
**ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ/BASES AND FOUNDATIONS,
UNDERGROUND STRUCTURES**

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1>

EDN: LHDPFG

**ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ СТРУЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО СТАБИЛИЗАЦИИ
ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ**

Научная статья

Богов С.Г.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0003-4048-6589;¹ ООО «ИСП Георекострукция», Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (s.bogov[at]georec.spb.ru)

Предложена: 06.04.2026; Принята: 24.06.2026; Опубликовано: 21.07.2026

Аннотация

В статье произведена оценка повышения несущей способности грунтовых оснований фундаментов усиленных по технологии jet grouting. Цель работы — рассмотреть варианты повышения несущей способности фундаментов зданий устройством грунтоцементных элементов, ограничив их деформаций величиной сдвиговой осадки.

Оценка улучшения деформационных свойств грунтов строительных площадок позволила выявить источники эффективности, как временной, так и экономической т.е снижая количество буровых скважин и непродуктивный расход цементного раствора.

Контроль смещений массива окружающего грунта с помощью инклинометрических измерений позволяет в режиме реального времени производить не только при вскрытии котлована, но и оценку эффективности проводимого закрепления, а также фиксировать нарушения в технологии.

Ключевые слова: технология jet grouting, усиление фундаментов, грунтоцементный элемент, грунтовая инклинометрия.

**AN EVALUATION OF THE USE OF JET GROUTING TECHNOLOGY FOR STABILISING GROUND
FOUNDATIONS**

Research article

Bogov S.G.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0003-4048-6589;¹ ISP Georeconstruction LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (s.bogov[at]georec.spb.ru)

Suggested: 06.04.2026; Accepted: 24.06.2026; Published: 21.07.2026

Abstract

The article evaluates the increase in the bearing capacity of ground foundations reinforced with jet grouting technology. The aim of the study is to examine options for increasing the bearing capacity of building foundations by installing ground-cement elements, limiting their deformation to the amount of distortion settlement.

An assessment of the improvement in the deformation properties of grounds at construction sites has made it possible to identify sources of efficiency, both in terms of time and cost, namely by reducing the number of boreholes and the wasteful consumption of cement mixture.

Monitoring displacements in the surrounding soil using ground inclination measurement makes it possible to assess the effectiveness of the stabilisation work in real time, not only during the excavation of the pit but also to identify any deviations from the procedure.

Keywords: jet grouting technology, foundation reinforcement, ground-cement element, ground inclination measurement.

Введение

Для зданий исторической застройки Санкт-Петербурга существует ограничения по значениям дополнительных осадок 5...20 мм. Скорость развития деформаций («вековые осадки») на объектах в историческом центре при том, что в состоянии системы «основание — фундамент» не вмешиваются иные факторы, может составлять порядка 1,5 мм/год [1]. Федеральные законы 384-ФЗ и 73-ФЗ требуют проведения работ с соблюдением максимальной безопасности. Значимыми факторами риска, оказывающими влияние на деформации зданий на слабых грунтах, как при новом строительстве, так и реконструкции, являются технология фундирования и организационная последовательность устройства. Для зданий на слабых грунтах необходимо повышать эффективность проведения строительных работ нулевого цикла. Предпочтительной является технология, которая исключает нарушение структуры этих грунтов [2]. Значимость усиления фундаментов в условиях пылевато-глинистых грунтов связана с тем, что грунты оснований зданий уже перегружены или находятся в состоянии предельного равновесия. Поэтому важна оценка нагрузок, как по первой группе предельных состояний, так и введение ограничения относительной неравномерности накопленных деформаций, для зданий ОКН с несущими стенами из кирпичной кладки $(\Delta S/L)_{ad u}=0,0020$.

Необходимость реконструкции исторической застройки, бездефектное устройство заглубленных и подземных сооружений является актуальной проблемой строительства. Технологии стабилизации грунтов оснований ниже подошв фундаментов зданий на определяемую расчетом глубину позволяют решать эти многофакторные проблемы. Проведение цементации из скважин под подошвой фундаментов с высокими давлениями приводит к подъемам и далее к просадкам фундаментов из-за явлений клакажа и гидроразрывов. Нужно учитывать, что в наклонных скважинах в результате ускоренного осаждения частиц и седиментационного расслоения цементного раствора снижается качество закрепления из-за проявления эффекта Бойкотта.

С помощью струйной технологии закрепления можно реализовать эффективные варианты усиления фундаментов — максимально используя свойства оснований за счет ограничения боковых деформаций грунта и развития значительных сил трения грунта о грунт при боковых смещениях грунтов ниже грунтоцементных элементов (ГЦЭ). Эффективность зависит от формы и размеров армирующих элементов, а также их глубины. Несущая способность основания определяется прочностью на сжатие созданных конструкций и несущей способностью подстилающих грунтов [3]. Расчетное обоснование усиления позволяет влиять на показатели эффективности технологии: глубины заложения фундаментов для увеличения допускаемой нагрузки, устройства подземного объема под зданием, а также для устройства днищ котлованов. Использование конических свай в основании бутовых фундаментов исторических зданий показало, что максимальное уплотнение слоев грунтов оснований приуроченных к верхней части и имеющих очертание полуцилиндрической формы, а в слабых грунтах их форма была трапецевидной с сужением книзу [4].

Актуальной задачей является систематизация и оценка эффективных решений усиления грунтов в самостоятельном виде. Для определения деформаций оснований фундаментов в настоящее время широко применяются методы численного 2D-моделирования, при котором грунт основания полностью заменяется модифицированным материалом, что не экономично. Выбор модели структурного геомассива, выполненного по струйной технологии, должен определяться в сравнении с фактическими данными [5]. Методы аналитических решений задач повышения несущей способности и подбора оптимальных параметров усиления в геотехнической практике используются реже [6], [7]. Для оптимизации варианта усиления по струйной цементации оснований, после выбора и расчета осадки, необходимо 3D-моделирование усиления фундаментов, особую значимость имеет проведение статических испытаний слабых грунтов площадок опытными jet сваями. Контроль технологии и оценка эффективности расхода цемента должен осуществляться не только с помощью испытаний кернов, но и инклинометрических измерений.

Развитие методов струйной технологии в геотехнической практике

Технология jet grouting была запатентована в Японии как «Метод химического перемешивания свай» (ССР), который является предшественником технологии Jet-1. Со временем, при совершенствовании оборудования были разработаны технология Jet-2 [8], технология Jet-3, а также методы SSS-MAN, Rodin Jet Pile (RJP) и Metro Jet System (MJS) [9]. Для увеличения размеров ГЦЭ были внедрены технические усовершенствования, такие как технология Super Jet, технология X-Jetting, технология Rodin Jet Pile (RJP), метод Twin-Jet и технология Metro Jet system (MJS) (рис. 1), которые применяются в Китае, Ю. Корее, Японии.

В нашей стране данная технология известна больше как струйная и широко используется на стройплощадках в регионах, сложенных слабыми грунтами. По технологии Jet-1 выполняются вертикальные и наклонные скважины, она применяется для усиления фундаментов зданий, а технология Jet-2 для устройства ограждений котлованов и ПФЗ, в т.ч. нижних распорок. Имеются примеры использования технологии Jet-2 для закрепления грунтов оснований фундаментов зданий [10].

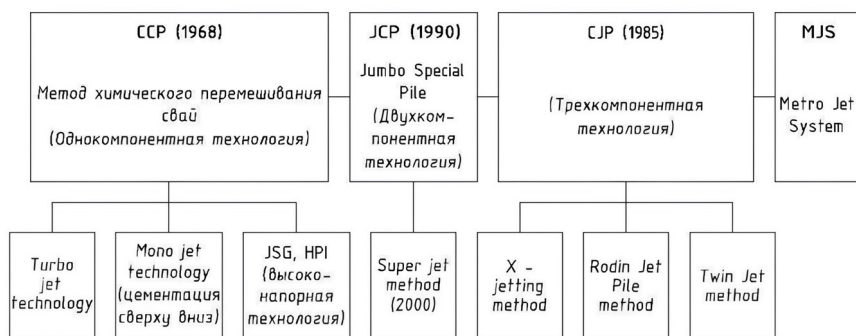


Рисунок 1 - Схема методов закрепления по технологии jet grouting

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1.1>

Струйная технология в геотехнической практике усиления слабых грунтовых оснований

Повышение несущей способности ленточных фундаментов за счет увеличения ширины и глубины передачи нагрузки

С целью выявления вариантов эффективного усиления ленточных фундаментов на естественном грунтовом основании закрепление следует рассмотреть проведение закрепления не тотально под подошвой, а путем устройства

закрепления грунта в виде отдельных рядов ГЦЭ, выполненных по струйной технологии (рис. 2). В настоящее время у струйной технологии усиления нет регламентированных вариантов усиления и методики их расчета [11], поэтому представляется целесообразным рассмотреть часто используемые и применительно к ним методы расчета.

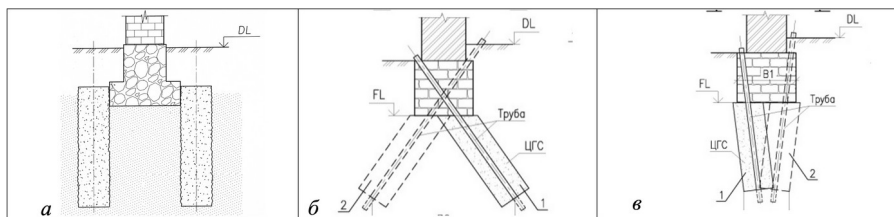


Рисунок 2 - Схемы усиления ленточных фундаментов с помощью рядов ГЦЭ:

a – вертикальные; *б, в* – наклонные; 1, 2 – грунтоцементные jet элементы

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1.2>

Ограничения относительной неравномерности деформаций фундаментов здания, приводящих к трещинам, делают возможным применение различных вариантов в одном здании.

а. Повышение несущей способности фундаментов за счет увеличения глубины передачи нагрузки

Нагрузка от фундамента усиленного вертикальными стенками передается на грунт, как по их боковым поверхностям, так и в уровне нижнего торца стенок рисунка 3. Между вертикальными стенками в работу включается заключенный между ними массив грунта (грунтовое ядро) только при определенном расстоянии [12]. При этом сопряженный со стенками фундамент работает с ними как единая конструкция, и это зависит от вида грунтов основания, ширины и глубины фундамента заложения. С увеличением расстояния между вертикальными стенками сначала возрастает его несущая способность, после чего происходит снижение до постоянного значения. По боковой поверхности реализуются силы сопротивления, максимальные значения которых соответствуют осадке »4мм. Вертикальные напряжения в плоскости на уровне торца стенок распределяются неравномерно — наибольшие под торцами стенок, а наименьшие в промежутке между стенками и за их пределами. С возрастанием нагрузки эти напряжения линейно возрастают наиболее интенсивно под торцами стенок и меньше в промежутке между стенками. Доля нагрузки N , воспринимаемая боковой поверхностью порядка 10% от общей нагрузки. Расчетная ширина фундамента (м): $B = b + 2D_{ГЦЭ} + 2d \cdot \operatorname{tg} \alpha$.

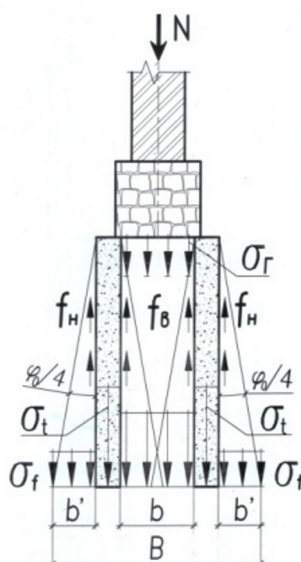


Рисунок 3 - Схема взаимодействия ленточного фундамента и jet элементов

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1.3>

Несущая способность [12] нового фундамента равна:

$$N = [b + 2a(K - 1)] \cdot R = [b + 2D_{ГЦЭ} + 2d \cdot \operatorname{tg} \alpha + 2D_{ГЦЭ}(K - 1)] \cdot R \quad (1)$$

где $a \cong D_{ГЦЭ}$ — ширина вертикальных элементов, м;

R — расчетное сопротивление грунта основания, кПа;

K — коэффициент увеличения напряжений под торцами вертикальных стен 1,5...4,8;

b — расстояние между стенками, м;

d — глубина заложения фундамента от планировочной отметки, м;

α — угол рассеивания напряжений, град.: $\alpha = \varphi \cdot \psi = \varphi \cdot \frac{(3,8+2,2d)}{(5+7d)}$.

Расчетное сопротивление по грунту фундаментов: $R = P_g = m (m_R R_F + u \sum m_f f n h_i)$.

Допускаемая нагрузка на фундамент [13]: $P = \frac{P_g}{k_g}$.

где $k_g=1,25 \dots 1,4$ — коэффициент безопасности по грунту.

Метод расчета по деформациям фундаментов мелкого заложения с вертикальными стенками из ГЦЭ основывается на принципе суперпозиции, в соответствии с которым определяются величины осадок верхнего и нижнего слоев с их сложением:

$$S = S_b + S_n \quad (2)$$

где S — суммарная осадка фундамента, мм; S_b — осадка фундамента от сжатия верхнего слоя грунта основания; S_n — осадка фундамента от деформации нижнего слоя грунта, залегающего под подошвами вертикальных стенок фундамента. При наличии слабого подстилающего слоя в основании вертикальных стенок величину осадок следует ограничивать значением S_b , что снижает эффективность способа усиления.

б. *Повышения несущей способности фундаментов за счет увеличения ширины и глубины передачи нагрузки*

Вариантом усиления фундаментов для увеличения нагрузки является устройство «козловых» как и буроналивных свай, так и столбов из закрепленного грунта (рис. 2б). Под фундаментами столбы закрепленного грунта выполняются с двух сторон от фундамента под углом от вертикали. Столбы выполняются вплотную или с некоторым расстоянием между наружными поверхностями.

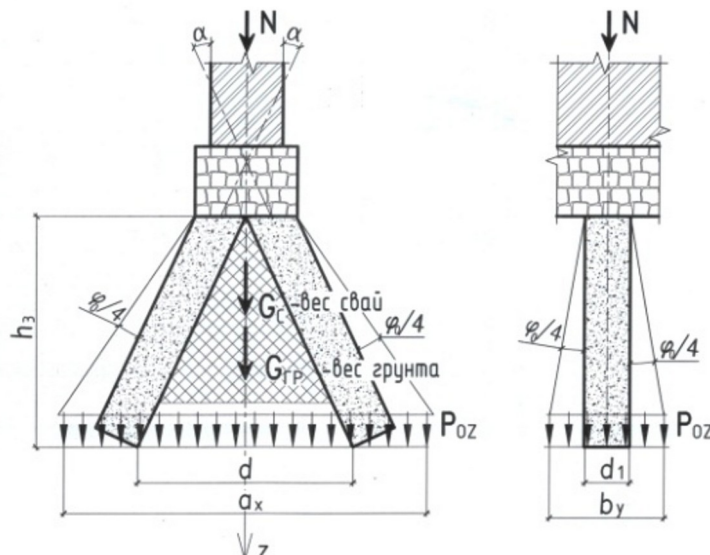


Рисунок 4 - Расчетная схема усиления ленточного бутового фундамента

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1.4>

Применительно к струйной технологии расчет осадки производится как условного заглубленного фундамента в соответствии с расчетной схемой рисунка 4 по [14] на нагрузку $P_c + G_{jcb} + G_{gp}$, в которой условный фундамент заглублен на величину h_3 . Образующие несущего объема грунта составляют с гранью ГЦЭ угол равный $\varphi/4$, согласно А.А. Луга. Расчетная схема представляется в виде условного фундамента, заглубленного на величину h_3 и передающего внешнюю нагрузку на грунтовое основание [14]. Размеры подошвы определяются с учетом передачи давления наружными гранями на грунт. С ростом нагрузки грунт, расположенный между сваями, дополнительно уплотняется до предельной величины и перемещается вместе с телом свай. Деформации происходят в объеме грунта, находящегося со стороны наружных граней, и в основании под грунтовым ядром. Вертикальная нагрузка N передается ГЦЭ, как вглубь основания, так и в распор. Эпюра распределения давления по боковой поверхности ГЦЭ — козловых свай имеет форму трапеции с большим основанием у острия свай. При сопротивлении свай грунтовое ядро оказывает расклинивающее действие на сваи. Очевидно, что с увеличением h_3 растет и вес вовлеченного грунта G_{gp} . Размеры одиночного условного фундамента: $a_x = d + 2h_3 \tan \frac{\varphi_0}{4}$; $b_y = nD_{ГЦЭ} + 2h_3 \tan \frac{\varphi_0}{4}$; n — число ГЦЭ на 1 метр длины фундаментов.

$$\sigma_{zp,0} = \frac{N + G_{jcb} + G_{gp}}{a_x \cdot b_y} = \frac{N + G_{jcb} + G_{gp}}{(d + 2h_3 \tan \frac{\varphi_0}{4}) \cdot (nD_{ГЦЭ} + 2h_3 \tan \frac{\varphi_0}{4})} \quad (3)$$

С ростом угла наклона α эффективность и качество закрепления под подошвой широких фундаментов снижается.

в. *Увеличение ширины передачи нагрузки*

Для увеличения допустимой нагрузки на ленточный фундамент применяют варианты усиления путем устройства рядов наклонных стенок. Без привязки к технологии изготовления автор [15] определил, что несущая способность нового фундамента существенно зависит от геометрических размеров распорных стенок, угла их наклона и глубины (рис. 4в). Для расчета несущей способности по первой группе предельных состояний усиленного грунтового основания $P_{пр}$ использовалась формула К. Терцаги:

$$P_{пр} = P_{\gamma} + P_q + P_c = \gamma b^2 N_{\gamma} + qb N_q + cb N_c \quad (4)$$

Методика построения многоугольника сил была разработана и использована для определения коэффициентов несущей способности N_{γ} , N_q , N_c . Установлено, что работа фундамента на грунтовом основании усиленном распорными стенками существенно зависит от геометрических параметров стенок: угла наклона стенок, глубины стенок l_c [15]. Методы сооружения стенок не носили практический характер. Создание столбов закрепленного грунта с двух сторон фундамента параллельно его оси позволяет струйная технология.

На этой основе и применительно к слабым грунтам с углом внутреннего трения от $\varphi = 14^\circ$ до $\varphi = 29^\circ$ для оценки роста коэффициентов несущей способности грунтового основания нами была проведена серия расчетов. Варьировались величины n — отношении длины стенки l_c к ши-рине подошвы фундамента b при ее вертикальном положении и под углом к вертикали 15° .

Из приведенных графиков рисунка 5 видно, что величина $P_{пр}$ при вертикальном расположении стенок усиления растет практически линейно в зависимости от роста угла внутреннего трения. При наклонном положении стенок даже в условиях слабых грунтов начиная с угла внутреннего трения $\varphi = 14 \dots 29^\circ$ величины N_{γ} и N_q возрастают от 4 до 10 раз, а N_c от 6,5 до 15 раз.

Для слабых грунтовых оснований наглядно продемонстрировано преимущество усиления фундаментов путем устройства наклонных стенок.

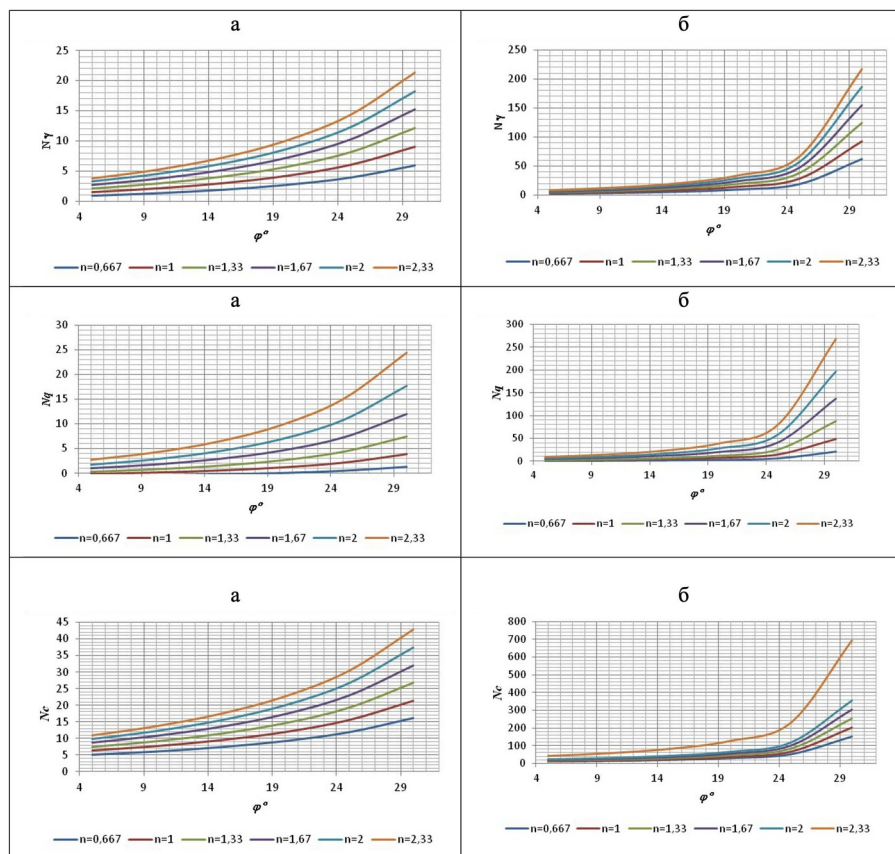


Рисунок 5 - Увеличение коэффициентов несущей способности N_{γ} , N_q и N_c однослойного грунтового основания от изменения угла внутреннего трения грунта – φ и $n = l_c/b$:
а – при вертикальном; б – при наклонном положении стенок $\alpha = 15^\circ$

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1.5>

Расчет несущей способности объединенной конструкции стенок из наклонных ГЦЭ и с усиливаемым фундаментом выполняется как для сваи без учета работы острия [16]:

$$F_d = A \cdot \cos \alpha \left\{ \left[k_t^{\frac{1-\xi}{2}} \cdot (p_H + c \cdot \operatorname{ctg} \varphi) - c \cdot \operatorname{ctg} \varphi \right] \cdot (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi) + c \right\} =$$

$$\pi D_{\text{ГЦЭ}} l_c \cdot n \cdot \cos \alpha \left\{ \left[k_t^{\frac{1-\xi}{2}} \cdot (p_H + c \cdot \operatorname{ctg} \varphi) - c \cdot \operatorname{ctg} \varphi \right] \cdot (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi) + c \right\} \quad (5)$$

где $p_H = \frac{2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi}{1+\xi} - c \cdot \operatorname{ctg} \varphi + p_0$; $\xi = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$; $k_{t=0} = \frac{0,5 \cdot E_{\text{упр}}}{E_{\text{упр}} / E_{\text{пл}} (1-2\nu) \cdot [p_H(1+\nu) - p_0] + (1+\nu) \cdot (p_H - p_0)}$;

p_0 — природное горизонтальное давление грунта на глубине h ; α — угол наклона ГЦЭ к вертикали; A — площадь внешней боковой поверхности ряда ГЦЭ; $E_{\text{упр}}$ — модуль упругости грунта; ν — коэффициент Пуассона; n — число ГЦЭ на 1 метр длины фундаментов.

Значимый вклад в увеличение несущей способности оказывают параметры элементов усиления: площадь боковой поверхности и угол наклона ГЦЭ.

Численное моделирование НДС грунта основания на различных этапах реконструкции

Расчет осадки фундаментов зданий при давлениях под подошвой фундаментов больше расчетного сопротивления грунта выполняется с использованием нелинейной механики грунтов. Проведенное нами численное 3D-моделирование усиления ленточного фундамента на слабом грунтовом основании (ИГЭ1: песок пылеватый $\varphi = 25^\circ$ $c = 1 \text{ кПа}$; $E = 10 \text{ МПа}$, ИГЭ2: суглинок $\varphi = 7^\circ$ $c = 5 \text{ кПа}$; $E = 4 \text{ МПа}$) показало, что косвенное усиление основания может фактически локализовать области предельного состояния под фундаментом в пределах достигнутых до усиления глубин. В результате, при дополнительном нагружении основания грунт от суммарной нагрузки может работать в пределах линейной стадии [17]. Моделирование и расчет дополнительной осадки здания был выполнен в программном комплексе "FEM models" с использованием вяз-копластической модели грунта. Численное моделирование проводилось в три этапа: на первом моделировалось природное напряженное состояние массива грунта, на втором воспроизводилось напряженно-деформированное состояние основания от существующих нагрузок, на третьем определялось напряженно-деформированное состояние основания при увеличении нагрузок на фундаменты здания после создания грунтоцементных столбов усиления. Расчетная схема задачи приведена на рисунки 6.

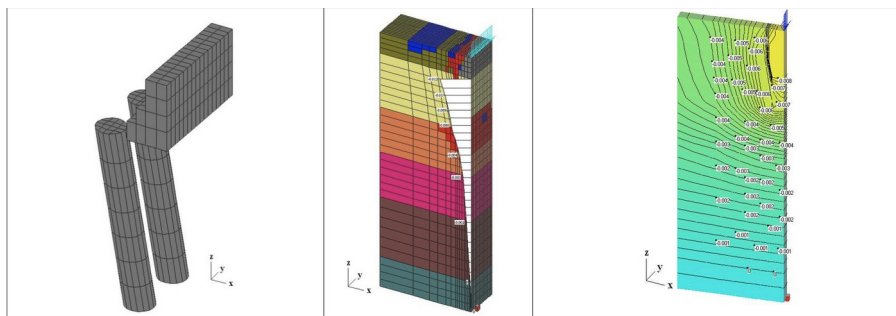


Рисунок 6 - Схема численного моделирования усиления фундамента несопряженными наклонными ГЦЭ в условиях многослойного основания

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1.6>

Оптимизация варианта усиления зависит от геотехнических условий, в котором выполняются ГЦЭ, ширины подошвы фундамента и нагрузок, глубины расположения слабого подстилающего слоя.

Таблица 1 - Оценка применения вариантов усиления с помощью ГЦЭ

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1.7>

№ п/п	Наименование работ		Вариант а ($b \approx D_{\text{ГЦЭ}}$)	Вариант б ($b \leq 2D_{\text{ГЦЭ}}$)	Вариант в ($b \geq 2D_{\text{ГЦЭ}}$)
1	Увеличение нагрузки на фундамент				
	слабый грунт подстилающего слоя	да	-	+	+
		нет	+	+	+
2	Устройство подвальных помещений				
	высокий уровень подземных вод	да	+	-	+
		нет	+	-	+
3	Усиление оснований		+	+	+

№ п/п	Наименование работ	Вариант а ($b \approx D_{ГЦЭ}$)	Вариант б ($b \leq 2D_{ГЦЭ}$)	Вариант в ($b \geq 2D_{ГЦЭ}$)
	деформированных фундаментов			
4	Технологическая осадка	-	-	-

На площадках реконструкции для зданий исторической застройки существует ограничение по значениям дополнительных осадок. Поэтому в условии залегания слабых грунтов целесообразно увеличив долю нагрузки передаваемой по боковой поверхности и ограничить передачу нагрузки на подстилающие слои по острию.

При расчете осадки свайных фундаментов сдвиговая осадка используется как один из важных параметров. Ф.К. Лапшин (1979) установил, что величина сдвиговой осадки $S_{сдвиг}$ (мм) зависит от вида грунта, его консистенции и варьирует от 25 до 5 мм для пластичных глин и для песков соответственно [16]:

$$S_{сдвиг} = 5 + 100 \cdot I_l I_p, \text{ мм}, \quad (6)$$

где I_l — показатель текучести; I_p — показатель пластичности глинистого грунта.

В пределах деформаций от нуля до $S_{сдвиг}$ с момента приложения нагрузки на ГЦЭ его несущая способность характеризуется активным включением боковой поверхности, а после достижения перемещения сопротивление по боковой поверхности достигает предельного значения. Вся дальнейшая нагрузка приходится на острие ГЦЭ.

Подобный подход был нами успешно реализован на ряде зданий ОКН при реконструкции [17] в городах Санкт-Петербурге: наб. р. Карповки д. 36а, ул. Почтамтская д. 3,5, Новая Голландия корпуса № 8, № 12, 17 и Казани: ул. Профсоюзная д. 19/15, осадки фундаментов не превысили нормативных значений.

Оценка несущей способности ГЦЭ по боковой поверхности

Для ГЦЭ на площадках необходимо производить испытания грунтов jet сваями. Наряду с известными методами интерпретации зависимости «нагрузка-осадка свай»: Chin-Kondner Method, Mazurkiewicz, De Beer-Wallays, Decourt [18] для проведения анализа результатов испытания грунтов сваями часто используется метод, который заключается в логарифмировании значений «нагрузка-осадка» и последующем определении точки пересечения прямых линий, характеризующих работу свай до и после $S_{сдвиг}$ [16], [19].

На площадках № 1 и № 2 нами были проведены испытания опытных jet свай. Для проведения статических испытаний ствол опытных ГЦЭ (свай) армировался на всю глубину пространственным каркасом. Для устройства свай № 1 по технологии *jet1* лидерная скважина $d_l=0,132$ м выполнялась длиной 8,6 м (рис. 7). Под острием залегали суглинки тугопластичные ИГЭЗ с $E=8$ МПа. Размыв ствола скважины через сопла монитора осуществлялся цементным раствором с В/Ц=1. Диаметр ствола jet свай $D_{ГЦЭ}=0,42$ м.

Таблица 2 - Физико-механические характеристики грунтов площадки № 1

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1.8>

№ слоя	Наименование грунтов	ρ , кН/м ³	I_l	φ , °	c , кПа	E , МПа
1	Насыпные грунты, насыщенные водой, мощностью 2-5,6 м	18,5	-	-	-	-
2	Суглинки пылеватые тугопластичные, мощностью 0,9-1,5 м	20	0,46	20	22,4	14
3	Суглинки пылеватые тугопластичные, мощностью 1,5 м	19	0,80	14	22,4	8
4	Супеси пылеватые полутвердые, мощностью 1,7 м	21,4	-0,12	27	35	26

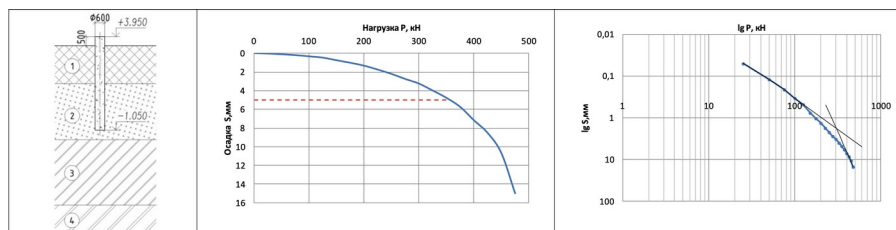


Рисунок 7 - Схема методов закрепления по технологии jet grouting

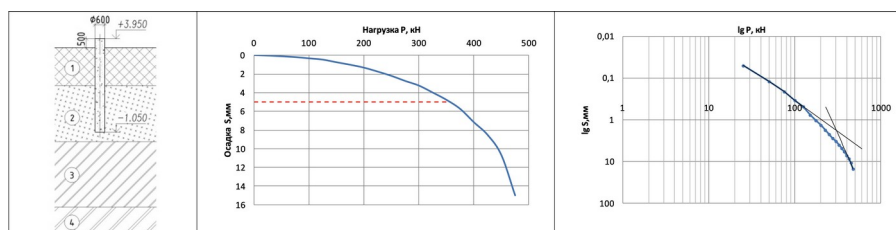
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1.9>

Таблица 3 - Физико-механические характеристики грунтов площадки № 2

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1.10>

№ слоя	Наименование грунтов	r , кН/м ³	I_l	j , °	c , кПа	E , МПа
1	Насыпной грунт, мощность 2,0 м	16,0	-	-	-	-
2	Пески пылеватые, мощностью 3–3,5 м	19,4	1,24	25	1	10,0
3	Суглинки пылеватые, мощностью 3,5–4 м	17,7	0,9	7	5	4,0
4	Суглинки пылеватые, мощностью 1,2–1,5 м	19,1	0,9	12	10	7,0

На площадке № 2 опытная *jet* свая была изготовлена диаметром $D_{ГЦЭ}$ 0,6 м, длиной в грунте 5 м, под острием залежали пески пылеватые с $E=10$ МПа (рис. 8). Разрыв лидерной скважины $d_f=0,25$ м выполнялся по технологии *jet2* цементным раствором с $B/C=0,9$ давлением струи ≈ 5 МПа и давлением воздуха $\approx 0,45$ МПа.

Рисунок 8 - Результаты статических испытаний *jet* свай № 2DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1.11>

По результатам проведенных испытаний статической нагрузкой *jet* свай и графикам «нагрузка-осадка» рисунков 7 и 8 очевиден вклад острия.

Изменение деформационных свойств грунтов

При ведении работ в условиях слабых грунтов имеется необходимость в придании основаниям лучших деформационных свойств. Полученные данные на различных площадках показывают, что модуль деформации сформированного на площадке материала ГЦЭ в глинистых грунтах может иметь большой разброс, поэтому до реализации полной осадки элементы могут получить значительные деформации [20]. Очевидно, что с учетом этого выбор оптимальных вариантов и параметров элементов закрепления требуют уточнения. По аналогии со щелевыми

фундаментами расчет фундамента усиленного грунтоцементными элементами должен производиться по несущей способности и по деформациям. В первом случае должно соблюдаться условие: $N \leq P$, где N — расчетная нагрузка, передаваемая на фундамент; P — допускаемая расчетная нагрузка на фундамент. Расчет фундаментов по деформациям сводится к удовлетворению условия: $S \leq S_{пр}$.

Механизм деформирования ГЦЭ включает несколько этапов: усадочные деформации ГЦЭ — S_1 ; восприятие нагрузки боковой поверхностью; этап, когда дальнейшее увеличение нагрузки приводит к осадке нижнего торца и наблюдается до тех пор, пока они не достигнут предельных значений, когда происходит осадка всего фундамента.

$$S = S_1 + S_2 + S_3 = S_1 + \frac{F_d^S \cdot l}{2A \cdot E_c} + \frac{F_d^T \cdot l}{2A \cdot E_c} \quad (7)$$

где S_2 — осадка верхнего торца сваи за счет деформации ствола; F_d^S — предельная величина нагрузки по боковой поверхности; l , A — длина и площадь сечения; E_c — начальный модуль деформации ГЦЭ; F_d^T — предельная величина нагрузки, воспринимаемая острием элемента.

Осадку S_2 острия ГЦЭ определяют как осадку заглубленного фундамента с использованием метода эквивалентного слоя [20].

При устройстве закрепления грунта в днищах котлованов проводится расчет требуемых прочности и модуля деформаций для восприятия горизонтальной нагрузки и подпора воды.

Модуль деформации E закрепленного основания пропорционален прочности на одноосное сжатие R с коэффициентом 350 – 1000 и зависит от тех же факторов, что и прочность на одноосное сжатие. Для глинистых грунтов отношение модуля упругости к прочности на одноосное сжатие не превышает 600 [21].

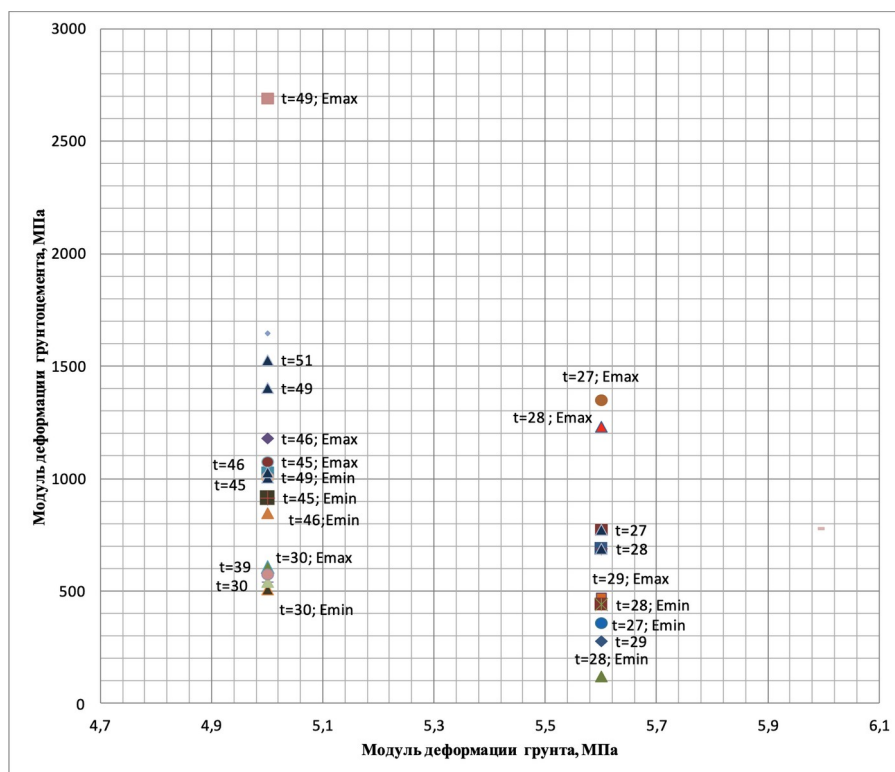


Рисунок 9 - Диаграмма соотношения значений модуля деформации грунтоцемента от модуля деформации грунта и продолжительности твердения

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1.12>

На рисунке 9 приведены полученные нами данные максимальных E_{max} , минимальных E_{min} и средних значений модуля деформации грунтоцемента, полученные в различном возрасте в результате закрепления слабых грунтов в основании днищ котлованов. После закрепления суглинков текучих с прослоями текучепластичных, ленточных и слоистых с прослоями песков пылеватых (I_{gIII}) с модулем деформации $E_{гр}=5,0$ МПа и $E_{гр}=5,6$ МПа были проведены серии испытаний кренов образцов кернов $\cong 100$ для оценки средних значений модуля ГЦЭ от модуля деформации грунта. В целом диаграмма показывает значительный разброс максимальных и минимальных значений модуля деформаций в различном возрасте для конкретных интервалов «напряжения-деформация». Отметим, что значения модуля деформации ГЦЭ менее 400 МПа зафиксированы у образцов со сроком твердения менее 30 суток. Результаты проведенного нами на этих объектах геотехнического мониторинга при вскрытии котлованов показали отсутствие сверхнормативных деформаций ограждений и соседних зданий. Таким образом, в фильтрующих грунтах следует выполнять тотальное закрепление по сетке в шахматном порядке (см. рис. 10а) из условия соблюдения фильтрационной прочности. При закреплении слабо фильтрующих грунтов эффективность «нулевого» цикла может быть повышена путем создания временной ячеистой структуры наподобие «сот» (рис. 10б). Вокруг одного

«незакрепленного» цилиндра выполняются шесть ГЦЭ. Конструкция реализуется без снижения надежности, так как ГЦЭ надежно сопряжены вместе, а свойства исходного грунта в незаполненных сотах улучшаться в силу уменьшения влажности при гидратации цемента ГЦЭ. Это позволяет сделать работы «нулевого цикла» экономичнее не менее 15% по количеству скважин, расходу цемента и по времени устройства. Выбор последовательности устройства позволяет влиять на свойства ГЦЭ и управлять модулем за счет уменьшения количества «мягких» (номера 1, 2) или увеличения количества более «прочных» (номера 6,7) с большим содержанием цемента [22].

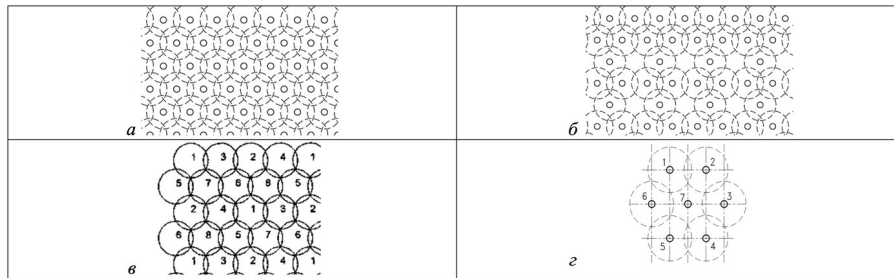


Рисунок 10 - Варианты сопряжения ГЦЭ:

a – тотального закрепления грунта; *б* – «сотового» типа; *в, г* 1..8 – последовательность устройства ГЦЭ

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1.13>

Модуль деформации геомассива равен:

$$E = \frac{E_b \cdot A_b + E_s \cdot (A - A_b)}{A} = \frac{E_b \cdot 0,785 \cdot n \cdot (1 + \alpha) \cdot D_{ГЦЭ}^2 + E_s \cdot (A - 0,785 \cdot n \cdot (1 + \alpha) \cdot D_{ГЦЭ}^2)}{A} \quad (8)$$

где A — общая площадь конструкции; A_b — суммарная площадь ГЦЭ; n — число ГЦЭ; α — коэффициент учитывающий пересечение соседних ГЦЭ; $D_{ГЦЭ}$ — диаметр одного ГЦЭ; E_b — модуль деформации ГЦЭ; E_s — модуль деформации грунта.

Дабы устройство ГЦЭ не приводило к росту напряженно-деформированного состояния в стенках лидерной скважины d_l и гидроразрывам при технологии Jet-1 [22] потребуется соблюдение равенства объема V_{jet1} цементного раствора и частиц грунта на 1 м.п за время выполнения размыва: $t = \left(\sqrt{\rho_{цр} / \rho_{гп}} + 1 \right) \cdot \frac{D_{ГЦЭ}}{2v_m}$;

$$V_{jet1} = t Q_{цр} \simeq 13,083(1 - n) \cdot \left(D_{ГЦЭ}^2 - d_l^2 \right) \quad (9)$$

При технологии Jet-2 происходит процесс насыщения цементного раствора пузырьками воздуха и объем подаваемой смеси V_{jet2} в скважину равен:

$$V_{jet2} = \left(Q_{цр} + \frac{Q_{воз} \cdot \rho_{цп}}{h} \right) \cdot t \quad (10)$$

где n — пористость грунта; h — глубина скважины, м; $Q_{воз}$ — расход воздуха, м³/мин; $\rho_{цп}$ — плотность пульпы кг/м³; $\rho_{цр}$ — плотность цементного раствора; $\rho_{гп}$ — плотность грунта; v_m — скорость струи, м/с.

С учетом этого расход цементного раствора может быть снижен, формула (10) преобразуется:

$$V_{jet2} \cong \left[13,083(1 - n) \cdot \left(D_{зуд}^2 - d_l^2 \right) - \frac{Q_{воз}}{g \cdot h \cdot \rho_{цр}} \right] \cdot \left(\sqrt{\rho_{цр} / \rho_{гп}} + 1 \right) \cdot \frac{D_{ГЦЭ}}{2v_m} \quad (11)$$

В случае несоблюдения соотношения (11) происходят вертикальные и горизонтальные деформации окружающего массива грунта, снижение свойств ГЦЭ из-за потерь объема цемента из закрепляемой зоны. Производить оценку эффективности и фиксировать нарушения в технологии закрепления во время производства работ позволяют инклинометрические измерения деформации массива грунта. На (рис. 11б) приведены фактические данные смещений массива грунта за шпунтовым ограждением котлована в период устройства нижней распорки по технологии Jet-2. Горизонтальные смещения массива локально превысили 270 мм, давление струи раствора составляло 45 МПа.

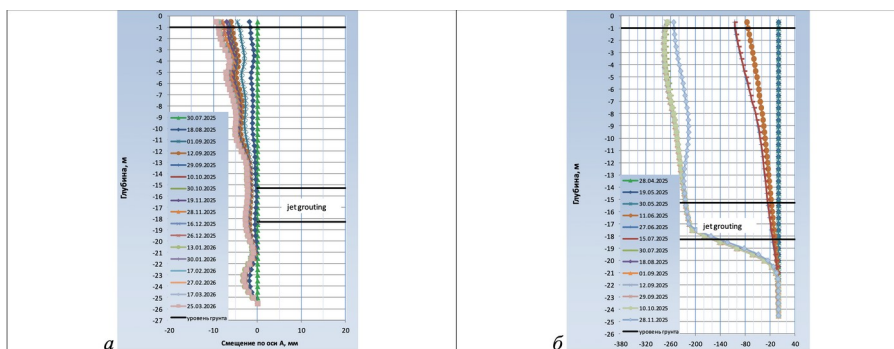


Рисунок 11 - Инклинометрические измерения смещений массива грунта за ограждением при закреплении грунта в котловане:

а – с минимальным влиянием; *б* – с передачей давления раствора на грунты выше области закрепления

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1.14>

Заключение

1. Оценка вариантов ГЦЭ для увеличения несущей способности фундаментов, с целью максимально использовать свойства существующих оснований, за счет ограничения деформаций грунтов путем устройства под подошвами рядов из сопряженных вертикальных и наклонных ГЦЭ позволила показать преимущества устройства наклонных стенок по струйной технологии. Учитывая разнотипность фундаментов исторической застройки для передачи нагрузки на грунты, расположенные на большей глубине более применим вариант *а*, варианты *б* и *в* целесообразно использовать для передачи нагрузки на большую площадь.

2. Оценка конструкций усиления по струйной цементации производится в несколько этапов: выбор варианта и аналитический расчет, сравнение и ограничение неравномерных деформации фундаментов здания; проведение 3D-моделирования усиления для уточнения шагов и углов наклона ГЦЭ усиления для снижения неравномерности деформаций фундаментов. В дополнение к этому, для выявления несущей способности «по грунту» боковой поверхности ГЦЭ под нагрузкой, необходимо проведение статических испытаний слабых грунтов *jet* сваями. Испытания позволят оценить эффективность конструкции усиления фундаментов, улучшить технико-экономические показатели за счет снижения количества ГЦЭ. Контроль за соблюдением технологий и оценка эффективности усиления должен осуществляться не только путем отбора керна, но и в процессе ведения работ с помощью проведения инклинометрических измерений смещений массива грунта.

3. При реконструкции зданий в условиях слабых грунтов для исключения прироста осадки больше предельной $S_{сдвиг}$, передача нагрузки через острие ГЦЭ на грунты оснований должна быть ограничена с учетом их консолидации.

4. Выбор последовательности устройства ГЦЭ позволяет активно влиять на деформационные свойства за счет уменьшения количества «мягких» или увеличения количества более «прочных» элементов с большим содержанием цемента. Выявление вертикальных и горизонтальных деформации окружающего массива грунта будет свидетельствовать о снижении свойств грунтоцемента закрепляемой зоны из-за потерь объема цемента.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Газиев А.Н., ООО «СТРОЙЦЕНТРАЛЬ», Санкт-Петербург Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1.15>

Review

Gaziev A.N., STROYCENTRAL LLC, Saint-Petersburg Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.74.1.15>

Список литературы / References

1. Шашкин А.Г. Мониторинг зданий и сооружений при строительстве и эксплуатации / А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин, С.Г. Богов [и др.]. — Санкт-Петербург : Георекострукция, 2021. — 632 с.
2. Сотников С.Н. Строительство и реконструкция фундаментов зданий и сооружений на слабых грунтах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.02 / С.Н. Сотников. — Ленинград, 1986. — 440 с.
3. Кремнев А.П. Исследование влияния армирования на деформируемость сильносжимаемых водонасыщенных грунтов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / А.П. Кремнев. — Москва, 1993. — 25 с.
4. Пашкин Е.М. Инженерно-геологическая диагностика деформаций памятников архитектуры / Е.М. Пашкин. — Москва : Высшая школа, 1998. — 255 с.
5. Маковецкий О.А. Расчет и конструирование искусственного основания «структурный геотехнический массив» : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.02 / О.А. Маковецкий. — Москва, 2021. — 363 с.



6. Алексеев А.Г. Инженерный метод определения осадки свай с учетом допускаемой упругопластической работы грунта / А.Г. Алексеев, С.Г. Безволев // Вестник МГСУ. — 2025. — Т. 20. — № 11. — С. 1691–1706. — DOI: 10.22227/19970935.2025.11.1691-1706.
7. Давлатов Д.Н. Усиление ленточных свайных фундаментов переустройством в комбинированный с опрессовкой и цементацией основания : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Д.Н. Давлатов. — Тюмень, 2020. — 128 с.
8. Шапошников А.В. Разработка расчетных параметров закрепления просадочных грунтов цементом буросмесительным способом : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / А.В. Шапошников. — Москва, 1986. — 191 с.
9. Wang Z.F. Jet Grouting Practice: an Overview / Z.F. Wang, S.L. Shen, C.E. Ho [et al.] // Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA. — 2013. — Vol. 44. — № 4. — P. 88–96.
10. Мангушев Р.А. Реконструкция подземной части Российского государственного академического Большого драматического театра (АБДТ) имени Г.А. Товстоногова в г. Санкт-Петербурге / Р.А. Мангушев, А.А. Панферов, А.И. Осокин [и др.] // Геотехника. Теория и практика : межвузовский тематический сборник трудов Общероссийской конференции молодых ученых, научных работников и специалистов. — Санкт-Петербург, 2013. — 239 с.
11. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов / А.Г. Малинин. — Москва : Стройиздат, 2010. — 226 с.
12. Ревазошвили Р.Г. Расчет щелевых фундаментов при вертикальных нагрузках : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Р.Г. Ревазошвили. — Москва, 1988. — 17 с.
13. Ковалев В.А. Закономерности взаимодействия с основанием и расчет осадки двухщелевых ленточных фундаментов мелкого заложения : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / В.А. Ковалев. — Москва, 2006. — 165 с.
14. Плахотный Г.Н. Работа козловых свай уплотнения в различных инженерно-геологических условиях : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Г.Н. Плахотный. — Одесса, 1986. — 2018 с.
15. Ху Н. Несущая способность оснований, усиленных распорными стенками : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Н. Ху. — Москва, 1993. — 20 с.
16. Лапшин Ф.К. Расчет свай по предельным состояниям / Ф.К. Лапшин. — Саратов : Издательство Саратовского университета, 1979. — 152 с.
17. Улицкий В.М. Основания и фундаменты реконструируемых зданий : учебное пособие / В.М. Улицкий, В.Н. Парамонов, А.Г. Шашкин [и др.]. — Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2017. — 94 с.
18. Olgun M. Interpreting Load-Settlement Curves of Pile Foundations by Graphical Methods / M. Olgun, Y. Yenginar, A. Hanati // EJCAR. — 2017. — Vol. 1. — № 2. — P. 1–10. — DOI: 10.12.2017.
19. Horiguchi T. Rotary jet aids inner city piling / T. Horiguchi, K. Kajihara // Civil Engineering. — October 1988. — P. 43–51.
20. Коган В.В. Разработка методов расчета и контроля качества грунтоцементных свай, изготовленных струйной цементацией : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / В.В. Коган. — Уфа, 1996. — 17 с.
21. Идрисов И.Х. Развитие системы контроля и оценки качества строительных глинистых композитов, закрепленных по технологии глубинного смешивания : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / И.Х. Идрисов. — Пенза, 2011. — 248 с.
22. Богов С.Г. Технологические аспекты закрепления грунтов цементными растворами / С.Г. Богов // Современное строительство и архитектура. — 2025. — № 12 (67). — DOI: 10.60797/mca.2025.67.2.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Shashkin A.G. Monitoring zdaniy i sooruzhenij pri stroitel'stve i jekspluatacii [Monitoring of buildings and structures during construction and operation] / A.G. Shashkin, K.G. Shashkin, S.G. Bogov [et al.]. — Saint Petersburg : Georekonstrukcija, 2021. — 632 p. [in Russian]
2. Sotnikov S.N. Stroitel'stvo i rekonstrukcija fundamentov zdaniy i sooruzhenij na slabych gruntah [Construction and reconstruction of foundations of buildings and structures on weak soils] : dis. ... of Grand PhD in Engineering : 05.23.02 / S.N. Sotnikov. — Leningrad, 1986. — 440 p. [in Russian]
3. Kremnev A.P. Issledovanie vlijanija armirovanija na deformiruemost' sil'noszhimaemyh vodonasyshennyh gruntov [Study of the influence of reinforcement on the deformability of highly compressible water-saturated soils] : abst. of dis. ... of Grand PhD in Engineering : 05.23.02 / A.P. Kremnev. — Moscow, 1993. — 25 p. [in Russian]
4. Pashkin E.M. Inzhenerno-geologicheskaja diagnostika deformacij pamjatnikov arhitektury [Engineering-geological diagnostics of deformations of architectural monuments] / E.M. Pashkin. — Moscow : Vysshaja shkola, 1998. — 255 p. [in Russian]
5. Makovetsky O.A. Raschet i konstruirovanie iskusstvennogo osnovanija "strukturnyj geotekhnicheskij massiv" [Calculation and design of an artificial foundation "structural geotechnical array"] : dis. ... of Grand PhD in Engineering : 05.23.02 / O.A. Makovetsky. — Moscow, 2021. — 363 p. [in Russian]
6. Alekseev A.G. Inzhenernyj metod opredelenija osadki svai s uchetom dopuskaemoj uprugoplasticheskoj raboty grunta [Engineering method for determining pile settlement taking into account the permissible elastic-plastic behaviour of the soil] / A.G. Alekseev, S.G. Bezvolev // Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. — 2025. — Vol. 20. — № 11. — P. 1691–1706. — DOI: 10.22227/19970935.2025.11.1691-1706. [in Russian]
7. Davlatov D.N. Usilenie lentocnyh svajnyh fundamentov pereustroystvom v kombinirovannyj s opressovkoj i cementaciej osnovanija [Reinforcement of strip pile foundations by restructuring into combined with pressing and cementation of the base] : abst. of dis. ... of PhD in Engineering / D.N. Davlatov. — Tyumen, 2020. — 128 p. [in Russian]



8. Shaposhnikov A.V. Razrabotka raschetnykh parametrov zakrepleniya prosadochnykh gruntov cementom burosmesitel'nym sposobom [Development of design parameters for strengthening subsiding soils by cement using the auger-mixing method] : dis. ... of PhD in Engineering : 05.23.02 / A.V. Shaposhnikov. — Moscow, 1986. — 191 p. [in Russian]
9. Wang Z.F. Jet Grouting Practice: an Overview / Z.F. Wang, S.L. Shen, C.E. Ho [et al.] // Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA. — 2013. — Vol. 44. — № 4. — P. 88–96.
10. Mangushev R.A. Rekonstrukcija podzemnoj chasti Rossijskogo gosudarstvennogo akademicheskogo Bol'shogo dramaticheskogo teatra (ABDT) imeni G.A. Tovstonogova v g. Sankt-Peterburge [Reconstruction of the underground part of the Russian State Academic Bolshoi Drama Theater (ABDT) named after G.A. Tovstonogov in Saint Petersburg] / R.A. Mangushev, A.A. Panferov, A.I. Osokin [et al.] // Geotekhnika. Teoriya i praktika [Geotechnics. Theory and practice] : Interuniversity thematic proceedings of the All-Russian Conference of Young Scientists, Researchers and Specialists. — Saint Petersburg, 2013. — 239 p. [in Russian]
11. Malinin A.G. Strujnaja cementacija gruntov [Jet grouting of soils] / A.G. Malinin. — Moscow : Strojizdat, 2010. — 226 p. [in Russian]
12. Revazoshvili R.G. Raschet shhelevykh fundamentov pri vertikal'nykh nagruzkah [Calculation of slot foundations under vertical loads] : abst. dis. ... of PhD in Engineering : 05.23.02 / R.G. Revazoshvili. — Moscow, 1988. — 17 p. [in Russian]
13. Kovalev V.A. Zakonomernosti vzaimodejstvija s osnovaniem i raschet osadki dvuhshhelevykh lentochnykh fundamentov melkogo zalozhenija [Regularities of interaction with the base and calculation of settlement of double-slot strip shallow foundations] : dis. ... of PhD in Engineering : 05.23.02 / V.A. Kovalev. — Moscow, 2006. — 165 p. [in Russian]
14. Plakhotny G.N. Rabota kozlovnykh svaj uplotnenija v razlichnykh inzhenerno-geologicheskikh uslovijah [Performance of compaction pile trestles in various engineering-geological conditions] : dis. ... of PhD in Engineering : 05.23.02 / G.N. Plakhotny. — Odessa, 1986. — 2018 p. [in Russian]
15. Hu N. Nesushhaja sposobnost' osnovanij, usilennykh raspornymi stenkami [Bearing capacity of bases reinforced with strut walls] : abst. of dis. ... of PhD in Engineering : 05.23.02 / N. Hu. — Moscow, 1993. — 20 p. [in Russian]
16. Lapshin F.K. Raschet svaj po predel'nykh sostojanijam [Pile calculation by limit states] / F.K. Lapshin. — Saratov : Saratov University Press, 1979. — 152 p. [in Russian]
17. Ulitsky V.M. Osnovaniya i fundamenty rekonstruirovannykh zdaniy [Foundations and bases of reconstructed buildings] : textbook / V.M. Ulitsky, V.N. Paramonov, A.G. Shashkin [et al.]. — Saint Petersburg : Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija Imperatora Aleksandra I, 2017. — 94 p. [in Russian]
18. Olgun M. Interpreting Load-Settlement Curves of Pile Foundations by Graphical Methods / M. Olgun, Y. Yenginar, A. Hanati // EJCAR. — 2017. — Vol. 1. — № 2. — P. 1–10. — DOI: 10.12.2017.
19. Horiguchi T. Rotary jet aids inner city piling / T. Horiguchi, K. Kajihara // Civil Engineering. — October 1988. — P. 43–51.
20. Kogan V.V. Razrabotka metodov rascheta i kontrolja kachestva gruntocementnykh svaj, izgotovlennykh strujnoj cementaciej [Development of methods for calculation and quality control of soil-cement piles made by jet grouting] : abst. of dis. ... of PhD in Engineering: 05.23.02 / V.V. Kogan. — Ufa, 1996. — 17 p. [in Russian]
21. Idrisov I.H. Razvitie sistemy kontrolja i ocenki kachestva stroitel'nykh glinistykh kompozitov, zakreplennykh po tehnologii glubinnogo smeshivaniya [Development of a system for control and quality assessment of clay building composites strengthened by deep mixing technology] : dis. ... of PhD in Engineering : 05.23.05 / I.H. Idrisov. — Penza, 2011. — 248 p. [in Russian]
22. Bogov S.G. Tehnologicheskie aspekty zakrepleniya gruntov cementnymi rastvorami [Technological aspects of soil stabilisation with cement mixtures] / S.G. Bogov // Sovremennoe stroitel'stvo i arhitektura [Modern Construction and Architecture]. — 2025. — № 12 (67). — DOI: 10.60797/mca.2025.67.2. [in Russian]