Применение шлакощелочных вяжущих в технологии струйной цементации для усиления грунтов

А.И. Харченко¹, В.А. Алексеев², И.Я. Харченко², А.А. Алексеев³

¹ Ингеострой, 109147, г. Москва, ул. Калитниковская, д. 7;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26;

³ Научно-исследовательский центр подземных сооружений (НИЦ ПС), 115114, г. Москва, наб. Дербеневская, д. 7, стр. 2

АННОТАЦИЯ

Введение. Обоснована актуальность проблемы, связанной с получением эффективных шлакощелочных вяжущих для применения в технологии струйной цементации грунтов (СЦГ). Замена обычного портландцемента на шлакощелочное вяжущее в геотехнических работах в подземном строительстве позволяет решить вопрос утилизации отходов (шлаков) и повысить экономическую эффективность использования технологии струйной цементации. Ввиду особенностей технологий цементации и возможности применения цементационных смесей с различными техническими показателями для разных типов грунтов возможно широко использовать номенклатуру шлакощелочных композиций для получения грунтоцементных конструкций.

Материалы и методы. Изучены различные виды шлака в составе композиционного вяжущего. В качестве базового портландцемента принят портландцемент ПЦ 500 Д0. Критерием стали стандартные требования к цементационным смесям смесительных и насосных установок по устройству грунтоцементных массивов. Исследования процессов гидратации и структурообразования при твердении шлакощелочного вяжущего и грунтобетонов на их основе выполнялись с применением комплекса физико-химических методов. Оценка строительно-технических свойств композиционного шлакощелочного вяжущего осуществлялась согласно стандартным методам исследования по ГОСТ 10181-2014 и ГОСТ 5802-86.

Результаты. Приведены результаты анализа влияния вида и количества шлака на физико-механические свойства вяжущего, используемого при СЦГ. Показано улучшение физико-механических, технологических и эксплуатационных характеристик шлакощелочного вяжущего. Выявлены общие закономерности влияния шлака на свойства цементационной смеси.

Выводы. Теоретически обоснована и экспериментально доказана эффективность применения шлака как активного компонента в составе композиционного вяжущего для струйной цементации при геотехническом строительстве. Установлена общая применимость получаемой бетонной смеси на шлакощелочном вяжущем для использования в цементационных методах повышения технических показателей бетонной смеси и бетонов. Предложена классификация расширяющихся цементов, обладающих разной степенью расширения при гидратации, для решения различных строительных задач.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: шлакощелочное вяжущее, струйная цементация, укрепление грунтов, структурообразование цементного камня, грунтобетон, микронаполнитель, цементация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Харченко А.И., Алексеев В.А., Харченко И.Я., Алексеев А.А. Применение шлакощелочных вяжущих в технологии струйной цементации для усиления грунтов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 6. С. 680–689. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.680-689

Application of slag-alkali binders in jet cement grouting for soil consolidation

Alexey I. Kharchenko¹, Vyacheslav A. Alekseev², Igor Ya. Kharchenko², Andrey A. Alekseev³

¹ Ingeo-Stroy, 7 Kalitnikovskaya st., Moscow, 109147, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation;

³ Science Research Centre for Underground Construction (SRC UC), bldg. 2, 7 Derbenevskaya embankment, Moscow, 115114, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The study proves actuality of the problem connected with obtaining efficient slag-alkali binders for usage in soil jet cement grouting. Replacement of usual portland cement for a slag-alkali binder in geotechnical underground

construction activities allows solving a problem of waste (slag) utilization and increase economic efficiency of the soil jet cement grouting. In view of cement grouting technology features and possibility of usage cementation mixtures with various engineering characteristics for different soil types, a broad nomenclature of slag-alkali compositions can be used for obtaining soil-concrete structures.

Materials and methods. Different types of slag were studied as constituents of composite binders. The PTs 500 D0 cement was taken as the basic portland cement. Standard requirements for cementation mixtures of mixing and pump facilities for soil-concrete bodies became the criteria. Investigations of hydration and structure formation during hardening of slag-alkali binders and soil-concretes on their base were conducted using a system of physical and chemical methods. Evaluation of construction and engineering properties of the composite slag-alkali binder was accomplished in accordance with the methods as per GOST 10181-2014 and GOST 5802-86 state standards.

Results. Results of analysis how the slag type and amount influence the physical and mechanical properties of the binder used for jet soil cementation are presented. The article shows improvement of physical, mechanical, process and usage properties of the slag-alkali binder. General mechanism of impact of the slag on properties of the cementation mixture were revealed.

Conclusions. Efficiency of application of the slag as an active component of the composite binder for jet cementation in geotechnical construction was theoretically substantiated and experimentally demonstrated. General applicability of the obtained concrete mixture based on the slag-alkali binder is stated for usage in cementation methods of improvement of technical parameters of concrete mixture and concretes. A classification of expanding cements possessing various expansion degrees was suggested for solving different construction problems.

KEYWORDS: slag-alkali binder, jet cement grouting, soil consolidation, cement stone structure formation, soil-concrete, microfiller, grouting

FOR CITATION: Kharchenko A.I., Alekseev V.A., Kharchenko I.Ya., Alekseev A.A. Application of slag-alkali binders in jet cement grouting for soil consolidation. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(6):680-689. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.680-689

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие геотехнических работ на основе цементационного упрочнения и уплотнения грунтов тесно связано с экономической эффективностью и необходимостью повышения их конкурентоспособности на основе создания и широкого внедрения в практику строительных материалов на основе безобжиговых вяжущих вместо энерго- и ресурсоемкого портландцемента [1, 2]. Приготовление бесцементных вяжущих с наиболее рациональным использованием местных сырьевых компонентов особенно важно для регионов, не имеющих в своем распоряжении предприятий по производству цемента. При этом основным поставщиком сырьевых ископаемых безобжиговых вяжущих веществ и строительных материалов представляются наиболее часто встречающиеся местные материалы (известняки, глины, песчаники, опоки и др.) и остатки горнопромышленного комплекса, которые включают остатки предприятий по производству нерудных строительных материалов, заводов по изготовлению облицовочного камня, высокодисперсные остатки горно-обогажительных комбинатов и др. [3]. Из всего получаемого на земле этого минерального сырья (100 млрд в год) в качестве продукта общественного

потребления применяется только 2 %, а оставшиеся 98 % — в химически слабоизмененном состоянии являются отходами, ухудшающими экологию [4].

На территории России ежегодно образуются около 8 млрд т отходов, причем, накопившихся только в твердом виде в отвалах и хранилищах, хранится около 80 млрд т. Большая часть твердых отходов — это отходы горной промышленности, золы и шлаки энергетической промышленности, цветной и черной металлургии. В целом доля используемых отходов по всей стране составляет 8–10 % [5]. Прямой безобжиговый синтез вяжущих веществ из тонкодисперсных горных пород не один раз исследовался в строительном материаловедении [6, 7].

Связующим звеном в этом процессе должен быть шлак, так как он может выступать как химически активная искусственная порода, имеющая, в отличие от естественных горных пород, близкую по химическому составу способность к гидратационному затвердеванию. Наилучшими активаторами твердения шлака являются щелочесодержащие компоненты [8]. Щелочная активация шлаков применяется для получения на их основе высокопрочных материалов, что привело к появлению шлакощелочных цемента и бетонов. Но стремление к появлению высокопрочных шлакощелочных

вяжущих, которые требуют существенного расхода щелочных активаторов (поташа, соды, щелочей, силикатов щелочных металлов), достигающих 8–12 % от массы шлака, существенно сдерживало их широкое применение в строительстве [9]. В связи с этим геотехническое и подземное строительство является наиболее эффективной областью применения шлакощелочных вяжущих, где отсутствуют требования по исключению высолообразования, обеспечению заданного уровня трещиностойкости, строгой воспроизводимости минерального состава шлаков и стабильности их свойств [10].

Комплексное использование подземного пространства застроенных городских территорий предусматривает формирование подземной городской инфраструктуры в целях обеспечения эффективных транспортных коммуникаций, оптимальных условий труда, быта и отдыха населения, создания комфортной окружающей среды в подземных сооружениях. Для решения задач, связанных с освоением подземного пространства застроенных городских территорий, применяются различные технологии уплотнения и упрочнения грунтов. В настоящее время на строительном рынке при освоении подземного пространства достаточно широкое распространение получила технология струйной цементации грунтов (СЦГ), суть которой заключается в формировании грунтоцементного массива путем интенсивного смешения частичек грунта и цементно-водной суспензии [11]. Подающийся через форсунку вращающегося монитора под давлением 40...60 МПа поток цементно-водной суспензии режет и диспергирует структуру грунта с частичным ее замещением, образуя грунтоцементную смесь, которая после процесса затвердевания делает возможным формирование грунтоцементного массива с заданными физико-механическими характеристиками [12]. В настоящее время широкое практическое применение имеют различные методики СЦГ, такие как: однокомпонентная струйная цементация (Jet-1), когда через форсунку нагнетается поток цементно-водной суспензии; двухкомпонентная цементация (Jet-2), когда через форсунки вращающегося монитора в одно и то же время подаются цементно-водная суспензия и струя воздуха (или воды); трехкомпонентная цементация (Jet-3), когда через форсунки монитора одновременно подаются струи цементно-водной суспензии, воды и воздуха [13, 14]. Каждый из выше-названных способов струйной цементации обладает наиболее рациональной областью использования при решении геотехнических задач с учетом индивидуальных геологических условий [15]. В зависимости от вида закрепляемого грунта и применяемого способа струйной цементации, получаемый расчетный диаметр грунтоцементной сваи и харак-

теристики прочности закрепленного грунта могут меняться в широком диапазоне [16, 17].

Такие технологические характеристики, как давление, скорость вращения и подъема монитора, в большей степени определяют диаметр и размеры сделанного грунтоцементного элемента [18]. В связи с этим прочностные и деформативные параметры и коэффициент фильтрации выполненного грунтоцементного массива в определяющей мере связаны с величиной В/Ц, цементной активностью, вязкостью цементно-водной суспензии, регулируемой путем добавления разных пластифицирующих добавок [19]. При этом расход цемента составляет 450...900 кг/м³ закрепляемого грунта в зависимости от проектных требований и геотехнических условий строительства [20]. Таким образом, замена строительного портландцемента на шлаковое вяжущее является значительным резервом повышения технико-экономической эффективности работ по уплотнению и упрочнению грунтов по технологии струйной цементации [21–23]. Кроме того, целесообразность замены строительного портландцемента на шлаковое вяжущее обусловлена тем, что грунтовые воды в условиях плотной городской застройки обладают повышенной агрессивностью по отношению к цементным бетонам и, наоборот, могут быть дополнительным активирующим фактором при применении шлаковых вяжущих [17, 24]. Теоретические основы применения активированных шлаков в строительстве изложены в трудах Г. Кюля, Я. Давидовича, В.Г. Глуховского [25, 26]. В частности, Я. Давидович ввел понятие геопалимерных систем, основанных на щелочной активации метакрилатов с образованием алюмосиликатных полимеров. В настоящее время исследованы и разработаны различные способы активации шлаков и зол, предусматривающих механическое, химическое или механохимическое воздействие на их структуру. Один из эффективных способов активации доменных гранулированных шлаков — сульфатная активация, основанная на смешивании молотых шлаков и гипса [27, 28].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью оценки эффективности применения шлаковых вяжущих для уплотнения и упрочнения грунтов по технологии струйной цементации был выполнен комплекс исследований свойств композиционного вяжущего на основе молотого гранулированного шлака, активированного сульфатом кальция, и грунтобетона, как в лабораторных, так и в полевых условиях. Исследования проводились с применением тульского шлака, размолотого до удельной поверхности 4600 см²/гр, гидравличе-

ская активность шлака оценивалась в соответствии с DIN 1164. В качестве сульфатного активатора применялся гипсовый ангидрит или двуводный гипс. Для дополнительной активации процессов гидратации в состав композиционного вяжущего вводился гидроксид кальция в количестве до 10 %. Применялся раствор с В/В = 0,35. Строительно-технические свойства композиционного вяжущего изучались на цементном тесте нормальной густоты. Готовую в мешалке принудительного действия литую грунтобетонную смесь заливали в обычные формы-кубы размером 70 × 70 × 70 мм и прессовали без использования вибрации (самоуплотнением, под воздействием одной только силы тяжести). Фактическую прочность грунтобетона на сжатие в проектом возрасте 28 сут (Rф) определяли по ГОСТ 10180-90 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» с применением соответственного масштабного коэффициента 0,85.

В экспериментальных работах приготавливались образцы-балочки размерами 40 × 40 × 160 мм и 70 × 70 × 280 мм из мелкозернистой бетонной смеси с Ц:П = 1:2 при В/Ц = 0,4.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что активный процесс расширения развивается в первые 48...72 ч гидратации практически для всех видов расширяющихся цементов. В последующем величина расширения имеет незначительные увеличения при твердении в течение 28 дней в герметичных условиях.

Результаты изучения влияния соотношения компонентов на активность композиционного вяжущего представлены на рис. 1, 2.

Анализ результатов экспериментов позволил установить, что сульфатная активация на основе гипсового ангидрита является более эффективной по сравнению с активацией на основе двуводного гипса. Причем, если при применении ангидрита его оптимальное содержание находится в пределах 15–20 % от массы шлака, то для двуводного гипса его эффективное содержание ограничивается 25–30 %. Это обусловлено различием в механизме взаимодействия сульфатного компонента со шлаком, а также существенным различием в их растворимости.

При дополнительном введении в состав сульфатно-шлаковой смеси гидроксида кальция, активность композиционного вяжущего существенно повышается. На основании анализа результатов экспериментальных исследований установлено, что для смеси шлака как с ангидритом, так и с гипсом, оптимальный расход гидроксида кальция в составе композиционного вяжущего — 5–7 %. Дальнейшее увеличение содержания гидроксида кальция в составе с ангидритом не сопровождается увеличением прочности при сжатии, а в присутствии двуводного гипса прочность снижается.

Использование грунтобетона в струйной технологии как модификацию мелкозернистого цементного бетона предоставляет возможность применять известные теоретические основы, разработанные для бетонных технологий. При этом при рассмотрении вопросов проектирования, подбора и регулирования состава композиционных вяжущих для

Рис. 1. Влияние сульфатов кальция на гидравлическую активность молотого шлака (28 сут нормального твердения)

Fig. 1. Effect of calcium sulphates on ground slag hydraulic activity (28 days of normal hardening)

Рис. 2. Влияние гидроксида кальция на прочность шлака с сульфатным активатором: сульфат кальция — 20 %; 28 сут нормального твердения

Fig. 2. Effect of calcium hydroxide on strength of sulphate-activated slag: calcium sulphate content is of 20%; 28 days of normal hardening

СЦГ, прогноза и контроля пределов его прочности, состава и долговечности (коррозионной стойкости и морозостойкости) грунтобетона, необходимо учитывать особенности цементации грунтов по струйной технологии. Такой метод, при всех его плюсах, имеет границы между принципиальными отличиями струйной технологии и традиционного применения технологии бетона, среди которых более всего необходимы две ее особенности:

- как и в других технологиях бетона, при формировании грунтобетона по методу струйной цементации используется заполнитель — связанный или несвязанный грунт (в том числе глинистый, илистый и т.п.), содержащий частицы в виде агрегатов;
- в струйной технологии применяются грунтобетонные смеси со значительно большим водосодержанием в сравнении с обычной технологией бетона.

Таким образом, характеристики грунтобетона в струйной технологии сильно отличаются от свойств мелкозернистого цементного бетона при сравниваемых значениях В/Ц и расхода цемента. В струйной технологии важнейшей особенностью при подборе составов, в отличие от обыкновенной бетонной смеси, является корректировка параметров первоначальных расчетных составов вяжущего с учетом фактической влажности грунта. При этом следует рассматривать грунт как заполнитель грунтобетона, состоящего из двух частей:

- 1) несвязного грунта, аналогично частичкам стандартного песка;
- 2) части, состоящей из агрегатов связного грунта.

Учитывая более развитую поверхность частиц грунта по сравнению со строительным кварцевым

песком, а также достаточно высокое водосодержание природного грунта, определяющим конструктивным и технологическим фактором служит не активность цемента, а количество вяжущего в составе грунтобетона.

Составы композиционного вяжущего на основе шлака, активированного ангидритом и гидроксидом кальция, прошли производственную апробацию при закреплении обводненного песчаного грунта по технологии однокомпонентной струйной цементации Jet-1 с применением цементно-водных растворов с В/Ц = 0,8...1,2.

Как видно из табл. 1, основная закономерность изменения прочности грунтобетона от В/Вяз сохраняется для грунтов с различным водосодержанием. Важно знать, что воздействие В/Вяз как фактора уменьшается с увеличением водосодержания грунта (Вг).

Водосодержание грунтобетонной смеси, формируемой по технологии струйной цементации, может достигать 300 л/м³ и более, что существенно превышает водосодержание мелкозернистых бетонных смесей. Следствием повышенного водосодержания грунтобетонной смеси является увеличение объема и размера капиллярных пор образуемого грунтобетона, что снижает его прочностные характеристики. Одновременно с этим возрастает риск расслаиваемости грунтобетонной смеси и неоднородности грунтобетонного массива, что отрицательно сказывается на его конструктивном качестве. Эти характеристики струйной технологии надо учитывать при расчете составов и анализе свойств грунтобетона, например, используя мо-

Табл. 1. Влияние В/Вяз на прочность грунтобетона (в возрасте 28 сут) на основе композиционного шлакового вяжущего (75 % — шлак, 20 % — ангидрит, 5 % — гидроксид кальция, активность вяжущего — 32,0 МПа) при расходе вяжущего 650 кг/м³ для исходного грунта — мелкозернистого кварцевого песка

Table 1. Influence of water-binder ratio on soil concrete strength (after 28-day hardening) based on composite slag binder (slag is of 75 %, anhydrite is of 20 %, calcium hydroxide is of 5 %, binder activity is of 32.0 MPa) at binder consumption of 650 kg/m³ for fine silica sand as initial soil

Вр, % / Soil water content, %	Прочность при сжатии грунтобетона, при различном В/Вяз, R, МПа / Soil concrete compression strength at various water-binder ratios, R, MPa				
	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
0	12,6	9,8	7,3	5,2	3,8
5	9,4	6,2	5,1	3,1	1,4
10	5,1	3,8	3,0	2,2	0,5
15	2,2	1,8	1,2	0,8	—
20	0,9	0,6	0,2	—	—

дифицированные смеси с повышенной кинетикой твердения (Аквабиндер, ПФС+) или проводить предварительную обработку грунта составами типа Интросил, связывающими избыток грунтовой воды.

В то же время фактором, определяющим прочностные характеристики и однородность грунтобетонного массива, является не активность вяжущего, а расход вяжущего и величина водовязущего отношения, определяющее количество вяжущего в составе грунтобетонной смеси. В практике геотехнического строительства уплотнению, консолидации и упрочнению подлежат преимущественно водонасыщенные или обводненные грунты. В этой связи применение композиционных вяжущих на основе активированных шлаков более предпочтительно по отношению к обычным строительным цементам. В соответствии с предложенными методиками расчета определения параметров струйной цементации при упрочнении песчаных водонасыщенных грунтов, на стадии проектирования расход композиционного вяжущего может назначаться в соответствии с нижеприведенной формулой И.И. Бройда:

$$R_w = 10^6 \cdot \left[\frac{2,45 \left(1 - \Pi_{гр} - 0,01 \frac{\Gamma \cdot W_{гр}}{g_b} \right) - 10 \frac{\Gamma \cdot W_{гр}}{g_b} \left(\frac{1}{\Pi} - \frac{1}{g_u} \right)}{(1 - \Pi_{гр}) \frac{B}{\Pi}} \right]^2, \text{ Па}, \quad (1)$$

где R_w — прочность грунтобетона в грунте с определенным влажностью; Π — содержание цемента в массиве грунтобетона, кг/м³; g_u , g_b — плотность частиц цемента и воды, кг/м³; $\Pi_{гр}$ — пористость первоначального грунта, м³/м³; $W_{гр}$ — его влажность, в процентном соотношении по массе.

Отличительными свойствами композиционного вяжущего на основе активированного шлака являются: достаточно высокая гидравлическая активность, повышенная долговечность в условиях агрессивной среды, повышенное адгезионное сцепление с элементами структуры грунта, использование шлаков — отходов производства в качестве основного компонента. В связи с тем, что минеральная основа активированного шлака (АШ) однородна с минеральным составом грунта, при СЦГ с применением АШ формируется грунтобетонный массив, который можно классифицировать как геополимерный массив с повышенными физико-механическими характеристиками.

Как показывает анализ результатов производственных исследований, для цементационной смеси на основе АШ характерно пониженное гидродинамическое сопротивление струи на выходе из монитора, улучшенное дезагрегирующее воздействие на структуру грунта, повышенная связанность и устойчивость грунтобетонной смеси, повышенная однородность формируемых грунтобетонных массивов, ускоренный набор прочности. Применение опытных составов в технологии струйной цементации с помощью смесительного и насосного оборудования типа Obermann, Soilmes показало сравнимые эксплуатационные свойства с обычно применяемыми цементными смесями на основе стандартного портландцемента.

Использование оптимальных рецептов на основе АШ позволяет увеличивать эффективный размер формируемых грунтобетонных массивов с одновременным повышением их однородности и сплошности, что является предпосылкой для уменьшения количества свай, сокращения стоимости и сроков производства работ при одновременном повышении качества.

Обобщение и анализ результатов экспериментальных исследований дает возможность выполнять проектирование состава и свойств грунтобетона на основе АШ, расчет, проектирование составов и технологических режимов, прогнозировать кинетику набора прочности, пористости, водонепроницаемости и долговечности грунтобетонных массивов, а также обосновать технико-экономическую эффективность применения АШ для упрочнения и уплотнения практически всех видов грунтов с проектной прочностью при сжатии в интервале 0,5...10,0 МПа при строительстве объектов транспортного, специального промышленного и общегражданского назначения.

ВЫВОДЫ

1. Введение в состав молотого шлака сульфата и гидроксида кальция обеспечивает его гидравлическую активацию, необходимую для уплотнения и упрочнения несвязанных водонасыщенных грунтов по технологии струйной цементации.

2. На основании анализа результатов экспериментальных исследований установлено, что сульфатная активация шлаков с применением ангидрита и гидроксида кальция обеспечивает формирование грунтобетонных массивов с проектными параметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Butchibabu B., Khan P.K., Jha P.C. Foundation evaluation of underground metro rail station using geophysical and geotechnical investigations // *Engineering Geology*. 2019. Vol. 248. Pp. 140–154. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.12.001
2. Belyi A., Karapetov E., Efimenko Y. Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint-Petersburg example) // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 189. Pp. 145–151. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.024
3. Farfan J., Fasihi M., Breyer C. Trends in the global cement industry and opportunities for long-term sustainable CCU potential for Power-to-X // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 217. Pp. 821–835. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.226
4. Song D., Lin L., Bao W. Exergy conversion efficiency analysis of a cement production chain // *Energy Procedia*. 2019. Vol. 158. Pp. 3814–3820. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.867
5. Elfaham M.M., Eldemerdas U. Advanced analyses of solid waste raw materials from cement plant using dual spectroscopy techniques towards co-processing // *Optics & Laser Technology*. 2019. Vol. 111. Pp. 338–346. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.10.009
6. Nezhnikova E. The use of underground city space for the construction of civil residential buildings // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 165. Pp. 1300–1304. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.854
7. Панченко А.И., Харченко И.Я., Алексеев С.В. Микроцементы. М. : Изд-во АСВ, 2014. 75 с.
8. Thomas R.J., Gebregziabihe B.S., Giffin A., Peethamparan S. Micromechanical properties of alkali-activated slag cement binders // *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 90. Pp. 241–256. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.04.003
9. Гришина А.Н., Королев Е.В. Жидкостекольные строительные материалы специального назначения. М. : Московский государственный строитель-

ный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2015. 224 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/32221>

10. Харченко И.Я., Алексеев В.А., Ибрафимов К.А., Бетербиев А.С.-Э. Современные технологии цементационного закрепления грунтов // *Вестник МГСУ*. 2017. № 5 (104). С. 552–558. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.552-558

11. Кочев Д.З., Алексеев С.В., Алексеев В.А. Особенности инженерно-геологических изысканий и опыт повышения несущей способности загрязненных грунтов в городских условиях Московской области / ответ. ред. В.И. Осипов // *Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи* : сб. мат. юб. конф., посвящ. 25-летию образования ИГЭ РАН. 2016. С. 305–309.

12. Zhi-Feng Wang, Shui-Long Shen, Giuseppe Modoni. Enhancing discharge of spoil to mitigate disturbance induced by horizontal jet grouting in clayey soil: Theoretical model and application // *Computers and Geotechnics*. 2019. Vol. 111. Pp. 222–228. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.03.012

13. Heidari M., Tonon F. Ground reaction curve for tunnels with jet grouting umbrellas considering jet grouting hardening // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015. Vol. 76. Pp. 200–208. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.03.021

14. Makovetskiy O.A. Application of “Jet Grouting” for installation of substructures of estates // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. Pp. 2228–2231. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.269

15. Kashevarova G.G., Makovetskiy O.A. Analysis of experimental and estimated jet-grouted soil mass deformations // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. Pp. 2223–2227. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.268

16. Güllü H. On the viscous behavior of cement mixtures with clay, sand, lime and bottom ash for jet grouting // *Construction and Building Materials*.

2015. Vol. 93. Pp. 891–910. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.072

17. Güllü H. A new prediction method for the rheological behavior of grout with bottom ash for jet grouting columns // *Soils and Foundations*. 2017. Vol. 57. Issue 3. Pp. 384–396. DOI: 10.1016/j.sandf.2017.05.006

18. Cristelo N., Soares E., Rosa I., Miranda T., Chaves A. Rheological properties of alkaline activated fly ash used in jet grouting applications // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 48. Pp. 925–933. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.063

19. Малинин А.Г. Влияние режимов струйной цементации на диаметр грунтоцементных колонн // *Метро и тоннели*. 2013. № 4. С. 30.

20. Бройд И.И. Струйная геотехнология : учеб. пос. для студентов, обучающихся по направлению 653500 «Строительство». М. : Изд-во АСВ, 2004. 440 с.

21. Güllü H., Cevik A., Al-Ezzi K.M.A., Gülsan M.E. On the rheology of using geopolymers for grouting: A comparative study with cement-based grout included fly ash and cold bonded fly ash // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 196. Pp. 594–610. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.140

22. Тер-Мартirosян З.Г., Струнин П.В. Усиление слабых грунтов в основании фундаментных плит с использованием технологии струйной цементации грунтов // *Вестник МГСУ*. 2010. № 4–2. С. 310–315.

23. Ахтямов Р.Р., Трофимов Б.Я. Жаростойкий бетон на шлакощелочном вяжущем и заполнителях

из шамота и высокоглиноземистых шлаков алюминотермического производства // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2014. № 1–2. С. 45–47.

24. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З. Развитие и перспективные возможности получения и применения активированных щелочами гидравлических вяжущих и материалов на их основе // *Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук*. 2011. № 14. С. 151–167.

25. Makovetskiy O.A. Application of “Jet Grouting” for installation of substructures of estates // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. Pp. 2228–2231. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.269

26. Ochmański M., Modoni G., Bzówka J. Prediction of the diameter of jet grouting columns with artificial neural networks // *Soils and Foundations*. 2015. Vol. 55. Issue 2. Pp. 425–436. DOI: 10.1016/j.sandf.2015.02.016

27. Jeong Y., Sung-Hoon Kang, Du Y., Moon J. Local Ca-structure variation and microstructural characteristics on one-part activated slag system with various activators // *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 102. Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.04.009

28. Shi Z., Shi C., Wan S., Li N., Zhang Z. Effect of alkali dosage and silicate modulus on carbonation of alkali-activated slag mortars // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 113. Pp. 55–64. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.07.005

Поступила в редакцию 5 апреля 2019 г.

Принята в доработанном виде 14 мая 2019 г.

Одобрена для публикации 31 мая 2019 г.

О Б АВТОРАХ: Харченко Алексей Игоревич — кандидат технических наук, Ингеострой, 109147, г. Москва, ул. Калитниковская, д. 7, zao.ingeostroy@gmail.com;

Алексеев Вячеслав Александрович — заведующий сектором расчета и проектирования отдела освоения подземного пространства Научно-исследовательского института проектирования, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, AlekseevVA@mgsu.ru;

Харченко Игорь Яковлевич — доктор технических наук, начальник отдела освоения подземного пространства Научно-исследовательского института проектирования, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, HarchenkoIYA@mgsu.ru;

Алексеев Андрей Александрович — заместитель главного инженера, Научно-исследовательский центр подземных сооружений (НИЦ ПС), 115114, г. Москва, наб. Дербеневская, д. 7, стр. 2, aandrey441@gmail.com.

REFERENCES

1. Butchibabu B., Khan P.K., Jha P.C. Foundation evaluation of under-ground metro rail station using geophysical and geotechnical investigations. *Engineering Geology*. 2019; 248:140–154. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.12.001

2. Belyi A., Karapetov E., Efimenko Y. Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint-Petersburg example). *Procedia Engineering*. 2017; 189:145–151. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.024

3. Farfan J., Fasihi M., Breyer C. Trends in the global cement industry and opportunities for long-term sustainable CCU potential for Power-to-X. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 217:821-835. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.226
4. Song D., Lin L., Bao W. Exergy conversion efficiency analysis of a cement production chain. *Energy Procedia*. 2019; 158:3814-3820. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.867
5. Elfaham M.M., Eldemerdaş U. Advanced analyses of solid waste raw materials from cement plant using dual spectroscopy techniques towards co-processing. *Optics & Laser Technology*. 2019; 111:338-346. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.10.009
6. Nezhnikova E. The use of underground city space for the construction of civil residential buildings. *Procedia Engineering*. 2016; 165:1300-1304. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.854
7. Panchenko A.I., Kharchenko I.Ya., Alekseev S.V. Micro cement. Moscow, ASV Publ., 2014; 76. (rus.).
8. Thomas R.J., Gebregziabihe B.S., Giffin A., Peethamparan S. Micromechanical properties of alkali-activated slag cement binders. *Cement and Concrete Composites*. 2018; 90:241-256. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.04.003
9. Grishina A.N., Korolev E.V. *Liquid-Glass construction materials for special purposes*. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering, AI PI er Media, EBS, ASV Publ., 2015; 224. URL: <http://www.iprbookshop.ru/32221> (rus.).
10. Kharchenko I.Y., Alekseev V.A., Israfilov K.A., Beterbiev A.S. Modern technologies of cement grouting. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 5(104):552-558. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.552-558 (rus.).
11. Kochev D.Z., Alekseev S.V., Alekseev V.A. Features of engineering and geological surveys and the experience of increasing the carrying capacity of polluting new soils in urban areas of the Moscow region. *Sergei readings. Engineering geology and geoecology. Fundamental problems and applied tasks : collected materials jubileinaya conf., dedication the 25th anniversary of Institute of environmental Geoscience RAS*. 2016; 305-309. (rus.).
12. Zhi-Feng Wang, Shui-Long Shen, Giuseppe Modoni. Enhancing discharge of spoil to mitigate disturbance induced by horizontal jet grouting in clayey soil: Theoretical model and application. *Computers and Geotechnics*. 2019; 111:222-228. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.03.012
13. Heidari M., Tonon F. Ground reaction curve for tunnels with jet grouting umbrellas considering jet grouting hardening. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015; 76:200-208. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.03.021
14. Makovetskiy O.A. Application of "Jet Grouting" for installation of substructures of estates. *Procedia Engineering*. 2016; 150:2228-2231. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.269
15. Kashevarova G.G., Makovetskiy O.A. Analysis of experimental and estimated jet-grouted soil mass deformations. *Procedia Engineering*. 2016; 150:2223-2227. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.268
16. Güllü H. On the viscous behavior of cement mixtures with clay, sand, lime and bottom ash for jet grouting. *Construction and Building Materials*. 2015; 93:891-910. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.072
17. Güllü H. A new prediction method for the rheological behavior of grout with bottom ash for jet grouting columns. *Soils and Foundations*. 2017; 57(3):384-396. DOI: 10.1016/j.sandf.2017.05.006
18. Cristelo N., Soares E., Rosa I., Miranda T., Chaves A. Rheological properties of alkaline activated fly ash used in jet grouting applications. *Construction and Building Materials*. 2013; 48:925-933. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.063
19. Malinin A.G. Influence of jet grouting regimes on the diameter of soil-cement columns. *Metro and tunnels*. 2013; 4:30. (rus.).
20. Broyd I.I. *Jet Geotechnology : studies. manual for students enrolled in the direction 653500 "Construction"*. Moscow, Publishing house Assots. builds. universities, 2004; 440.
21. Güllü H., Cevik A., Al-Ezzi K.M.A., Gülsan M.E. On the rheology of using geopolymer for grouting: A comparative study with cement-based grout included fly ash and cold bonded fly ash. *Construction and Building Materials*. 2019; 196:594-610. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.140
22. Ter-Martirosyan Z.G., Strunin P.V. Strengthening weak soils in the basis of foundation slabs with use of technology of jet grouting. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2010; 4-2:310-315. (rus.).
23. Akhtyamov R.R., Trofimov B.Y. Heat-resistant concrete on slag-alkaline binder and aggregates of fireclay and high-alumina slag aluminothermic production. *Refractories and technical ceramics*. 2014; 1-2:45-47. (rus.).
24. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Development and perspective possibilities of obtaining and application of alkali-activated hydraulic binders and materials based on them. *Bulletin of the Volga regional branch of the Russian Academy of architecture and building Sciences*. 2011; 14: 151-167. (rus.).
25. Makovetskiy O.A. Application of "Jet Grouting" for Installation of Substructures of Estates. *Procedia Engineering*. 2016; 150:2228-2231. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.269
26. Ochmański M., Modoni G., Bzówka J. Prediction of the diameter of jet grouting columns with artificial neural networks. *Soils and Foundations*. 2015; 55(2):425-436. DOI: 10.1016/j.sandf.2015.02.016

27. Jeong Y., Sung-Hoon Kang, Du Y., Moon J. Local Ca-structure variation and microstructural characteristics on one-part activated slag system with various activators. *Cement and Concrete Composites*. 2019; 102:1-13. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.04.009

28. Shi Z., Shi C., Wan S., Li N., Zhang Z. Effect of alkali dosage and silicate modulus on carbonation of alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Research*. 2018; 113:55-64. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.07.005

Received April 5, 2019

Adopted in a modified form on May 14, 2019.

Approved for publication May 31, 2019

B I O N O T E S: **Alexey I. Kharchenko** — Candidate of Technical Sciences, **Ingeo-Stroy**, 7 Kalitnikovskaya st., Moscow, 109147, Russian Federation, zao.ingestroy@gmail.com;

Vyacheslav A. Alekseev — Head of the sector of analysis and design of Department of development of underground space research Institute of engineering, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, AlekseevVA@mgsu.ru;

Igor Ya. Kharchenko — Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of underground space development of the Research Institute of design, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, HarchenkoIYA@mgsu.ru;

Andrey A. Alekseev — Deputy chief engineer, **Science Research Centre for Underground Construction (SRC UC)**, build. 2, 7 Derbenevskaya embankment, Moscow, 115114, Russian Federation, aandrey441@gmail.com.