

## Исследование влияния добавок пылевидных отходов камнеобработки на прочностные свойства бетона

О.Н. Галактионов<sup>1</sup>, П.В. Будник<sup>1</sup>, В.Н. Баклагин<sup>2</sup>,  
Д.С. Семенов<sup>3</sup>, Н.А. Захаров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Петрозаводский государственный университет

<sup>2</sup>Институт водных проблем Севера, Карельский НЦ РАН Петрозаводск

<sup>3</sup>ООО «Торговый дом «Балтик гранит»»

**Аннотация:** Использование отходов камнеобработки в производстве других видов продукции является актуальной задачей для камнерезных предприятий. В данном исследовании изучены возможности использования базальтовой пыли, образующейся при пилении, шлифовке и полировании изделий из базальтов и родственных минералов при изготовлении бетонов. Подготовлены три группы образцов с различным содержанием базальтовой пыли – 0 %, 5 % и 20 %. После окончательного твердения бетона проведены испытания прочности образцов на сжатие. Результаты показали, что добавка 5 % базальтовой пыли практически не снизила прочности бетонного образца, повышение содержания базальтовой пыли до 20 % вызвало снижение прочности образцов в среднем на 16 %. Характер разрушения образцов с содержанием базальтовой пыли соответствовал характеру разрушения аналогичных по форме бетонных изделий.

**Ключевые слова:** бетон, отходы камнеобработки, прочность, базальт.

### Введение

Мировые тенденции к интенсификации использования отходов производства толкают производственные компании к поиску методов применения отходов на собственной технологической основе. Для камнеобрабатывающей отрасли таким направлением может стать производство строительных конструкций, прежде всего, на основе бетонов [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Этим направлением позволяет использовать как крупномерные, так и пылевидные отходы камнерезных производств, снизить расходы на хранение и утилизацию каменных отходов [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Для выработки обоснованных рекомендаций необходимо определить характеристики отходов, выбрать вид отходов, который будем рассматривать в качестве основного и экспериментальным путем определить режим изготовления продукции из

бетонного камня, обеспечивающий максимальный потенциал использования по объему и сохранению свойств конечного продукта.

Бетонная смесь, в соответствии со стандартом ГОСТ 7473-2010 «Смеси бетонные. Технические условия», включает в себя заполнитель, вяжущее, воду. Основные исследования касаются замены заполнителя каким-либо ресурсом, имеющимся в избытке и, соответственно, задача использования местных материалов при производстве бетона ставилась и решалась в большом количестве исследований в зависимости от химического состава и размерных характеристик выбранного ресурса.

Например, в работе [3] изучались возможности использования известнякового заполнителя для изготовления бетона. Установлено, что использование вяжущих, с добавлением разработанной добавки, по сухой массе смеси 3,0 %, позволяет получать равнозначные по прочности бетоны. Дополнительно установлено, что экономия цемента составляет 15,5 %. Необходимо учитывать, что в указанном исследовании использовали известняк, который достаточно активно реагировал с компонентами бетонной смеси, в случае с базальтовыми материалами, химический состав представлен менее активными веществами.

В работе [4] исследовано влияние добавок габбро-диабаз на свойства бетонной смеси. Показано, что добавки способствуют самоуплотнению смеси. В исследуемые смеси также добавлялся известняк, что обеспечивало изменение химизма процесса твердения смеси.

Исследование [5] подтверждает гипотезу о сходстве физико-технических характеристик ячеистых бетонов полученных по стандартной технологии и на основе отходов камнерезания. При этом доля отходов камнерезания составляла 50 % от сухой смеси.

Изучение использования гранитных отсевов (до 10% от природного песка) в бетонных смесях в работе [6] показало, что прочность образцов на сжатие не снижается, а наблюдается ее увеличение (до 6%).

В работе [7] предложены изменения в рецептуре бетонных смесей введением дисперсных и тонкозернистых заполнителей, в основном, тонкого дробленого песка фракции 0,16-0,63. При этом содержание каменной муки составляло 40% от массы цемента без снижения прочности, отмечено увеличение времени набора бетоном рабочей прочности.

В статье [8] приведены данные об использовании естественных виброактивированных тонкомолотых вяжущих на основе барханных песков для производства бетонных смесей. Доля в составе бетона достигала 25 %, полученные бетоны имели класс прочности от В40 до В60. Примечательно, что по размерным характеристикам данные пески соответствуют отходам камнеобрабатывающего предприятия менее 0,14 мм.

В исследовании [9] изучалось введение в бетонную смесь отходов пиления жадеита и известняковой муки в объеме 6-7 %. В первом случае достигнуто приводит к повышению прочности при сжатии на 27 %, во втором – на 14 %. При большем содержании отходов до 40-50 % показано снижение прочности.

В работе [10] исследовалось влияние молотого гранитного отсева на свойства бетона. В ней указывается на то, что частицы пыли выступают в качестве центров кристаллизации в жидком бетоне, что ускоряет процессы гидратации и формирования структуры готового бетонного изделия. Механизм процесса объясняется сходной химической природой частиц базальта и способствует понижению уровню энергии начала структурообразования и формирования фаз готового цементного камня. В этой же работе отмечается способность пылевидных добавок обеспечивать

---

лучшее удержание крупного заполнителя во взвешенном состоянии в жидком бетонном растворе и препятствовать его расслоению.

Таким образом, изучение влияния на прочностные свойства бетонной смеси добавления отходов камнеобработки – резания, пиления, шлифования, является достаточно актуальным и наша задача оценить уровень изменения этих свойств для камнеобрабатывающего предприятия специализирующегося на обработке базальтов, в свою очередь оценка прочностных свойств позволит оценить возможности использования каменной пыли для получения бетона заданной прочности.

### Методы.

Для решения поставленной задачи были подготовлены образцы бетонной смеси в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Подготовлено три замеса: Замес 1, без добавления каменной пыли; Замес 2, с добавлением 5 % каменной пыли; Замес 3 – 20 % каменной пыли по отношению к массе готовой смеси. Затем из бетонной смеси были изготовлены по три образца. Форма образцов – цилиндрическая, диаметр основания – 100 мм, высота цилиндра – 105 мм (Рис. 1).



Рис. 1 Подготовленные образцы

Образец выполнен из готовой пескобетонной смеси АХТОН М300 с характеристиками: содержание цемента – 33 %, содержание песка – 67 %; влажность – 0,02 %; прочность на сжатие готовой смеси 21.09 МПа; марка прочности – М300; размер фракции – 1.2 мм; расход воды на 1 кг смеси – 0.14 л. Каменная пыль получена при резании габбро-диабазы при помощи круглых, канатных пил, а так же при шлифовке готовых изделий, пыль улавливалась мокрым способом и накапливалась в бункере, пыль для образцов взята со случайных участков бункера. Проба каменной пыли сушилась в естественных условиях, ее влажность на момент формирования образцов – 16.84 %. Влажность определена методом взвешивания после сушки в термостате при температуре 110 в течение суток. Для получения усредненных данных изготовлено по 4 образца каждого вида, из них – 3 испытаны на сжатие, 1 образец оставлен для контроля. Измерение прочностных характеристик образцов проводилось после полного набора ими прочности – 28 дней. Для испытаний использована универсальная испытательная машина Shimadzu AGS-300KNX. Режим нагружения 1 мм/мин.

### **Результаты**

Исследование поведения подготовленных образцов на прочность показало, что поведение и максимальные достигнутые нагрузки при добавлении 5 % каменной пыли практически не различаются, однако, при доведении уровня каменной пыли до 20 %, произошло снижение прочностных показателей. Характер разрушения образцов при этом не изменился (Рис. 2). Вид разрушения образцов не отличается от результатов, полученных другими исследователями, изучавшими схожие проблемы, например, [11] или [12].

Образец №2

Образец №3



Рис. 2. Внешний вид разрушенных образцов №2 и №3

Результаты нагрузочных испытаний приведены в таблице 1. Образцы из Замеса 1 и Замеса 2 показали практически одинаковые результаты, вероятно, это обусловлено малой выборкой. Замес 3 показал более низкие результаты – прочность снизилась на 16 %. В целом прочность полученных смесей соответствует классу бетона В15.

Таблица 1

Результаты испытания на сжатие образцов, максимальные значения

Замесы	Образцы	Сила на прессе, Н	Ход пресса, мм	Содержание каменной пыли, %	Напряжения сжатия, МПа
1	1.1	167 027	2,931	0	21,31

	1.2	158 042	2,246	0	20,12
	1.3	150 441	3,327	0	19,28
	Среднее	158 503	2,835	0	20,25
2	2.1	156 880	3,605	5	20,03
	2.2	179 878	3,789	5	22,92
	2.3	142 291	3,399	5	18,12
	Среднее	159 683	3,597	2	20,34
3	3.1	137 970	2,466	20	17,64
	3.2	154 630	1,768	20	19,73
	3.3	121 713	2,313	20	15,58
	Среднее	138 104	2,182	20	17,68

Поведение образцов №1 и №2 под нагрузкой показано на рис. 3.

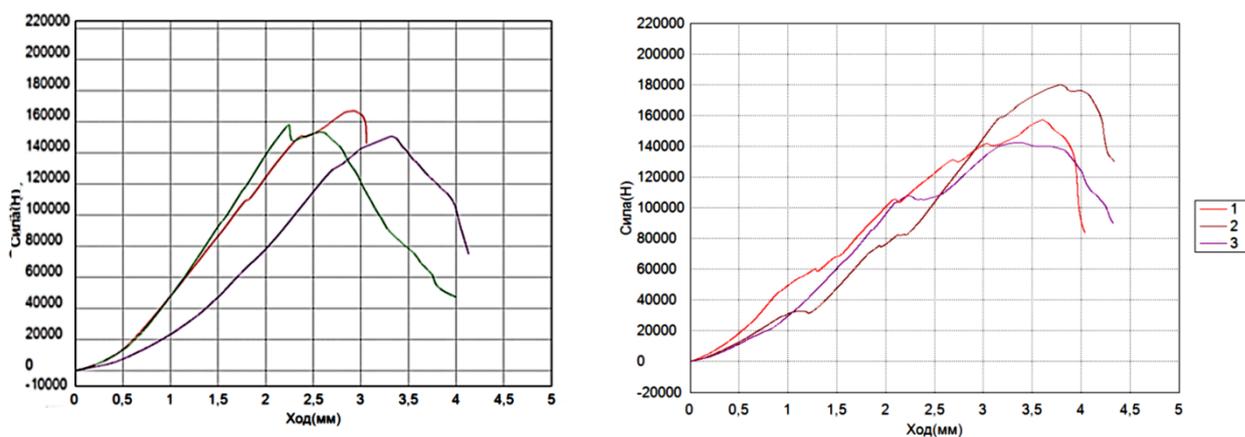


Рис. 3. График ход–нагрузка для образцов №1 и №2, изготовленных с содержанием каменной пыли соответственно 0 % и 5 %

Образцы, выполненные из одного и того же замеса, при росте нагрузки ведут себя схожим образом. Статистические характеристики, ввиду малости выборок средних, не вычисляли. График изменения средних значений максимальной силы, приложенной к образцам, приведен на рис. 4.

Наблюдается небольшое увеличение несущей способности образцов при добавке 5 % каменной пыли к цементно–песчаной смеси. Однако, при дальнейшем увеличении содержания каменной пыли, прочность снижается. Небольшой рост прочности от нулевого содержания каменной пыли до 5 %, вероятно, позволит увеличить содержание каменной пыли без снижения прочности.

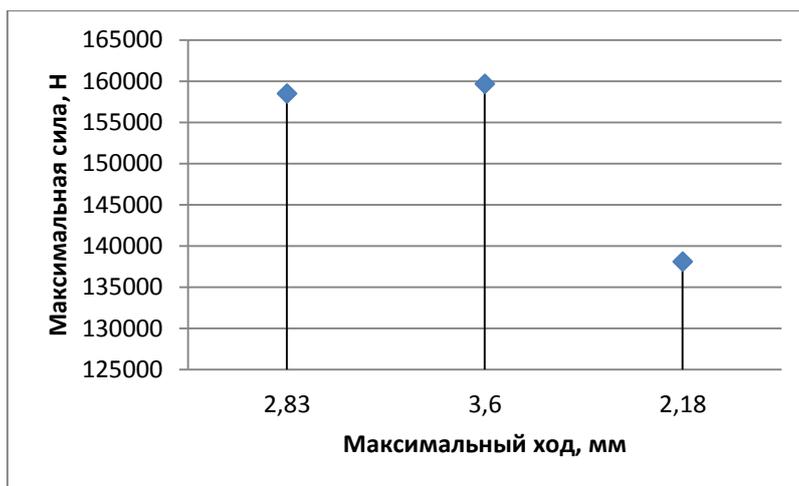


Рис. 4. Максимальная сила, приложенная к образцам

Построение регрессионных линий также указывает на недостаток экспериментальных данных. На рис. 5 приведен график регрессии напряжения от содержания каменной пыли.

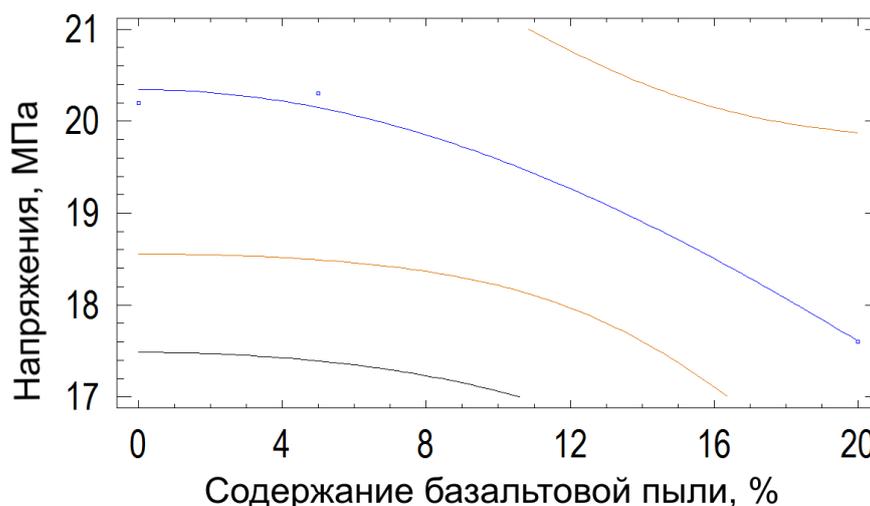


Рис. 5. Линия регрессии напряжения-содержание базальтовой пыли

На рис. 5 точками показаны средние максимальные величины напряжений достигнутые в экспериментах, синей линией показан график регрессионного уравнения; красной – 95 % доверительный интервал, черной – 95 % интервал прогноза.  $R^2$  уравнения скорректированный на степень свободы составляет 98,59 %.

Уравнение регрессии напряжений от содержания базальтовой пыли имеет вид:

$$\sigma = \frac{1}{0,0495+k \cdot 1,91 \cdot 10^{-5}} \text{ МПа,}$$

где  $k$  – содержание базальтовой пыли в бетонной смеси, %.

**Обсуждение и выводы.** Таким образом, собранные данные позволяют утверждать, что добавление отходов камнеобработки с преобладанием базальтовой пыли в объеме 5 % от сухой цементно-песчаной смеси способствует увеличению несущей способности бетонных образцов.

Наблюдаемое на рис. 3 увеличение несущей способности бетонных образцов требует проверки на большем объеме выборки, однако можем предполагать, что добавка базальтовой пыли по массе до 10 %, по крайней мере, не снижает прочности бетонных изделий.

Построенное регрессионное уравнение, хотя и не однозначно, также указывает на необходимость дополнительных измерений на образцах с промежуточным по отношению к проведенным экспериментам содержанием базальтовой пыли.

Для увеличения потенциальной вместимости бетонных смесей необходимо провести исследования с содержанием базальтовой пыли в объеме смеси 7–8 %, вид графика на рис. 3 дает основания предполагать сохранение прочности при таком уровне добавок. Соответствие полученных бетонных изделий классу прочности В15 (ГОСТ 26633-2015 Бетоны тяжелые и мелкозернистые Технические условия) позволяет использовать его для возведения монолитных фундаментов, бетонирования подпорных стенок, а

после дополнительных испытаний для формирования перекрытий и стен зданий нормальной этажности.

Так как производство железобетонных конструкций - достаточно востребованная развитая отрасль, то данное направление утилизации мелкозерновых отходов камнерезания может стать одним из перспективных для камнеобрабатывающих предприятий.

### Литература

1. Silva, L.S.; Amario, M.; Stolz, C.M.; Figueiredo, K.V.; Haddad, A.N. A Comprehensive Review of Stone Dust in Concrete: Mechanical Behavior, Durability, and Environmental Performance. *Buildings* 2023, 13, 1856. URL: [//doi.org/10.3390/buildings13071856](https://doi.org/10.3390/buildings13071856).
2. Курочка П.Н., Гаврилов А.В. Бетоны на комплексном вяжущем и мелком песке // Инженерный вестник Дона, 2013, №1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1562](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1562).
3. Кузнецова Е.Ф., Соболев Г.М., Соболев К.Г. Получение эффективных литых бетонных смесей и бетонов на основе наноматериалов и отходов камнеобработки // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2014. №2. С. 7-10.
4. Кузнецова, Е.Ф. Эффективные литые бетоны с использованием отходов камнеобработки: дисс... канд. техн. наук: 05.23.05 / Кострома:, 2014. 149 с.
5. Опекунов, В. В. Использование отходов камнепиления в производстве ячеистых бетонов // Строительная наука и техника. 2011. № 4. С. 46-49.
6. Бурба Д.В., Сафончик Д.И. Изменение физико-механических свойств бетонов при их модификации отходами камнеобработки и техническими волокнами // Строительство. Прикладные науки. Строительные материалы. 2016. №8 С. 53-56.

7. Суздальцев О. В. Долговечные архитектурно-декоративные порошково-активированные бетоны с использованием отходов камнедробления горных пород: дисс... канд. техн. наук: 05.23.05 Пенза, 2015. 237 с.

8. Саламанова М.Ш., Узаева А.А., Муртазаева Э.Д., Ахматов А.Р. Исследование свойств тонкомолотых вяжущих на основе барханных песков // Международная научно-практическая конференция, посвященная 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова Научкоемкие технологии и инновации (XXIII научные чтения), 2019. С. 351-360.

9. Енджиевская И. Г., Одинцов К. В., Чехлов М. К. Влияние комплексной модификации на цементные композиции // Международная научная конференция «Перспектив Свободный-2016». 2019. С. 38-41.

10. Батяновский Э. И., Дрозд А. А., Смоляков А. В. Свойства цемента и цементного камня с минеральной добавкой в виде молотого гранитного отсева // Строительная наука и техника. 2009. №1. С. 73-79.

11. Gu, H. Compressive behaviours and failure modes of concrete cylinders reinforced by glass fabric. Mater. Des. 2006, 27, 601–604.

12. Бутакова М.Д., Зырянов Ф.А. Исследование свойств бетонных смесей и бетонов на основе мелкозернистых минеральных отходов горного производства // Инженерный вестник Дона, 2012, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/983.

### References

1. Silva, L.S.; Amario, M.; Stolz, C.M.; Figueiredo, K.V.; Haddad, A.N. A Comprehensive Review of Stone Dust in Concrete: Mechanical Behavior, Durability, and Environmental Performance. Buildings 2023, 13, 1856. URL: doi.org/10.3390/buildings13071856.

---

2. Kurochka P.N., Gavrilov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1562](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1562).
  3. Kuznetsova YE.F., Sobolev G.M., Sobolev K.G. Vestnik BGTU imeni V. G. Shukhova. 2014. №2. pp. 7-10.
  4. Kuznetsova, YE.F. Effektivnyye litnyye betony s ispol'zovaniyem otkhodov kamneobrabotki [Efficient cast-in-place concrete using stone processing wastes.]: diss... kand. tekhn. nauk: 05.23.05. Kostroma:, 2014. p. 149.
  5. Opekunov, V. V. Stroitel'naya nauka i tekhnika. 2011. № 4. pp. 46-49.
  6. Burba D.V., Safonchik D.I. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. Stroitel'nye materialy. 2016. №8. pp. 53-56.
  7. Suzdal'tsev O. V. Dolgovechnyye arkhitekturno-dekorativnyye poroshkovo-aktivirovannyye betony s ispol'zovaniyem otkhodov kammedrobleniya gornykh porod [Durable architectural and decorative powder-activated concrete using rock crushing wastes.]: diss... kand. tekhn. nauk: 05.23.05. Penza, 2015. pp. 237.
  8. Salamanova M.SH., Uzayeva A.A., Murtazayeva E.D., Akhmatov A.R. Issledovaniye svoystv tonkomolotykh vyazhushchikh na osnove barkhannykh peskov. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 65-letiyu BGTU im. V.G. Shukhova Naukoyemkiye tekhnologii i innovatsii (XXIII nauchnye chteniya), 2019. pp. 351-360.
  9. Endzhiyevskaya I. G., Odintsov K. V., Chekhlov M. K. Vliyaniye kompleksnoy modifikatsii na tsementnyye kompozitsii. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Prospekt Svobodnyj-2016». 2019. pp. 38-41.
  10. Batyanovskiy E. I., Drozd A. A., Smolyakov A. V. Stroitel'naya nauka i tekhnika. 2009. №1. pp. 73-79.
  11. Gu, H. Compressive behaviours and failure modes of concrete cylinders reinforced by glass fabric. Mater. Des. 2006, 27, pp.601–604.
-



12. Butakova M.D., Zyryanov F.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №3.  
URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/983](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/983).