

14. Половко А.М., Бутусов П.Н. Интерполяция. Методы и компьютерные технологии их реализации. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2004. – 320 с.

15. Никитин Д. Поиск простейшего интерполянта. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 245 с.

УДК 624.159.4

АСПЕКТЫ КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИЙ ВОЗВОДИМЫХ В ГРУНТЕ ПО СТРУЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Богов С. Г., инж.

(ООО «ИСП Геореконструкция»,
г. Санкт-Петербург, Россия)

Аннотация

Освоение подземного пространства является главной тенденцией современного нового строительства и реконструкции старых зданий. Большая сложность этой задачи связана с условием сохранения исторического центра городов, где и нужны многофункциональные подземные сооружения. Так, создание на толще слабых грунтов Санкт-Петербурга специальных паркингов, подвальных этажей – сложная геотехническая задача. При том, что допускаемые предельные осадки, как реконструируемого, так и соседних зданий ограничиваются требованиями, как отечественных норм СНиП 2.02.01 «Основания зданий и сооружений», так и европейских нормативов EC-7 «Геотехническое проектирование». В условиях слабых и значимых толщ грунта возникла весьма перспективная возможность создания сплошной завесы на определенной расчетами глубине. Это позволяет решать многие реконструкционные задачи, когда плотные и сильнофильтрующие грунты находятся на большой глубине. Нужны технологии по созданию вертикальных создаваемых столбов и завес для обеспечения надежной гидроизоляции подземных объемов на длительные годы, не прибегая к последующим откачкам воды из подземных сооружений. Такие работы выполнялись экспериментально и на реальных объектах. Перспектив-

ной является система стабилизации грунта в основании фундаментов зданий, причем свойства и глубина стабилизации грунта ниже подошв фундаментов определяется совместными численными расчетами, в основу которых закладываются допускаемые предельные осадки, как для самого здания, так и для соседних зданий, задаваемые архитектурные требования либо технологии, например создающие автоматизированные системы парковок. Все это обеспечивает важнейшие требования по безопасности СНиП и законом 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

Использование струйной технологии (jet grouting) для стабилизации грунтов предназначено для создания в грунтах специальных подземных систем, позволяющих максимально выполнять требования безопасности для зданий и сооружений. К таким системам относятся: закрепление грунтов оснований для увеличения глубины заложения подошв ленточных фундаментов при усилении, устройство свай, устройство нижней распорки ограждения в грунте еще до вскрытия котлована, создание горизонтальной и вертикальной противофильтрационной завесы (ПФЗ) подземного объема, например при устройстве подвалов в существующих зданиях. Струйная технология позволяет создавать на строительной площадке конструкции из вертикальных, наклонных, горизонтальных цилиндрических закрепленных объемов, как отдельно стоящих, так и сопряженных вместе. Если монитор из скважины поднимается без вращения, то струей цементного раствора через сопла сначала в грунте формируется тонкая щель, а затем вертикальная цементогрунтовая стенка, формируя вертикальный экран. Оптимизация стоимости нулевого цикла в подземном строительстве и практика импортозамещения технологий делает применение струйной технологии еще более актуальной. В 2017 году в РФ подготовлен свод правил СП 291.1325800.2017 «Конструкции грунтоцементные армированные» для создания одиночного грунтоцементного элемента (ГЦЭ) в составе грунтоцементной конструкции (ГЦК) используются параметры: тип закрепляемого грунта (пески, глины), активность цемента для приготовления раствора, его содержание и объем в нем воды, давление нагнетания, скорость подъема монитора из скважины и общий расход цементного раствора. Однако, этого недостаточно. Также необходимы данные по влажности грунта, так как это увеличит водотвердое отношение закрепляемого элемента, грануломет-

рического состава исходного грунта и его плотности, для оценки объема частиц грунта в объеме закрепляемого элемента, а также содержание органики для оценки количества цемента в ГЦЭ. Задание технологических параметров применяемого оборудования: одно или двухкомпонентные трубы и мониторы их диаметры, проектные углы наклона лидерных скважин, плотность и вязкость раствора [1]. В условиях строительной площадки для обеспечения качества стабилизации грунтов также нужно согласовать все технологические параметры: объем размываемого грунта и скорости вращения и подъема монитора из скважины, объем подаваемого через сопла монитора цементного раствора, а также режимы движения раствора в затрубном пространстве и др.

Параметры грунтоцементных элементов для расчета по грунту и материалу

Для определения несущей способности ГЦЭ, как сваи по грунту по формуле 8 СП 24.13330.2011, так и для численного моделирования усиления требуются, как свойства создаваемого материала, вертикальные размеры ГЦЭ, которые определяются глубиной лидерного бурения скважин, диаметр закрепления, он при этом является величиной переменной, обеспечивающей качество работ и поэтому требует надежного определения. Анализ работ по определению глубины размыва породы струей показывает, что они сводятся к определению процессов воздействия гидравлических струй на породы и включают три основных способа описания процесса: теоретический, эмпирический и полуэмпирический. Имеется несколько подходов к описанию механизма разрушения среды струей.

- Гидродинамическое давление струи представляется как средоточенная сила или квазистатическое давление, распределенное по поверхности среды по некоторому закону (параболическое, равномерное). Грунт рассматривается как сплошной однородный массив. Квазистатическое давление струи вызывает возникновение поля напряжений в массиве, рассчитываемых с использованием формул той или иной теории напряженно-деформированного состояния. Размеры разрушения среды при таком подходе определяются некоторой областью, в которой напряженное состояние достигает предельного значения в соответствии с выбранным критерием разрушения. Возможными условиями разрушения среды яв-

ляются: разрушение при достижении предельного сопротивления сдвигу, прочности на одноосное сжатие, прочности на разрыв. В качестве критериев разрушения используются такие параметры, как критическая энергия разрушения, предельная деформация, и т.п.

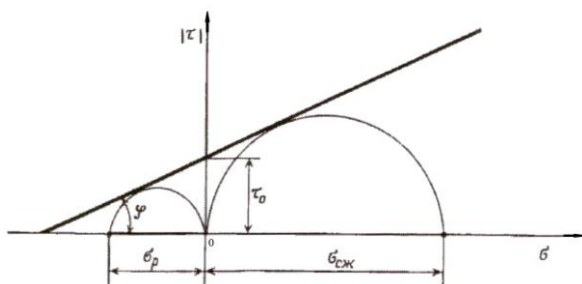


Рис.1. Прочностные параметры породы по Кулону-Мору, где $\sigma_p = 2\tau_0 \frac{\cos\varphi}{1+\sin\varphi}$

- Использование прочностных характеристик грунта (c, φ), не определенных для этого специально, не позволяют прогнозировать размер зон разрушения и закрепления грунта. При расчете разрушения струей горных пород выполняется единичное решение «давление-деформация». Однако, в этом случае фактический радиус закрепления грунта оказывается в несколько раз превышающим рассчитанные значения и не совпадает с экспериментальными значениями. Решение такой задачи не отражает эффекта "внедрения" струи в грунт, в результате которого давление от струи постепенно передается на частицы, удаленные от стенки изначальной скважины. В случае песчаных грунтов со сцеплением $c=0$ кПа грунт не воспринимает растягивающих напряжений $\sigma_p=0$ кПа и размер зоны закрепления мог бы определяться только длиной действия струи и возникающими в грунте растягивающими напряжениями (рис.1), но действие струи в условии пульпы в скважине быстро затухает. Имеется подход определения области закрепления, но для этого для грунтов нужно определение дополнительного параметра – его ударной вязкости.

- Грунт – многофазная среда, а давление струи передается на поровую воду. Разрушение грунта происходит за счет гидроразрывов при развитии давления в поровой воде, разрывающего грунт

"изнутри". Очевидно, в этом случае в качестве критерия разрушения среды принимается ее прочность на гидростатическое растяжение. Это относится к высоконапорной инъекции, например через манжетные трубы, а при струйном закреплении образования гидро-разрыва не допускается.

- Грунт рассматривается как массив, состоящий из отдельных частиц. При встрече с поверхностью грунта струя растекается и, захватывая частицы грунта, размывает и выносит их. По мере увеличения глубины прорези возрастает длина пути выноса частиц, возрастает также сопротивление выносу частиц. Изменение размеров прорези происходит за счет разрушения среды в точке лобового действия струи и за счет размыва стенок прорези обратными потоками. При таком подходе критерием разрушения является критическая скорость размыва либо скорость взвешивания, зависящие от гранулометрического состава грунта. Данные переменные параметры разнообразны, имеют большой разброс значений в зависимости от условий реализации и могут быть применимы в строго определенных условиях. В большинстве практических случаев используются эмпирические методы расчета размеров размыва и закрепления грунтов, основанные на большом количестве экспериментов в различных грунтовых условиях.

В настоящее время фактически сложились «оптимальные размеры» ГЦЭ для усиления фундаментов в песках радиусом 0,3м при закреплении по однокомпонентной технологии, а для ГЦЭ в глинистых грунтах по двухкомпонентной технологии закрепления радиусом 0,6м. «Бесконечное» увеличение радиуса размыва скважины невозможно не только из-за затухания действия струи с расстоянием, но и из-за вероятности обрушения выше расположенного свода грунта. Влияющим фактором на радиус закрепления является существенное отличие технологий: однокомпонентной от двухкомпонентной, когда подача струи цементного раствора в скважине осуществляется в «воздушной рубашке». Негативным аспектом реализации закрепления по двухкомпонентной технологии является большое соотношение давлений: размывающего раствора и давления воздуха. В случае явления клапача в скважине, когда происходит закупорка грунтом затрубного пространства, кольцевой зазор в двухкомпонентных трубах для подачи воздуха может быть блокирован, воздух может выходить только в виде отдельных пузырей,

приводя к снижению прочности материала. Попаданию раствора внутрь двойных труб, монитора и вертлюга и их цементации могут препятствовать только малые величины зазоров воздушных и жидкостных сопел и высокая вязкость пульпы. В техногенных грунтах определение диаметра закрепляемого массива осложняется наличием крупноразмерных включений, которые создают «тень» за этими включениями.

Таблица 1

№ комплекта	Оборудование		$\delta = d_m/2 - d_t/2$, мм
	диаметр буровой труб d_m , мм	диаметр колонки монитора d_m , мм	
1	89	90	0,5
2	89	132	21,5
3	89	151	31,5

В таблице 1 приведены наиболее широко используемые размеры мониторов и буровых труб. Таким образом, при использовании комплекта №1 потребуется «прокачать» объем раствора обогащенный частицами грунта через зазор 0,5мм, в комплекте №2 через зазор чуть более 20 мм. Опыт работ и расчеты показывают, что даже для вертикальных относительно глубоких скважин в этих условиях происходит образование локального клаважа и гидроразрыв стенок скважин. При проектировании усиления фундаментов с помощью слабонаклонных ГЦЭ по однокомпонентной технологии углы наклона к вертикали следует принимать до 20° с учетом эффекта А. Бойкотта (1920), когда большая часть жидкости протекает по верхней части кольцевого затрубного пространства, препятствуя нормальной транспортировке частиц грунта, так как подобный профиль течения дает недостаточно энергии для транспортирования частиц по нижней части ствола, что в свою очередь способствует общей неравномерности набора прочности и локальным ухудшениям свойств ГЦЭ.

Назначение факторов влияющих на свойства ГЦЭ: диаметр закрепления.

Существуют большое количество видов одно и двухкомпонентных мониторов, где струи воздействуют на стенки скважины под углом 90° . Для определения радиуса закрепления R_3 предлагается использовать подход на основе изменения конструкции монитора для формирования нужного размера закрепления. Таким образом, мониторы нужно выполнить с расположением пары сопел направленных вверх и имеющих точку пересечения струй в пространстве на нужном расстоянии от оси скважины, за которой следует зона рассеивания энергии струй.

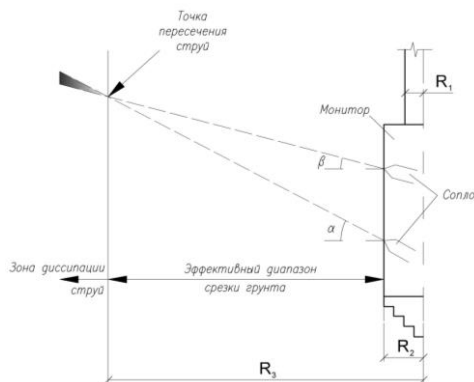


Рис. 2. Схема конструкции монитора для определения зоны закрепления.
 R_1 – радиус буровых труб; R_2 – радиус монитора; R_3 – радиус размыва и закрепления грунта в скважине

Известно, что устройство вертикальных скважин в грунте без крепления стенок приводит к их обрушению. Наибольшая интенсивность напряжений возникает на стенке скважин. Здесь фактором устойчивости является разность между боковым давлением грунта и гидростатическим давлением в скважине: с его уменьшением уменьшаются радиальные напряжения σ_r на стенке и растут тангенциальные σ_θ . Потеря устойчивости и разрушение стенок скважин могут возникнуть при достижении предельного состояния прочности грунтов. По К.Терцаги, вблизи ствола горной выработки образуется зона повышенных напряжений, горизонтальное напряжение

в массиве с глубиной изменяется по закону прямой пропорциональности. Вскрытие пород бурением меняет их напряжённое состояние, так как гидростатическое давление столба бурового раствора в скважине ниже вертикального и бокового давления горных пород. По М.П. Бродскому (1933) величина давления в подземных вертикальных выработках не зависит от их глубины и величина его зависит лишь от диаметра поперечного сечения этой выработки, объемного веса окружающей ее породы и угла внутреннего трения данного грунта [2]. При устройстве вертикального ГЦЭ по струйной технологии «снизу – вверх» в верхней части скважины радиусом R_2 от ее «подработки» радиусом R_3 грунта происходит нарушение устойчивости стенок и образование свода см. рис.2. Формирование зоны обрушения за пределами стенок скважины ГЦЭ негативно скажется на свойствах материала, как самого ГЦЭ, так и окружающего грунта – дальнейшее разуплотнение песчаных и расструктурирование глинистых грунтов.

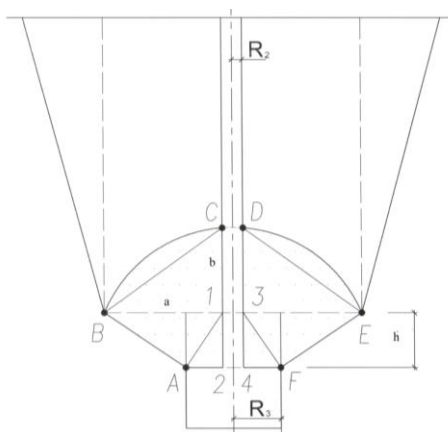


Рис.2. Схема образования свода обрушения при струйном размыве радиусом R_3

Объем грунта над зоной размыва радиусом R_3 :

$$V_I = \frac{\pi h (R_2^2 + R_2 R_3 + R_3^2)}{3} \quad (1)$$

где высота $h = R_3 \tan\left(\frac{90-\varphi}{2}\right)$ (2)

При устройстве ПФЗ в песках и текучих суглинках с углом внутреннего трения от 32° до 14° их верхнюю отметку относительно вскрытия котлована необходимо задавать с учетом высоты свода обрушения h , которые близки по значению и составляют порядка $0,67R_3$.

Важным аспектом качества и получения необходимой прочности ГЦЭ является содержание цементирующего вещества в закрепляемом объеме, а также водоцементное отношение (WC) размывающего цементного раствора. Важно учитывать и соотношение плотностей размываемого грунта и закрепляющего раствора. Как правило, плотность грунта в зависимости от вида будет на $0,3 \dots 0,6 \text{ т/м}^3$ больше плотности цементного раствора $1,5 \dots 1,6 \text{ т/м}^3$, что приведет к обрушению вниз скважины подмытого грунта объемом V_2 ЗФЕ и 1ВА. Далее, в случае нарушения равновесия может произойти формирование и вторичного объема обрушения грунта большим радиусом $B1$ и ЗЕ. Высота обрушения может составлять $b=0,8a$. Этот параметр необходимо учитывать при проектировании элементов усиления и глубины заложения горизонтальных ГЦЭ. Недочет приводит к снижению прочности, так как в процессе размыва монитор непрерывно поднимается из скважины. Подача цементного раствора объемом $V_g = m_c / (1/\rho_c + WC/\rho_w)$ в скважину поле обрушения продолжается уже выше, объем размыва будет составлять: $V = \pi H (R_3^2 - R_2^2)$

При закреплении грунта плотностью ρ цементным раствором с плотностью $\rho_g = m_c(I+WC)/V_g$ достигается полная влагоемкость грунта $w_o = e/\rho_s$. Насыщенность водой цементогрунтовой смеси с WC раствора изменяется за счет исходной влажности грунта $w = \rho/\rho_d - 1$ и в водонасыщенных грунтах будет увеличиваться. Планируя увеличение прочности ГЦЭ, необходимо минимизировать ее водотвердое отношение (B/T) – суммарное содержание воды к содержанию поступившего в скважину грунта и цемента. Снижение возможно за счет уменьшения исходного WC отношения цементного раствора за счет применения химических добавок снижающих вязкость.

Свойства ГЦЭ: прочность и модуль деформации

Параметры цементогрунта по материалу определяются необходимостью восприятия проектных усилий. Зависимость модуля де-

формации закрепленного грунта от прочности на сжатие имеет разброс от 50 до 200. Для большинства проектных задач достаточно создать ГЦЭ с прочностью на одноосное сжатие порядка 10 МПа и модулем деформации 1000 МПа [3]. Песчаные отложения, даже водонасыщенные пылеватые пески, в отличие от глин хорошо размываются и закрепляются цементными растворами. Механические параметры материала можно получить в более широком диапазоне, зависящем не столько от гранулометрического состава грунта, сколько от расхода цементного раствора и времени набора прочности. При закреплении глинистых и биогенных грунтов прочность в стандартном для мелкозернистых бетонов возрасте может быть на порядок ниже. Ее рекомендуется определять в возрасте 56 суток. По окончании процесса закрепления грунта цементным раствором в скважинах развиваются процессы отстоя воды и седиментации твёрдых частиц раствора под действием собственного веса. Высаживание частиц из цементного раствора зависит не только от разности плотностей твёрдых частиц и раствора, но и его реологических характеристик, смачиваемости, дисперсности и формы частиц. Частицы твёрдой фазы в статических условиях будут осаждаться, если его удерживающая способность недостаточна. В стволе скважины осаждение с сопротивлением происходит значительно медленнее, чем свободное осаждение отдельной частицы и по мере роста структуры цементного раствора скорость осаждения этой фазы ещё более замедляется. «Осаждение» обозначает изменение плотности раствора после окончания размыва, когда раствор остаётся в неподвижном состоянии в течение длительного времени. Имеются данные, что увеличение пластических свойств промывочных растворов приводят к ухудшению выноса. Осаждение частиц в движущейся жидкости зависит от режима течения: в ламинарном режиме сопротивление падению частицы в ньютоновских жидкостях определяется силами вязкости и подчиняется закону Стокса. Цементные же растворы проявляют поведение неньютоновских жидкостей и существуют зависимости, основанные на экспериментальных результатах. Для снижения вязкости раствора, а также для ускорения сроков схватывания ГЦЭ цементный раствор для закрепления грунтов с большим содержанием глинистых частиц нужно готовить с применением добавки хлористого кальция введенного в воду затворения. Для увеличения седиментационной устойчивости материал ГЦЭ

при закреплении песчаных грунтов цементный раствор нужно готовить с использованием комплексной добавки: жидкого стекла и суперпластификатора СЗ [5].

Из закона сохранения массы веществ известно, что масса веществ, вступивших в реакцию, равна массе продуктов реакции. Таким образом, часть цементного раствора остается в скважине – в виде смеси частиц грунта и цемента, а другая часть, если нет гидроразрывов пластов грунта, изливается из скважины. На поверхность изливаются менее вязкие растворы, обогащенные наиболее плавучими частицами. Качество создаваемой в грунте конструкции первично следует путем контроля свойств излива цементогрунтовой смеси из устья скважин из затрубного пространства испытаниями в раннем возрасте.

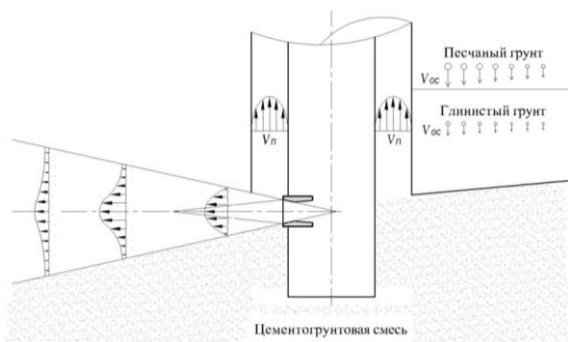


Рис. 3. Схема движения раствора в скважине при струйном закреплении грунтов

Вынос частиц грунта из буровой скважины зависит также от вида и скорости потока восходящей в затрубном пространстве жидкости и не зависит от продолжительности промывки. На частицы грунта, находящиеся в растворе во взвешенном состоянии, действуют:

- сила тяжести $P_m = \rho_r g V_p$;
- выталкивающая сила цементного раствора $P_a = \rho_f g V_p$;
- сила сопротивления среды при движении частицы, определяемая по формуле Ньютона $F_r = c A \rho_r u^2 / 2$;

где A – площадь проекции частицы на плоскость, перпендикулярную к направлению движения; u – скорость движения; c – коэффициент сопротивления, который зависит от формы, диаметра и

шероховатости твёрдой частицы, свойств жидкости и скорости обтекания.

По данным Р. Уильямса и Г. Брука (1951г.) при структурном режиме потока транспортировка частиц грунта зависит от установившегося профиля скоростей в кольцевом сечении скважины [4]. Наилучшие условия для выноса глинистых частиц дискообразной и сплюснутой формы существуют при турбулентном режиме, когда частицы независимо от их размеров движутся в потоке не переворачиваясь. Частицы средних и малых размеров в процессе гидротранспорта переворачиваются на ребро и относятся к стенкам скважины, чем и затрудняется их вынос. Интенсивность выноса возрастает при использовании менее вязких растворов и зависит от величины соотношения толщины частицы t к ее диаметру d . При $t/d=0,3-0,8$ частицы двигаются в восходящем потоке в горизонтальном положении. В общем случае скорость восходящего потока должна суммироваться со скоростью подъема монитора из скважины. Качество работ по закреплению обеспечивается системой контроля качества, которая представлена на рис.4.

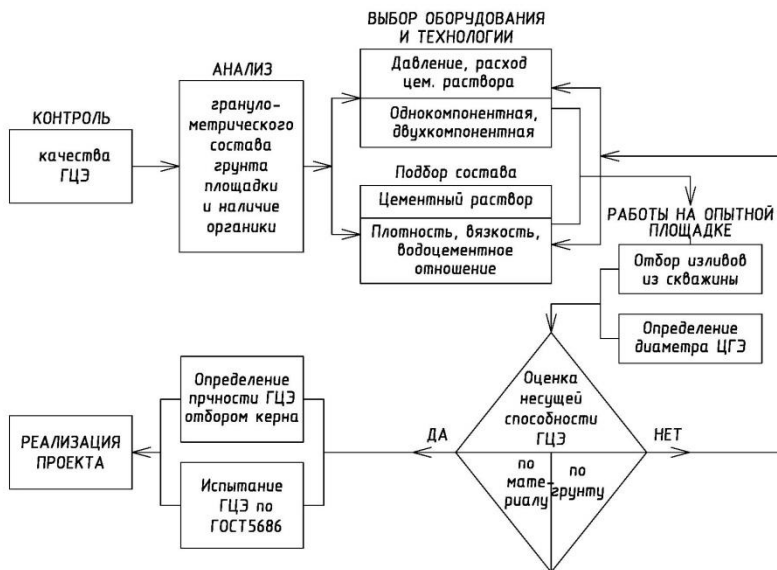


Рис. 4. Система контроля качества ГЦЭ

Заключение

1. Качественное создание конструкций в грунте в настоящее время, путем стабилизации грунтов цементными растворами по струйной технологии может обеспечиваться системой контроля качества и согласованием грунтовых условий площадки технологическим параметрам закрепления.

2. Соотношение объемов закрепляемого слабого грунта и подаваемого цементного раствора, систематический контроль проб и кернов на соответствие проектным значениям на опытной площадке может гарантировать прочностные и деформационные свойства создаваемой конструкции. В свою очередь это еще позволяет заложить в расчетную модель реальные свойства грунтоцементного материала и последовательность устройства ГЦК и обеспечить безопасность всего строительства.

3. Реализация усиления грунтов оснований фундаментов зданий по струйной технологии требует уточнения несущей способности одиночного ГЦЭ на опытной площадке по ГОСТ 5686, а также проверки его сплошность сейсмоакустическим методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендации по струйной технологии сооружения противофильтрационных завес, фундаментов, подготовки оснований и разработки мерзлых грунтов. НИИОСП, М. 1989. 89с.

2. Бродский М. П. Новая теория давления пород на подземную крепь./ М. П. Бродский. –М.-Л.: ОНТИ, 1933. 72 с.

3. Богов С.Г. Формирование заглубленных объемов в бесподвальных исторических зданиях в условиях слабых грунтов Санкт-Петербурга.//Жилищное строительство. №9 2016. с.45-49.

4. Рабинович Н.Р. Инженерные задачи механики сплошной среды в бурении. М. Недра. 1989. 269с.

5. Богов С.Г. К вопросу исследования свойств и применения цементных растворов для струйной технологии закрепления грунтов. Материалы конф. Геотехника Беларуси: наука и практика. (г. Минск, БНТУ — 23–25.10.2013). Часть 2. Минск 2013г. с.30-37.