

А.А. ДОЛЕВ¹, В.А. АЛЕКСЕЕВ², О.Ю. БАЖЕНОВА³

¹АО «Мосинжпроект», г. Москва, Россия

²ООО «Институт Мосинжпроект», г. Москва, Россия

³ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

ПОДБОР РАСХОДОВ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫХ СВАЙ В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Укрепление грунтов по струйной технологии в сложных грунтовых условиях в настоящее время получило широкое распространение в том числе при строительстве заглубленных и подземных сооружений. При этом накопилось достаточное количество опытных данных для прогнозирования свойств получаемого грунтоцемента. Цель работы заключается в определении оптимальных расходов материалов для грунтоцементных конструкций с учётом сложных инженерно-геологических условий. Изучение твердеющих систем на минеральной основе в водонасыщенных грунтах с включениями органических отложений или в условиях высокой фильтрации, имеет ряд особенностей, затрудняющих назначение оптимальных технологий и компонентов растворов на цементной основе для формирования грунтоцементов. Для определения конечных параметров грунтоцементов анализировались параметры грунтоцементных свай на объектах при строительстве метрополитена, лабораторные данные при смешивании минеральных компонентов и грунтов разных типов, данные научно-технического сопровождения при контроле качества и приёмке работ. Изучена кинетика твердения грунтоцементов для различных грунтов при разных расходах цемента, зафиксирован положительный эффект от применения различных типов добавок при невозможности достижения проектных физико-механических свойств в сложных грунтовых условиях. Изучена эффективность достижения проектных прочностных характеристики грунтоцемента с определением минимального порога расхода цемента. При производстве опытных работ для подтверждения выбранного расхода цемента и технологических параметров цементации, отмечены особенности закрепления по технологии jet-grouting в грунтах разного типа.

Ключевые слова: грунтоцемент, закреплённый грунт, грунтобетон, струйная цементация, цементационное закрепление, усиление грунтов оснований, противофильтрационная завеса.

A.A. DOLEV¹, V.A. ALEKSEEV², O.YU. BAZHENOVA³

¹Engineering company Mosinzhproekt, Moscow, Russia

²Department of Computer Science, Moscow, Russia

³National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia

SELECTION OF CONCRETE FORMULATIONS FOR THE CREATION OF SOIL-CEMENT PILES IN DIFFICULT ENGINEERING AND GEOLOGICAL CONDITIONS

Abstract. Strengthening of soils by jet technology in difficult ground conditions has now become widespread, including in the construction of buried and underground structures. At the same time, a sufficient amount of experimental data has accumulated to predict the properties of the resulting soil cement. The purpose of the work is to determine the optimal consumption of materials for

soil-cement structures, taking into account complex engineering and geological conditions.

The study of mineral-based hardening systems in water-saturated soils with inclusions of organic deposits or in conditions of high filtration has a number of features that make it difficult to assign optimal technologies and components of cement-based solutions for the formation of soil cements. To determine the final parameters of soil cement, the parameters of soil cement piles at the facilities during the construction of the subway, laboratory data on mixing mineral components and soils of different types, scientific and technical data were analyzed.

Keywords: *soil cement, fixed soil, soil concrete, jet grouting, grouting, reinforcement of foundation soils, anti-seepage curtain.*

Введение

Подземное строительство в условиях мегаполисов достаточно часто требует необходимости применения специальных методов работ [1], ввиду особой степени ответственности и наличия жилых зданий, критически важных коммуникаций и сооружений круглосуточной эксплуатации [2]. Среди специальных методов закрепления грунта особое распространение получил способ цементации грунтов, в частности струйной цементации [3, 4]. Данная технология достаточно широко используется для закрепления грунтов в гражданском строительстве с 80-х годов XX века в Японии, Англии, Германии и некоторых других странах с момента достижения машиностроительной отраслью возможности создания насосов, транспортной системы и, самое главное, мониторов, способных создавать, прокачивать и выбрасывать тонкую высоконапорную струю цементной суспензии под большим давлением и с требуемой производительностью [5, 6, 7, 8]. В свое время это потребовало серьезных достижений в материаловедении, т.к. абразивные свойства цементной суспензии, особенно под большим давлением, чрезвычайно велики.

Более 20 лет назад [9] зарубежные производители вышли на отечественный рынок с подобным оборудованием, и сразу же начали появляться отечественные компании, которые, используя достижения зарубежных машиностроителей, начали выполнять работы по струйному закреплению грунта на строительных объектах сначала в крупных городах, а потом уже и по всей России [10, 11, 12, 13]. Действительно, инженерная идея доставлять цементную суспензию непосредственно в место, нуждающееся в укреплении и гарантированно перемешивать эту суспензию с местным грунтом [14, 15], является очень выгодной. При этом полностью отпадает необходимость устройства, например, обсадки [16], или вскрытия котлована сверх необходимой меры, или использования дорогого, громоздкого и трудозатратного оборудования для устройства свай в непосредственной близости от стен существующего здания/сооружения [17, 18]. Так же отпадает необходимость в объемном замещении слабого грунта на грунт с большей плотностью/несущей способностью [19].

Поскольку рассматриваемая технология, «jet grouting», получила в России широкое распространение, и с течением времени нарабатывался опыт применения [2, 6] этой технологии в грунтах различного генезиса, то постепенно складывалась граничные значения по таким технологическим параметрам, как шаг подъема монитора и время обработки грунта [20] на одном горизонте. Эти параметры оказывают прямое влияние на удельный расход цемента и размеры массива закрепленного грунта [11], и зависят от вида конкретного грунта в грунтовом напластовании на площадке проведения работ, уровня грунтовых вод [21].

Для систематизации данных о зависимости расхода цемента и прочности закрепленного грунта от вида грунта и его свойств, почти все строительные компании, использующие «jet grouting» ведут внутреннюю статистику. Одной из крупнейших компаний в области строительства, которая озаботилась обобщением статистики, проведением дополнительных лабораторных работ с целью выработки соответствующего нормативного документа, является АО «Мосинжпроект». Однако, разработанные и стандартизированные таким образом нормы расхода цемента, добавок и воды для устройства грунтоцементных свай (ГЦС) и массивов при проектировании и выполнении работ подрядными организациями, привлекаемыми ОА «Мосинжпроект», являются пока лишь внутриведомственными.

Методы

Разработанные нормы должны применяться для оценки технико-экономической эффективности применения метода струйной цементации для создания противофильтрационных завес (ПФЗ) и закрепления грунтов, в том числе основания, а также для составления смет при проектировании и строительстве объектов различного назначения.

Создание норм выполнялось в соответствии с требованиями СНиП 82-01-95 «Положение о производственном нормировании расхода материалов в строительстве» и РДС 82-201-96 «Правила разработки норм расхода материалов в строительстве».

Областью применения разработанных норм являются:

- устройство лидерных скважин диаметром 102 мм; 127 мм;
- устройство ГЦС в слабообводнённых и обводнённых несвязанных грунтах (рисунок 1);
- конструкционное закрепление откосов котлованов в песках средней крупности, слабообводнённых с целью устройства массива закрепленного грунта с прочностью при сжатии не менее 5 МПа;
- устройство горизонтальных и вертикальных ПФЗ с ненормируемой прочностью при сжатии в песках средней крупности.

В качестве единицы измерения для нормирования расхода материалов, принято:

- при устройстве лидерной скважины один погонный метр скважины;
- при струйной цементации один кубический метр отдельного грунтоцементного массива.

Применение технологии «jet grouting» обеспечивается тем, что при смешивании с цементом со временем затвердевает практически любой грунт, даже богатый органическими кислотами гумус и жирная глина (необходим высокий расход цемента). Исходя из подобной технологичности «jet grouting» используется очень широко – устройство ограждений котлованов, устройство целиков закрепленного грунта и т.д. в основном для стабилизации откосов (в тех или иных формах) и для создания ПФЗ при устройстве оснований и фундаментов зданий, подземных инженерных систем, устройстве оснований устоев мостов, сбоек тоннелей и т.д. [10, 11]. В связи с широким спектром грунтовых условий и решаемых закреплением грунтов задач, методика, используемая при разработке норм, должна одинаково объективно выявлять зависимость расхода и прочности как общие (для грунтов природного сложения), так и частные (для грунтов по градации крупности или числа пластичности и т.д.).



Рисунок 1 – Устройство jet-элементов

Поэтому при разработке норм расхода материалов применялись следующие методы:

- расчётно-аналитический, на основании общеизвестных математических формул и уравнений;

- лабораторно-экспериментальный, на основании определения свойств грунтоцементных образцов, приготовленных в лаборатории по общепринятой методике;
- производственный, на основании обобщения и анализа результатов наблюдений и испытаний непосредственно в грунтовых условиях каждой отдельной строительной площадки, а также действующей нормативной строительно-технологической документации.

При устройстве грунтоцементного массива (ГЦМ) выполняется бурение лидерной скважины на глубину, превышающую проектную длину на 0,5 м. В зависимости от свойств грунта, для т.н. бурения прямого хода используется соответствующий буровой инструмент, закреплённый на наконечнике буровой штанги. С целью удаления измельчённой породы из объема скважины, охлаждения бурового инструмента и временного крепления стен скважины, исключающего «прихват» бурового инструмента при т.н. обратном ходе, через открытый прямой клапан в процессе бурения в буровой наконечник непрерывно подается буровой раствор. На основании анализа отечественного и зарубежного производственного опыта, в качестве бурового раствора используется, как правило, бентонитовый или цементный раствор. При использовании бентонитового раствора, решение о включении в состав технологического комплекса сепарационной установки, обеспечивающей повторное использование и обогащение первичного раствора с утилизацией шлама, принимается после соответствующего технико-экономического обоснования.

При применении бурового раствора на основе цемента следует применять цементный раствор с повышенным водоцементным отношением В/Ц=2,0.

Расчёт расхода цемента (Ц, кг/пм) на 1 п.м. пробуренной скважины выполняется по формуле:
$$Ц = \frac{V}{В/Ц + 1/\rho}.$$

где V – объём 1 п.м. скважины, см³;

ρ – плотность цемента, г/см³ (для расчётов принимается ρ=3,1 г/см³).

Для корреляции фактического расхода материалов с теоретическим следует применять следующие повышающие коэффициенты, статистически определенные на большом числе конкретных строительных площадок:

А) В связи с тем, что стенки скважины в процессе бурения в несвязанных грунтах обрушаются, фактический диаметр скважин не менее, чем на 25%, больше расчётного. Для определения фактического расхода материала применяется повышающий коэффициент K₁=1,25.

Б) В связи с тем, что в процессе бурения буровой раствор поглощается через поры, трещины и пустоты в самом разуплотнённом и несвязанном грунте, применяется повышающий коэффициент K₂=1,2

В) В связи с тем, что буровой раствор выполняет функцию промывочной жидкости, обеспечивающей непрерывное удаление разрушенного грунта из объёма скважины, применяется повышающий коэффициент K₃=2,0.

Результаты исследования и их анализ

При сооружении объектов подземного строительства, в частности, Московского метрополитена, были проанализированы грунтовые условия применения технологии струйной цементации, отмечено что зависимости прочности от вида и типа грунтов (гранулометрический состав, пластичность) и от расхода цемента носят нелинейный характер. Ниже приведены основные зависимости, являющиеся основными при выполнении работ по jet-технологии для заданных прочностных свойств.

В соответствии с методикой расчёта расхода цемента, предложенной Бройдом [6] при цементации песчаных грунтов, для обеспечения прочности при сжатии не менее 5 МПа, расход цемента составит 630 кг/м³:

$$R_w = 10^6 \cdot \left\{ \frac{2,45 \left(1 - П_{гр} + \frac{W_{гр}}{g_v} \right) - \frac{W_{гр}}{g_v} \left(\frac{1}{Ц} - \frac{10^4}{g_{ц} \cdot g} \right)}{(1 - П_{гр}) \cdot \frac{В}{Ц}} \right\}^2$$

где R_w – прочность грунтобетона на влажном грунте, Па;

B – содержание воды в растворе цемента, л/м³;

C – содержание цемента в растворе цемента, кг/м³;

$g_{ц}, g_{в}$ – плотность зёрен цемента и воды, кг/м³;

$P_{гр}$ – пористость исходного грунта, м³/м³;

$W_{гр}$ – влажность грунта, % по массе.

Таким образом, в качестве обоснованного расчётом расхода цемента, для обеспечения прочности при сжатии не ниже 5 МПа, при закреплении струйной цементации сухих песчаных грунтов, следует принять 600 кг/м³.

В связи с отсутствием однозначного расчётно-аналитического обоснования расхода цемента при струйной цементации грунта, специалистами НИиПИ ТС (структурное подразделение АО «Моинжпроект») и МГСУ были проведены лабораторные исследования влияния расхода цемента на прочность при сжатии моделей песчаного грунта, условно закрепляемых методом струйной цементации. Анализ полученных результатов позволил экспериментально установить зависимость для сухих песчаных грунтов, представленную на рисунке 2. Смешивание песка с цементом производилось в смесителе принудительного действия, после этого добавлялась вода, получившимся раствором заполнялись формы-кубы с трамбованием. Варьировался расход цемента при неизменном количестве воды.

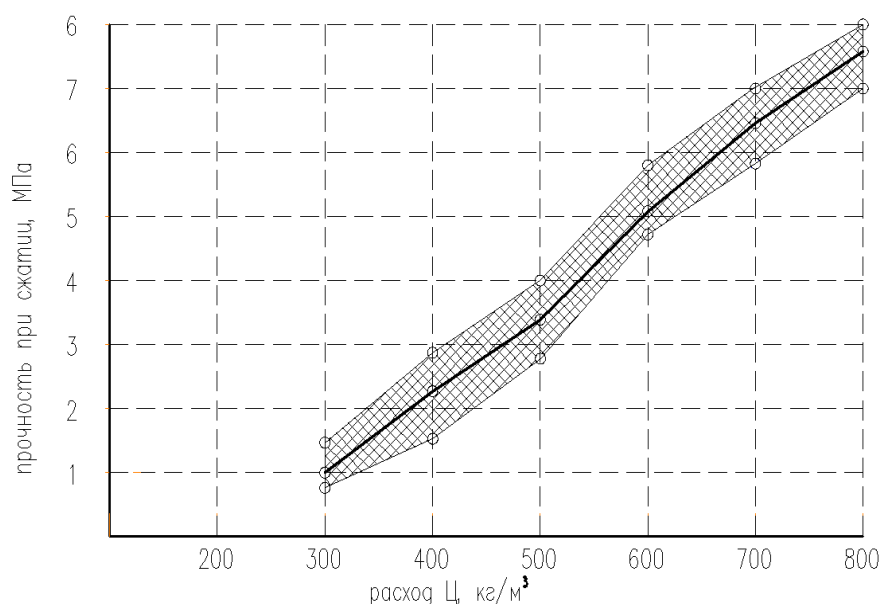


Рисунок 2 – Влияние расхода цемента на прочность при сжатии песчаного грунта - песок сухой, средней крупности, с $M_{кр}=1.8$, (28 сут., $B/C=1.0$, ПЦ 400 Д0).

На основании представленной на рисунке 2 зависимости установлено, что достижение прочности при сжатии, например, в 5 МПа для песчаного грунта с $M_{кр}=1.8$ (песок средней крупности), необходим расход цемента в количестве 600 кг/м³.

Далее, на моделях различных грунтов (глинистый и песчаный) были опробованы зависимости прочности от вида и типа грунта, расхода цемента. Смешивание с цементом во всех моделях грунтов происходило с имитацией струйной цементации. Полученные удельные расходы цемента послужили для предварительного назначения расхода цемента. Далее, указанные зависимости (рисунок 3) в основном подтвердились при производстве работ на строительных площадках при возведении объектов Московского метрополитена.

При устройстве массивов закрепленного грунта и ПФЗ методом струйной цементации «jet-grouting» в соответствии с нормативной документацией после определения предварительного расчетного расхода цемента для закрепления конкретного вида грунта на данной строительной площадке для необходимой прочности закрепленного грунта,

устанавливался опытный участок. Этот участок выбирался из объема проектного закрепления. Выполнялись несколько элементов из закрепленного грунта с вариативным расходом цемента. После набора прочности грунтобетона выбуривались керны для определения сплошности закрепления, прочности грунтобетона и водопоглощения скважин в элементах закрепленного грунта. Значения технологических параметров, которые показали наилучшие результаты в прочности грунтобетона и экономичности расхода цемента, признавались подходящими для устройства всех проектных объемов закрепления грунтов.

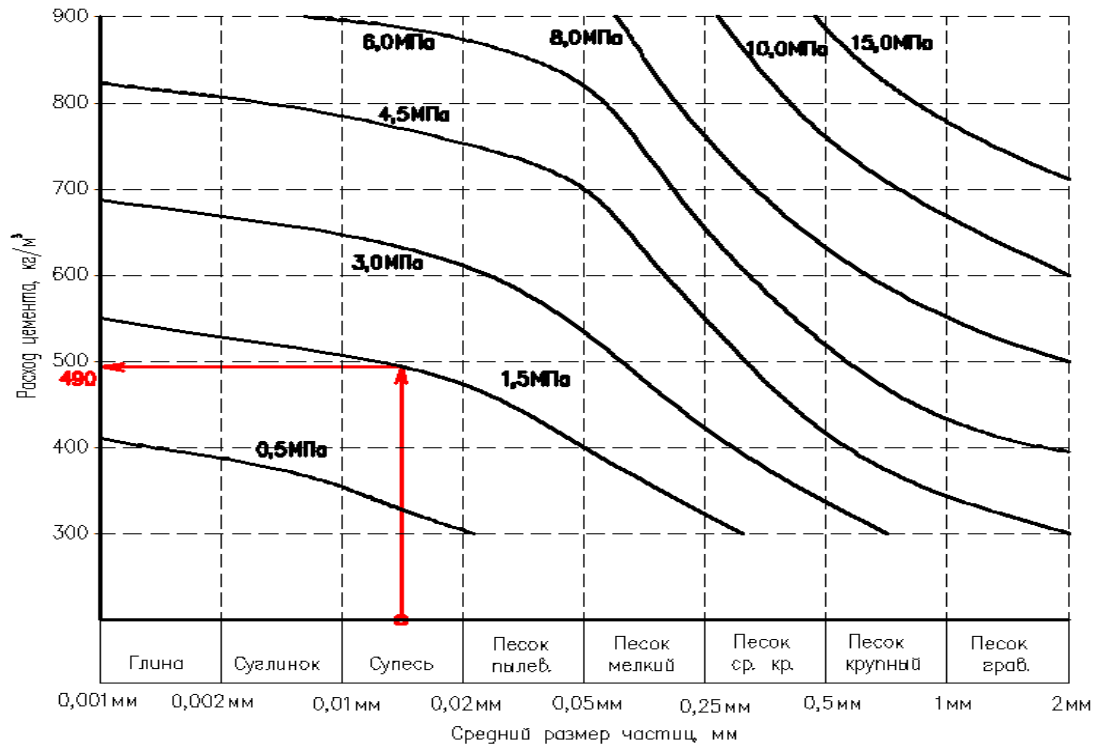


Рисунок 3 – Влияние вида грунта и расхода цемента на прочность при сжатии закрепленного грунта.

После анализа результатов работ по контролю качества (рисунок 4) были выявлены некоторые особенности [3] использования струйной технологии «jet-grouting» при закреплении грунтов.



Рисунок 4 – Анализ образцов-керна грунтобетона при контроле качества работ

Высокая усадка грунтобетона. При выполнении работ по устройству jet-элементов само тело jet-элемента представляет собой довольно большой объем жидкой сметанообразной массы, состоящей из воды, мелко разрушенного грунта и цемента. При лабораторных испытаниях подобная суспензия (В/Ц пульпы около 1) показала достаточно высокую расслаиваемость порядка 10% [10, 12, 13]. Теоретически это означает, что jet-элемент длиной 10 м способен дать усадку в 1 м. Это грозит незапланированными чрезмерными осадками [5, 15] вышерасположенных сооружений или даже поверхности земли в период до окончания твердения грунтобетона. В реальности такие чрезмерные осадки наблюдаются редко из-за реализации комплекса мер по предотвращению подобных деформаций. Эти меры включают в себя обеспечение связи внешнего шламоборника с jet-элементом после его устройства через скважину для обеспечения постоянного обратного притока пульпы с целью ее доливки через эту скважину, принудительной опрессовки устья скважины, введения сердечника и т.д. Однако, поскольку как в скважине, так и по длине jet-элемента возможно образование пробок, достижение однородной плотности (прочности) по всему объему jet-элемента, по-видимому, невозможно.

Уменьшение прочности грунтобетона. При устройстве jet-элементов в глинистых грунтах или даже гумусах прочность грунтобетона резко падает. Механизм этого, как известно, различный для этих двух видов грунта. Глина, состоящая из огромного числа очень мелких чешуек минерала монтмориллонита, адсорбирует из цементной суспензии на поверхность этих чешуек свободный кальций и вследствие этого затрудняется образования кристаллов цементного камня. Т.е. для устройства равнопрочного грунтобетона необходим гораздо больший расход цемента [4, 6, 10, 14]. Гумусовый грунт в своем составе имеет большое количество микроорганизмов и еще большее количество отходов их жизнедеятельности, которые химически связывают свободный кальций. Т.е. так же, как и в случае с чешуйками монтмориллонита, для устройства равнопрочного грунтобетона необходим гораздо больший расход цемента. Для увеличения прочности jet-элементах в подобных грунтах рекомендуется применение предварительного размыва струей воды или цементной суспензии, что так же повышает гарантированный диаметр jet-элемента.

Использование жидкого стекла и хлорида кальция. В следствии того, что сразу после устройства jet-элементов грунтобетон, находясь в полужидком состоянии способен менять свою форму, расслаиваться, в некоторых случаях терять цемент с пропиткой им окружающего грунта и т.д. производители работ при устройстве jet-элементов применяют химические добавки. Самыми распространенными среди них являются добавки – ускорители твердения жидкое стекло и хлорид кальция. Их широкая распространенность характеризуется невысокой ценой. Как правило, эти добавки вводят в смеситель при затворении водой цемента. Однако у использования этих добавок есть обратная сторона. Дело в том, что при смешении с цементом сразу начинают происходить химические реакции гелеобразования со снижением подвижности (величина снижения может достигать 30%). Это означает, что при выходе из сопла монитора при устройстве jet-элемента цементная суспензия будет иметь меньшую подвижность, следовательно, струя будет иметь более быстрое затухание и возможность достижения расчетного радиуса размыва снижается [2, 15, 16]. При этом повышаются энергозатраты на прокачку суспензии с пониженной подвижностью по транспортной системе от смесителя через насос к монитору. Подобным явлением возможно объяснить то, что в одних и тех же грунтовых условиях достаточно часто наблюдаются разность в эффективных диаметрах jet-элементов [4], изготовленных с использованием добавок ускорителей твердения и без их использования.

Выводы

Подытоживая описанное выше, необходимо отметить, что получившая широкое распространение технология jet grouting по укреплению грунтов не имеет четко разработанного нормирования по расходу цемента в зависимости от типа грунтов и

необходимой прочностью грунтобетона для первичного назначения расхода цемента при устройстве опытного участка. Окончательный расход цемента, согласно действующим правилам, назначается только после подтверждения такового на опытном участке. Работы, выполненные в АО «Мосинжпроект», позволяют закрыть этот пробел. Так, например, для прочности грунтобетона в ЗМП для глины расход цемента составляет 650...700 кг/м³, а для крупного песка 300 кг/м³. К этому необходимо добавить расход цемента при бурении скважины. Т.е. при подборе расхода материалов рекомендуется назначать нормируемые удельные расходы исходя из полученных исходных данных.

Кроме того, в сложных инженерно-геологических условиях необходимо учитывать такие особенности технологии jet grouting как повышенная усадка грунтобетона, уменьшение прочности грунтобетона в глинах и гумусовых грунтах (перерасход цемента), использование ускорителей твердения (снижение диаметра размыва при устройстве грунтобетонной колонны).

Эти эффекты предлагается учитывать при проектировании и выполнении работ по закреплению по технологии jet grouting.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nezhnikova E. The Use of underground city space for the construction of civil residential buildings. *Procedia Engineering*. Vol. 165. Pp. 1300-1304. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.854>.
2. Boschi K., di Prisco C.G., Ciantia M.O. 2019. Micromechanical investigation of grouting in soils. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 187. Pp. 121-132. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.06.013>.
3. Джантимиров Х.А., Долев А.А. Опыт усиления основания сооружения с помощью струйной геотехнологии // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2006. №1. С. 34-37.
4. 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*. Vol. 76. Pp. 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.03.021>.
5. Makovetskiy O.A. Application of "jet grouting" for installation of substructures of estates. *Procedia Engineering*. Vol. 150. Pp. 2228-2231. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.269>.
6. Бройд И.И. Струйная геотехнология. Издательство АСВ. Москва. 2004 г. 448 стр.
7. Долев А.А., Алексеев В.А. Изменение границы применимости jet-технологии при укреплении грунтов в связи с накоплением практического опыта // Метро и тоннели. №4. 2021 г. С. 48-52.
8. Murat Olgun, Askar Kanat, Alican Senkaya Ibrahim Hakkı Erkan. Investigating the properties of jet grouting columns with fine-grained cement and silica fume // *Construction and Building Materials*. Volume 267. 18 January 2021. 120637. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120637.
9. 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*. Volume 111. July 2019. Pages 222-228. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.03.012.
10. Mahdi Heidari, Fulvio Tonon. Ground reaction curve for tunnels with jet grouting umbrellas considering jet grouting hardening // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015. Volume 76, June Pages 200-208. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.03.021.
11. Малинин А.Г. Влияние режимов струйной цементации на диаметр грунтоцементных колонн // Метро и тоннели. 2013. № 4. С. 30.
12. 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. 310-31.
13. 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*, Volume 111. July 2019. Pages 222-228. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.03.012.
14. Makovetskiy O.A.. Application of "Jet Grouting" for Installation of Substructures of Estates // *Procedia Engineering*. 2016. Volume 150. Pages 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. Volume 150. Pages 2223-2227. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.268.
16. Hamza Güllü. On the viscous behavior of cement mixtures with clay, sand, lime and bottom ash for jet grouting // *Construction and Building Materials*. 15 September 2015. Volume 93. Pages 891-910. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.072.
17. Hamza Güllü. A new prediction method for the rheological behavior of grout with bottom ash for jet grouting columns // *Soils and Foundations*. June 2017. Volume 57. Issue 3. Pages 384-396. DOI: 10.1016/j.sandf.2017.05.006.

18. Nuno Cristelo, Edgar Soares, Ivo Rosa, Tiago Miranda, Ana Chaves. Rheological properties of alkaline activated fly ash used in jet grouting applications // *Construction and Building Materials*. November 2013. Volume 48. Pages 925-933. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.063.
19. Makovetskiy O.A.. Application of "Jet Grouting" for Installation of Substructures of Estates // *Procedia Engineering*. 2016. Volume 150. Pages 2228-2231. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.269.
20. Axelsson M., Gustafson G. The PenetraCone, a new robust field measurement device for determining the penetrability of cementitious grouts // *Tunnelling and Underground Space Technology*. January 2010. Volume 25. Issue 1. Pages 1-8. DOI: 10.1016/j.tust.2009.06.004.
21. Katia Boschi, Claudio Giulio di Prisco, Matteo Oryem Ciantia. Micromechanical investigation of grouting in soils // *International Journal of Solids and Structures*, 15 June 2019. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2019.06.013.

REFERENCES

1. Nezhnikova E. The Use of underground city space for the construction of civil residential buildings. *Procedia Engineering*. Vol. 165. Pp. 1300-1304. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.854>.
2. Boschi K., di Prisco C.G., Ciantia M.O. 2019. Micromechanical investigation of grouting in soils. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 187. Pp. 121-132. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.06.013>.
3. Dzhanimirov Kh.A., Dolev A.A. Experience of strengthening the foundation of a structure using jet geotechnology // *Foundations, foundations and soil mechanics*. 2006. No. 1. Pp. 34-37.
4. 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*. Vol. 76. Pp. 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.03.021>.
5. Makovetskiy O.A. Application of "jet grouting" for installation of substructures of estates. *Procedia Engineering*. Vol. 150. Pp. 2228-2231. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.269>.
6. Broyd I.I. Jet geotechnology. Publishing house ASV. Moscow. 2004. 448 p.
7. Dolev A.A., Alekseev V.A. Change in the applicability limit of jet technology in soil strengthening in connection with the accumulation of practical experience // *Metro and tunnels*. 2021.No. 4. Pp. 48-52.
8. Murat Olgun, Askar Kanat, Alican Senkaya Ibrahim Hakkı Erkan. Investigating the properties of jet grouting columns with fine-grained cement and silica fume // *Construction and Building Materials*. Volume 267. 18 January 2021. 120637. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120637.
9. 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*. Volume 111. July 2019. Pages 222-228. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.03.012.
10. Mahdi Heidari, Fulvio Tonon. Ground reaction curve for tunnels with jet grouting umbrellas considering jet grouting hardening // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015. Volume 76, June Pages 200-208. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.03.021.
11. Malinin A.G. Influence of jet cementation regimes on the diameter of soil-cement columns // *Metro and tunnels*. 2013. No. 4. P. 30.
12. Ter-Martirosyan ZG, Strunin P.V. Strengthening of weak soils at the base of foundation slabs using the technology of jet cementation of soils // *Vestnik MGSU*. 2010. No. 4-2. P. 310-31.
13. 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*. July 2019. Volume 111. Pages 222-228. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.03.012.
14. Makovetskiy O.A. Application of "Jet Grouting" for Installation of Substructures of Estates // *Procedia Engineering*. 2016. Volume 150. Pages 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. Volume 150. Pages 2223-2227. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.268.
16. Hamza Güllü. On the viscous behavior of cement mixtures with clay, sand, lime and bottom ash for jet grouting // *Construction and Building Materials*. 15 September 2015. Volume 93. Pages 891-910. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.072.
17. Hamza Güllü. A new prediction method for the rheological behavior of grout with bottom ash for jet grouting columns // *Soils and Foundations*. June 2017. Volume 57. Issue 3. Pages 384-396. DOI: 10.1016/j.sandf.2017.05.006.
18. Nuno Cristelo, Edgar Soares, Ivo Rosa, Tiago Miranda, Ana Chaves. Rheological properties of alkaline activated fly ash used in jet grouting applications // *Construction and Building Materials*. November 2013. Volume 48. Pages 925-933. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.063.
19. Makovetskiy O.A.. Application of "Jet Grouting" for Installation of Substructures of Estates // *Procedia Engineering*. 2016. Volume 150. Pages 2228-2231. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.269.

20. Axelsson M., Gustafson G. The PenetraCone, a new robust field measurement device for determining the penetrability of cementitious grouts // Tunnelling and Underground Space Technology. January 2010. Volume 25. Issue 1. Pages 1-8. DOI: 10.1016/j.tust.2009.06.004.

21. Katia Boschi, Claudio Giulio di Prisco, Matteo Oryem Ciantia. Micromechanical investigation of grouting in soils // International Journal of Solids and Structures, 15 June 2019. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2019.06.013.

Информация об авторах:

Долев Андрей Андреевич

АО «Мосинжпроект», г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, главный специалист.

E - mail: a_a_dolev77@mail.ru

Алексеев Вячеслав Александрович

ООО «Институт Мосинжпроект», г. Москва, Россия,
заместитель начальника управления по проектированию подземных сооружений и геотехнических изысканий.

E - mail: 634586@mail.ru

Баженова Ольга Юрьевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
(НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,

кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения.

E - mail: Bagenova54@mail.ru

Information about the authors:

Dolev Andrey An.

Company «Mosinjproekt», Moscow, Russia,
candidate of science in technics, main specialist.

E - mail: a_a_dolev77@mail.ru

Alekseev Vyacheslav Al.

Company «Institut Mosinjproekt», Moscow, Russia,
deputy head of the department for the Design of Underground Structures and Geotechnical Surveys.

E - mail: 634586@mail.ru

Bazhenova Olga Yu.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of Building Materials Science.

E - mail: Bagenova54@mail.ru