



Интенсификация процессов набрызгбетонирования для подземных конструкций с учетом подбора компонентов смеси

© С.И. Баженова, А.А. Мельниченко

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
г. Москва, Россия

Резюме: Цель работы – обосновать возможность применения технологии набрызгбетонирования как способа не только укрепления грунта и шахт при ведении горнодобывающих работ, но и репрофилирования подземных пространств для дальнейшего целевого использования (например, в качестве спортивных объектов и памятников культурного наследия, что реализовано в некоторых странах Европы). Рассмотрены достоинства и недостатки технологии набрызгбетонирования. С учетом необходимости использования набрызгбетона, отвечающего высоким эксплуатационным требованиями, авторами предлагаются композиции набрызгбетона с повышенными физико-механическими характеристиками. Оптимизация свойств смесей при этом достигается путём добавления микронаполнителей с самостоятельной гидравлической активностью. В опытных работах производились исследования набора прочности образцов набрызгбетона с ускорителями схватывания (А1 и А2 на основе алюминатов и Б1 и Б2 – бесщелочных ускорителей) разнообразного генезиса. По результатам работ отмечена высокая степень эффективности бесщелочных ускорителей схватывания по сравнению с ускорителями на основе алюминатов, что может объясняться более высоким уровнем вовлечения ускорителей схватывания в процесс структурообразования цементного камня и созданием новообразований, способствующих гидратации цемента, в больших объемах. Высокая эффективность совместной работы ускорителей твердения вяжущих и микронаполнителя позволяет подбирать составы набрызгбетона с учетом любых показателей горного давления для грунтов средней устойчивости и выработок среднего сечения.

Ключевые слова: набрызгбетон, торкретбетон, бетонная смесь, бетонная крепь

Для цитирования: Баженова С.И., Мельниченко А.А. Интенсификация процессов набрызгбетонирования для подземных конструкций с учетом подбора компонентов смеси. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2021. Т. 11. № 2. С. 242–249. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-2-242-249>

Intensification of concrete spraying for buried structures, including composition selection

Sof'ya I. Bazhenova, Alexandra A. Melnicnenko

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

Abstract: The study aims to substantiate the application of concrete spraying technologies, which allow the soil and mines during the mining operation to be strengthened and underground spaces to be repurposed for further use (e.g., sports facilities and cultural heritage sites, as implemented in some European countries). The advantages and disadvantages of concrete spraying technologies are considered. Following the need for sprayed concrete to meet high operational requirements, the authors offer sprayed concrete compositions with increased physical and mechanical properties. The properties of the mixtures are optimised by adding microfillers with hydraulic activity. In experimental work, concrete strength development of sprayed concrete samples with setting agents of various origins (A1 and A2 aluminates based and B1 and B2 nonalkaline accelerators) was investigated. It was determined that nonalkaline setting agents are more efficient than those based on aluminates. This can be explained by the higher activity of these setting accelerators in the structure formation of cement brick and the formation of new growth that promote cement hydration in large volumes. The high-efficiency cooperation of setting agents and microfiller allows the composition of sprayed concrete to be selected, taking into account any rock pressure values for medium-stable soil and medium section mine roadway.

Keywords: shotcrete, sprayed concrete, mix concrete, concrete support

For citation: Bazhenova SI, Melnichenko AA. Intensification of concrete spraying for buried structures, including composition selection. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(2):242–249. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-2-242-249>

Введение

Многие промышленные регионы характеризуется высокой концентрацией горнодобывающих и промышленных объектов, причем высокий вклад в таких субъектах в экономические показатели вносит угледобыча. Динамику мощностей горнодобывающей отрасли в настоящий момент можно охарактеризовать как стагнирующую, ввиду перехода на «зеленую» энергетику и альтернативные источники топлива часть шахт со временем становится полузаполненной, текущий ремонт в этих шахтах не осуществляется [1]. Все это способствует деструкции объема грунта вмещающего массива, расположению больших объемов отвалов в зоне шахт пустой породы, требующих отдельных путей решения (выделения больших площадей под отвалы вокруг шахт, разработки программ по вторичному использованию пустых пород, поддержки законсервированных или ликвидации шахтных выработок с целью исключения аварийных ситуаций – особенно при наличии на данных участках зданий и сооружений). Ввиду того, что в районах расположения шахт часто находятся объекты инфраструктуры, жилые и нежилые здания, потенциальное разрушение подземных выработок может сопровождаться деформациями грунтового массива и ненормативными осадками в соответствующих зонах. Мероприятия по предотвращению аварийных ситуаций для гражданских и жилых объектов весьма затратные и требуют специальных технологий [2, 3], поэтому необходима тщательная оценка эффективности каждой угольной выработки с целью принятия решения по возобновлению угледобычи или ее ликвидации.

Опыт зарубежных стран в создании на базе угольных предприятий спортивных объектов и памятников культурного наследия (Великобритания), библиотек и национальных парков (Германия), торгово-развлекательных центров, офисных и складских площадей (Китай) [1, 4] можно адаптировать к российским условиям. Также данная строительная практика может быть полезной для Донецкой

Народной Республики ввиду высокой концентрации населения на ее территории (порядка 200 чел./км², что сравнимо с европейскими странами) в плане потенциального освоения и использования подземного пространства и ликвидации опасной предаварийной ситуации в небезопасных и неконтролируемых подземных выработках [5–8].

Методы

Одним из самых эффективных способов реконструкции подземных выработок является устройство набрызгбетонной крепи, являющейся постоянной конструкцией, обеспечивающей целостность, водонепроницаемость и воспринимающей постоянные нагрузки.

Особенностями процесса набрызгбетонирования являются:

а) снижение толщины слоя обделки, за счет чего можно уменьшить сечение сооружаемой выработки;

б) возможность формирования слоя набрызгбетона непосредственно на обнажаемой породе с отказом от применения опалубки и исключением опалубочных работ;

в) отсутствие необходимости тампонажных работ, т.к. при формировании слоя набрызгбетона обеспечивается достаточно плотный контакт набрызгбетона с грунтом;

г) сокращение объемов работ и числа случаев установки опалубки, цементационного оборудования, а соответственно, снижение транспортных издержек;

д) возможность создания многослойных и многофункциональных набрызгбетонных конструкций, при необходимости сочетающихся с анкерной, сеточной, арочной крепью;

е) создание модифицированных покрытий высокой степени водонепроницаемости и долговечности, обеспечивающих требуемый срок службы тоннельных сооружений (рис. 1);

ж) возможность механизации и автоматизации технологии набрызгбетонирования, в том числе с применением 3D-моделирования;

з) высокая степень адаптации технологии к инновационным способам возведения тоннелей (НАТМ).



Рис. 1. Создание объёмной конструкции по металлическому армокаркасу
Fig. 1. Creating a three-dimensional concrete structure based on a metal frame

Однако технология набрызгбетонирования имеет и недостатки:

- высокий отскок (в первую очередь крупных фракций заполнителя) в процессе нанесения смеси на поверхность, достигающий до 35% в зависимости от технологических параметров процесса;
- высокий коэффициент пылеобразования, что требует защиты органов дыхания и соответствующей системы фильтрации.

Однако назначив оптимальные технологические параметры, снижая удельный процент крупного заполнителя в смеси и осуществив рациональный подбор составов, можно резко повысить эффективность технологии набрызгбетонирования.

Полностью избавиться от этих недостатков невозможно, но с помощью рациональных мероприятий (выдерживания оптимальных технологических параметров нанесения, уменьшения количества крупного заполнителя, подачи воды в материальный шланг за несколько метров до вылета материала из сопла при «сухом» способе нанесения) можно значительно их сократить. Обычно различают две основные технологии набрызгбетонирования: так называемые «сухой» и «мокрый» способы. При «сухом» способе из сопла вылетают два направленных потока – сухой смеси и воды, смешивающихся в полёте, скорость вылета смеси из сопла составляет до 50 м/с. Однако такая технология характеризуется повышенным пылеобразованием, большим процентом отскока и высокими требованиями к квалификации рабочих-сопловщиков. «Сухой» метод набрызгбетонирования оптимален при небольших объёмах работ, при нанесении на грунты низкой степени устойчивости, а также при частых перерывах для циклических работ. При мокром способе набрызгбетонирования из сопла вылетает предварительно подготовленная

смесь (рис. 2), что позволяет сократить процент отскока и пылеобразование, проконтролировать точное соотношение компонентов, улучшить условия работы и снизить трудоёмкость. «Мокрая» технология набрызгбетонирования требует применения смесей более высокой степени подвижности и пластичности, при этом имеет более низкий показатель скорости вылета смеси, чем при «сухом» способе, снижает плотность, проницаемость и физико-механические характеристики затвердевшего набрызгбетона. Кроме того, технология «мокрого» набрызгбетонирования требует использования высокотехнологичного оборудования, ежедневной прочистки систем растворопроводов. Тем не менее, несмотря на свою большую трудоёмкость, «мокрый» способ весьма эффективен при сооружении подземных конструкций в устойчивых грунтах, для больших объёмов работ и для устойчивых циклических работ без длительных технологических перерывов. Это объясняется более высокой производительностью «мокрого» метода, удобством работ в выработках и тоннелях большого сечения ввиду наличия телескопируемых стрел на большинстве комплексов, однако при длительных технологических остановках и перерывах в работе эффективность «мокрого» способа набрызгбетонирования падает из-за необходимости консервации оборудования и промывки всех технологических трубопроводов и бетононасосов перед каждым циклом остановки. При создании крупных объектов в настоящий момент тендерная система предусматривает большие штрафы за срывы графиков строительства, поэтому «мокрый» способ может эффективно использоваться в случае соответствующих обоснований. Имеющиеся жёсткие требования к соблюдению графика строительства предполагают интенсификацию строительных производств, что влечёт за собой необходимость оптимизации свойств набрызгбетонных композиций [5].



Рис. 2. Набрызгбетонирование «мокрым» способом
Fig. 2. Wet spray concreting

При назначении конструкций из набрызгбетона необходимо определять фактические усилия горного давления, зависящие от типа вмещающего грунта и сечения выработок [9]. Нормативно-технической документацией предусматриваются оптимальные параметры набрызгбетонных конструкций при изменении прочностных показателей пород, однако такая концепция зачастую не реализуется ввиду сложности перехода от одного типа крепи к другому или изменения его параметров из-за низкой технологичности и трудоёмкости вспомогательных переделов. При использовании «мокрой» технологии набрызга за счёт нанесения бетонных смесей с требуемыми характеристиками возможна высокая степень адаптации технологии набрызгбетонирования к строительству в любых типах грунтов.

С учетом необходимости использования набрызгбетона, отвечающего высоким требованиям, авторами предлагаются композиции набрызгбетона с повышенными физико-механическими характеристиками. Оптимизация свойств смесей при этом достигается путём добавок микронаполнителей с самостоятельной гидравлической активностью [9]. В рамках экспериментальных изысканий были исследованы образцы модифицированной набрызгбетонной композиции с целью определения ее основных физико-механических свойств.

Результаты и их обсуждение

В опытных работах производились исследования набора прочности образцов набрызгбетона с ускорителями схватывания (А1 и А2 на основе алюминатов и Б1 и Б2 – бесщелочных ускорителей) разнообразного генезиса. Так как в подземных конструкциях механизм нарастания критических напряжений во вмещающем грунте и конструкциях достигает максимума на 7–10 сутки, нужно использовать набрызгбетон с повышенными физико-

механическими параметрами в ранние сроки твердения. Из этого следует необходимость обеспечения требуемых показателей набора прочности набрызгбетона при расчете подземных конструкций из набрызгбетона с учетом горного давления. Добавки на основе алюминатов кальция повышают кинетику твердения цементных растворов, взаимодействуя с водой без прямого содействия гидратирующихся компонентов цемента. Наиболее часто такие добавки базируются на аморфных алюминатах кальция типа С12А7 или смеси алюминатов кальция с сульфатсодержащим компонентом, как правило с безводной формой гипса – ангидритом. Действие этих комплексов основывается на образовании этtringита, в результате чего, как и в случае с сульфоалюминатами кальция, сокращаются сроки схватывания и происходит возрастание начальной прочности. Добавлением ангидрита ограничивается содержание свободных ионов алюминия, оказывающих сильный замедляющий эффект на процесс гидратации алита. Сульфоалюминаты и алюминаты кальция способны как ускорять схватывание и компенсацию усадки, так и «самозалечивать» поверхностные трещины с шириной раскрытия 250–400 мкм. Данный эффект обусловлен повышением содержания ионов кальция в поровой жидкости, в результате чего происходит образование карбоната кальция на поверхности излома трещины и заполнение им всего её объёма. Источником сульфат-ионов является как сама добавка, аналогично случаю с сульфоалюминатами кальция или смешанными системами алюминатов кальция, так и компоненты цемента: регулятор твердения – гипс, ангидрит; примесные сульфаты натрия и калия.

Высокая гигроскопичность описываемых добавок вынуждает устанавливать сушильные устройства в комплексе применяемой технологической цепи, что является основным недостатком ускорителей схватывания на основе алюминатов.

Бесщелочные ускорители схватывания имеют в своём составе: сульфат алюминия 20-40, сульфаты двухвалентных металлов 4-6, органический буферобразующий компонент 6-12, комплексообразователь 2-10, воду и т.д. В качестве соединений алюминия данные ускорители содержат стабилизированный органическим буферобразующим компонентом на основе кислоты с константой ионизации $pK_a = 2 \div 4$ основной сульфат алюминия, а в качестве комплексообразователя – многоатомные спирты $\text{HOCH}_2(\text{CHON})_n\text{CH}_2\text{OH}$, где $n = 0 \div 4$, пентаэритрит, замещенные спирты $\text{RCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$, где R содержит элемент со свободной неподеленной парой электронов или смесь нескольких указанных продуктов, способных образовывать пяти- и шестичленные хелаты при дополнительном введении водорастворимых сульфатов двухвалентных металлов. Для оптимизации свойств набрызгбетона исследовались тонкомолотые наполнители с составом: тонкомолотый портландцемент ($Sy_d = 12000 \text{ см}^2/\text{гр}$) с тонкодисперсным порошком карбоната кальция ($Sy_d = 20000 \text{ см}^2/\text{гр}$) – и их влияние на свойства растворной смеси. В лабораторных опытах использовался алитовый портландцемент СЕМІ 32,5 Н Оскольского цементного завода с общим содержанием Al_2O_3 не более 4,3% по массе. В качестве мелкого заполнителя использовался песок Рузского (Богаевского) карьера с модулем крупности $M_k = 2,5$.

Испытания эффективности действия ускорителей на схватывание и твердение проводились на цементно-песчаном растворе. Со-

став раствора – 1:3 (цемент:песок); В/Ц – 0,45, содержание добавки, % от массы цемента: суперпластификатора – 0,1%; ускорителя – 6,5%.

В процессе приготовления раствора химические добавки смешивали с водой затворения. Добавляли остальные компоненты в указанной ниже последовательности, после чего перемешивали по режиму: цемент – 30 с, песок – 60 с, остановка – 90 с, окончательное перемешивание – 30 с. Из смеси готовили образцы-балочки с размерами 40x40x160 мм для определения прочностных характеристик. Образцы хранили в камере нормального твердения (при 100-процентной относительной влажности и $t = 20^\circ\text{C}$) и испытывали на сжатие в возрасте 1, 7, 14 и 28 суток. На основе анализа графика (рис. 3) можно сделать вывод, что стандартный набрызгбетон В30 без добавок не удовлетворяет требованиям восприятия горного давления в грунтах средней крепости (по М.М. Протоdjяконову) и сечениях до 4–5 м в начальные периоды затвердевания, требуя модификации данного параметра. Добавка в портландцемент типа М500 ДО микронаполнителей, имеющих в составе наночастицы со средним диаметром до 100 нм, позволяет достигать повышенных физико-механических характеристик набрызгбетона. В ряде исследований по данной тематике с использованием микронаполнителей, обладающих различной степенью самостоятельной гидравлической активности, было определено повышение плотности затвердевшего бетона, адгезии и прочностных показателей, снижение процента отскока) [9–13].

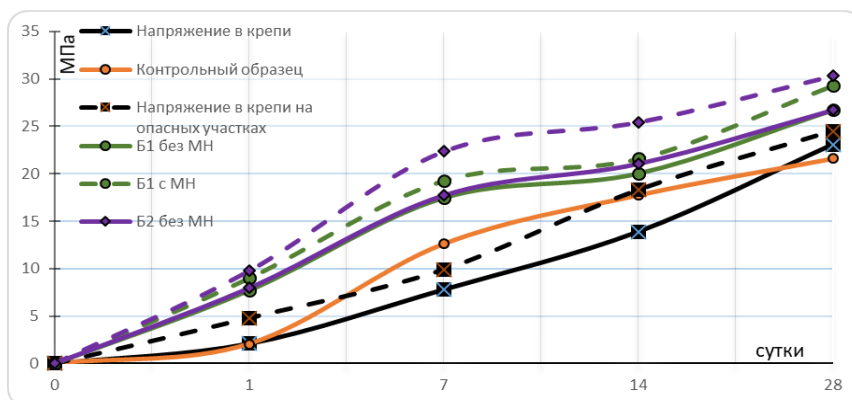


Рис. 3. Сравнение прочности на сжатие набрызгбетонных композиций

Fig. 3. Comparison of the compressive strength of various concrete compositions for shotcrete

Также использование микронаполнителя стабилизирует смесь за счет уменьшения пористости вяжущего (повышения плотности упаковки частиц минеральных композиций), снижая нормальную густоту вяжущего за счет меньшей водопотребности [14, 15]. При ис-

пользовании ускорителей схватывания можно оптимально регулировать кинетику набора прочности бетона, не допуская превышения критических значений напряжения в крепи. По результатам работ отмечена высокая степень эффективности бесщелочных ускорителей схватывания по

сравнению с ускорителями на основе алюминатов, что может объясняться более высоким уровнем вовлечения бесщелочных ускорителей в процесс структурообразования цементного камня и созданием новообразований, способствующих гидратации цемента, в больших объемах [16, 17].

Заключение

Полученные выводы позволяют констатировать более сильный эффект влияния на гидратацию бесщелочных ускорителей схва-

тывания по сравнению с ускорителями-алюминатами, что необходимо учитывать в процессах назначения оптимальных составов для набрызгбетонирования. Высокая эффективность совместной работы ускорителей твердения вяжущих и микронаполнителя позволяет подбирать составы набрызгбетона с учетом любых показателей горного давления для грунтов средней устойчивости и выработок среднего сечения [18–21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоног Ю.Г., Лобов И.М. Использование пространств шахтной выработки при реновации недействующих шахт // Современное промышленное и гражданское строительство. 2018. Т. 14. № 2. С. 81–88.
2. Нефедьева А.К., Нефедьев А.П., Баженов М.И., Александров А.В., Алексеев В.А. Комплексные решения при применении технологии компенсационного нагнетания // Метро и тоннели. 2020. № 3. С. 32–33.
3. Алексеев В.А., Баженова С.И. Оптимизация бетонных составов для набрызгбетонирования при сооружении подземных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 1. С. 8–17. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-1-8-17>
4. Saade M.R.M., Passer A., Mittermayr F. A Preliminary Systematic Investigation onto Sprayed Concrete's Environmental Performance // Procedia CIRP. 2018. Vol. 69. p. 212–217. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.108>
5. Харченко И.Я., Алексеев В.А., Исрафилов К.А., Бетербиев А.С.-Э. Современные технологии цементационного закрепления грунтов // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 5 (104). С. 552–558. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.5.552-558>
6. Пат. № 2622057 С, Российская Федерация, МПК C04B 28/02, C04B 7/00, C04B 111/20. Сухая смесь для приготовления бетона и строительного раствора и применение сухой смеси / Алексеев В.А., Харченко И.Я., Харченко А.И., Матвеев К.Н.: заявитель и патентообладатель ООО "Научно-исследовательский центр". № 2015146093; заявл. 27.10.2015; опубл. 09.06.2017.
7. Алексеев В.А., Харченко А.И., Соловьев В.Г., Никоноров Р.Н. Набрызгбетон в шахтном строительстве // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 7 (106). С. 780–787. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.7.780-787>
8. Bernard E.S., Thomas A.H. Fibre reinforced sprayed concrete for ground support // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Vol. 99. p. 103302. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103302>
9. Ginouse N., Jolin M. Investigation of Spray Pattern in Shotcrete Applications // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 93. pp. 966–972. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.061>
10. Alekseev V.A., Bazhenov Yu.M., Bazhenova S.I., Bazhenova O.Yu., Golovashchenko N.A., Mironchuk N.S. Modified binder for sprayed concrete // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 5 (1005). С. 18–19.
11. Pan-Pan Sun, Xu-Xu Yang, De-Kang Sun. Optimally designed shotcrete material and its cooperating performance when integrated with sandstone // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 249. p. 118742. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118742>
12. Kalhori H., Bagherzadeh B., Akhlaghi M.A. Experimental study on the influence of the different percentage of nanoparticles on strength and freeze-thaw durability of shotcrete // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 256. p. 119470. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119470>
13. Winnefeld F., Kaufmann J., Leemann A. Influence of shotcrete accelerators on the hydration of cement pastes and their impact on sulfate resistance // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 266. Part A. p. 120782. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120782>
14. Алексеев В.А., Баженов Ю.М., Баженова С.И., Баженова О.Ю., Бисембаев Р.С., МIRONЧУК Н.С. Добавки с самостоятельной гидравлической активностью для набрызгбетона // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 8 (1008). С. 61–63.
15. Naotaka Kikkawa, Sinya Ito, Nobutaka Hiraoka. Punching fracture mechanism and strength formula of early-age shotcrete // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 110. p. 103765. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103765>

16. Kaufmann J., Loser R., Leemann A. Sulfate resistance testing of shotcrete – Sample preparation in the field and under laboratory conditions // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 276. p. 122233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122233>

17. Jiadong Qiu, Lin Luo, Yong Luo. Numerical investigation on the tensile fracturing behavior of rock-shotcrete interface based on discrete element method // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020. Vol. 30. Iss. 3. pp. 293–301. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.03.007>

18. Guler S., Öker B., Akbulut Z.F. Workability, strength and toughness properties of different types of fiber-reinforced wet-mix shotcrete // *Structures*. 2021. Vol. 31. pp. 781–791. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.02.031>

19. Yifei Wang, Caijun Shi, Yi Liu. Accelerators for shotcrete – Chemical composition and their effects on hydration, microstructure and properties of cement-based materials // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 281. p. 122557. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122557>

20. Харченко А.И., Харченко И.Я., Алексеев В.А., Баженова С.И. Применение расширяющихся цементов для набрызгбетона в тоннельном строительстве // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 11 (134). С. 1438–1448. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.11.1438-1448>

21. Bjureland W., Johansson F., Larsson S. Influence of spatially varying thickness on load-bearing capacity of shotcrete // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020. Vol. 98. p. 103336. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103336>

REFERENCES

1. Belonog YuG, Lobov IM. Use of space mine roadway at renovation of out-of-service mines. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo = Modern industrial and civil construction*. 2018;14(2):81–88. (In Russ.)

2. Nefedieva AK, Nefediev AP, Bazhenov MI, Alexandrov AV, Alekseev VA. Complex solutions in the application of compensation injection technology. *Metro i tonneli*. 2020;3:32–33. (In Russ.)

3. Alekseev VA, Bazhenova SI. Optimization of concrete compositions for sprayed concrete in the construction of underground structures. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova = Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2020;1:8–17. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-1-8-17> (In Russ.)

4. Saade MRM, Passer A, Mittermayr F. A Preliminary Systematic Investigation onto Sprayed Concrete's Environmental Performance. *Procedia CIRP*. 2018;69:212–217. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.108>

5. Kharchenko IYa, Alekseev VA, Israfilov KA, Beterbiev AS-E. Modern technologies of cement grouting. *Vestnik MGSU*. 2017;12(5):552–558. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.5.552-558> (In Russ.)

6. Alekseev VA, Kharchenko IYa, Kharchenko AI, Matveev KN. Dry mixture for preparing concrete and building mortar and use of dry mixture. Patent RF, no. 2622057 C, 2017. (In Russ.)

7. Alekseev VA, Kharchenko AI, Solovyev VG, Nikonorov RN. Shotcrete in Mine Construction. *Vestnik MGSU*. 2017;12(7):780–787. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.7.780-787> (In Russ.)

8. Bernard ES, Thomas AH. Fibre reinforced sprayed concrete for ground support. *Tunnelling*

and Underground Space Technology. 2020;99:103302. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103302>

9. Ginouse N, Jolin M. Investigation of Spray Pattern in Shotcrete Applications. *Construction and Building Materials*. 2015;93:966–972. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.061>

10. Alekseev VA, Bazhenov YuM, Bazhenova SI, Bazhenova OYu, Golovashchenko NA, Mironchuk NS. Modified binder for sprayed concrete. *BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki*. 2018;5(1005):18–19.

11. Pan-Pan Sun, Xu-Xu Yang, De-Kang Sun. Optimally designed shotcrete material and its cooperating performance when integrated with sandstone. *Construction and Building Materials*. 2020;249:118742. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118742>

12. Kalhori H, Bagherzadeh B, Akhlaghi MA. Experimental study on the influence of the different percentage of nanoparticles on strength and freeze-thaw durability of shotcrete. *Construction and Building Materials*. 2020;256:119470. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119470>

13. Winnefeld F, Kaufmann J, Leemann A. Influence of shotcrete accelerators on the hydration of cement pastes and their impact on sulfate resistance. *Construction and Building Materials*. 2021;266(A):120782. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120782>

14. Alekseev VA, Bazhenov YuM, Bazhenova SI, Bazhenova OYu, Bisembaev RS, Mironchuk NS. Additive having hydraulic activity for shotcrete. *BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki*. 2018;8(1008):61–63. (In Russ.)

15. Naotaka Kikkawa, Sinya Ito, Nobutaka Hiraoka. Punching fracture mechanism and strength formula of early-age shotcrete. *Tunnelling and Underground*

Space Technology. 2021;110:103765.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103765>

16. Kaufmann J., Loser R., Leemann A. Sulfate resistance testing of shotcrete – Sample preparation in the field and under laboratory conditions. *Construction and Building Materials.* 2021;276:122233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122233>

17. Jiadong Qiu, Lin Luo, Yong Luo. Numerical investigation on the tensile fracturing behavior of rock-shotcrete interface based on discrete element method. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2020;30(3):293–301. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.03.007>

18. Guler S, Öker B, Akbulut ZF. Workability, strength and toughness properties of different types of fiber-reinforced wet-mix

shotcrete. *Structures.* 2021;31:781–791. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.02.031>

19. Yifei Wang, Caijun Shi, Yi Liu. Accelerators for shotcrete – Chemical composition and their effects on hydration, microstructure and properties of cement-based materials. *Construction and Building Materials.* 2021;281:122557. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122557>

20. Kharchenko AI, Kharchenko IYa, Alekseev VA, Bazhenova SI. Application of expanding cements for sprayed concrete in tunnel construction. *Vestnik MGSU.* 2019;14(11):1438–1448. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.11.1438-1448> (In Russ.)

21. Bjureland W, Johansson F, Larsson S. Influence of spatially varying thickness on load-bearing capacity of shotcrete. *Tunnelling and Underground Space Technology.* 2020;98:103336. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103336>

Сведения об авторах

Баженова Софья Ильдаровна,
кандидат технических наук, доцент кафедры технологий вяжущих веществ и бетонов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, e-mail: sofia.bazhenova@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6111-201X>

Мельниченко Александра Александровна,
студент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0690-9763>

Information about the authors

Sof'ya I. Bazhenova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technologies of Binders and Concretes, Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia, e-mail: sofia.bazhenova@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6111-201X>

Alexandra A. Melnichenko,
Undergraduate student, Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0690-9763>

Заявленный вклад авторов

Баженова С.И., Мельниченко А.А. имеют равные авторские права. Баженова С.И. несет ответственность за плагиат.

Contribution of the authors

Bazhenova S.I., Melnichenko A.A. have equal author's rights. Bazhenova S.I. bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 09.04.2021.
Одобрена после рецензирования 11.05.2021.
Принята к публикации 17.05.2021.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

The article was submitted 09.04.2021.
Approved after reviewing 11.05.2021.
Accepted for publication 17.05.2021.