

НАБРЫЗГБЕТОН В ШАХТНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ¹

В.А. Алексеев, А.И. Харченко, В.Г. Соловьев, Р.Н. Никоноров*

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26;

**Научно-инженерный центр Тоннельной ассоциации (НИЦ Тоннельной ассоциации), 129344, г. Москва, ул. Енисейская, д. 7, стр. 4, ком. 10*

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются особенности строительства подземных сооружений с использованием набрызгбетона в качестве крепи, приведены примеры сооружения шахт с конструкциями из набрызгбетона, в т.ч. проектируемая шахта с вертикальным стволом. Изложен метод расчета сооружения шахтного ствола с применением набрызгбетонной крепи, даны основные аналитические зависимости, получен график роста напряжений в крепи для нескольких участков по результатам фактических инженерно-геологических изысканий.

Проведены исследования свойств бетона с ускоренным набором прочности при сооружении шахт в горном деле и строительстве объектов транспортной инфраструктуры. Приведены результаты экспериментальных исследований набрызгбетона с органоминеральными и химическими добавками.

Установлено повышение физико-механических характеристик получаемого набрызгбетона при использовании комплексной активной наносодержащей добавки в составе базового вяжущего. Повышенная кинетика набора прочности при введении ускорителей позволяет подобрать составы набрызгбетона практически для любых устойчивых и среднеустойчивых пород при устройстве крепи подземных сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: шахтное строительство, набрызгбетон, фибронабрызгбетон, микронаполнитель, модифицированное вяжущее, структурообразование, горное давление, кинетика набора прочности, ускоритель схватывания

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Алексеев В.А., Харченко А.И., Соловьев В.Г., Никоноров Р.Н. Набрызгбетон в шахтном строительстве // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 7 (106). С. 780–787. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.780-787

SHOTCRETE IN MINE CONSTRUCTION

V.A. Alekseev, A.I. Kharchenko, V.G. Solovyev, R.N. Nikonorov*

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation;

**LLP «Nauchno-inzhenernyy tsentr Tonnel'noy assotsiatsii» (NITs Tonnel'noy assotsiatsii), 7 Eniseyskaya st., bld. 4, r. 10, Moscow, 4129344, Russian Federation*

ABSTRACT. This article deals with concerns of construction of subsurface structures with the use of shotcrete as a support, the samples of mine construction with application of shotcrete have been shown, in particular projected mine with vertical well bore. The calculation method for construction of well bore with the use of shotcrete support has been stated, the major analytical relationships have been set out, a graph showing the growth of strength in a support has been generated for several sites according to the results of actual geotechnical survey.

The research of properties of concrete with fast development of strength has been implemented for mine engineering and construction of transportation infrastructure. The results of experimental analysis of shotcrete with organo-mineral and chemical additives have been listed.

Performance improvement of physical and mechanical properties of shotcrete has been proven when the complex active nano agent added into composition of the binder. Improved kinetics of development of strength related to accelerated admixture helps in proportioning concrete compositions for practically any firm and medium-firm grounds during construction of support of subsurface structures.

KEY WORDS: mine construction, shotcrete, fibre shotcrete, micro filler, modified binder, structure formation, overburden pressure, kinetics of development of strength, accelerating agent

FOR CITATION: Alekseev V.A., Kharchenko A.I., Solovyev V.G., Nikonorov R.N. Nabryzgbeton v shakhtnom stroitel'stve [Shotcrete in Mine Construction]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 7 (106), pp. 780–787. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.780-787

¹ Авторы выражают свою признательность Меркину В.Е. и И.Н. Хохлову за ценные консультации, а также рецензенту журнала «Вестник МГСУ», чьи подробные комментарии и рекомендации помогли повысить качество статьи.

Шахтное строительство широко представлено в добывающей промышленности полезных ископаемых, в оборонной промышленности и при ос-

воении подземного строительства городов. Повышение темпов подземного строительства связано с процессом развития транспортной инфраструктуры

и ускоренными темпами освоения недр, богатых природными ресурсами необходимыми для промышленности и сельского хозяйства.

В настоящее время, несмотря на интенсивную разработку залежей полезных ископаемых в карьерах, шахтным способом добывается примерно 80 % каменных углей, 30 % руд металлов и 15 % нерудных полезных ископаемых [1–4].

Конструкция шахты, способ сооружения ствола и организация работ при строительстве определяются инженерно-геологическими условиями участка и его гидрогеологией, которая при неблагоприятных обстоятельствах требует применения специальных способов работ (замораживание или предварительное закрепление грунтового массива) [5–7].

Совершенствование технологий и появление на рынке инновационных строительных материалов в совокупности с возрастающей ролью экономической эффективности строительства диктуют необходимость усовершенствования традиционных конструктивных и технологических решений шахтных сооружений. Однако в настоящее время при сооружении шахт параметры и типы используемой крепи по всей длине ствола не меняются даже при изменяющихся инженерно-геологических условиях в пределах геометрии выработки, что является экономически нецелесообразным решением. Хотя нормативными документами регламентируется дифференциация конструкций крепей при изменении прочностных показателей пород, фактически данный постулат не реализуется ввиду сложности перехода с одного типа крепи на другой или изменения его параметров ввиду низкой технологичности и трудоемкости вспомогательных переделов.

Одной из гибких технологий с использованием крепи регулируемого сопротивления и простой коррекции параметров является набрызгбетонная крепь. Впервые в СССР технология набрызгбетонирования применялась при ремонте действующих подземных выработок Донбасса, а затем и при строительстве новых шахт в 1920–30-е гг. В послевоенный период в связи с ростом промышленности и успехами в области технологии бетонов набрызгбетон начал широко применяться при сооружении подземных конструкций. С использованием набрызгбетона были построены шахты «Холодная Балка № 3», «Великомостовская № 3» и ряд других подземных сооружений.

С момента внедрения технологии набрызгбетона для создания крепи этот процесс условно разделяется на две разновидности: торкретирование и набрызгбетонирование. Говоря о технологии торкретирования, всегда подразумевается, что данным способом создается тонкое покрытие толщиной до 2...3 см с использованием для приготовления бетонной смеси только мелких фракций инертного заполнителя (до 5 мм). В то же время в технологии

набрызгбетона для бетонных смесей используется крупный заполнитель до 25 мм, что позволяет создавать несущие конструкции крепей значительной толщины. В общем случае, когда говорят о создании несущих крепей при строительстве подземных сооружений, следует понимать, что имеется в виду их создание в процессе набрызгбетонирования [8, 9].

Различие технологических и конструкторских решений при использовании набрызгбетона заключается в разных требованиях к необходимости обеспечения их физико-механических параметров, коррозионной стойкости, проницаемости, морозостойкости [10, 11].

Сочетание прогрессивных методов строительства и использование набрызгбетона с повышенными характеристиками и регулируемым структурообразованием позволяет оптимизировать расходы при сооружении шахт, сократить срок строительных работ и повысить общую безопасность конструкций [12, 13].

Отдельным требованием является долговечность и безопасность эксплуатации сооружаемых конструкций из набрызгбетона на переходном участке стволов, где пониженные температуры. Как известно, температура грунтового массива меняется на различных глубинах и обычно меньше температуры твердения бетона в нормальных условиях. Особенно это актуально для суровых климатических условий, где температура окружающего массива может достигать низких значений, что приводит к необходимости достижения определенных технических параметров материала конструкций.

МГСУ и ООО «Научно-инженерный центр тоннельной ассоциации» участвовали в разработке проекта по проходке клетового ствола с использованием опережающей крепи из набрызгбетона, где крепь ствола служит для восприятия нагрузок от горного массива и давления морозного пучения замороженных пород. Конструкция крепи рассчитывалась на восприятие горного и гидростатического давления, а также давления морозного пучения при сопутствующем замораживании пород на отдельных участках, где требовались специальные способы производства работ. При возникновении необходимости обеспечения устойчивости разработанного участка породы до подведения передовой бетонной крепи по окончании проходки заходки высотой 1,5 м было предусмотрено нанесение слоя набрызгбетона на обнаженные стенки ствола, а в случае проходки по неустойчивым породам — выполнение этих работ из забоя.

Проходка вертикального шахтного ствола проектируется в пределах участка недр «Нивенский–1» в Калининградской области по совмещенной схеме с ежесуточным продвижением забоя на 1,5 м. В качестве примера рассматривается участок ствола на глубине 390 м. Проходка на данном участке про-

изводится в замороженной породе. Крепь ствола толщиной 500 мм из набрызгбетона. Характеристики горной породы (суглинок моренный) следующие: общий модуль деформации горной породы в естественных условиях $E_0 = 80$ МПа, коэффициент Пуассона горной породы в естественных условиях $\nu_0 = 0,45$, общий модуль деформации замороженной горной породы $E_f = 770$ МПа, коэффициент Пуассона замороженной горной породы $\nu_f = 0,3$, удельный вес горной породы $\gamma = 19,2$ кН/м³, параметры ползучести горной породы $\alpha_f = 0,7$ и $\delta_f = 0,01$. Геометрические характеристики крепи из набрызгбетона $r_0 = 4,0$ м, $r_1 = 4,5$ м, $H = 390$ м. Давление морозного пучения $P_f = 0,09$ МПа.

При расчете необходимо было учесть совместное влияние трех факторов: подвигание забоя ствола, твердение бетона и ползучесть замороженной породы.

Проследим подвигание забоя ствола на 1,5 м/сут при начальном расстоянии рассматриваемого сечения ствола от забоя $l = 7,5$ м. Коэффициент $\alpha^*(l)$ определяется по формуле

$$\alpha^* = \exp\left(-1,3 \cdot \frac{l}{r_0}\right). \quad (1)$$

Относительные перемещения контура сечения ствола:

$$\tilde{u}(t_i) = 1 - \alpha^*. \quad (2)$$

Доля $\Delta\alpha_i^*$, учитывающая влияние отхода забоя, приходящаяся на каждый момент времени t_i , определяется по формуле

$$\tilde{u}(t_i + 1) - \tilde{u}(t_i) = \Delta\alpha_i^*. \quad (3)$$

Результаты вычислений приведены в табл. 1. Здесь же приведены значения α^* как суммы $\Delta\alpha_i^*$ с нарастающим итогом.

Изменение модуля деформации бетона определяется по формуле Н.Х. Арутюняна

$$E(T) = E_b \cdot (1 - 0,6 \cdot e^{-0,13T}). \quad (4)$$

Модуль сдвига бетона (в соответствии с СП 63.13330.2012²):

$$G_1(T) = 0,4 \cdot E_1(T). \quad (5)$$

Далее определяется функция ползучести замороженной породы в момент времени t_i по формуле

$$\Phi = \frac{\delta \cdot t^{1-\alpha}}{1-\alpha}. \quad (6)$$

Определяем значения величин E_{0t} , G_{0t} , ν_{0t} , χ_{0t} . Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Коэффициенты передачи нагрузок для каждого момента времени определяем по формуле

$$K_{0(2)i} = \frac{x_{0t} + 1}{2 + \frac{G_{0i}}{G_{b(T)}} \cdot \frac{d'_{1(1)}}{c_1^2 - 1}}. \quad (7)$$

Результаты вычислений приведены в табл. 3, также приведены значения приращения коэффициента передачи нагрузок в каждый момент времени $\Delta K_{0(2)i}^*$.

Определяем приращения нормальных напряжений на контакте опережающей крепи с массивом (нагрузок на крепь) в каждый момент времени, вызванные подвиганием забоя, по формуле:

² СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения

Табл. 1. Параметры подвигания забоя ствола (первый этап вычислений)

Параметры	Время t , сут			
	1	7	14	28
Расстояние l , м	7,5	16,5	27	48
Коэффициент $\alpha^*(l)$	0,0874	0,0047	0,0002	1,68E-07
Перемещение $u(t)_i$	0,9126	0,9953	0,9998	1,0000
Доля $\Delta\alpha_i^*$	0,0337	0,0018	0,0001	1,68E-07
Коэффициент α^*	0,0337	0,0845	0,0873	0,0874

Табл. 2. Параметры подвигания забоя ствола (второй этап вычислений)

Параметры	Время t , сут			
	1	7	14	28
Время t , с	86 400	604 800	1 209 600	2 419 200
Модуль деформации $E_b(T)$	14 194,3	22 754,6	27 083,5	29 527,5
Модуль сдвига $G_b(T)$	5677,7	9101,8	10 833,4	11 811,0
Ползучесть Φ	1,009	1,809	2,227	2,741
Модуль E_{0t}	383,3	274,1	238,6	205,8
Модуль G_{0t}	136,9	95,9	83,0	71,1
Коэффициент ν_{0t}	0,400	0,429	0,438	0,447
Коэффициент χ_{0t}	1,398	1,285	1,248	1,214

$$\Delta p'_{0(2)i} = K_{0(2)} \cdot \frac{2}{x_{0t} + 1} \cdot (\Delta \alpha_i^* \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot H + P_f). \quad (8)$$

Далее необходимо определить приращения нормальных напряжений на контакте крепи с массивом в каждый момент времени, вызванные ползучестью пород. Для этого определим коэффициенты передачи нагрузок $K'_{0(2)}$ без учета ползучести пород. Результаты приведены в табл. 3. Вычислим приращения коэффициентов передачи нагрузок, учитывающие только твердение бетона, в каждый момент времени. Далее вычислим приращение коэффициентов передачи нагрузок, вызванные только ползучестью пород по формуле

$$\Delta K_{0(2)\Phi} = \Delta K_{0(2)i} - \Delta K'_{0(2)}. \quad (9)$$

Результаты вычислений тоже приведены в табл. 3. Определяем приращение нормальных напряжений на контакте крепи с массивом, вызванные ползучестью пород:

$$\Delta p''_{0(2)i} = \Delta K_{0(2)} \cdot \frac{2}{x_{0t} + 1} \cdot (\alpha^* \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot H + P_f). \quad (10)$$

Определяем полные напряжения на контакте крепи с массивом суммируя с нарастающим итогом $\Delta p'_{(2)i}$ и $\Delta p''_{(2)i}$. Средние по радиальному сечению нормальные тангенциальные напряжения в крепи приведены в табл. 3.

Ввиду высоких требований к набрызгбетону авторами было предложено использование набрызгбетона с повышенными характеристиками за счет введения в его состав композиционного вяжущего

Табл. 3. Напряжения в крепи

Параметры	Время t , сут			
	1	7	14	28
Коэффициент $K_{0(2)i}$	1,034	1,068	1,070	1,064
Приращение $\Delta K_{0(2)i}$	0,000	0,002	0,000	0,000
Приращение $\Delta p'_{0(2)i}$, МПа	0,249	0,087	0,078	0,078
Коэффициент $K'_{0(2)}$	1,041	1,152	1,185	1,201
Приращение $\Delta K'_{0(2)}$	0,000	0,009	0,003	0,000
Коэффициент $K_{0(2)\Phi}$	0,000	–0,008	–0,003	0,000
Приращение $\Delta p''_{0(2)i}$, МПа	0,000	–0,004	–0,001	0,000
Напряжение $p_{0(2)}$, МПа	0,249	0,951	1,493	2,578
Напряжение σ_m , МПа	2,248	8,587	13,481	23,278

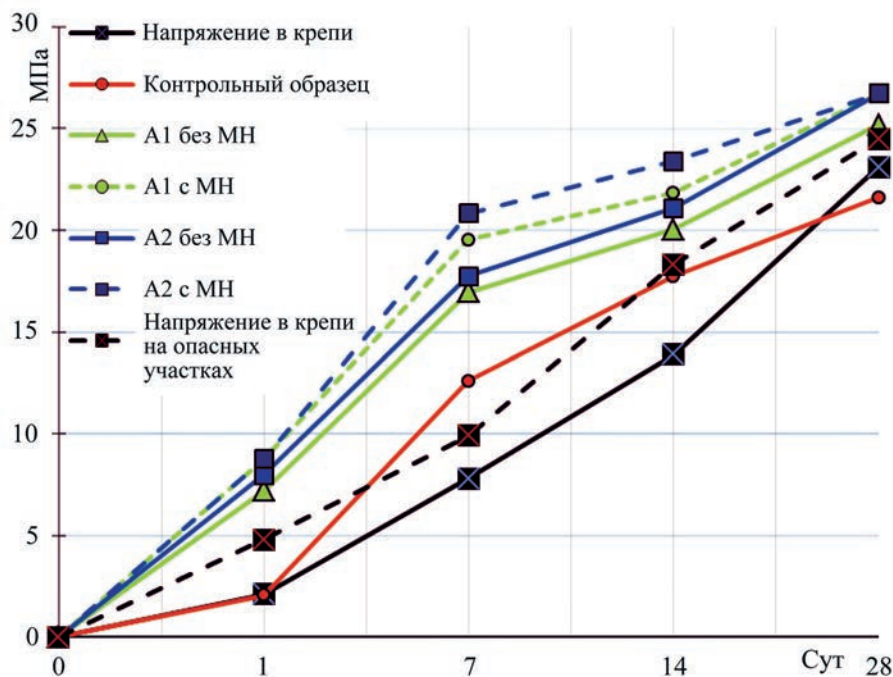


Рис. 1. График нарастания напряжений в крепи и набор прочности различных составов бетона с микронаполнителем и ускорителями A1 и A2 на основе алюминатов

щего вещества с микронаполнителями типа МСГТ (микронаполнитель с самостоятельной гидравлической активностью) [14, 15].

В рамках научно-исследовательских работ лабораторией кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов был проделан ряд опытов и исследованы различные образцы бетонных смесей с целью определения рабочих составов набрызгбетона для подземных конструкций [14–17].

В процессе проектирования проходки ствола (в т.ч. на участках со сложными инженерно-геологическими условиями) приходилось учитывать пониженную температуру окружающего грунтового массива (порядка 10 °С), что дополнительно накладывало более высокие требования к кинетике твердения бетонной смеси.

При исследовании набора прочности образцов бетона использовались ускорители схватывания на основе алюминатов (А1 и А2) и бесщелочных ускорителей (Б1 и Б2) известных отечественных и зарубежных компаний (рис. 1 и 2).

Подземные сооружения, ввиду особенностей распределения возникающих напряжений в конструкции, расположенной в грунтовом массиве, зачастую имеют неоднородные включения (линзы), негативную динамику гидрогеологических условий, изменения деформативных свойств геологических слоев, что требует применения спецметодов при проходке стволов. Поэтому при расчете подземных конструкций из набрызгбетона необходимо обеспечить требуемые показатели набора прочностных показателей.

Из графиков видно, что бетон В20 без добавок не может воспринимать горное давление в начальный период твердения, что требует модификации бетонной смеси органоминеральными и химическими добавками.

Введение в состав базового вяжущего помимо стандартного портландцемента М500 Д0, а также микронаполнителя, имеющего в составе наночастицы со средним диаметром до 100 нм, позволяет повысить характеристики набрызгбетона (прочность, плотность бетона, объем отскока при нанесении набрызга, адгезию с подложкой), что было определено в ряде экспериментальных исследований по данной тематике с использованием микронаполнителей, обладающих различной степенью самостоятельной гидравлической активности. Кроме того, использование микронаполнителя повышает плотность упаковки частиц вяжущего, что позволяет снизить нормальную густоту вяжущего за счет меньшего количества воды, необходимого для заполнения межзернового пространства зерен вяжущего [14–20].

Использование ускорителей схватывания позволяет оптимально повысить кинетику набора прочности бетона с опережением роста напряжения в крепи. Причем зафиксировано более эффективное использование бесщелочных ускорителей схватывания по сравнению с алюминатами, что, по всей видимости, объясняется большей степенью вовлечения в процесс структурообразования и формирования большего количества новообразований, способствующих гидратации цемента [21].

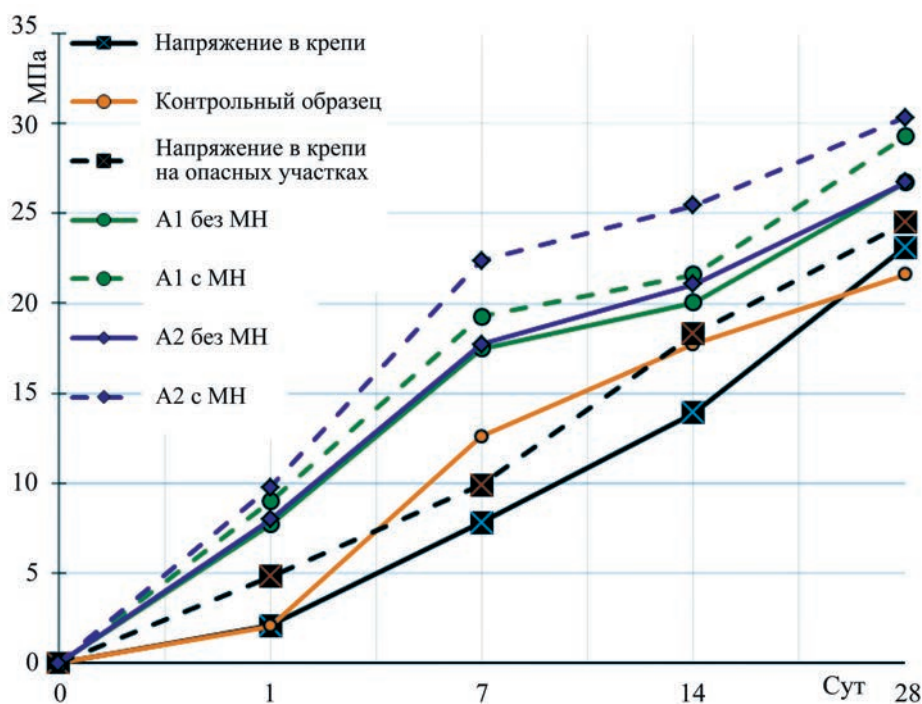


Рис. 2. График нарастания напряжений в крепи и набор прочности различных составов бетона с микронаполнителем и ускорителями Б1 и Б2 на основе бесщелочного ускорителя схватывания

Также перспективным и оптимальным способом повышения модуля упругости набрызгбетона является введение в его состав фибры, которая при распределении в объеме бетона начинает воспринимать на себя все растягивающие усилия. Благодаря более высокому значению модуля упругости такие волокна не разрываются при нагрузке, предотвращают раскрытие трещины, разрушение приобретает более «вязкий» характер. Окончательная деструкция фибронабрызгбетона наступает чаще всего как результат нарушения связи «армирующее фиброволокно — бетонная матрица» за счет превышения действующей нагрузки над значениями сцепления фибры и матрицы, что сопровождается вырывом волокон из цементного камня [22, 23].

При использовании дисперсного армирования повышается предел прочности на растяжение при изгибе и модуль упругости набрызгбетона, что позволяет снизить толщину и удельные трудозатраты

возводимых конструкций, повысить критерии безопасности подземного сооружения, предупреждая «взрывной» характер разрушения при превышении допустимой нагрузки, как в случае использования обычного бетона [12, 22, 24].

По результатам проектных и экспериментальных работ можно сделать следующие выводы:

1. Установлен с помощью аналитического метода прирост напряжений в крепи на заданных участках.

2. Определено изменение параметров прочности набрызгбетона с добавкой микронаполнителя, обладающего самостоятельно гидравлической активностью и ускорителями схватывания на основе алюминатов и бесщелочных ускорителей.

3. Зафиксирована повышенная кинетика набора прочности бетона с добавками-ускорителями, удовлетворяющая конструкционным требованиям при росте горного давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Березнев С.В. Шахтостроительное производство и отраслевая наука в Кузбассе: некоторые проблемы и перспективы развития // Уголь. 2010. № 11 (1015). С. 24–26.
2. Меркин В.Е., Зерцалов М.Г., Конюхов Д.С. Управление геотехническими рисками в подземном строительстве // Транспортное строительство. 2013. № 3. С. 10–12.
3. Устинов Д.В., Конюхов Д.С. Применение математического моделирования для оптимизации конструктивных решений подземных сооружений, возводимых в сложных геотехнических условиях // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 11. С. 57–60.
4. Holmberg K., Kivikytö-Reponen P., Härkisaari P. et al. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry // Tribology International. November 2017. Vol. 115. Pp. 116–139.
5. Гончаров А.А. Строительство Строгинского участка Арбатско-Покровской линии Московского метрополитена с использованием ТПМК // Метро и тоннели. 2009. № 3. С. 18–21.
6. Астрин Л.А. Завершилось строительство тоннеля под Босфором // Метро и тоннели. 2009. № 4. С. 8–9.
7. Кривчун С.А., Кривчун Е.А., Баженов М.И. и др. Структура и свойства грунтобетонных массивов на основе наномодифицированных микроцементов // Жилищное строительство. 2016. № 9. С. 55–58.
8. Панкратов М.С., Бородин И.А. Применение набрызг-бетона при строительстве подземных объектов глубокого заложения в Москве // Метро и тоннели. 2014. № 5. С. 10–12.
9. Меркин В.Е., Чеботаев В.В. Расчетные снижения стоимости конструкций подземных сооружений транспортного назначения // Транспортное строительство. 2015. № 4. С. 9–12.
10. Меркин В.Е. О комбинированных обделках транспортных тоннелей из набрызг-бетона с напыляемой гидроизоляцией (по материалам семинара в Норвегии) // Метро и тоннели. 2011. № 3. С. 16–17.
11. Ginouse N., Jolin M. Investigation of spray pattern in shotcrete applications // Construction and Building Materials. 15 September 2015. Vol. 93. Pp. 966–972.
12. Харченко И.Я., Харченко А.И., Алексеев В.А., Баженов Д.А. Применение расширяющихся цементов для фибронабрызгбетона при строительстве подземных сооружений // Вестник МГСУ. 2017. № 3 (102). С. 334–340.
13. Бегалинов А.Б., Сердалиев Е.Т., Алменов Т.М. Пути повышения качества и эффективности применения набрызгбетона в подземных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 5. С. 5–9.
14. Алексеев В.А., Харченко И.Я., Харченко А.И. и др. Модифицированные бетонные смеси для пространственных конструкций, наносимые методом набрызга // Вестник МГСУ. 2016. № 11. С. 48–58.
15. Алексеев В.А., Баженова С.И., Харченко И.Я. и др. Совершенствование качества набрызгбетона для строительства тоннельных и притоннельных сооружений // Жилищное строительство. 2016. № 9. С. 33–36.
16. Дятлов А.К., Харченко А.И., Баженов М.И., Харченко И.Я. Композиционное вяжущее для мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов // Технологии бетонов. 2013. № 3 (80). С. 40–43.
17. Баженова О.Ю., Баженова С.И., Баженов М.И. Исследования некоторых свойств цементов с тонкодисперсной добавкой // Молодой ученый. 2013. № 10. С. 96–97.
18. Баженова С.И. Высококачественные бетоны на наномодификаторах техногенного происхождения // Вестник МГСУ. 2011. № 3–2. С. 172–175.
19. Патент РФ 2416582, МПК C04B 28/00 (2006.01) B28C 5/00 (2006.01) C04B 111/20 (2006.01). Способ приготовления бетонной смеси / В.Ф. Коровяков, Л.А. Алимов, С.И. Баженова, В.В. Воронин; заяв. и патентообл. Научно-исследовательский институт московского строительства (НИИМосстрой); заяв. 2009145031/03, заяв. 07.12.2009; опубл. 20.04.2011; бюл. № 11.
20. Пиеничный Г.Н., Галкин Ю.Ю. О механизме действия высокодисперсных минеральных добавок // Технологии бетонов. 2014. № 11 (100). С. 41–45.
21. Ибрагимов Р.А., Изотов В.С. Исследование влияния электролитов на физико-механические свойства тя-

желого бетона // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 14. С. 140–143.

22. Бурьянов А.Ф., Кухарь И.Д., Соловьев В.Г. Оптимизация составов и свойства самоуплотняющегося сталефибробетона // Эффективные строительные композиты : науч.-практ. конф. к 85-летию заслуж. деятеля науки РФ, акад. РААСН, д-ра техн. наук Баженова Юрия Михайловича. Белгород : Белгород. гос. технолог. ун-т им. В.Г. Шухова, 2015. С. 347–350.

23. Елсуфьева М.С., Соловьев В.Г. Получение сталефибробетонных с компенсированной усадкой // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований : мат. IV междунар. науч.-практ. конф. М. : CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014. С. 160–164.

24. Соловьев В.Г., Бурьянов А.Ф., Елсуфьева М.С. Пути повышения эффективности производства сборных сталефибробетонных изделий // Технологии бетонов. 2016. № 1–2. С. 34–36.

Поступила в редакцию в мае 2017 г.

Принята в доработанном виде в июне 2017 г.

Одобрена для публикации в июне 2017 г.

Об авторах: **Алексеев Вячеслав Александрович** — заведующий лабораторией кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 634586@mail.ru;

Харченко Алексей Игоревич — кандидат технических наук, заведующий сектором внедрения, Научно-исследовательский институт экспертизы и инжиниринга, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, gorgestroj@mail.ru;

Соловьев Вадим Геннадьевич — кандидат технических наук, доцент, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, s_vadim_g@mail.com;

Никоноров Роман Николаевич — магистр, **Научно-инженерный центр Тоннельной ассоциации (НИЦ Тоннельной ассоциации)**, 129344, г. Москва, ул. Енисейская, д. 7, стр. 4, ком. 10, nikonovrn@mail.ru.

REFERENCES

1. Bereznev S.V. Shakhtostroitel'noe proizvodstvo i otraslevaya nauka v Kuzbasse: nekotorye problemy i perspektivy razvitiya [Mine Building and Sectorial Science in Kuzbass : Some Problems and Prospects of Development]. *Ugol' [Coal]*. 2010, no. 11 (1015), pp. 24–26. (In Russian)
2. Merkin V.E., Zertsalov M.G., Konyukhov D.S. Upravlenie geotekhnicheskimi riskami v podzemnom stroitel'stve [Geotechnical Risks Management in Underground Construction]. *Transportnoe stroitel'stvo [Transport Construction]*. 2013, no. 3, pp. 10–12. (In Russian)
3. Ustinov D.V., Konyukhov D.S. Primenenie matematicheskogo modelirovaniya dlya optimizatsii konstruktivnykh resheniy podzemnykh sooruzheniy, vozvodimykh v slozhnykh geotekhnicheskikh usloviyakh [Application of Mathematical Modeling for Optimization of Constructive Solutions of Underground Structures Erected in Complex Geotechnical Conditions]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Construction]*. 2014, no. 11, pp. 57–60. (In Russian)
4. Holmberg K., Kivikytö-Reponen P., Härkisaari P. et al. Global Energy Consumption due to Friction and Wear in the Mining Industry. *Tribology International*. November 2017, vol. 115, pp. 116–139. (In Russian)
5. Goncharov A.A. Stroitel'stvo Stroginskogo uchastka Arbatsko-Pokrovskoy linii Moskovskogo metropolitena s ispol'zovaniem TPMK [Construction of the Strogino section of the Arbatsko-Pokrovskaya Line of the Moscow Metro with the Use of TBM]. *Metro i tunneli [Metro and Tunnels]*. 2009, no. 3, pp. 18–21. (In Russian)
6. Astrin L.A. Zavershilos' stroitel'stvo tunnelya pod Bosforom [Construction of the Tunnel under the Bosphorus Completed]. *Metro i tunneli [Metro and Tunnels]*. 2009, no. 4, pp. 8–9. (In Russian)
7. Krivchun S.A., Krivchun E.A., Bazhenov M.I. et al. Struktura i svoystva grunto-betonnykh massivov na osnove nanomodifitsirovannykh mikrotsmentov [Structure and Properties of Soil-Concrete Massifs Based on Nanomodified Microcements]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo [Zhilishchnoe Stroitel'stvo]*. 2016, no. 9, pp. 55–58. (In Russian)
8. Pankratov M.S., Borodin I.A. Primenenie nabryzgbetona pri stroitel'stve podzemnykh ob'ektov glubokogo zalozheniya v Moskve [Shotcreting Application in the Construction of Underground Deep Objects in Moscow]. *Metro i tunneli [Metro and Tunnels]*. 2014, no. 5, pp. 10–12. (In Russian)
9. Merkin V.E., Chebotaev V.V. Raschetnye snizheniya stoimosti konstruktivnykh podzemnykh sooruzheniy transportnogo naznacheniya [Estimated Reduction in the Cost of Structures of Underground Facilities for Transport Purposes]. *Transportnoe stroitel'stvo [Transport Construction]*. 2015, no. 4, pp. 9–12. (In Russian)
10. Merkin V.E. O kombinirovannykh obdelkakh transportnykh tonneley iz nabryzgbetona s napylyaemoy gidroizolyatsiey (po materialam seminarov v Norvegii) [On the Combined Lining of Transport Tunnels from Shotcreting with Sprayed Waterproofing (Based on the Materials of the Seminar in Norway)]. *Metro i tunneli [Metro and Tunnels]*. 2011, no. 3, pp. 16–17. (In Russian)
11. Ginouse N., Jolin M. Investigation of Spray Pattern in Shotcrete Applications. *Construction and Building Materials*. 15 September 2015, vol. 93, pp. 966–972.
12. Kharchenko I.Y.A., Kharchenko A.I., Alekseev V.A., Bazhenov D.A. Primenenie rasshiryayushchikhsya tsementov dlya fibronabryzgbetona pri stroitel'stve podzemnykh sooruzheniy [Application of Expanding Cements for Fibronabrysg-beton in the Construction of Underground Facilities]. *Vestnik*

MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, no. 3 (102), pp. 334–340. (In Russian)

13. Begalinov A.B., Serdaliev E.T., Almenov T.M. Puti povysheniya kachestva i effektivnosti primeneniya nabryzgbetona v podzemnykh usloviyakh [Ways to Improve the Quality and Efficiency of Shotcreting Application in the Underground Conditions]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2013, no. 5, pp. 5–9. (In Russian)

14. Alekseev V.A., Kharchenko I.Ya., Kharchenko A.I. et al. Modifitsirovannyye betonnyye smesi dlya prostranstvennykh konstruktсий, nanosimyye metodom nabryzga [Modified Concrete Mixtures for Spatial Structures, Applied by the Method of Spraying]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016, no. 11, pp. 48–58. (In Russian)

15. Alekseev V.A., Bazhenova S.I., Kharchenko I.Ya. et al. Sovershenstvovaniye kachestva nabryzgbetona dlya stroitel'stva tunnel'nykh i pritonnel'nykh sooruzheniy [Improving the Quality of Shotcreting for the Construction of Tunnel and Tunnel Structures]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo* [Zhilishchnoe Stroitel'stvo]. 2016, no. 9, pp. 33–36. (In Russian)

16. Dyatlov A.K., Kharchenko A.I., Bazhenov M.I., Kharchenko I.Ya. Kompozitsionnoe vyazhushchee dlya melkozernistykh samouplotnyayushchikhsya betonov [Compositional Bonding for Fine-Grained Self-Compacting Concretes]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technologies]. 2013, no. 3 (80), pp. 40–43. (In Russian)

17. Bazhenova O.Yu., Bazhenova S.I., Bazhenov M.I. Issledovaniya nekotorykh svoystv tsementov s tonkodispersnoy dobavkoy [Investigations of Some Properties of Cements with a Finely Dispersed Additive]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist]. 2013, no. 10, pp. 96–97. (In Russian)

18. Bazhenova S.I. Vysokokachestvennyye betony na nanomodifikatorakh tekhnogennogo proiskhozhdeniya [High-quality Concretes On Nanomodifiers Of Industry-related Origin]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011, no. 3–2, pp. 172–175. (In Russian)

19. Korovyakov V.F., Alimov L.A., Bazhenova S.I., Voronin V.V. Patent RU 2416582, IPC C04B 28/00 (2006.01) B28C 5/00 (2006.01) C04B 111/20 (2006.01). *Sposob prigotovleniya betonnoy smesi* [Method for concrete mix preparation]; claimer and patent holder Nauchno-issledovatel'skiy

institut moskovskogo stroitel'stva (NIIMosstroy) [Research Institute of Moscow Construction (NIIMosstroy)]; claim 2009145031/03, 07.12.2009; publ. 20.04.2011; bul. no. 11. (In Russian)

20. Pshenichnyy G.N., Galkin Yu.Yu. O mekhanizme deystviya vysokodispersnykh mineral'nykh dobavok [On the Mechanism of Action of Highly Disperse Mineral Additives]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technologies]. 2014, no. 11 (100), pp. 41–45. (In Russian)

21. Ibragimov R.A., Izotov V.S. Issledovanie vliyaniya elektrolitov na fiziko-mekhanicheskie svoystva tyazhelogo betona [Investigation of the Effect of Electrolytes on the Physico-Mechanical Properties of Heavy Concrete]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Herald of the Kazan Technological University]. 2014, vol. 17, no. 14, pp. 140–143. (In Russian)

22. Bur'yanov A.F., Kukhar' I.D., Solovyev V.G. Optimizatsiya sostavov i svoystva samouplotnyayushchegosya stalefibrobetona [Optimization of Compositions and Properties of Self-Sealing Steel Fiber Reinforced Concrete]. *Effektivnye stroitel'nye kompozity : nauchno-prakticheskaya konferentsiya k 85-letiyu zaslužennogo deyatelya nauki RF, akademika RAASN, doktora tekhnicheskikh nauk Bazhenova Y.M.* [Effective Construction Composites: Scientific AND Practical Conference Devoted to the 85th Anniversary of Honored Science Worker of the Russian Federation, Member of the RAASN Academy, Dr. of Technical Sciences Bazhenov Y.M.]. Belgorod, Shukhov Belgorod State Technological University Publ., 2015, pp. 347–350. (In Russian)

23. El'suf'eva M.S., Solovyev V.G. Polucheniye stalefibrobetonov s kompensiro-vannoy usadkoy [Obtaining Steel Fiber Reinforced Concrete with Compensated Shrinkage]. *Aktual'nye napravleniya fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy : materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual Directions of Fundamental and Applied Research : Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference]. Moscow, CreateSpace Independent Publishing Platform Publ., 2014, pp. 160–164. (In Russian)

24. Solovyev V.G., Bur'yanov A.F., El'suf'eva M.S. Puti povysheniya effektivnosti proizvodstva sbornyykh stalefibrobetonnykh izdeliy [Ways to Improve the Production Efficiency of Prefabricated Steel-Fiber-Reinforced-Concrete Products]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technologies]. 2016, no. 1–2, pp. 34–36. (In Russian)

Received in May 2017.

Adopted in revised form in June 2017.

Approved for publication in June 2017.

About the authors: **Alekseev Vyacheslav Aleksandrovich** — Head of laboratory, Department of Binding Agents and Concrete Technology, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; 634586@mail.ru;

Kharchenko Aleksey Igorevich — Candidate of Technical Sciences, Director general, Institute of expert evaluation and Engineering, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; gorgestroj@mail.ru;

Solovyev Vadim Gennad'evich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; s_vadim_g@mail.com;

Nikonov Roman Nikolaevich — Master Student, **Nauchno-inzhenernyy tsentr Tunnel'noy assotsiatsii (NITs Tunnel'noy assotsiatsii)**, 7 Eniseyskaya st., bld. 4, r. 10, Moscow, 4129344, Russian Federation; nikonorovrn@mail.ru.