

Освоение подземного пространства городов, построенных на толще осадочных отложений, считается невозможным без применения двух современных технологий – «стены в грунте» и струйной цементации. Обе технологии широко внедрены на Западе в различных по сложности инженерно-геологических условиях.

К сожалению, использование технологии устройства «стены в грунте» в условиях распространения структурно-неустойчивых водонасыщенных глинистых грунтов малой и средней степени литификации, характерных для Санкт-Петербурга, было скомпрометировано на ряде объектов. Петербургские геотехнические организации допустили брак на ряде объектов, где вместо «стены в грунте» по факту получился «грунт в стене», что привело к серьезным проблемам при устройстве глубоких котлованов, деформациям окружающей территории и построек.

Технологии струйной цементации повезло больше – отчасти в связи с тем, что этот геотехнический инструмент оказался в руках высокопрофессиональной организации из Предуралья (кстати говоря, у которой есть чему поучиться многим крупным организациям), а отчасти благодаря предварительно проведенным петербургскими учеными исследованиям этого метода. Технология струйной цементации известна также под названиями – высоконапорная инъекция, струйная технология, или Jet Grouting.

Многолетние исследования, апробация и адаптация этой технологии применительно к грунтам Санкт-Петербурга, выполненные С. Г. Боговым, способствовали превращению ее в эффективный инструмент для усиления фундаментов, устройства глубоких котлованов, углубления подвалов.

Научный руководитель института «Геореконструкция»
проф. В. М. УЛИЦКИЙ

УДК 624.131

Применение технологии струйной цементации для освоения подземного пространства Санкт-Петербурга

Сергей Геннадиевич БОГОВ, руководитель службы геотехнического мониторинга

ООО «ПИ Геореконструкция», 190005 Санкт-Петербург, Измайловский просп., 4, e-mail: mail@georec.spb.ru

Аннотация. Технология струйной цементации, апробированная в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга, позволяет эффективно решать ряд актуальных геотехнических задач, таких как увеличение глубины заложения фундаментов исторических зданий, устройство дисков грунтоцемента для крепления ограждения глубоких котлованов, создание коробчатых грунтоцементных конструкций для организации подземных объемов под существующими зданиями. Исследования показывают, что в песчаных и глинистых грунтах с помощью струйной цементации удаётся создать грунтоцемент с приемлемыми механическими характеристиками. При проектировании грунтоцементных конструкций предлагается руководствоваться подходом к грунтоцементу как к низкомарочному мелкозернистому бетону. При развитии такого мегаполиса, как Санкт-Петербург, имеется насущная потребность в управляемом преобразовании свойств грунтов оснований и придании им необходимых свойств (увеличение прочности и модуля деформации, снижение водопроницаемости). Закрепление грунтов по струйной цементации – это технологический процесс, который для создания геомассы с необходимыми свойствами включает в себя комплекс специальных работ, например, лидерное бурение скважин с промывкой выбуренного грунта водой или раствором, перемешивание грунтов площадки, как правило, с цементными растворами, содержащими химические добавки, а затем армирование скважины. Струйная технология в Санкт-Петербурге внедряется более 20 лет, сначала однокомпонентная, а затем двухкомпонентная. Приведены примеры расчетов грунтоцементных конструкций различного типа и рассмотрены примеры реализации проектных решений на объектах в историческом центре Санкт-Петербурга.

Ключевые слова: струйная цементация, закрепление грунтов, грунтоцементная конструкция, усиление фундаментов, глубокие котлованы, противодиффузионная завеса, геотехнический мониторинг, контроль качества.

APPLICATION OF JET GROUTING FOR DEVELOPMENT OF UNDERGROUND AREAS IN ST. PETERSBURG

Sergey G. BOGOV, e-mail: mail@georec.spb.ru

PI "Georeconstruction", Izmaylovsky prosp., 4, St. Petersburg 190005, Russian Federation

Abstract. Jet grouting technology, which has been tested under the geotechnical conditions of St. Petersburg, provides effective solutions for a number of relevant geotechnical problems, including deepening of foundations of historical

buildings, making soil-cement discs to fix fences of deep pits, construction of box soil-cement structures to organize underground spaces under the existing buildings. Studies show that in sandy and clayey soils jet grouting helps to make soil-cement with acceptable mechanical properties. When designing soil-cement structures, it is proposed to treat soil-cement as fine concrete of a low grade. When developing such megapolis as Saint-Petersburg, there is an urgent need for controlled transformation of properties of foundation soils and giving them the necessary properties (increase in strength and deformation modulus, reduction in water permeability). Jet grouting of soils is a technological process which, for creation of geo-massif with required properties, includes a complex of special works, for example, pilot well-drilling with washing of drill cuttings with water or solution, mixing of the site soils, as a rule, with cement solutions containing chemical additives and then reinforcement of the well. Jet technology is being introduced in Saint-Petersburg over 20 years, at first as a one-component, then — as two-component. Examples of calculations of soil-cement structures of different types are presented and examples of realization of project solutions at the sites in the historic center of St. Petersburg are considered.

Key words: jet grouting, soil grouting, soil-cement structure, reinforcement of foundations, deep pits, grout curtain.

Технология струйной цементации позволяет создавать в любых грунтах отдельные грунтоцементные элементы, которые могут образовывать конструкции и массивы [1].

Технологический процесс однокомпонентной струйной цементации включает в себя комплекс специальных работ: лидерное бурение скважин, разрушение грунта острой струей цементного раствора (при необходимости с химическими добавками) под высоким давлением (30–40 МПа), вытеснение пульпы на поверхность. При двухкомпонентной технологии струя раствора подается под защитой коаксиальной струи воздуха [2].

Струйную технологию, сначала однокомпонентную, а затем и двухкомпонентную, применяют в Санкт-Петербурге с середины 1990 г. За это время технология прошла всестороннюю апробацию в инженерно-геологических условиях города и адаптацию к особенностям грунтов его территории [3–6].

Механические параметры грунтоцемента

Необходимость адаптации технологии была обусловлена тем обстоятельством, что получаемый в результате материал (грунтоцемент) состоит не только из привнесенного в грунт цемента, но и частиц исходного грунта. Как показывает опыт, добиться абсолютного замещения грунта цементным раствором не удает-

ся, да и не требуется. Грунтоцемент всегда содержит примеси окружающего грунта. Высокое содержание воды, наличие глинистых и пылеватых фракций в цементном растворе, как известно, могут резко снизить механические свойства образующегося материала по сравнению с чистым цементным раствором [7, 8].

Проведенные автором данной статьи исследования позволили установить, что при соблюдении определенной технологической процедуры (этому вопросу посвящен ряд статей [9, 10]) в среде слабых глинистых грунтов удается создать грунтоцементный материал с прочностью на одноосное сжатие R_0 порядка 10 МПа и модулем деформации $E = 1000$ МПа. При проектировании следует иметь в виду, что более высокие параметры в среде глинистых грунтов, скорее всего, недостижимы при использовании существующих одно- и двухкомпонентных технологий струйной цементации без применения метода полного замещения и увеличения содержания цемента в растворе.

В песчаных отложениях, даже в пылеватых песках, механические параметры грунтоцемента можно получить в более широком диапазоне, зависящем не столько от гранулометрического состава грунта, сколько от «проработки» массива струей. В данном случае необходимые параметры грунтоцемента могут задавать проектировщики исходя из

необходимости восприятия проектных усилий (как, скажем, при назначении класса бетона), хотя для большинства проектных задач достаточно создать грунтоцемент с R_0 порядка 10 МПа и $E = 1000$ МПа.

Заметим, что для грунтоцемента, образуемого с помощью струйной цементации, между R_0 и E существует следующая зависимость:

$$E = 100R_0.$$

Грунтоцемент занимает промежуточное положение между исходным грунтом и бетоном: по деформационным параметрам он на порядок ниже бетона и на два порядка выше грунта. Примеры определения физико-механических характеристик грунтоцемента на рассмотренных в данной статье объектах Санкт-Петербурга приведены в *таблице*.

После окончания размыва грунта цементным раствором в скважинах развиваются процессы седиментации раствора и отстоя жидкости, т. е. идет процесс осаждения твердых частиц под действием собственного веса. По мере роста структуры цементного раствора скорость осаждения этой фазы замедляется. Седиментация влияет на изменение свойств грунтоцемента по глубине, о чем свидетельствуют испытания кернов, отобранных с различных глубин. Для снижения этого негативного явления в цементные растворы следует вво-

дить химические добавки, ускоряющие процессы структурообразования. Для получения более прочных и экономически целесообразных конструкций в грунте можно предложить использовать растворы на основе пуццоланового цемента с добавками [10, 11].

Принципы конструирования грунтоцементных конструкций

Несмотря на возможность формирования с помощью технологии струйной цементации слабофильтрующего массива грунтоцемента, не надо забывать, что это не монолит. Массив состоит из отдельных цилиндров, а значит, подобен низкомарочному бетону с большим количеством холодных швов бетонирования. Отсюда следует очевидный вывод — грунтоцемент способен работать на сжатие и плохо работает на изгиб и растяжение. Закрепленный грунт хорошо работает на сжатие на небольших «пролетах». При проектировании конструкций из грунтоцемента необходимо руководствоваться простым правилом: там, где не сработает бетон, бесполезен и грунтоцемент. Бетон не работает на растяжение и изгиб, а закрепленный грунт тем более.

Эффективность армирования закрепленного грунта требует отдельного исследования. Возможности размещения арматуры в грунтоцементных элементах весьма ограничены. Армирующий элемент можно разместить только соосно скважине, пробуренной для производства работ по струйной цементации. В грунтоцементном элементе удастся разместить так называемое жесткое армирование, например металлическую трубу. Это позволяет рассчитывать на способность армированного грунтоцементного элемента воспринимать изгибающие моменты. Наивно пола-

Физико-механические характеристики грунтоцемента на строительных площадках Санкт-Петербурга

Объект, замещаемый грунт	Среднее значение прочности образцов на сжатие R_0 , МПа, в возрасте, сут	Среднее значение плотности грунтоцемента ρ , кг/м ³	Среднее значение модуля деформации E , МПа
<i>Загородный просп.</i> , суглинки тяжелые, пылеватые, ленточные с прослоями песка, текучие	$R_{45} = 10,06$	1732	1003
<i>Ансамбль «Новая Голландия»</i> (кузница), пески пылеватые, насыщенные водой, средней плотности	$R_{45} = 9,84$	1776	1009
<i>Набережная р. Карповки</i> , разнозернистые пески, преимущественно мелкие и пылеватые, средней плотности и рыхлые	$R_{30} = 11,4$	1750	1470

гать, что нарушение конструктивных принципов армирования железобетона даст позитивный результат для грунтоцемента.

Для формирования сплошного массива грунтоцемента скважины для струйной цементации необходимо располагать в шахматном порядке с расстоянием между ними, равным диаметру грунтоцементного элемента. Последний определяется не только затуханием действия струи с расстоянием, но и возможностью обрушения свода грунта, расположенного выше зоны размыва. В связи с этим диаметр грунтоцементного элемента для озерно-морских и озерно-ледниковых песчаных и глинистых отложений, как показывает накопленный опыт, при проектировании не может увеличиваться «бесконечно», а следует принимать равным 700 мм при однокомпонентной разновидности технологии и 1200 мм — при двухкомпонентной.

Важный технологический аспект — отсутствие существенных отклонений лидерных скважин от вертикали и соблюдение расстояний между скважинами в плане, в этом случае удастся сформировать квазисплошной массив, обладающий необходимыми механическими параметра-

ми, в котором границы отдельных грунтоцементных элементов незаметны. При этом массив характеризуется относительной водонепроницаемостью, достаточной для рассмотрения его в качестве противофильтрационного экрана.

Увеличение глубины заложения фундаментов

Фундаменты исторической застройки Санкт-Петербурга возведены преимущественно на озерно-морских песчаных отложениях, служащих естественной песчаной подушкой, которая способствует перераспределению давления от здания на подстилающие слабые водонасыщенные глинистые грунты. Для решения ряда геотехнических задач (увеличение несущей способности исторических фундаментов, углубление подвалов, устройство на прилегающей территории заглубленных объемов) весьма эффективным в техническом и экономическом отношении будет увеличение глубины заложения фундаментов без изменения типа фундаментов и несущего слоя под подошвой. Это позволяет сохранить исходный принцип взаимодействия здания и основания, а следовательно, ограничиться

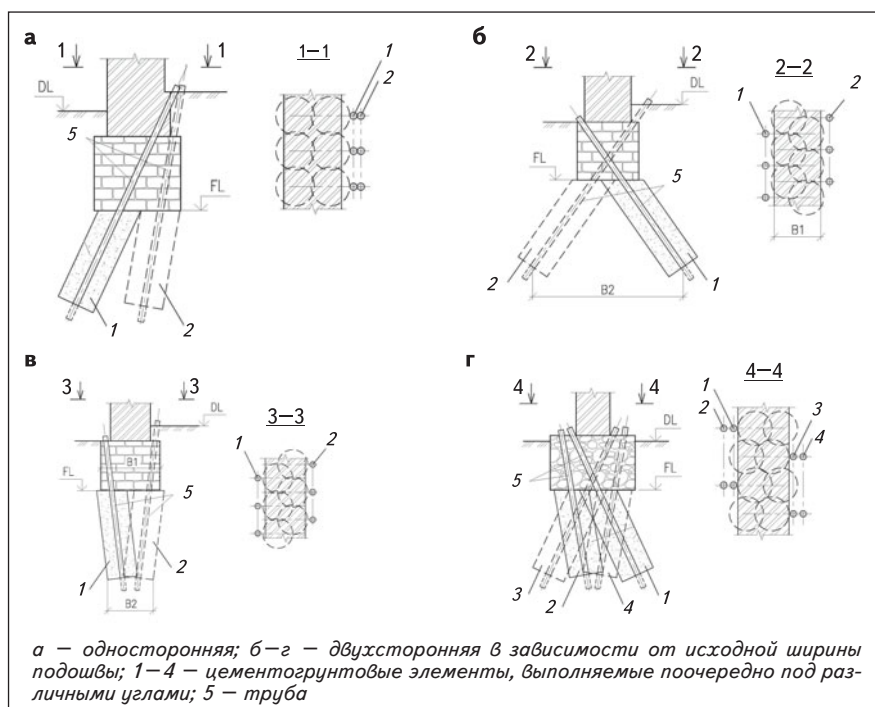


Рис. 1. Схемы усиления ленточных фундаментов

усилением локальной зоны, в которой необходимо решить поставленную задачу.

Заметим, что такой возможности не возникает при использовании свай усиления, которые передают нагрузку на слои грунта, залегающие ниже толщи слабых отложений. В этом случае замена типа фундамента на свайный обя-зывает пересаживать на сваи все здание в пределах одного деформационного блока. Хотя нередко встречаются и ошибочные решения по пересадке на сваи отдельного участка здания, что обрекает его на развитие неравномерных деформаций вследствие процес-сов «ползучести».

Увеличение глубины заложения фундаментов путем создания грунтоцементных элементов в слоях песчаных грунтов с помощью технологии струйной цементации успешно реализовано на ряде объектов. Проектные варианты усиления фундаментов можно подразделить в зависимости от доступа на односторонние и двухсторонние (рис. 1).

Элементы усиления можно объединять с исторической конструкцией с помощью армиру-ющих элементов (рис. 2). В этом случае исторический фундамент должен быть рассчитан на вос-приятие усилий от «жесткого» армирования.

Расчет несущей способности грунтоцементного элемента по материалу нужно проводить используя СП 52-101-2003, СП 266.1325800.2016, а также СП 291.1325800. 2017.

После набора прочности грун-тоцементом под подошвой фун-дамента образуется искусствен-ный массив со свойствами, близ-кими к самому бутовому фунда-менту. Созданная конструкция должна быть смоделирована и рассчитана по прочности и де-формациям.

Назначать последовательность устройства скважин для струй-ной цементации необходимо с учетом времени набора прочно-сти соседних грунтоцементных элементов. Также следует иск-лючать усадочные деформации.

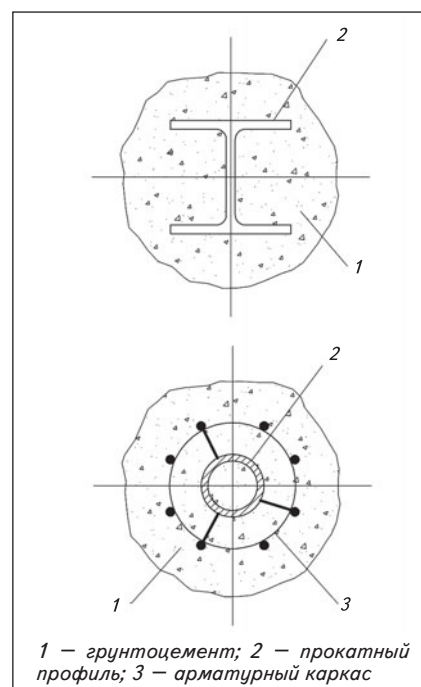


Рис. 2. Армирование цементогрун-товых элементов

Для этого должна предусматри-ваться опрессовка зоны «подош-ва фундамента — грунтоцемент-ный элемент». Опыт показывает, что 15–20 % общего количества элементов опрессовывается на начальном этапе без роста дав-ления, что является свидетельст-вом имеющихся под подошвами фундаментов зон поглощений из-за процессов седиментации и усадки.

Углы наклона грунтоцемент-ных элементов принимаются с учетом восприятия нагрузки от-носительно осей фундаментов или от центра тяжести системы «фундамент—стена—перекры-тие» и определяется геометриче-ским построением. При этом сле-дует учитывать эффект А. Бой-котта (1920 г.) [12], когда в сква-жинах с углом наклона 30° и бо-лее частицы грунта из объема «подмыва и вывала», образовав-шегося в верхней части скважи-ны, могут «сползть» в нижнюю часть. Вследствие этого плот-ность в поперечном сечении эле-мента сильно меняется: более



Рис. 3. Усиление ленточных фундаментов по технологии высоконапорной цементации

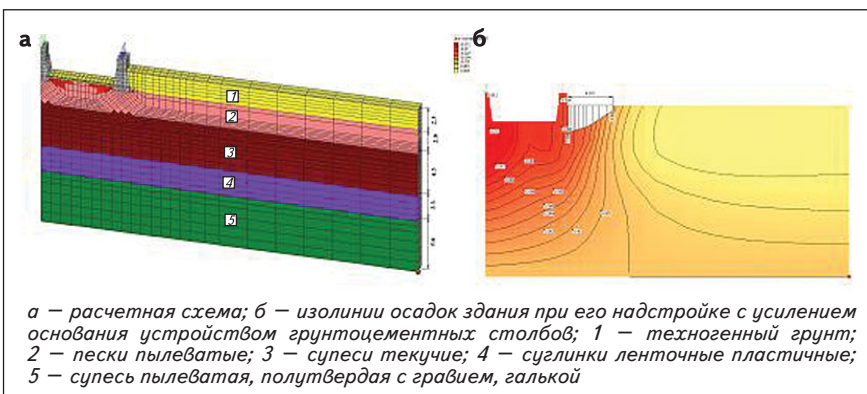


Рис. 4. Расчет напряженно-деформированного состояния основания при реконструкции здания

легкая фаза поступает вверх, а более тяжелая — вниз. Большая часть жидкости, протекая по верхней части цилиндрического пространства, препятствует нормальной транспортировке всего шлама. Таким образом, может получиться неоднородный массив с изменяющимися по глубине

свойствами. Для того чтобы избежать этого негативного эффекта, углы наклона столбов к вертикали рекомендуется принимать до 20° .

Практический пример реализации технологии струйной цементации для увеличения глубины заложения фундаментов

представляет собой усиление фундаментов здания на набережной р. Карповки. Реконструкция здания была связана с изменением его функционального назначения, увеличением этажности и полезных нагрузок. Трехэтажное здание было возведено в 1905 г. с продольными несущими стенами и подвалом, расположено в глубине дворовой застройки. С одной стороны к нему примыкает жилое здание, с другой — крыло недавно построенной многоэтажной гостиницы.

Фундаменты реконструируемого здания, характерные для Санкт-Петербурга, выполнены ленточными из рваного известняка на цементно-песчаном растворе на естественном основании. Глубина заложения подошвы фундаментов равна 2,1 м, ширина — 1,5 м. В основании фундаментов залегают водонасыщенные разнородные пески средней плотности, местами рыхлые. Мощность песков ниже подошвы фундаментов варьируется от 2 до 3 м. Залегающие под ними после- и позднеледниковые суглинки имеют низкие деформационные характеристики и могут способствовать развитию значительных дополнительных осадок при увеличении нагрузки без специальных мер усиления. Подземные воды были вскрыты на глубине 2 м.

В рассматриваемой геотехнической ситуации была очевидна необходимость превентивного усиления фундаментов здания, которое включало два этапа: укрепительную цементацию кладки бутовых фундаментов и устройство грунтоцементных столбов усиления диаметром 0,6 м. Столбы выполняли в слое песчаных грунтов под наклоном, в шахматном порядке таким образом, чтобы отдельные элементы смыкались (рис. 3). Тем самым получали не только углубление, но и уширение фундаментов. Макси-

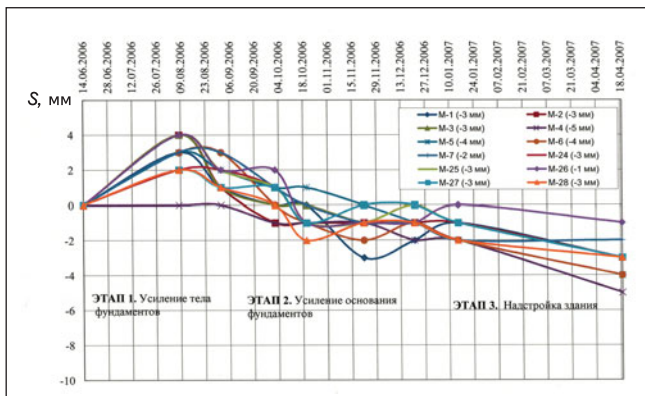


Рис. 5. График перемещений осадочных геодезических марок (М-1—М-28) на здании, набережная р. Карповки, 39а

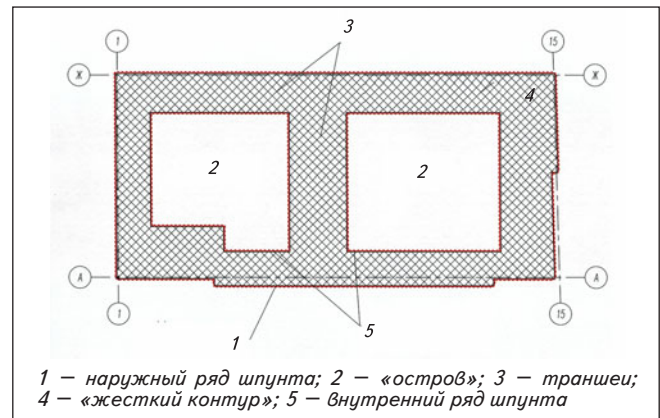


Рис. 7. Схема устройства траншей «жесткого контура»

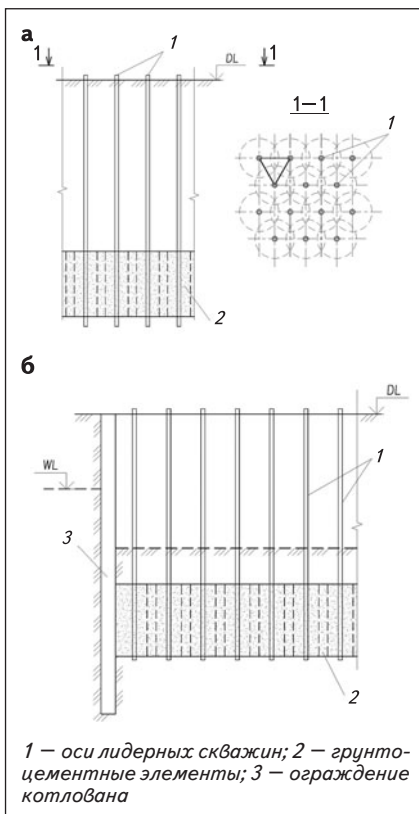


Рис. 6. Схема выполнения скважин при устройстве противопыльной завесы (а) и горизонтальных распорок в грунте (б)

мальная ширина B_1 по низу создаваемой усилительной конструкции для фундамента внутренней продольной стены составила более 3 м, а для наружных — более 2,5 м. Для армирования грунтоцементных столбов были применены металлические трубы.

Дополнительную осадку зда-

ния рассчитывали с использованием вязкопластической модели грунта [13, 14] в программном комплексе «FEM models», разработанном в институте «Геореконструкция». Численное моделирование проводилось в три этапа. На первом этапе моделировали природное напряженное состояние массива грунта, на втором — воспроизводили напряженно-деформированное состояние основания от существующих нагрузок, на третьем — определяли напряженно-деформированное состояние основания при увеличении нагрузок на фундаменты здания от надстройки после создания грунтоцементных столбов усиления. Расчетная схема задачи приведена на рис. 4.

Как показали расчеты, дополнительные осадки от надстройки здания с усилением фундаментов для внутренних и наружных стен составили соответственно не более 12 и 8 мм, что меньше допустимых значений дополнительных деформаций (рис. 4б). Также была обеспечена рекомендуемая нормами допустимая неравномерность осадок.

Заметим, что без усиления фундаментов осадки для внутренней стены составили бы 55 мм, для наружной — 40 мм, при этом относительная разность осадок была бы 0,003, а соседние здания в зоне примыкания

получили бы дополнительную осадку 35 мм. Расчетами было также установлено, что в случае более редкого устройства грунтоцементных столбов (с шагом два диаметра) график «нагрузка—осадка» приобретает нелинейный характер, что снижает эффективность усиления.

На основе ранее проведенных исследований [15, 16] применили однокомпонентную струйную цементацию и портландцемент М500 с добавкой хлористого кальция. Через манжеты, расположенные на армирующих металлических трубах, проводили опрессовку созданных столбов на отметках подошв для минимизации деформаций фундаментов, связанных с седиментацией грунтоцементной смеси. Для реализации проекта потребовалось устройство более 500 столбов.

Для контроля качества усиления на объекте осуществляли комплекс работ по геотехническому сопровождению, который включал геодезические наблюдения за осадками фундаментов самого здания и примыкающих строений (рис. 5).

В рамках геотехнического сопровождения производился отбор проб грунтоцемента (см. таблицу), при шурфовании контролировали размеры элементов. Средний диаметр созданных столбов составил 0,6–0,7 м.

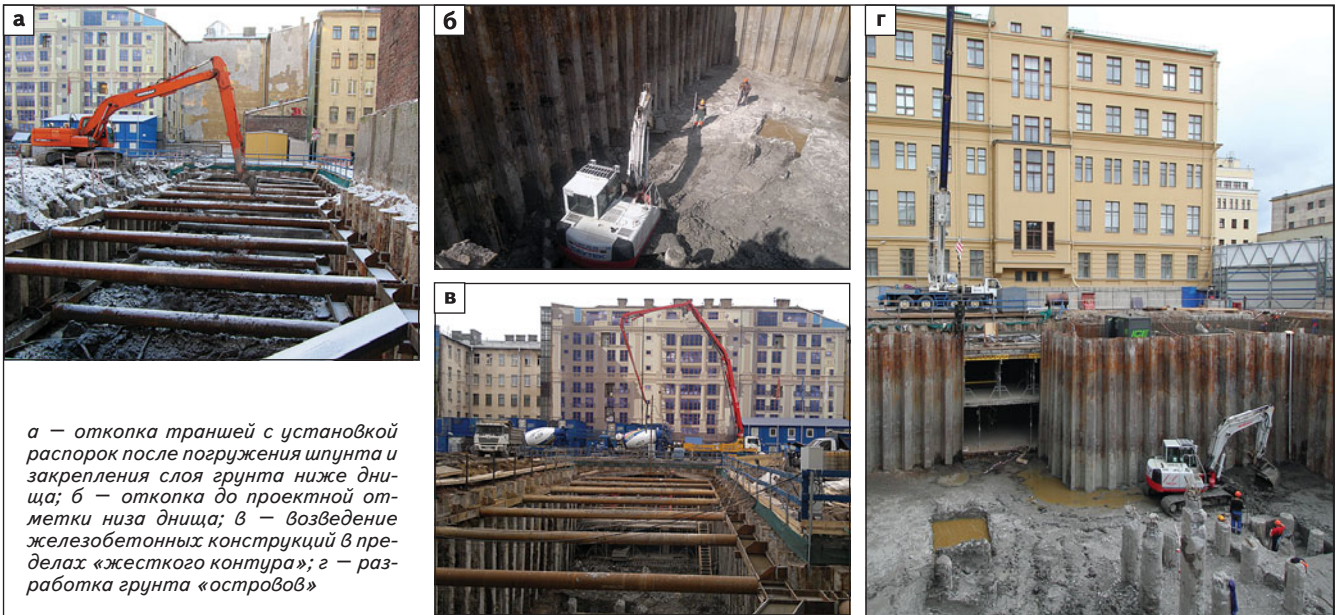


Рис. 8. Последовательность устройства котлована

Выполнение всех требований проекта, пооперационный контроль качества работ и геотехнический мониторинг позволили получить усиление заданных размеров с необходимыми характеристиками. Ведение работ по усилению фундаментов совпало по времени со снятием нагрузки на них вследствие разборки старых конструкций. Это выразилось в незначительном подъеме осадочных марок до 6 мм (см. рис. 5) в результате упругого разуплотнения. Дополнительные осадки фундаментов здания за весь период выполнения работ не превысили 5 мм [15].

Устройство распорных дисков из грунтоцемента для откопки глубоких котлованов

Для минимизации перемещений ограждения котлована необходима жесткая система распорных креплений, удерживающая ограждение котлована от перемещений. Наиболее эффективный способ — это устройство подземного объема «под защитой жесткого контура», предложенный специалистами института «Геореконструкция» [14]. Этот

способ заключается в устройстве траншей шириной 10–15 м под защитой шпунта и системы распорных креплений, образующих замкнутый контур по периферии подземного объема, в которых выполняются железобетонные конструкции будущего сооружения. Эти конструкции служат далее жестким контуром, воспринимающим давление от окружающего массива грунта и соседних зданий, под защитой которого ведется разработка грунта внутренней части котлована — так называемого острова.

Как показывают выполненные исследования, в условиях распространения слабых глинистых грунтов наибольшие перемещения ограждения котлована часто происходят ниже дна котлована, т. е. ниже того уровня, на котором есть возможность установить распорку. Следовательно, необходимо найти способ создания распорки до откопки котлована. Такую возможность предоставляет технология струйной цементации, позволяющая устроить слой закрепленного грунта на требуемой глубине. С помощью этой технологии становится

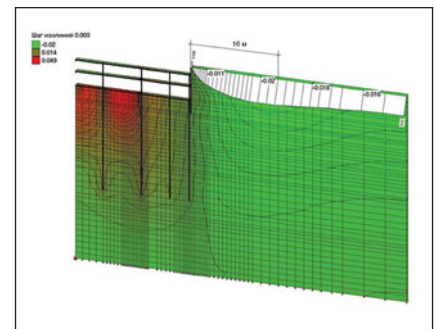


Рис. 9. Вертикальные деформации прилегающей территории, м, при устройстве подземной части здания под защитой «жесткого контура» (соседнее здание, расположенное на расстоянии 16 м, получает дополнительную осадку не более 20 мм)

возможным весьма простой способ устройства «жесткого контура»: ограждение траншей выполняют из короткого шпунта, который погружают всего на 3–4 м ниже проектной отметки дна котлована, а между двумя рядами шпунта ниже той же отметки устраивают слой закрепленного грунта толщиной порядка 2 м (рис. 6). Этот способ оказывается значительно дешевле технологии «стена в грунте», которая к тому же на ряде объектов Санкт-Петербурга была выполне-

на недолжным образом, и допущенный подрядчиком брак угрожал строительству объекта [18].

При устройстве больших по площади и массивных конструкций из грунтоцемента отмечалось снижение влажности вышерасположенных напластований грунтов, а также увеличение температуры, т. е. явления, связанные с процессами гидратации цемента.

В качестве примера рассмотрим устройство двухуровневой подземной парковки под 9-этажным многоквартирным жилым домом на Загородном просп. Надземная часть здания имеет П-образную форму, подземная часть — прямоугольную, с размерами 88×41,8 м. Для устройства подземного сооружения необходимо вскрытие котлована на глубину около 8,7 м от дневной поверхности. Здание возводится в условиях плотной застройки: соседние здания расположены на расстоянии 8–10 м от границ котлована, а одно из них вплотную примыкает к подземному сооружению.

В инженерно-геологическом отношении площадка строительства довольно типична для исторического центра города. Разрез участка под слоем техногенных отложений представлен последними озерно-морскими пылеватыми песками и супесями пластичными, озерно-ледниковыми суглинками текучими. Озерно-ледниковые и озерно-морские глинистые отложения, распространенные до глубины 18 м от поверхности, относятся к структурно-неустойчивым грунтам, способным при на-

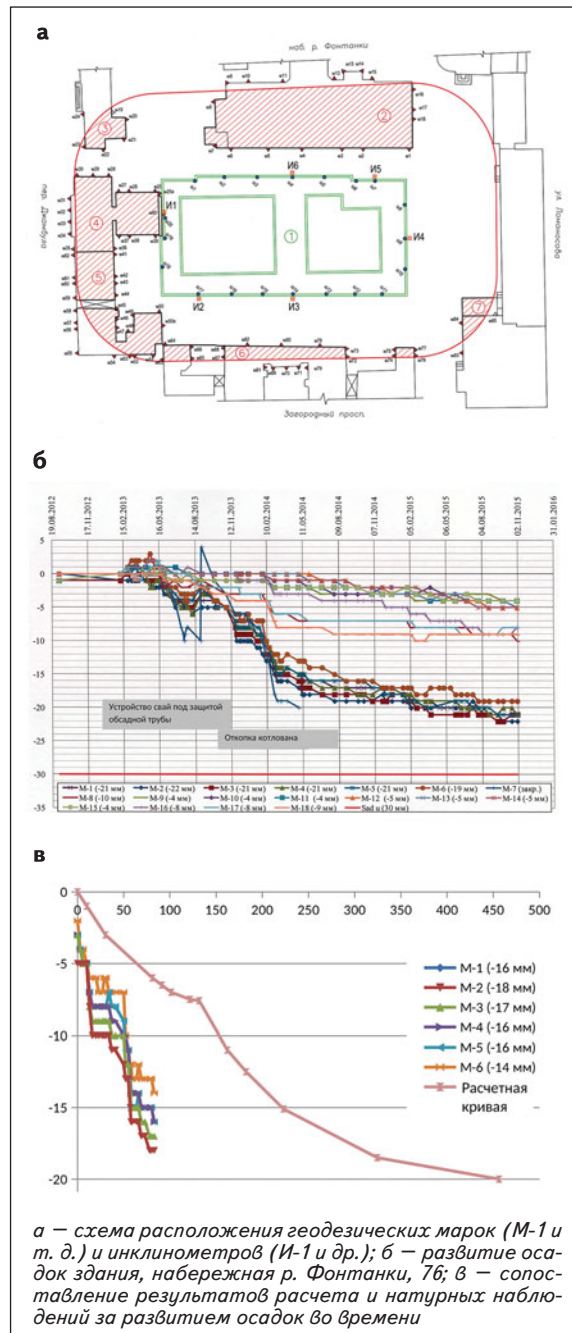


Рис. 10. Развитие осадок соседней застройки

рушении естественного сложения переходить из состояния твердообразного тела в состояние жидкообразной среды. Ниже залегают ледниковые отложения лужской морены — пески средней крупности, супеси пылеватые пластичные, суглинки тугопластичные и полутвердые, с валунами, гравием и галькой. На глубинах ниже 26 м отложения лужской

морены подстилаются межстадиальными озерно-ледниковыми суглинками текучепластичными, а на глубине 27,8–34,8 м вскрыта кровля ледниковых отложений московской морены, представленной суглинками полутвердой консистенции, гравийно-галечниковыми грунтами и супесями твердыми. Залегают грунты четвертичного комплекса на коренных отложениях верхнего протерозоя, состоящих из глин твердых, кровля которых вскрыта на глубине 30–37,7 м.

Гидрогеологические условия исследуемой территории характеризуются распространением двух водоносных горизонтов. Первый, безнапорный водоносный горизонт, приурочен к подошве техногенных образований (на глубинах 1,8–2,3 м), песчано-супесчаной толще озерно-морских отложений. Напорные воды второго водоносного горизонта (напор 1,7–5,6 м) формируются в мало-мощных прослоях песков, встречаемых на контакте озерно-ледниковых и моренных отложений на глубине 13,4–17,3 м.

В качестве ограждающей конструкции использовали металлический шпунт Ларсена Л5. Длину внутреннего ряда металлического шпунта (впоследствии извлекаемого) принимали из условия его заглубления до уровня низа слоя закрепленного грунта, т. е. 10,7 м, длину наружного ряда — из условия ограничения водопритока в котлован, или 12 м.

В проведенной серии расчетов выбрали следующие данные: толщина закрепленного по струйной технологии слоя грунта

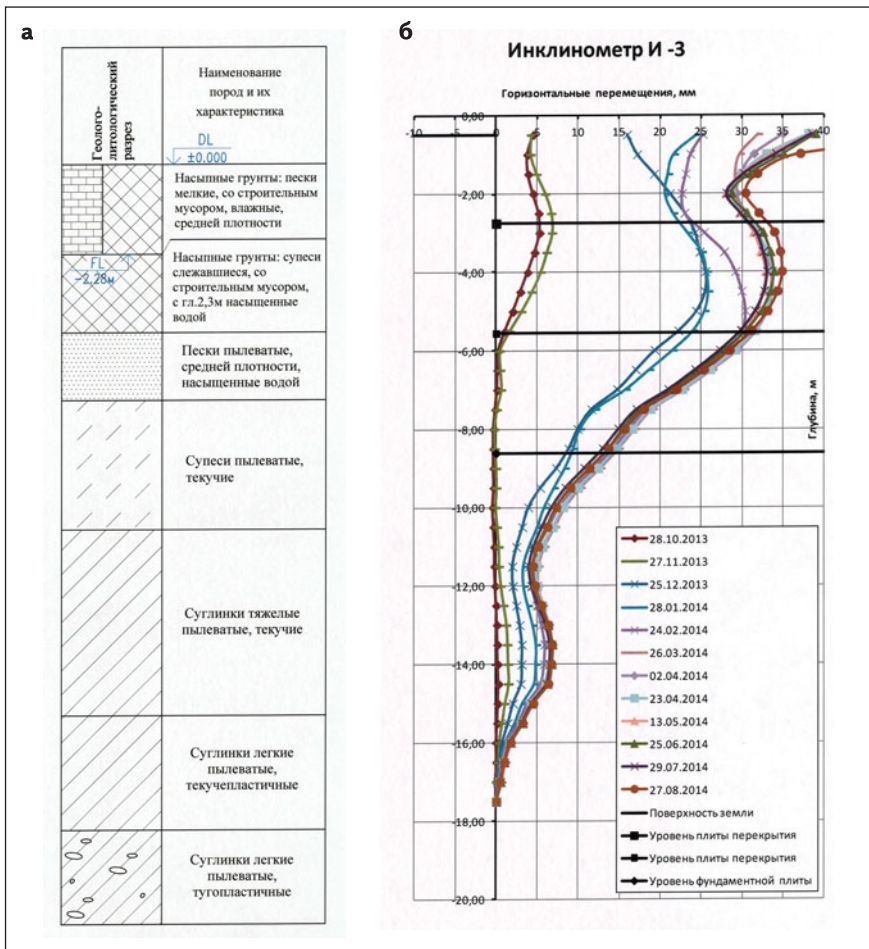


Рис. 11. Характеристика грунта (а) и результаты измерения горизонтального смещения массива грунта и ограждения котлована по инклинометру И-3 (б)

– 2 м; характеристики закрепленного слоя грунта, устраиваемого в диапазоне глубин 9–11 м, (см. таблицу). Обоснованность такого назначения характеристик подтверждена данными специальных исследований [15, 16].

Схема устройства траншей «жесткого контура» представлена на рис. 7.

Устройство подземного пространства осуществлялось в определенной последовательности (рис. 8):

- погружение шпунтового ограждения по границе «жесткого контура», устройство буронабивных свай;
- закрепление грунта ниже дна будущего котлована по струйной технологии в пределах «жестко-

го контура» на глубине ~8,7–10,7 м (толщиной 2 м);

- экскавация грунта в траншеях на глубину ~1,5 м; установка распорной системы из металлических балок на глубину ~1 м; экскавация грунта в траншеях до проектной отметки дна котлована (на глубину ~8,7 м); изготовление ростверка в пределах «жесткого контура»; в траншее у дома, непосредственно примыкающего к котловану, устанавливался дополнительный уровень распорок на глубине ~4,5 м;
- устройство конструкций «жесткого контура» из монолитных стен и колонн в уровне минус второго этажа и перекрытия над минус вторым этажом;
- устройство «жесткого конту-

ра» из монолитных стен и колонн в уровне минус первого этажа и перекрытия над минус первым этажом в пределах траншей, демонтаж металлической распорной системы;

- экскавация грунта в средних частях котлована (в «островах»), извлечение внутреннего ряда шпунта;
- изготовление монолитных конструкций подземных этажей в средних частях котлована.

Расчет сооружения выполнялся с учетом всех перечисленных этапов его устройства в программе «FEM models» с помощью вязкопластической модели, учитывающей реологические свойства грунта. При этом предполагалось, что работы по экскавации грунта в траншеях и устройству плиты ростверка в их пределах займут не более 8 мес, а полная экскавация котлована и устройство ростверка в средних частях будут завершены через 18 мес после начала разработки грунта в траншеях.

В результате полученная осадка прилегающей территории, достигаемая через четыре года после начала разработки котлована, по расчету составила 20 мм (рис. 9).

Горизонтальные смещения ограждения котлована по расчету не превышают 40 мм при разработке траншеи с одним уровнем распорных креплений и 20 мм – при двух уровнях распорок.

Из приведенных результатов расчета видно, что данный способ устройства подземного пространства вполне удовлетворяет условиям обеспечения безопасности соседней застройки. Суммарная осадка прилегающей территории от перемещения ограждения котлована и статического нагружения основания весом проектируемого здания составляет 20 + 2 = 22 мм, что не превышает предельно допустимой величины дополнительной осадки соседних зданий (30 мм).

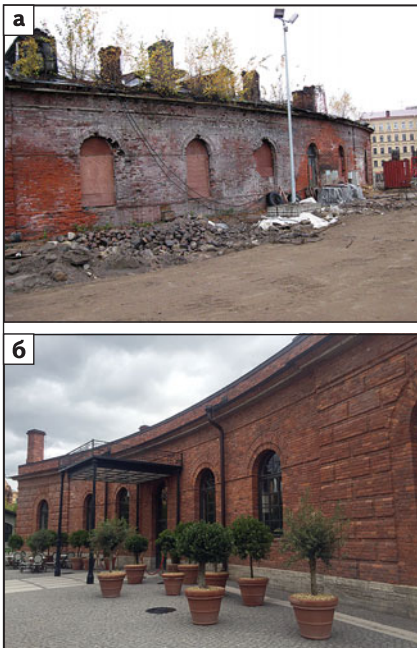


Рис. 12. Общий вид здания кузницы ансамбля «Новая Голландия» до (а) и после (б) реставрации

К тому же при этом варианте имеется «запас» 8 мм на случай возможных дополнительных перемещений зданий вследствие технологических воздействий во время производства работ. Как показали результаты мониторинга, развитие осадок окружающей застройки при устройстве котлована соответствовало расчетным ожиданиям (рис. 10) и не превысило 10–20 мм.

Горизонтальные перемещения в сторону котлована согласно показаниям инклинометров составили от 22,8 до 33,5 мм (для И-3, рис. 11). При этом наибольшие деформации происходили на глубине 5–6 м (деформации верхней части инклинометрической трубы во внимание не принимаются, поскольку обусловлены податливостью ее свободного конца).

Устройство нового заглубленного объема под зданием

При разработке проектов приспособления для современного использования объектов культурного наследия часто прихо-

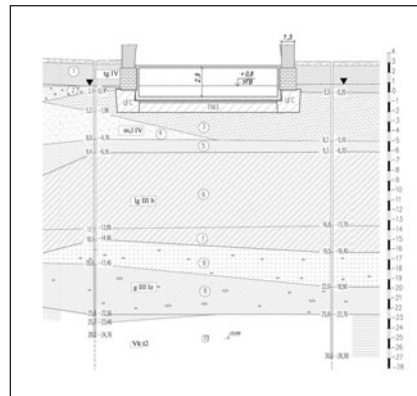


Рис. 13. Устройство подземного этажа под зданием-памятником

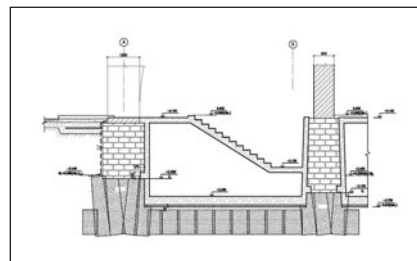


Рис. 14. Устройство грунтоцементной конструкции по технологии струйной цементации под зданием кузницы. Характерный разрез

дится сталкиваться с проблемой дефицита площадей для размещения пространств с новыми функциями, а также технических и обслуживающих помещений. При этом надстройка и пристройка недопустимы, поскольку искажают облик памятника. Следовательно, для того чтобы вернуть памятник к современной жизни, единственной возможностью остается освоение под ним подземного пространства. Именно такой путь развития был принят при возрождении Каменноостровского театра [13].

Устройство подземных объемов под историческим зданием сопряжено с существенными рисками. Прежде всего на каждом этапе работ необходимо обеспечить механическую безопасность здания. Вертикальные нагрузки должны быть надежно переданы на основание ниже планируемого уровня экскавации. Важно, чтобы

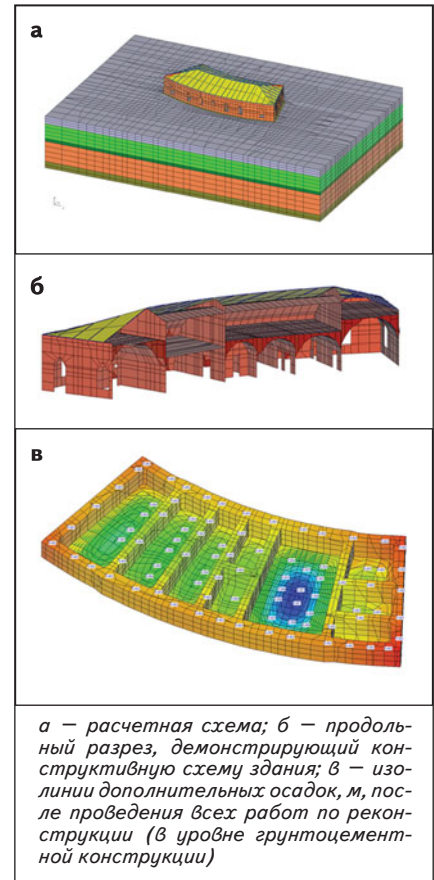


Рис. 15. Совместный расчет конструкций здания кузницы и ее основания при устройстве подземного объема

восприятие бокового давления грунта передавалось на ограждающие конструкции. В условиях высокого положения уровня подземных вод откопка подземного объема должна осуществляться под защитой противофильтрационного экрана, исключающего поступление воды по бокам и через днище. Следует отметить, что наибольшую сложность представляет собой именно разработка безопасного способа устройства подземного этажа. В связи с этим возникает потребность в применении такой технологии, которая позволяет до откопки в грунте под подошвой существующих фундаментов создавать стены и днище на требуемых глубинах с необходимыми характеристиками прочности и обладающие достаточной водонепроницаемостью.

Для решения задач устройства подземных объемов под историческими зданиями и памятниками весьма актуальным становится использование технологии струйной цементации.

В качестве примера приведем результаты устройства подземного этажа под небольшим зданием бывшей кузницы, входящей в ансамбль «Новая Голландия». Здание одноэтажное, кирпичное с мансардным этажом, без подвала, с несущими продольными и поперечными стенами и сводчатыми перекрытиями, в плане имеет вид сектора кольца (рис. 12). Расположено на расстоянии порядка 10 м от берега р. Мойки. Фундаменты здания бутовые ленточные, на деревянных лежнях и сваях. Для современного использования здания в качестве ресторана потребовалось создание дополнительного подземного объема под всем зданием глубиной от дневной поверхности 3,2 м (до уровня чистого пола) при глубине заложения исторических фундаментов 2,5–3,15 м. С учетом плиты днища глубина откопки составляла 3,7 м при уровне подземных вод на глубине около 2,5 м. Таким образом, требовалось устройство подземного объема на 0,55–1,2 м ниже подошвы существующих фундаментов и на 1,2 м ниже зеркала грунтовых вод.

Сложность поставленной задачи состоит в том, что на глубину до 8 м залегают техногенные и песчаные отложения с высокими коэффициентами фильтрации, а территория окружена водотоками с уровнем воды, как минимум, на 0,9 м выше необходимого уровня откопки (рис. 13). Следовательно, не может быть и речи о временном водопонижении на период откопки котлована. Необходим противифльтрационный контур по граням и днищу откапываемого объема.

Грунтоцементные элементы



Рис. 16. Вид грунтоцементной конструкции, изготовленной под подошвой бутового фундамента на деревянных лежнях и сваях (кузница, ансамбль «Новая Голландия»)

для создания водонепроницаемых стен и днища устраивали с помощью технологии струйной цементации в слое пылеватого песка (рис. 14). В ходе выполнения работ на площадке осуществляли непрерывный мониторинг, включающий геодезические наблюдения, отбор проб растворов и грунтоцемента, контроль последовательности и темпа работ и др. Вскрытие грунтов в здании началось через 4 мес после завершения работ по закреплению с повсеместной откопкой на глубину до 1,8 м. Затем локально были вскрыты опытные шурфы до проектных отметок понижения с целью контроля притока воды. Опытные откачки продемонстрировали отсутствие водопитока через замкнутый грунтоцементный контур, т. е. была создана противифльтрационная завеса.

По результатам испытаний проб грунтоцемента отмечался рост механических характеристик в зависимости от возраста. Так, предел прочности взятых образцов при сжатии возрастал от 5,1 до 13 МПа, а модуль деформации — от 1009 до 1830 МПа [19]. Вре-

мя набора прочности, а также вышеприведенные данные, введенные в расчетную модель, позволяют провести расчет по всем этапам производства работ, применяя программный комплекс «FEM models». Расчеты показали, что реализация проектного решения приведет к осадкам от изменения статических условий работы конструкций не более 7 мм (рис. 15).

Для обеспечения механической безопасности и сохранности памятника откопка подземного объема осуществлялась в такой последовательности: выполнялась разработка пионерного котлована на глубину до 1,8 м; устанавливались стальные конструкции усиления дверных проемов; откапывался грунт в пределах одного помещения до проектных отметок (см. рис. 14) с последующим устройством железобетонной фундаментной плиты, стен и перекрытия и т. д.

Согласно результатам мониторинга осадки в процессе ведения работ с учетом технологической составляющей не превысили 20 мм, что не привело к повреждению исторических конструкций (рис. 16) и не отразилось на их работоспособности.

Вывод

Натурными исследованиями доказано, что в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга технология струйной цементации позволяет формировать в грунте массивы грунтоцемента с механическими характеристиками, которые на два порядка выше, чем у исходного грунта, а после гидратации цемента и набора прочности приближаются к характеристикам мелкозернистого бетона. Возможность создания в основании без предварительной откопки конструкционного материала с гарантированными механическими параметрами делает технологию струйной цементации чрез-

вычайно эффективным инструментом для решения ряда сложных геотехнических задач [20]. Это позволяет применять ее для увеличения глубины заложения фундаментов исторических зданий, устройства подземных объемов под ними, создания распор-

ного диска, удерживающего опраждение котлована от смещения и препятствующего поступлению подземных вод в котлован. Проектирование грунтоцементных элементов должно основываться на совместных расчетах основания и сооружения,

усиленного грунтоцементными конструкциями, что становится возможным с помощью программы «FEM models». Реализация проекта должна включать в себя контроль качества, геотехнический мониторинг и сопровождение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смородинов М. И., Федоров Б. С. Устройство фундаментов и конструкций способом «стена в грунте». М. : Стройиздат, 1986. 216 с.
2. Лютов В. Н., Швецов Г. И., Куликов С. К. Исследование и анализ возможности использования современных струйных геотехнологий для укрепления лёссовых грунтов в условиях Западной Сибири // Ползуновский вестник. 2014. № 1. С. 95–100.
3. Мангушев Р. А., Осокин А. И. Геотехника Санкт-Петербурга. М. : АСВ, 2010. 264 с.
4. Pettit P. Jet grouting: the pace quickens // Civil Engineering. 1988. August. Pp. 65–68.
5. Ulitski V. M., Bogov S. G. Formation of piles with set strength characteristics // Grouting and Deep Mixing. Balkema, 1996. Pp. 773–776.
6. Зуев С. С., Маковецкий О. А., Хусаинов И. И. Применение струйной цементации для устройства подземных частей комплексов // Жилищное строительство. 2013. № 9. С. 10–14.
7. Безрук В. М. Теоретические основы укрепления грунтов цементами. М. : Автостройиздат, 1956. 248 с.
8. Гончарова Л. В. Основы искусственного улучшения грунтов (техническая мелиорация грунтов) / под ред. В. М. Безрука. М. : Изд-во МГУ, 1973. 376 с.
9. Богов С. Г., Зуев С. С. Опыт применения струйной технологии для закрепления слабых грунтов при реконструкции здания по ул. Почтамтская в Санкт-Петербурге // Материалы конф., посвященной 100-летию со дня рождения Б. И. Долматова. СПб : СПбГАСУ, 2010. С. 80–87.
10. Богов С. Г. Применение цементных растворов для струйной технологии закрепления грунтов с учетом их реологических свойств // Гидротехника. 2013. № 4. С. 84–86.
11. Ван Импе В., Верастеги Флорес В. Д. Проектирование, строительство и мониторинг насыпей на шельфе в условиях слабых грунтов: пер. с англ. / под ред. В. М. Улицкого, А. Б. Фадеева, М. Б. Лисюка. СПб : НПО «Геореконструкция-Фундамент-проект», 2007. 168 с.
12. Гауф В. А. Разработка и совершенствование системы промывки дополнительных стволов из эксплуатационных скважин // Известия вузов. Серия: Нефть и газ. 2001. № 4. С. 34–38.
13. Шашкин А. Г. Проектирование зданий и подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. М. : Академическая наука – Геомаркетинг, 2014. 352 с.
14. Шашкин А. Г., Шашкин К. Г. Подземное строительство в Санкт-Петербурге: краткий обзор технических решений // Жилищное строительство. 2016. № 9. С. 15–22.
15. Богов С. Г., Запелалов И. А. Исследование свойств инъекционных растворов на основе цемента для качественного закрепления грунтов // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2000. № 2. С. 2–8.
16. Богов С. Г. Опыт усиления фундаментов старых зданий с использованием струйной технологии // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2007. № 3. С. 28–32.
17. Проектирование и строительство подземной части нового здания (второй сцены) Государственного академического Мариинского театра: сб. науч.-техн. статей / под ред. В. А. Ильичева, Р. А. Мангушева и А. П. Ледяева. СПб : СПбГАСУ, 2011. 192 с.
18. Шашкин А. Г., Волобой С. А., Глыбин Л. А., Букатов А. М., Богов С. Г. Проблемы гидроизоляции подземных сооружений (случай из практики) // Геотехника. 2017. № 1. С. 10–19.
19. Богов С. Г. Формирование заглубленных объемов в бесподвальных исторических зданиях в условиях слабых грунтов Санкт-Петербурга // Жилищное строительство. 2016. № 4. С. 60–64.
20. Хасин М. Ф., Малышев Л. И., Бройд И. И. Струйная технология укрепления грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1984. № 5. С. 10–12.

REFERENCES

1. Smorodinov M. I., Fedorov B. S. *Ustroystvo fundamentov i konstruktsiy sposobom «stena v grunte»* [The foundations and structures by way of "wall in soil"]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. 216 p. (In Russian).
2. Lyutov V. N., Shvetsov G. I., Kulikov S. K. Research and analysis of using modern jet geotechnologies for strengthening of loess soils in conditions of Western

- Siberia. *Polzunovskiy vestnik*, 2014, no. 1, pp. 95–100. (In Russian).
3. Mangushev R. A., Osokin A. I. *Geotekhnika Sankt-Peterburga* [Geotechnical Engineering of Saint Petersburg]. Moscow, ASV Publ., 2010. 264 p. (In Russian).
 4. Pettit P. Jet grouting: the pace quickens. *Civil Engineering*, 1988, August, pp. 65–68.
 5. Ulitski V. M., Bogov S. G. Formation of piles with set strength characteristics. *Grouting and Deep Mixing*. Balkema, 1996, pp. 773–776.
 6. Zuev S. S., Makovetskiy O. A., Khusainov I. I. The use of jet grouting for the underground parts of the complexes. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2013, no. 9, pp. 10–14. (In Russian).
 7. Bezruk V. M. *Teoreticheskie osnovy ukrepleniya gruntov tsementami* [Theoretical basis of soil consolidation cements]. Moscow, Avtostroyizdat Publ., 1956. 248 p. (In Russian).
 8. Goncharova L. V. *Osnovy iskusstvennogo uluchsheniya gruntov (tekhnicheskaya melioratsiya gruntov)* [Fundamentals of artificial improvement of soils (technical reclamation of soils)]. Moscow, MGU Publ., 1973. 376 p. (In Russian).
 9. Bogov S. G., Zuev S. S. The experience of using inkjet technology for stabilization of soft soils during reconstruction of the building on Pochtamskaya street in St. Petersburg. *Materialy konf., posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya B. I. Dolmatova*. SpbGASU Publ., 2010, pp. 80–87. (In Russian).
 10. Bogov S. G. The use of cement mortars for the inkjet technology of grouting, taking into account their rheological properties. *Gidrotekhnika*, 2013, no. 4, pp. 84–86. (In Russian).
 11. Van Impe V., Verastegi Flores V. D. *Proektirovanie, stroitel'stvo i monitoring nasypey na shel'fe v usloviyakh slabyykh gruntov* [Design, construction and monitoring of embankments on the shelf under conditions of soft soils]. St. Petersburg, NPO «Georekonstruktsiya-Fundamentproekt» Publ., 2007. 168 p. (In Russian).
 12. Gauf V. A. The development and improvement of the flushing system of extra barrels of production wells. *Izvestiya vuzov. Seriya nef' i gaz*, 2001, no. 4, pp. 34–38. (In Russian).
 13. Shashkin A. G. *Proektirovanie zdaniy i podzemnykh sooruzheniy v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh Sankt-Peterburga* [The design of buildings and underground structures in difficult engineering-geological conditions of Saint Petersburg]. Moscow, Akademicheskaya nauka – Geomarketing Publ., 2014. 352 p. (In Russian).
 14. Shashkin A. G., Shashkin K. G. Underground construction in Saint Petersburg: a brief overview of the technical solutions. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2016, no. 9, pp. 15–22. (In Russian).
 15. Bogov S. G., Zapevalov I. A. Study of properties of solutions for injection based on cement for quality of grouting. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2000, no. 2, pp. 2–8. (In Russian).
 16. Bogov S. G. The experience of strengthening the foundations of the old buildings using inkjet technology. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2007, no. 3, pp. 28–32. (In Russian).
 17. *Proektirovanie i stroitel'stvo podzemnoy chasti novogo zdaniya (vtoroy stseny) Gosudarstvennogo akademicheskogo Mariinskogo teatra* [Design and construction of the underground part of the new building (second stage) of the State academic Mariinsky theatre]. Sb. nauch.-tekhn. statey. St. Petersburg, SpbGASU Publ., 2011. 192 p. (In Russian).
 18. Shashkin A. G., Voloboy S. A., Glybin L. A., Bukatov A. M., Bogov S. G. The problem of waterproofing underground structures (case study). *Geotekhnika*, 2017, no. 1, pp. 10–19. (In Russian).
 19. Bogov S. G. The formation of the buried volume in the demon of the historical buildings under conditions of soft soils of Saint Petersburg. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2016, no. 4, pp. 60–64. (In Russian).
 20. Khasin M. F., Malyshev L. I., Broid I. I. Jetgrouting technology for soils. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 1984, no. 5, pp. 10–12. (In Russian).

Для цитирования: Богов С. Г. Применение технологии струйной цементации для освоения подземного пространства Санкт-Петербурга // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 12. С. 31–43.

For citation: Bogov S. G. Application of Jet Grouting for Development of Underground Areas in St. Petersburg. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2017, no. 12, pp. 31–43. (In Russian). ■

ЖУРНАЛ «ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО» ИНДЕКСИРУЮТ:

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА
eLIBRARY.RU

Russian Science Citation
Index (RSCI) на платформе
Web of Science

 **ULRICHSWEB™**
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

САЙТ ЖУРНАЛА «ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»: www.pgs1923.ru