживания» влияния присутствия пылевидной фракции в отсеве на развитие процессов гидратации цемента (на скорость гидратации) предусматривалось определение прочности образцов бетона на сжатие в возрасте 7 и 28 суток естественного твердения.



Таблица 2

Характеристика отсевов дробления и пылевидной фракции в экспериментах

Наименование показателя	Ед. изм	Значение показателя		
		рядовой отсева	пылевидная фракция	обогащенный отсева
Плотность в зерне	г/см ³	2,6	2,5	2,6
Насыпная плотность	кг/м ³	1560	1240	1420
Пустотность	%	40	50	45
Модуль крупности	отн.	3,24	-	3,46
Удельная площадь поверхности	см ² /г	200...250 (расчетом)	1350...1400 (по ПСХ)	150...200 (расчетом)

В итоге в экспериментах получали и изучали 6 составов бетонов от «тощих» до «жирных».

Установлено, что водопотребность и, соответственно, В/Ц-отношение бетонной смеси на рядовом отсева, содержащем пылевидную фракцию в количестве до 10 масс%, естественно, оказалась выше, чем на обогащенном (так сказать, обеспыленном) отсева (рис. 4).

Несмотря на существенно более высокую водопотребность, прочность бетона («жирного») с порово-базальным типом цементации на рядовом отсева оказалась в возрасте 7 суток такой же, как и на обогащенном отсева (рис. 5 а), а в возрасте 28 суток – несколько (не более 10%) ниже (рис. 5 б). При этом удельный расход цемента в бетоне на рядовом и обогащенном отсева соответственно был 13,3 и 13,5 кг/единицу измерения его прочности, МПа.

Таким образом, отрицательная роль, «приписываемая» пылевидной части отсевов дробления, не прослеживается. Отсутствие такой отрицательной роли можно объяснить положительным эффектом влияния микроразмерных частиц как наполнителя цемента и наноразмерных частиц кремнезема как наномодифицирующей добавки. Полученные результаты исследований в целом корреспондируются с данными работ отечественных и зарубежных исследователей [25–29].



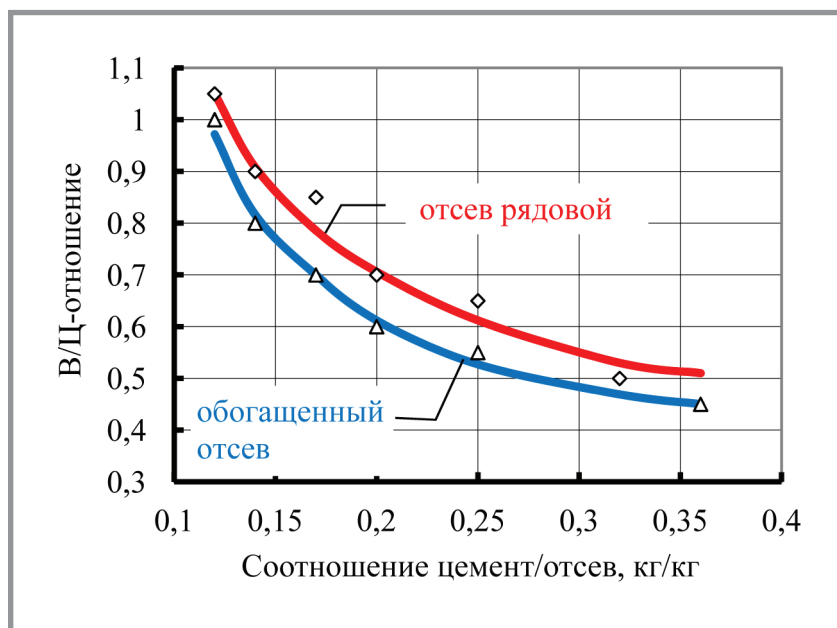


Рис. 4. Водопотребность по В/Ц-отношению для мелкозернистой бетонной смеси при изменении в ней массового соотношения цемента и отсева (рядового и обогащенного)

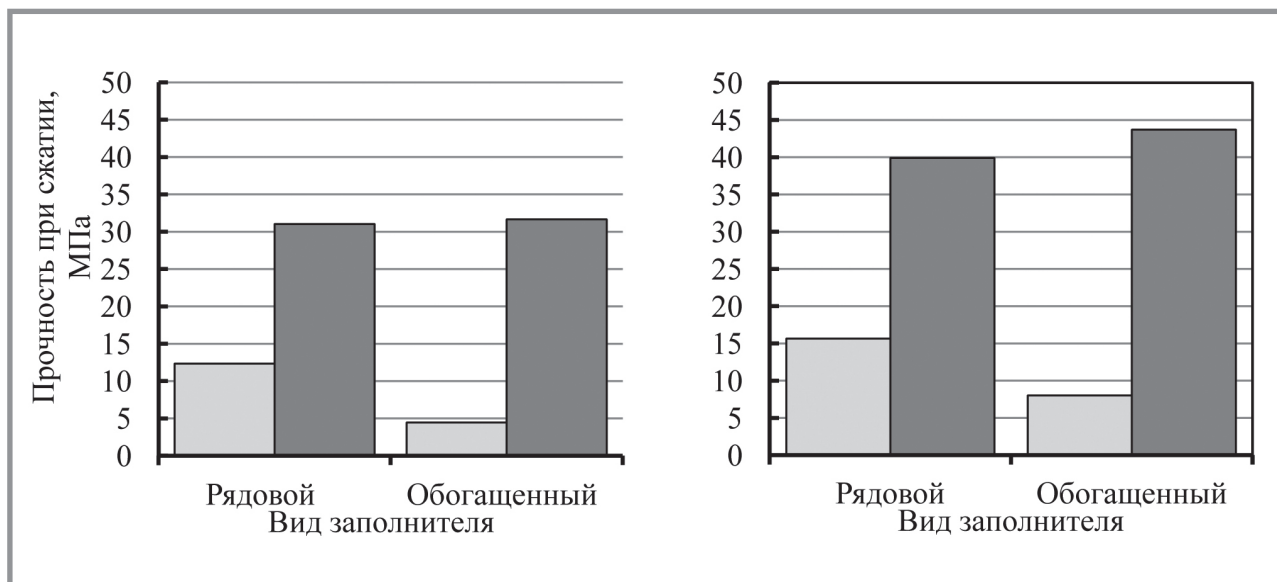


Рис. 5. Гистограммы прочности мелкозернистого бетона в возрасте 7 (а) и 28 (б) суток твердения при разном виде заполнителя и типе цементации структуры:
 ■ – контактово-пленочный, ■ – порово-базальный

Положительная роль пылевидной фракции особенно заметно проявляется в варианте «тощих» бетонов (с пленочно-контактным типом цементации), полученных с расходом цемента 210...230 кг/м³. В данном случае в возрасте 28 суток (см. рис. 5б) прочность бетона на рядовом отсеве почти в 2 раза выше прочности бетона на обогащенном отсеве. Удельный расход цемента в расчете на единицу прочности при этом оказывается в 1,8 раза меньше. Именно это является предпосылкой к существенной экономии цемента.

Тот факт, что в возрасте 7 суток прочность «тощего» бетона на рядовом отсеве выше не в 1,9, а в 2,8 раза (см. рис. 5 а), указывает на ускоренный набор прочности, который может быть объяснен как раз наномодифицирующим действием кремнеземсодержащих наночастиц пылевидной фракции гранитного отсева на кинетику гидратации цемента.

Выявленное различие в эффективности влияния пылевидной фракции отсевов на прочность «тощих» и «жирных» бетонов, на удельный расход цемента может быть связано с разной относительной ее (пылевидной фракции) долей в наполненном цементе и, соответственно, в матричной субстанции бетона. Так, в исследованных «тощих» бетонах эта доля больше и характеризуется величиной 190 кг пылевидной фракции на 230 кг цемента, а в «жирных» – существенно меньше – 160 кг на 520 кг цемента (в расчете на 1 м³ мелкозернистого бетона).

Заключение

Микро- и наночастицы пылевидной фракции отсевов дробления гранита можно считать микронаполняющими и наномодифицирующими добавками в составе бетонной смеси.

Фактическое присутствие этих добавок в бетонной смеси оказывается объективным результатом использования рядовых отсевов дробления в технологическом процессе производства бетонов.

Преимуществом особенностей такой технологии является то, что данные добавки оказываются однородно распределенными в составе заполнителя и бетонной смеси. А сама процедура их введения не требует специального оборудования и технологических приемов обеспечения равномерного их распределения по объему получаемого бетона.

Проведенные исследования подтверждают обоснованность отношения к отсевам камнедробления гранита не как к отходам нерудной про-



мышленности, а как к товарному эффективному компоненту бетонов, активно и многопланово участвующему в процессах их структурообразования на всех масштабных уровнях. При этом наиболее ценным продуктом камнедробления должна рассматриваться пылевидная фракция отсева, в том числе как носитель кремнеземсодержащего наномодификатора цементных систем твердения.

Библиографический список:

1. Харо О.Е., Левкова Н.С., Лопатников М.И., Горностаева Т.А. Использование отходов переработки горных пород при производстве нерудных строительных материалов // Строительные материалы. – 2003. – № 9. – С. 18–19.
2. Буткевич Г.Р. Состояние и направления развития горной отрасли промышленности строительных материалов // Строительные материалы. – 2006. – № 7 – С. 4–6.
3. Лесовик Р.В. К выбору техногенных песков для получения композиционных вяжущих и мелкозернистых бетонов // Технологии бетонов. – 2015. – № 1–2. – С. 60–63.
4. Rana, A., Kalla, P., Verma, H.K., Mohnot, J.K. Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review // Journal of Cleaner Production. 2016. V. 135. pp. 312–331.
5. Дворкин Л.И., Житковский В.В. Высокопрочные мелкозернистые бетоны с использованием гранитных отсеков // Технологии бетонов. – 2017. – № 5–6 (130–131). – С. 21–25.
6. Medina G., Sáez del Bosque I.F., Frías M., Sánchez de Rojas M.I., Medina C. Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (scm): scientific and technical considerations // Journal of Cleaner Production. 2017. V. 148. pp. 467–476.
7. Yegorychev A.S., Kalgin Yu.I. Feasibility of application of bituminous binder in cast asphalt concrete mixtures for laying and repairing roadway surfacing of a highway bridge // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2018. Т. 2. № 38. С. 38–46.
8. Макеев А.И. Глубокая переработка отсеков дробления гранитного щебня для их комплексного использования в производстве строительных материалов // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2010. – № 1. – С. 92–99.
9. Макеев А.И. Научно-техническое обоснование технологии глубокой переработки отсеков дробления гранитного щебня // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2011. – № 3. – С. 56–67.
10. Чернышов Е.М., Артамонова О.В., Славчева Г.С. Наномодифицирование систем твердения в структуре строительных композитов. – Воронеж: Изд-во «Научная книга», 2016. – 132 с.



11. *Макеев А.И., Чернышов Е.М.* Отсевы дробления гранита как компонентный фактор формирования структуры бетона. Часть I. Постановка проблемы. Идентификация отсевов // *Строительные материалы*. – 2018. – № 4. – С. 56–60.
12. *Веттегрень В.И., Щербаков И.П., Мамалимов Р.И., Кулик В.Б.* Изменение структуры гетерогенного твердого тела (гранита) под влиянием ударной волны // *Физика твердого тела*. – 2016. – Т. 58. – № 4. – С. 681–684.
13. *Мансуров В.А., Султонов У., Рустамова М.З., Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф.* Структурные изменения при деформации природных гетерогенных материалов // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2009. – № 4. – С. 55–59.
14. *Шарков М.Д. и др.* Рентгеновские исследования формирования доменов в горных породах под взрывным воздействием // *Физика твердого тела*. – 2016. – Т. 58. – № 11. – С. 2248–2251.
15. *Виноградов Ю.И., Хохлов С.В.* К вопросу об образовании «отсева» при добыче гранитного щебня // *Взрывное дело*. – 2015. – № 113–70. – С. 118–125.
16. *Адушкин В.В., Попель С.И.* Мелкодисперсные частицы в природных и техногенных геосистемах // *Физика Земли*. – 2012. – № 3. – С. 81–92.
17. *Соколова Ю.В., Айзеништадт А.М., Фролова М.А., Лесовик В.С.* Содержание диоксида кремния и энергетические характеристики тонкодисперсных систем горных пород // *Актуальные проблемы современной строительной науки и образования: Материалы всеросс. науч.-практ. конф.* – 2017. – С. 236–243.
18. *Коротких Д.Н., Артамонова О.В., Чернышов Е.М.* О требованиях к наномодифицирующим добавкам для высокопрочных цементных бетонов // *Нанотехнологии в строительстве*. – 2009. – Том 1, № 2. – С. 42–49. – URL: http://nanobuild.ru/ru_RU (дата обращения: 12 июля 2018 г.).
19. *Pacheco-Torgal F., Jalali S.* Nanotechnology: advantages and drawbacks in the field of construction and building materials // *Construction and Building Materials*. 2011. V. 25, № 2. pp. 582–590.
20. *Khaloo A., Mobini M.H., Hosseini P.* Influence of different types of nano-SiO₂ particles on properties of high-performance concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. T. 113. pp. 188–201.
21. *Asgari H., Ramezani-pour A., Butt H.-J.* Effect of water and nano-silica solution on the early stages cement hydration // *Construction and Building Materials*. 2016. V. 129. pp. 11–24.
22. *Zhang P., Wan J., Li Q., Wang K.* Influence of nano-SiO₂ on properties of fresh and hardened high performance concrete: a state-of-the-art review // *Construction and Building Materials*. 2017. V. 148. pp. 648–658.
23. *Li L.G., Huang Z.H., Zhu J., Chen H.Y., Kwan A.K.H.* Synergistic effects of micro-silica and nano-silica on strength and microstructure of mortar // *Construction and Building Materials*. 2017. V. 140. pp. 229–238.



24. *Bernal J., Reyes E., León N., Massana J., Sánchez E.* Fresh and mechanical behavior of a self-compacting concrete with additions of nano-silica, silica fume and ternary mixtures // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 160. pp. 196–210.
25. *Демьянова В.С., Калашников В.И., Казина Г.Н.* Дисперсно-наполненные клинкерные цементы на основе отходов камнедробления // *Изв. Вузов. Строительство*. – 2008. – № 5. – С. 30–37.
26. *Mármol I., Ballester P., Cerro S., Monrós G., Morales J., Sánchez L.* Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars // *Cement and Concrete Composites*. 2010. – V. 32. № 8. pp. 617–622. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2010.06.003.
27. *Mashaly A.O., Shalaby B.N., Rashwan M.A.* Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 169. pp. 800–818.
28. *Medina G., Sáez del Bosque I.F., Frías M., Sánchez de Rojas M.I., Medina C.* Mineralogical study of granite waste in a pozzolan/Ca(OH)₂ system: influence of the activation process // *Applied Clay Science*. 2017. V. 135. pp. 362–371. DOI: 10.1016/j.clay.2016.10.018.
29. *Singh S., Nande N., Bansal P., Nagar R.* Experimental investigation of sustainable concrete made with granite industry by-product // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017. V. 29. № 6. pp. 04017017. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001862.

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

**ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАТЕРИАЛА ДАННОЙ СТАТЬИ
ПРОСИМ ДЕЛАТЬ БИБЛИОГРАФИЧЕСКУЮ ССЫЛКУ НА НЕЁ:**

Макеев А.И., Чернышов Е.М. Пылевидная фракция отсевов дробления гранита как носитель микронаночастиц, участвующих в структурообразовании цементных бетонов // *Нанотехнологии в строительстве*. – 2018. – Том 10, № 4. – С. 20–38. – DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-20-38](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-20-38).

DEAR COLLEAGUES!

THE REFERENCE TO THIS PAPER HAS THE FOLLOWING CITATION FORMAT:

Makeev A.I., Chernyshov E.M. Dust fraction of granite crushing screenings as a medium of micro/nanoparticles engaged in structural formation of cement concrete. *Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*. 2018, Vol. 10, no. 4, pp. 20–38. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-20-38](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-20-38). (In Russian).

