

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

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.63.1>

К ВОПРОСУ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАМЕТРА ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ ПО СТРУЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

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)

Аннотация

Для определения несущей способности грунтоцементного элемента (ГЦЭ) как по грунту, так и по материалу необходимо знать диаметр закрепления. Этот параметр требует надежного определения, так как является величиной переменной. Существуют общие подходы формального характера, когда не учитывается механизм взаимодействия струи раствора с конкретным массивом грунта. Для геотехнической практики важно использование прочностных или деформационных характеристик грунта, которые бы позволяли прогнозировать размер зон закрепления грунта с помощью наиболее широко используемой однокомпонентной технологии. После выхода из сопла струя интенсивно расширяется, и на нее воздействует окружающая среда. При попадании струи в стенку скважины, струя меняет свою форму и направление движения. При вылете струи из сопла монитора в результате действия турбулентных пульсаций на ее поверхности образуются неровности в виде волн, по мере удаления от сопла начинается распад струи на мелкие капли. Осевое давление и сила удара струи снижаются при удалении от сопла. «Бесконечное» увеличение радиуса размыва скважины невозможно, несмотря на большое количество повторных проходов по «одному месту» не только из-за затухания действия струи с расстоянием, но и из-за вероятности обрушения выше расположенного свода грунта.

В статье приводятся решения по определению размера закрепления грунта с использованием деформационных характеристик грунтов — модуля упругости и коэффициента Пуассона. С помощью оценки эффективного давления струи в скважине предложен метод определения размера зон закрепления грунта с использованием прочностных характеристик грунтов: сцепления C и угла внутреннего трения.

Ключевые слова: диаметр закрепления грунта, однокомпонентная технология, грунтоцементный элемент, эффективное давление, предельное давление, струя раствора.

ON THE THEORETICAL DETERMINATION OF THE DIAMETER OF SOIL STABILISATION USING JET GROUTING

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)

Abstract

To determine the bearing capacity of a soil-cement element (SCE) in terms of both soil and material, it is necessary to know the diameter of the reinforcement. This parameter requires reliable determination, as it is a variable quantity. There are general formal approaches that do not take into account the mechanism of interaction between the solution jet and a specific soil mass. For geotechnical practice, it is important to use the strength or deformation characteristics of the soil, which would allow predicting the size of soil stabilisation zones using the most widely used single-component technology. After leaving the nozzle, the jet expands intensively and is affected by the surrounding environment. When the jet hits the wall of the well, it changes its shape and direction of movement. When the jet leaves the monitor nozzle, turbulent pulsations on its surface form irregularities in the form of waves, and as it moves away from the nozzle, the jet begins to break up into small droplets. The axial pressure and impact force of the jet decrease as it moves away from the nozzle. An 'infinite' increase in the radius of the borehole erosion is impossible, despite numerous repeated passes over the 'same place', not only because of the fading effect of the jet with distance, but also because of the likelihood of collapse of the soil arch located above.

The article presents solutions for determining the size of soil consolidation using soil deformation characteristics — elastic modulus and Poisson's ratio. Using the assessment of effective jet pressure in the well, a method is suggested for determining the size of soil consolidation zones using soil strength characteristics: cohesion C and angle of internal friction.

Keywords: soil stabilisation diameter, single-component technology, soil-cement element, effective pressure, ultimate pressure, solution jet.

Введение

Из-за сложности происходящих процессов в грунтах при струйном закреплении многочисленные результаты, приводимые в публикациях противоречивы. Струя цементного раствора, вылетающая из сопел монитора, при своем движении увлекает за собой часть окружающей в скважине жидкости, ударяется о стенки скважины, отражается от

них, смывая с поверхности частицы разрушенного грунта, создавая вихреобразные и вращательные движения в пространстве между монитором и стенками скважины, которое еще усложняется вращением буровых труб.

Струя раствора («затопленная струя» — окруженная жидкостью), попадая в объем жидкости, постепенно начинает расширяться, а ее скорость из-за сил трения с окружающей жидкостью падает. На границе струи образуются вихри, формируется пограничный турбулентный слой. На некотором расстоянии, на выходе из сопла в центральной части струи существует ядро с постоянными скоростями. С увеличением диаметра струи величина ядра быстро уменьшается. Сечение, где исчезает ядро, называется переходным и оно разделяет начальный и основной участки струи. Струя жидкости, вытекающая из сопла и встречающая стенку скважины, воздействует на нее с силой давления струи. Силу давления струи можно рассчитать с помощью уравнения изменения импульса жидкости. Таким образом, в буровой скважине гидромониторная струя, вытекающая из сопла, является турбулентной, затопленной и стесненной. Расчет такой струи производится на основе теории свободных затопленных струй [1].

Известно, что расчеты по определению глубины размыва грунтов струей сводятся к определению процессов воздействия гидравлических струй на грунт, и, как правило, включают три способа описания процессов: теоретические, эмпирические и «полуэмпирические». Имеется несколько подходов к описанию механизмов разрушения материала струей жидкости. Известно также, что гидродинамическое давление струи представляется как сосредоточенная сила или давление, распределенное по поверхности по некоторому закону. Давление струи вызывает в однородном грунте поля напряженно-деформированного состояния. Размеры разрушения при таком подходе определяются некоторой областью, в которой напряжения достигли предельного значения в соответствии с выбранным критерием разрушения. В качестве критериев разрушения используются такие параметры, как критическая энергия разрушения, предельная деформация, критическая скорость размыва и т.п. В подавляющем большинстве случаев используются эмпирические методы определения размеров размыва и закрепления грунтов, основанные на некотором количестве экспериментов в различных грунтовых условиях.

Рядом авторов отмечены пульсации на оси струи [2] продольной компоненты скорости (в зоне потенциального ядра) и пульсации осесимметричной моды давления в ближнем поле вне слоя смещения [3]. Допускается, что пульсации в области средних частот ($St \sim 0,2-0,8$) являются проявлением пакетов волн неустойчивости, развивающихся в струе за счет неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. При взаимодействии струи жидкости с твердой поверхностью могут развиваться очень высокие давления, т.е. проявляется эффект гидравлического удара [4]. Давление гидравлического удара:

$$P_s = \rho c v \quad (1)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м³; c — скорость волны сжатия в жидкости (≈ 1500 м/с); v — скорость течения жидкости, м/с.

Высокоскоростные струи раствора характеризуются числом Рейнольдса и носят турбулентный характер. Турбулентность струи на ее внешней границе вызывает потери энергии с уменьшением осевой скорости из-за массообмена с грунтовой жидкостью, вихрями и вязкими касательными напряжениями. С увеличением содержания твердой фазы повышаются плотность и вязкость раствора. В результате реализуется многофакторная задача. Многочисленные результаты, приведенные в публикациях, противоречивы. Переменные параметры как гидравлические, так и грунта разнообразны, имеют большой разброс значений в зависимости от условий реализации и могут быть применимы в строго определенных условиях. Есть решения, где с увеличением давления P и модуля упругости грунта E , радиуса «капли» глубина разрушения грунта увеличивается [5].

При расчетах разрушения породы струей, как правило, выполняется единичное решение «давление-деформация» и фактический радиус закрепления грунта может не совпасть с экспериментальными значениями. Решение такой задачи не отражает эффекта «внедрения» струи в грунт, в результате которого давление от струи постепенно передается на частицы, удаленные от стенки скважины.

Грунт состоит из отдельных частиц, при встрече с поверхностью грунта струя растекается и, захватывая частицы грунта, размывает и выносит их. По мере увеличения глубины внедрения возрастает и длина пути выноса частиц, возрастает также сопротивление выносу частиц. Изменение размеров происходит за счет разрушения грунта в точке лобового действия струи и за счет размыва стенок обратными потоками. При таком подходе критерием разрушения является критическая скорость размыва либо скорость взвешивания, зависящие от гранулометрического состава грунта.

Эффективность процесса гидравлического разрушения грунтов определяется компактностью струй. К факторам, определяющим эффективность размыва грунтов струей, относятся: расход раствора; скорость истечения струй, сила удара струи, динамическое давление струи, гидравлическая мощность; геометрия монитора — число и форма сопел, углы их расположения и расстояние до стенки скважины; характеристики раствора — плотность, вязкость и т.п.; свойства грунтов — прочность, проницаемость, давление поровой жидкости.

Существенное влияние на качество закрепления оказывают величина превышения гидростатического давления над поровым и эффективная вязкость раствора.

Для закрепления грунта по струйной технологии ряд авторов [6] считают основополагающими механизмами взаимодействия струи с грунтами: просачивание-фильтрация в гравийных грунтах, эрозия в песках и резание в глинах. Ее эффективность зависит от свойств грунтов в т.ч. от грансостава. Грунтоцемент, получаемый в песках, как правило, более однороден.

Теория эрозионного разрушения разработана недостаточно. При эрозионном разрушении основными являются два вида воздействия: многократная деформация грунтов при соударении частиц раствора с грунтом и режущий износ от воздействия частиц цемента, перемещающихся по направлениям, касательным к поверхности скважины. Для

пластичных грунтов основным считается режущий фактор. Одним из возможных объяснений эрозионного воздействия мониторинной струи жидкости на забой скважины является кавитационная эрозия [7], [8].

Гидромониторное разрушение грунта в стволе скважины Б.И. Есьман, Г.Г. Габузов (1991) определяют:

$$P_{\text{струи}} > (0,25 - 0,35) \sigma_{\text{сж}} \quad (2)$$

А В.Б. Байдюк и Р.В. Винярский (1978) сделали вывод о резком снижении эффективности разрушения грунтовой породы струей с ростом дифференциального давления $P_{\text{диф}}$. Увеличение проницаемости грунтов приводит к размыву грунтов при меньших давлениях за счет возникновения растягивающих напряжений в порах, сосредоточенных за пределами области прямого действия струи [9]. Считается, что в песчаном грунте давление струи передается на поровую воду. Разрушение грунта происходит за счет гидроразрывов при развитии давления в поровой воде, разрывающего грунт «изнутри». Очевидно, что в этом случае в качестве критерия разрушения среды принимается ее прочность на гидростатическое растяжение. В случае песчаных грунтов со сцеплением $c=0$ кПа грунт не воспринимает растягивающих напряжений $s_p=0$ кПа и размер зоны закрепления мог бы определяться только длиной действия струи и возникающими в грунте растягивающими напряжениями, но действие струи в условии пульпы в скважине быстро затухает.

Исследуя процесс разрушения грунтов под действием затопленных струй глинистых растворов с небольшим содержанием бентонитовой глины, А.К. Козодой и А.А. Босенко доказали, что разрушение консолидированных пород высоконапорной «неподвижной» струей воды без механических примесей под воздействием только гидродинамического давления практически невозможно. «Неподвижная» струя воды может вызывать кавитационное разрушение малой интенсивности.

В процессе размыва стенок скважины при струйном закреплении выделяется два основных этапа: сначала образование «воронки» путем взвешивания частиц грунта и далее при вращении монитора — врубной полости, а при подъеме — разрушение подрезанного объема грунта. Максимальное давление на дне воронки по оси струи равно $\frac{\rho u_m^2}{2}$, где u_m — расчетная осевая скорость струи на уровне дна воронки. Диаметр получаемого ГЦЭ равен:

$$D_{\text{ГЦЭ}} = D_{\text{закр}} = d_l \quad (3)$$

где d_l — диаметр скважины, м; $D_{\text{закр}}$ — диаметр закрепления (размыва), м.

Теоретически сила воздействия гидромониторной «режущей» струи о вертикальную преграду рассчитывается по формуле (4):

$$N = m v_0 = k_\phi v_0^2 \rho F \quad (4)$$

где N — сила удара струи в непосредственной близости у насадки, Н;

m — секундный расход воды, кг/с;

ρ — плотность раствора, кг/м³;

F — площадь поперечного сечения струи, м²;

v_0 — скорость вылета струи из сопла, м/с.

$k_\phi = 2$ (в скважине при отражении с полным разворотом струи);

F_l — полная площадь поперечного сечения струи на расстоянии l от сопла, м²:

$$F_l = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\mu}{k_0} \cdot \rho_{\text{ср}} v_{\text{ср}}^2 \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{ср}}}} \quad (5)$$

где P_0 , $P_{\text{ср}}$ — осевое давление струи у сопла и среднее давление струи на расстоянии l от сопла, МПа;

μ — коэффициент расхода ($\mu = 0,92-0,96$);

K_0 — коэффициент, учитывающий изменение диаметра струи высокого давления [10] при насыщении воздухом

$$K_0 = 0,46 \left(\frac{d_0}{l} \right)^{0,17} \quad (6)$$

$P_{\text{ср}}$ — средняя плотность струи у забоя, кг/м³;

$v_{\text{ср}}$ — средняя скорость струи на расстоянии l от сопла, м/с.

Скорость вылета струи из сопла, м/с:

$$v_0 = \varphi \sqrt{2gH} = \varphi \sqrt{(2g(100P_0))} \approx \frac{v_m(0,29+al/r_0)}{0,96} \quad (7)$$

H — напор воды перед насадкой, м.

где v_m — осевая скорость струи в пределах основного участка; v_0 — начальная скорость струи при вылете из насадки; l — расстояние от сопла; r_0 — радиус начального участка струи; a — опытная константа $\approx 0,07$.

По Г.Н. Абрамовичу (1972):

$$v_{\text{ср}} = 0,41 v_0 \frac{0,48}{0,145+0,064 \frac{l}{d_0}} \quad (8)$$

На основном участке затопленной струи полуугол её раскрытия по В.А.Жученко (1990) составляет $\frac{\alpha}{2} = 10^\circ 35'$. Используя выражение падения потока средней скорости по длине струи на расстоянии l , диаметр струи равен:

$$d_m = d_0 + 2l \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = d_0 + 0,374 \cdot l \quad (9)$$

Скорость затопленной струи непрерывно уменьшается от максимального значения v_m на оси струи до нуля на границе струи и среды, динамическое давление при $l \geq l_0$ также падает [4].

$$v_m = \frac{1+am_0}{1+am} \cdot v_0 \quad (10)$$

$$P_m = P_0 \cdot \left(\frac{1+am_0}{1+am} \right)^2 \quad (11)$$

где $m = \frac{l}{d_0}$; $m_0 = \frac{l_0}{d_0}$; $a = 2tg\frac{\alpha}{2}$.

Таблица 1 - Формулы прогнозирования диаметра ГЦЭ по струйной технологии
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.63.1.1>

№ п/п	Формула	Автор
1.	$D_0 = k p_g^{k_1} Q_g^{k_2} N^{k_3} v_m^{k_4}$ k, k1, k2, k3, k4, n1 и n2 — эмпирические коэффициенты.	Shabazaki (2003)
2.	$D_0 = n_1 \left(\frac{p_g Q_g}{v_s} \right)^{n_2}$	Mihalis et al. (2004)
3.	$D_0 = 2 \int_0^t V_c t \, dt$	Modoni et al. (2006)
4.	$D_0 = 12.5 d_0 \sqrt{\frac{p_g - p_0}{q_{bu}}} + D_r$	Ho (2007)

Примечание: по источнику [11]

Так, Хо (2007) представил метод оценки диаметра, который учитывает несколько параметров (давление струи, диаметр сопла и сопротивление грунта), но без учета других параметров: влияние воздуха, гранулометрический состав, скорости вращения и подъема, свойства раствора [11].

Имеются подходы для определения области закрепления, но для этого нужно определение специальных параметров: ударной вязкости грунтов — η (Дж/м²) [12] или размываемости грунта — I_s . Так, для определения радиуса закрепления по однокомпонентной технологии R_u кроме принятых значений d_g — диаметра сопла, давления раствора — P_g , n — частоты вращения, v_y — скорости подъема, ρ_g — плотности раствора, w/c — водоцементного отношения, еще нужны характеристики размываемости грунта I_s [7].

$$R_u = f(d_g, P_g, n, v_y, \rho_g, \frac{w}{c}, I_s) \quad (12)$$

Для геотехнической практики требуется проводить расчеты с использованием физико-механических свойств грунтов (φ , c , ρ , E , ν) и параметров мониторинга струи (d_0 , l , P) с использованием формул (4) и (11) определяя значения диаметра закрепления. Для анализа допустимо рассмотреть два теоретических подхода установления диаметра закрепления грунтов, при «однокомпонентной» струйной технологии.

Определение размера закрепления грунта с использованием деформационных характеристик грунтов – модуля упругости E и коэффициента Пуассона ν

Наряду с известными решениями задач Ж. Буссинеска (1885), Е. Мелана (1932) о сосредоточенной силе, приложенной к горизонтальной поверхности имеется аналитическое решение о горизонтальной силе, приложенной на глубине C внутри полупространства (Р. Миндлин, 1936) при этом поверхность $z=0$ свободна от нагрузок.

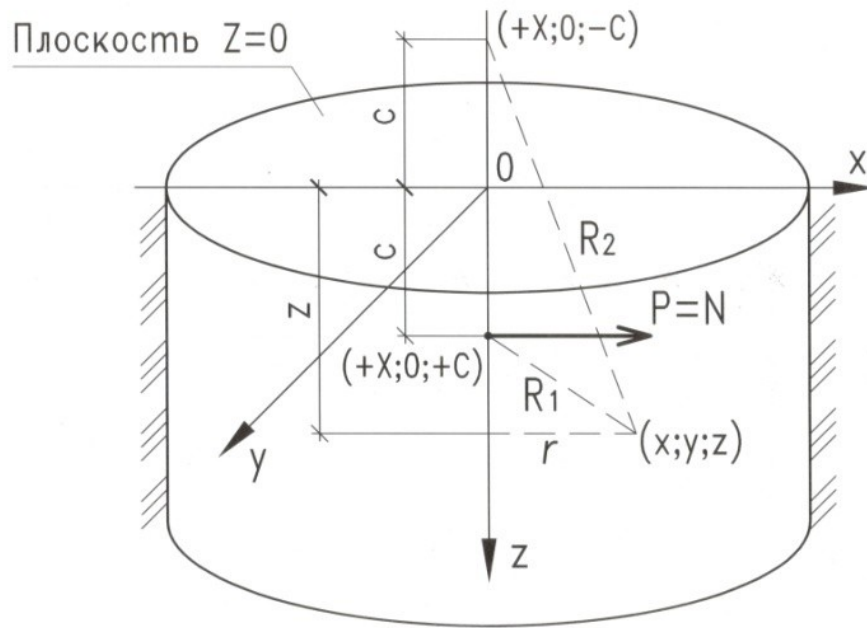


Рисунок 1 - Схема к решению Р. Миндлина для горизонтальной силы приложенной внутри упругого полупространства
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.63.1.2>

В рассматриваемом случае практический интерес представляет рассмотрение перемещений u и горизонтальных напряжений σ_x [13]. Перемещения могут быть определены по формулам:

$$R_1 = \sqrt{(z-c)^2 + r^2}; \quad R_2 = \sqrt{(z+c)^2 + r^2}; \quad \text{при том, что } z=c; \quad r=x; \quad R_1 = \sqrt{x^2} = x; \quad R_2 = \sqrt{4c^2 + x^2};$$

$$u = \frac{2P(1+\nu)}{16\pi E(1-\nu)} \left[\frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{x^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)x^2}{R_2^3} + \frac{2cz}{R_2^3} \left(1 + \frac{3x^2}{R_2^2} \right) + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2+z+c} \left(1 - \frac{x^2}{R_2(R_2+z+c)} \right) \right];$$

$$u(x, 0)_{z=c} = \frac{P(1+\nu)}{8\pi E(1-\nu)} \left[\frac{3-4\nu}{x} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{x} + \frac{(3-4\nu)x^2}{R_2^3} + \frac{2z^2}{R_2^3} \left(1 + \frac{3x^2}{R_2^2} \right) + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2+2z} \left(1 - \frac{x^2}{R_2(R_2+2z)} \right) \right]$$

$$= \frac{P(1+\nu)}{8\pi E(1-\nu)} \left[\frac{3-4\nu}{x} + \frac{1}{\sqrt{4c^2+x^2}} + \frac{1}{x} + \frac{(3-4\nu)x^2}{\sqrt[3]{4c^2+x^2}} + \frac{2c^2}{\sqrt[3]{4c^2+x^2}} \right]$$

$$\cdot \left(1 + \frac{3x^2}{\sqrt[3]{4c^2+x^2}} \right) + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{\sqrt{4c^2+x^2}+2c} \left(1 - \frac{x^2}{\sqrt{4c^2+x^2}(\sqrt{4c^2+x^2}+2c)} \right) \right]$$

$$K_1 = \frac{(1+\nu)}{8\pi(1-\nu)} \left[\frac{3-4\nu}{x} + \frac{1}{\sqrt{4c^2+x^2}} + \frac{1}{x} + \frac{(3-4\nu)x^2}{\sqrt[3]{4c^2+x^2}} + \frac{2c^2}{\sqrt[3]{4c^2+x^2}} \left(1 + \frac{3x^2}{\sqrt[3]{4c^2+x^2}} \right) + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{\sqrt{4c^2+x^2}+2c} \left(1 - \frac{x^2}{\sqrt{4c^2+x^2}(\sqrt{4c^2+x^2}+2c)} \right) \right]$$

С учетом (4) перемещение равно:

$$u(x, 0)_{z=c} = \frac{P}{E} \cdot K_1 = \frac{N}{E} \cdot K_1 \quad (13)$$

Напряжения σ_x от приложенной сосредоточенной силы на глубине z полупространства могут быть определены по формуле:

$$\begin{aligned}
\sigma_x(x, 0)_{z=c} &= \frac{Px}{8\pi(1-\nu)} \left[\frac{(1-2\nu)(5-4\nu)}{R_2^3} + \frac{6z}{R_2^5} \left\{ 3z - (6z - 4z\nu) + \frac{5x^2}{R_2^2} \right\} - \frac{1-2\nu}{x^3} - \frac{3}{x^3} \right. \\
&\quad \left. - \frac{3(3-4\nu)x^2}{R_2^5} - \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2(R_2+2z)^2} \left(3 - \frac{x^2(3R_2+2z)}{R_2^2(R_2+2z)} \right) \right] \\
&= \frac{Px}{8\pi(1-\nu)} \left[\frac{6c}{\sqrt[5]{4c^2+x^2}} \left\{ 3c - (6c - 4c\nu) + \frac{5x^2}{4c^2+x^2} \right\} - \frac{1-2\nu}{x^3} - \frac{3}{x^3} \right. \\
&\quad \left. - \frac{3(3-4\nu)x^2}{\sqrt[5]{4c^2+x^2}} - \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{\sqrt{4c^2+x^2} \left(\sqrt{4c^2+x^2} + 2c \right)^2} \left(3 - \frac{x^2 \left(3\sqrt{4c^2+x^2} + 2c \right)}{(4c^2+x^2) \cdot \left(\sqrt{4c^2+x^2} + 2c \right)} \right) \right. \\
&\quad \left. + \frac{(1-2\nu)(5-4\nu)}{\sqrt[3]{4c^2+x^2}} \right] \\
\sigma_x(x, 0)_{z=c} &= Px \cdot K_2
\end{aligned} \tag{14}$$

Полученные напряжения после подстановки значения силы действия струи N из формулы (4) для случая изотропных грунтов соотносятся с критерием Кулона-Мора. Критерий в главных напряжениях:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = -(\sigma_1 - \sigma_3) \sin \varphi + 2C \cdot \cos \varphi \tag{15}$$

где σ_1, σ_2 — главные напряжения; c — сцепление; φ — угол внутреннего трения.

В таблице 2 приведены значения коэффициентов K_1 и K_2 на различных расстояниях в зависимости от коэффициента Пуассона.

Таблица 2 - Значения коэффициентов K_1 и K_2 для определения перемещений и напряжений от действия сосредоточенной силы внутри полупространстваDOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.63.1.3>

№ n/n	X, м	Песок, супесь $\nu=0,3$				Суглинок $\nu=0,35$				Глина $\nu=0,42$			
		K_1		K_2		K_1		K_2		K_1		K_2	
		Z= 5м	Z=15м	Z= 5м	Z= 15м	Z= 5м	Z= 15м	Z= 5м	Z= 15м	Z= 5м	Z= 15м	Z= 5м	Z= 15м
1	0,15	1,395	1,385	-57,26	-57,26	1,45	1,44	-59,853	-59,853	1,524	1,512	-64,23	-64,23
2	0,2	1,05	1,04	-24,16	-24,16	1,09	1,08	-25,25	-25,251	1,15	1,135	-27,1	-27,097

№ n/n	X, м	Песок, супесь v=0,3				Суглинок v=0,35				Глина v=0,42			
		K ₁		K ₂		K ₁		K ₂		K ₁		K ₂	
		Z= 5м	Z=15м	Z= 5м	Z= 15м	Z= 5м	Z= 15м	Z=5м	Z= 15м	Z=5м	Z= 15м	Z= 5м	Z= 15м
3	0,3	0,70	0,695	-7,158	-7,158	0,732	0,721	-7,482	-7,482	0,77	0,759	-8,03	-8,029
4	0,5	0,43	0,419	-1,546	-1,546	0,445	0,435	-1,616	-1,616	0,469	0,457	-1,73	-1,734
5	0,6	0,36	0,350	-0,895	-0,895	0,374	0,363	-0,935	-0,935	0,393	0,382	-1,00	-1,00

№ n/n	X, м	Песок, супесь v=0,3				Суглинок v=0,35				Глина v=0,42			
		K ₁		K ₂		K ₁		K ₂		K ₁		K ₂	
		Z= 5м	Z=15м	Z= 5м	Z= 15м	Z= 5м	Z= 15м	Z= 5м	Z= 15м	Z= 5м	Z= 15м	Z= 5м	Z= 15м
6	0,7	0,31	0,30	-0,563	-0,563	0,323	0,312	-0,589	-0,589	0,339	0,328	-0,63	-0,632
7	0,8	0,274	0,264	-0,377	-0,377	0,28	0,274	-0,395	-0,395	0,299	0,288	-0,42	-0,423
8	0,9	0,245	0,235	-0,265	-0,265	0,254	0,244	-0,277	-0,2771	0,2677	0,257	-0,297	-0,297

Очевидно, что перемещения в первую очередь зависят от соотношения силы и модуля упругости грунта. Коэффициент K_1 зависит от вида грунта, расстояния от точки приложения силы ($K_1 \cong 0,225 \cdot X^{-0,99}$) и в меньшей степени от глубины приложения силы. Напряжения $\sigma_x(x,0)_{z=c}$ в полупространстве зависят от величины действующей силы и коэффициента K_2 , а он зависит от вида грунта и расстояния от точки приложения силы и не зависит от глубины ее приложения, что не логично.

Касательные напряжения τ_{zx} равны:

$$\tau_{zx} = \frac{P}{8\pi(1-\nu)} \left[\frac{-(1-2\nu)(z-c)}{R_1^3} + \frac{(1-2\nu)(z-c)}{R_2^3} - \frac{3x^2(z-c)}{R_1^5} - \frac{3x^2(3-4\nu)(z+c)}{R_2^5} - \frac{6c}{R_2^5} \left\{ z(z+c) - (1-2\nu)x^2 - \frac{5x^2z(z+c)}{R_2^2} \right\} \right];$$

После подстановки $\tau_{zx}(x,0)_{z=c}$:

$$\tau_{zx} = \frac{P}{8\pi(1-\nu)} \left[\frac{-6x^2(3-4\nu)c}{5\sqrt[5]{4c^2+x^2}} - \frac{6c}{5\sqrt[5]{4c^2+x^2}} \left\{ 2c^2 - x^2(1-2\nu) - \frac{10x^2c^2}{4c^2+x^2} \right\} \right]$$

Для песков, суглинков и глин соотношение величин касательных напряжений на глубинах 5м и 15м близки $\frac{\tau_{zx5}}{\tau_{zx15}} \approx 9$.

Полученные величины касательных напряжений, легко сравниваются с одним из критериев разрушения грунта.

Оценка эффективного давления струи в скважине

Для расчета закрепления грунтов оценка эффективного давления струи в скважине имеет важное практическое значение. Дифференциальное давление снижает действующее давление струи раствора на стенки скважины во время излива и представляет собой разность гидростатического и гидродинамического давлений раствора с пластовым давлением. Дифференциальное давление (формализовал П.Ф. Осипов, 2000) является комплексным фактором, с помощью которого учитываются конкретные условия скважины и свойства раствора (плотность, реологические свойства и др.) [14]. Исследования показали, что струя способна вызвать эффект возникновения и существования обратной фильтрации (характеризуется величиной максимума скорости фильтрации). А также этот эффект способен влиять на величину и знак градиента давления. Величина $P_{эф}$ — эффективное давление струи [14], вычисляется по формуле:

$$P_{эф} = P_{ос} - P_{диф} \quad (16)$$

где $P_{ос}$ — осевое давление струи на забой, определяемое по (10); $P_{диф}$ — дифференциальное давление, определяемое по формуле:

$$P_{диф} = g \cdot \rho \cdot l_{скв} + P_{кп} - P_{пор} \quad (17)$$

где $P_{кп}$ — потери давления в затрубном пространстве, кПа; $P_{пор}$ — поровое давление, кПа; ρ — плотность раствора, кг/м³; $l_{скв}$ — глубина скважины, м.

Поровое давление:

$$P_{пор} = \rho_v \cdot g \cdot L, \text{ кПа} \quad (18)$$

где ρ_v — плотность грунтовых вод, кг/м³; где g — ускорение свободного падения, м/с²; L — глубина проведения закрепления от УГВ, м.

Определение размера зон закрепления грунта с использованием прочностных характеристик грунтов: сцепления C и угла внутреннего трения φ

Величина предельного давления струи малого диаметра с высоким давлением на стенку скважины рассчитывается по известной формуле Л. Прандтля и Г. Рейснера для невесомого грунта с поверхностной «пригрузкой». Это решение используется для определения осадки свай [15], для обоснования величин эксплуатационных потерь при разработке месторождений песчано-гравийных смесей землесосными снарядами [16]. При достижении давления струи $P_{эф}=P_u$ в массиве образуется область предельного состояния [17] глубиной x . С увеличением давления струи начинаются разрушения, происходит выпор грунта и образуется «воронка», а далее врубовая полость. Величина P_u предельного давления равна:

$$P_u = (\gamma h + c \cdot \operatorname{tg} \varphi) \frac{1+\sin \varphi}{1-\sin \varphi} e^{\pi \cdot \operatorname{tg} \varphi} - c \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (19)$$

где P_u — предельная нагрузка для невесомого грунта, приложенного на поверхности, кПа; c — удельное сцепление, кПа; φ — угол внутреннего трения, град.

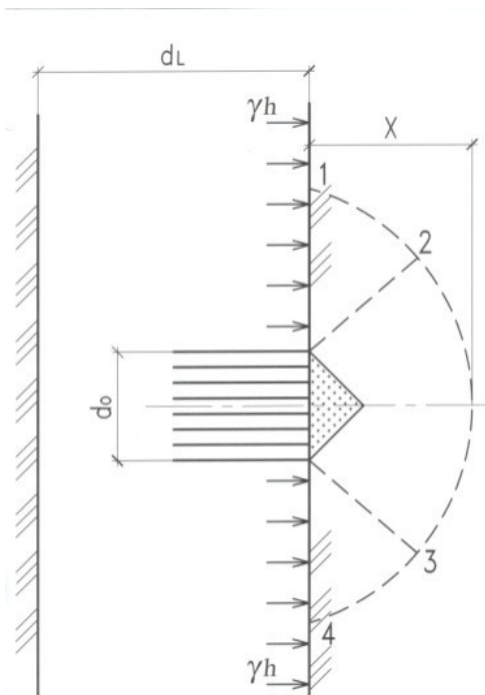


Рисунок 2 - Схема размыва струей стенки скважины в грунте
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.63.1.4>

В этой статье были рассмотрены наиболее характерные глубины и слабые грунты, которые на строительных площадках Санкт-Петербурга часто необходимо закреплять. На рисунках 3–7 приведены графики предельных давлений P_u для пылеватых песков, супесей, суглинков и глин.

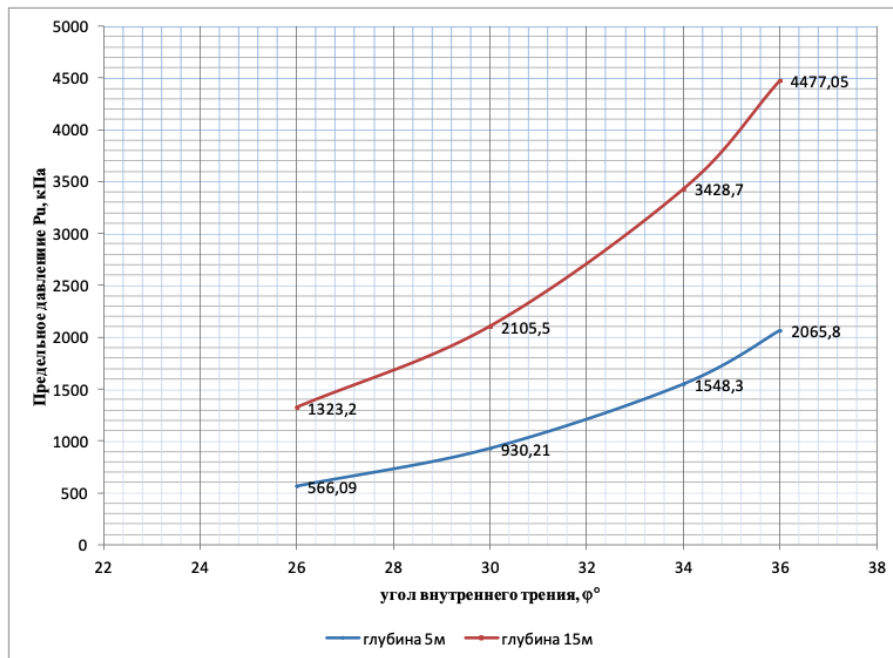


Рисунок 3 - Зависимость предельного давления P_u , кПа от угла внутреннего трения ϕ пылеватого песка ($c=2-8$ кПа; $\phi=26-36$; $e=0,55-0,75$) на глубинах 5 м и 15 м
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.63.1.5>



Рисунок 4 - Зависимость предельного давления P_u , кПа от угла внутреннего трения ϕ супеси ($c=9-21$ кПа; $\phi=18-29$; $0,25 < I_L < 0,75$) на глубинах 5м и 15м

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.63.1.6>

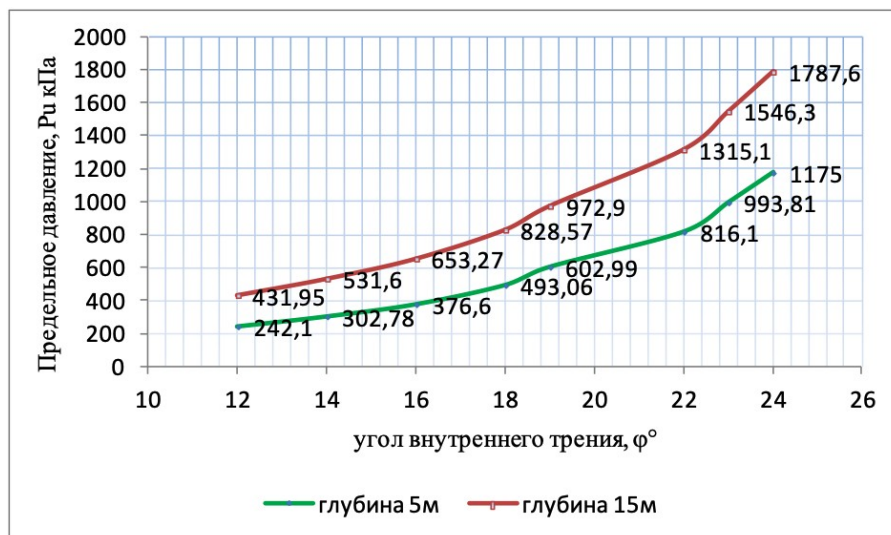


Рисунок 5 - Зависимость предельного давления P_u , кПа от угла внутреннего трения ϕ суглинка ($c=12-22$ кПа; $\phi=12-24$; $e=0,55-1,05$; $0,25 < I_L < 0,75$) на глубинах 5м и 15м

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.63.1.7>

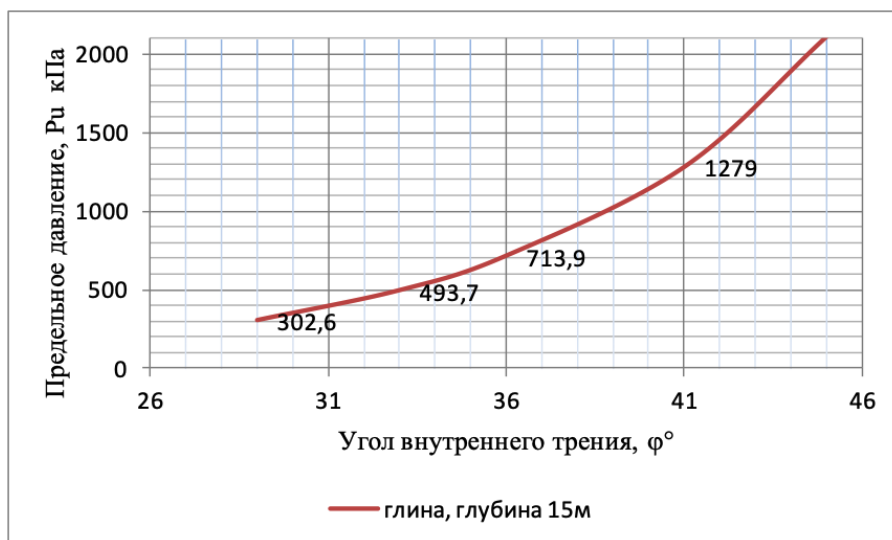


Рисунок 6 - Зависимость предельного давления P_u , кПа от угла внутреннего трения ϕ глин ($c=7-15$ кПа; $\phi=29-45$; $0,5 < I_L < 0,75$) на глубине 15 м

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.63.1.8>

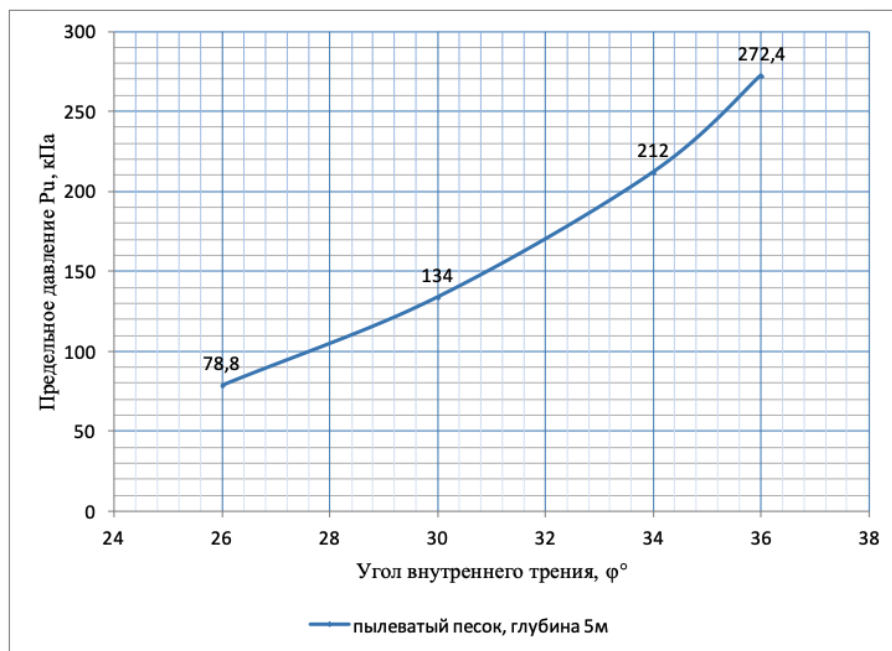


Рисунок 7 - Зависимость предельного давления P_u , кПа от угла внутреннего трения ϕ пылеватого песка ($c=2$ кПа; $0,7 \cdot \phi=18-25^\circ$; $e=0,55-0,75$) на глубине 5 м

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.63.1.9>

Полученные результаты расчетов хорошо согласуются с фактическими результатами закреплений в грунтах [18], [19], [20] и автора [21]. Проведенное исследование показало эффективность и перспективность развития этого подхода. Зависимости предельного сопротивления от угла внутреннего трения грунтов в сопоставлении со значениями осевых давлений струи, определяемой по формуле (11) в скважинах различных глубин позволяют прогнозировать диаметр закрепления.

Из графиков на рисунках 3 и 8 видно, что при низких давлениях нагнетания закрепление песков происходит не должно, что противоречит практическим результатам. При давлениях струи раствора $\cong 10$ МПа в пылеватых песках диаметр закрепления составляет $\approx 0,65$ м. Известно, что снижение сопротивления песчаных грунтов сдвигающим усилиям при воздействии вибрации весьма противоречивы (от 1,1 до 3,9 раз) и не дают четкой количественной оценки явления, объяснением которому могут быть знакопеременные изменения напряженного состояния грунта от пульсирующих нагрузок [22]. При больших вибрационных нагрузках возможно разрушение структуры грунта с изменением формы частиц и изменением характера их взаимодействия, приводящим к уменьшению сдвиговых характеристик. Можно предположить, что ожидаемый расчетный результат достигается в результате снижения значений угла внутреннего трения на $\cong 30\%$ за счет действующих пульсаций струй (рис. 7), а также снижения

величины пригруза в формуле (19) и увеличения эффективного давления за счет изменения направления фильтрации поровой воды из массива внутрь скважины.

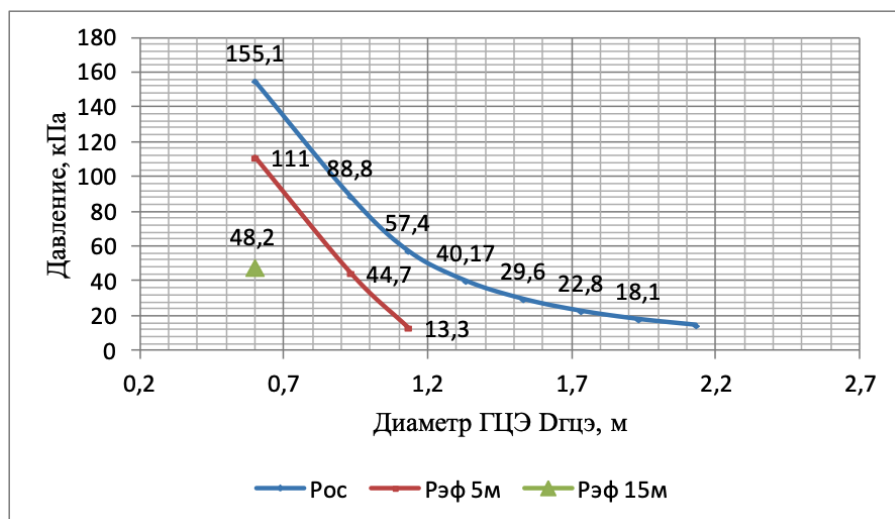


Рисунок 8 - Изменения давлений $P_{ос}$ и $P_{эф}$ в скважинах $d_l=0,132$ м на глубинах 5м и 15м при давлении нагнетания $P_0=10$ МПа ($d_0=5$ мм)

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.63.1.10>

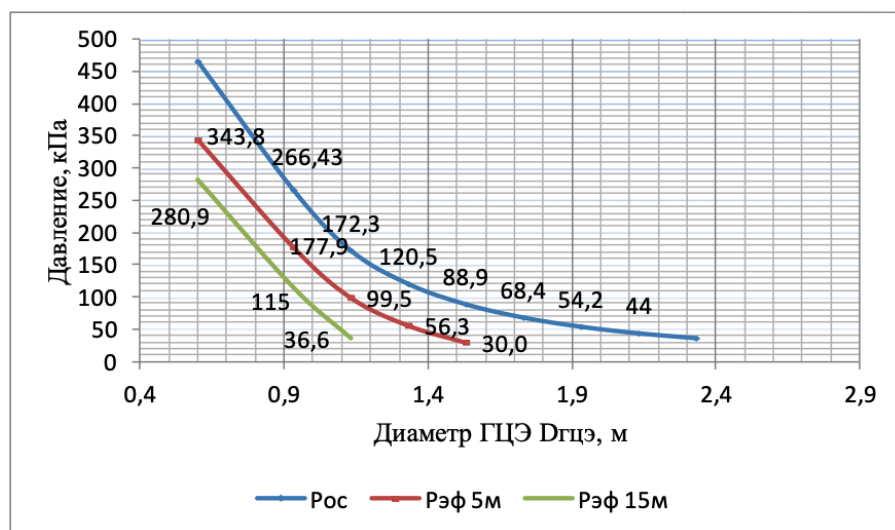


Рисунок 9 - Изменения давлений $P_{ос}$ и $P_{эф}$ в скважинах $d_l=0,132$ м на глубинах 5м и 15м при давлении нагнетания $P_0=30$ МПа ($d_0=5$ мм)

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.63.1.11>

С учетом уравнения Бернулли и теоремы сохранения импульсов [23] можно определить время t для размыва массива грунта с плотностью ρ_2 струей раствора с плотностью ρ_1 и начальной скоростью v_0 из (10):

$$t = \left(\sqrt{\rho_1 / \rho_2} + 1 \right) \frac{D_{ГЦЭ}}{2v_m}$$

$$t = D_{ГЦЭ} \cdot \left(\sqrt{\rho_1 / \rho_2} + 1 \right) \frac{1 + am}{2(1 + am_0) \cdot v_0} \quad (20)$$

Заключение

1. Для грунтов с известными модулем упругости и коэффициентом Пуассона с учетом решения Р. Миндлина для горизонтальной силы в упругом полупространстве были формализованы величины перемещений и напряжений. Перемещения от сосредоточенной силы зависят в первую очередь от соотношений силы и модуля упругости грунта. Коэффициент K_1 же зависит от вида грунта, расстояния от точки приложения силы и в меньшей степени от глубины ее приложения. Напряжения в полупространстве зависят от величины действующей силы и коэффициента K_2 , а он в свою очередь зависит от вида грунта и расстояния от точки ее приложения и не зависит от глубины, что не является логичным.

2. Предельное сопротивление грунта определялось по формуле Л. Прандтля для слабых грунтов, залегающих на глубинах 5 м и 15 м. При расчетах учитывалось эффективное давление в скважине. Сопоставление расчетных значений P_u и эффективных давлений $P_{эф}$ в скважинах позволяет прогнозировать диаметры закрепления цилиндрических ГЦЭ в различных грунтовых условиях и глубинах, используя стандартный набор параметров как грунтов, так и струи.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Минаков С.И. Интенсификация разрушения горных пород при использовании кавитационных колебаний жидкости в буровых долотах : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.14 / С.И. Минаков. — Москва, 2004. — 91 с.
2. Бай Ши-и. Теория струй / Бай Ши-и; пер. с англ. И.Б. Иконникова. — Москва : Физматгиз, 1960. — 326 с.
3. Бычкова О.П. О связи пульсаций скорости и давления на оси и в ближнем поле турбулентной струи / О.П. Бычкова, Г.А. Фараносова // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. — 2021. — № 4. — С. 41–51.
4. Маковей Н. Гидравлика бурения / Н. Маковей; пер. с румынского. — Москва : Недра, 1986. — 536 с.
5. Тюпин В.Н. Установление радиуса (глубины) разрушения грунтов при струйной цементации / В.Н. Тюпин, Н.П. Сигачев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2015. — № 2 (46). — С. 40–44.
6. Croce P. Jet-grouting: technology, design and control / P. Croce, A. Flora, G. Modoni. — CRC Press, 2014. — 278 p.
7. Бройд И.И. Струйная технология : учебное пособие / И.И. Бройд. — Москва : Издательство АСВ, 2004. — 448 с.
8. Михеев В.Л. Технологические свойства буровых растворов / В.Л. Михеев. — Москва : Недра, 1973. — 239 с.
9. Есьман Б.И. Термогидравлические процессы при бурении скважин / Б.И. Есьман, Г.Г. Гарбузов. — Москва : Недра, 1991. — 216 с.
10. Мерзляков В.Г. Физико-технические основы гидроструйных технологий в горном производстве / В.Г. Мерзляков, В.Г. Бафталовский. — Москва : Национальный научный центр горного производства – Институт горного дела имени А.А. Сковинского, 2006. — 646 с.
11. Wang Z.F. Jet Grouting Practice: and Overview / Z.F. Wang, S.L. Shen, C.E. Ho [et al.] // Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA. — 2013. — Vol. 44. — № 4. — P. 88e–96.
12. Владыко А.Б. Технология создание противодиффузионных завес струями высокого давления : монография / А.Б. Владыко. — Днепропетровск : Национальный горный университет, 2010. — 86 с.
13. Леденев В.В. Теоретические основы механики деформирования и разрушения : монография / В.В. Леденев, В.Г. Однолюк, З.Х. Нгуен. — Тамбов : Издательство Тамбовского государственного технического университета, 2013. — 312 с.
14. Осипов П.Ф. Проектирование оптимальных режимов бурения гидромониторными шарошечными долотами: проблемы и решения : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.14 / П.Ф. Осипов. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2000. — 46 с.
15. Тер-Мартirosян З.Г. Решение задачи осадки свай под действием вертикальной статической нагрузки с учетом пластических свойств грунтов основания / З.Г. Тер-Мартirosян, К.А. Филиппов // Вестник Московского государственного строительного университета. — 2022. — Т. 17. — Вып. 7. — С. 871–881.
16. Милютин И.А. Обоснование эксплуатационных и технологических потерь при добыче песчано-гравийных смесей землесосными снарядами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.22 / И.А. Милютин. — Екатеринбург, 2012. — 20 с.
17. Харр М.Е. Основы теоретической механики грунтов / М.Е. Харр; пер. с англ. М.Н. Гольдштейна. — Москва : Стройиздат, 1971. — 319 с.
18. Головин К.А. Обоснование параметров и создание оборудования для гидроструйной цементации неустойчивых пород в горном производстве : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.06 / К.А. Головин. — Тула, 2007. — 336 с.
19. Засорин М.С. Эффективность технологии струйной цементации грунтов / М.С. Засорин // Геотехника. — 2017. — № 3. — С. 40–45.
20. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов / А.Г. Малинин. — Москва : ОАО «Издательство «Стройиздат», 2010. — 226 с.
21. Улицкий В.М. Основания и фундаменты реконструируемых зданий : учеб. 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.
22. Бахтин Б.М. Учет влияния вибрации на сопротивление песчаного грунта сдвигу / Б.М. Бахтин // Гидротехническое строительство. — 2012. — № 1. — С. 42–47.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Minakov S.I. Intensifikatsiya razrusheniya gornyx porod pri ispolzovanii kavitatsionnykh kolebaniy zhidkosti v burovnykh dolotakh [Intensification of Rock Destruction Using Cavitation Fluid Oscillations in Drill Bits] : abst. of dis. ... of PhD in Engineering : 25.00.14 / S.I. Minakov. — Moscow, 2004. — 91 p. [in Russian]
2. Bai Shi-i. Teoriya struy [Theory of Jets] / Bai Shi-i; transl. from English by I.B. Ikonnikov. — Moscow : Fizmatgiz, 1960. — 326 p. [in Russian]
3. Bychkova O.P. O svyazi pulsatsiy skorosti i davleniya na osi i v blizhnem pole turbulentnoy strui [On the Relationship Between Velocity and Pressure Pulsations on the Axis and in the Near Field of a Turbulent Jet] / O.P. Bychkova, G.A. Faranosova // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Fluid and Gas Mechanics]. — 2021. — № 4. — P. 41–51. [in Russian]
4. Makovey N. Gidravlika bureniya [Drilling Hydraulics] / N. Makovey; transl. from Romanian. — Moscow : Nedra, 1986. — 536 p. [in Russian]
5. Tyupin V.N. Ustanovlenie radiusa (glubiny) razrusheniya gruntov pri struynoy tsementatsii [Determination of the Radius (Depth) of Soil Destruction During Jet Grouting] / V.N. Tyupin, N.P. Sigachev // Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. — 2015. — № 2 (46). — P. 40–44. [in Russian]
6. Croce P. Jet-grouting: technology, design and control / P. Croce, A. Flora, G. Modoni. — CRC Press, 2014. — 278 p.
7. Broyd I.I. Struynaya tekhnologiya [Jet Technology] : textbook / I.I. Broyd. — Moscow : ASV Publishing House, 2004. — 448 p. [in Russian]
8. Mikheev V.L. Tekhnologicheskie svoystva burovnykh rastvorov [Technological Properties of Drilling Fluids] / V.L. Mikheev. — Moscow : Nedra, 1973. — 239 p. [in Russian]
9. Esman B.I. Termogidravlicheskie protsessy pri burenii skvazhin [Thermohydraulic Processes in Well Drilling] / B.I. Esman, G.G. Garbuzov. — Moscow : Nedra, 1991. — 216 p. [in Russian]
10. Merzlyakov V.G. Fiziko-tekhnicheskie osnovy gidrostruynykh tekhnologiy v gornom proizvodstve [Physical and Technical Foundations of Hydrojet Technologies in Mining] / V.G. Merzlyakov, V.G. Baftalovsky. — Moscow : National Mining Research Center – A.A. Skochinsky Institute of Mining, 2006. — 646 p. [in Russian]
11. Wang Z.F. Jet Grouting Practice: and Overview / Z.F. Wang, S.L. Shen, C.E. Ho [et al.] // Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA. — 2013. — Vol. 44. — № 4. — P. 88e–96.
12. Vladyko A.B. Tekhnologiya sozdanie protivofil'tracionnykh zaves struyami vysokogo davleniya [Technology for Creating Anti-Filtration Barriers with High-Pressure Jets] : monograph / A.B. Vladyko. — Dnepropetrovsk : National Mining University, 2010. — 86 p.
13. Ledenev V.V. Teoreticheskie osnovy mekhaniki deformirovaniya i razrusheniya [Theoretical Foundations of the Mechanics of Deformation and Fracture] : monograph / V.V. Ledenev, V.G. Odnolko, Z.Kh. Nguyen. — Tambov : Publishing House of Tambov State Technical University, 2013. — 312 p. [in Russian]
14. Osipov P.F. Proektirovanie optimalnykh rezhimov bureniya gidromonitornymi sharoshechnymi dolotami: problemy i resheniya [Design of Optimal Drilling Modes for Hydromonitor Roller Cone Bits: Problems and Solutions] : abst. of dis. ... of Dr. of Engineering : 05.15.14 / P.F. Osipov. — Saint Petersburg : Saint Petersburg Mining University, 2000. — 46 p. [in Russian]
15. Ter-Martirosyan Z.G. Reshenie zadachi osadki svai pod deystviem vertikalnoy staticheskoy nagruzki s ucheto plasticheskikh svoystv gruntov osnovaniya [Solving the Problem of Pile Settlement Under Vertical Static Load Taking into Account the Plastic Properties of the Base Soils] / Z.G. Ter-Martirosyan, K.A. Filippov // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. — 2022. — Vol. 17. — Issue 7. — P. 871–881. [in Russian]
16. Milyutin I.A. Obosnovanie ekspluatatsionnykh i tekhnologicheskikh poter pri dobyche peschano-gravijnykh smesey zemlesosnymi snaryadami [Substantiation of Operational and Technological Losses in the Extraction of Sand-Gravel Mixtures by Dredges] : abst. of dis. ... of PhD in Engineering : 25.00.22 / I.A. Milyutin. — Yekaterinburg, 2012. — 20 p. [in Russian]
17. Kharr M.E. Osnovy teoreticheskoy mekhaniki gruntov [Foundations of Theoretical Soil Mechanics] / M.E. Kharr; transl. from English by M.N. Goldshteyn. — Moscow : Stroyizdat, 1971. — 319 p. [in Russian]
18. Golovin K.A. Obosnovanie parametrov i sozdanie oborudovaniya dlya gidrostruynoy tsementatsii neustoychivyykh porod v gornom proizvodstve [Substantiation of Parameters and Creation of Equipment for Hydrojet Cementation of Unstable Rocks in Mining] : dis. ... of Dr. of Engineering : 05.05.06 / K.A. Golovin. — Tula, 2007. — 336 p. [in Russian]
19. Zasorin M.S. Effektivnost tekhnologii struynoy tsementatsii gruntov [Efficiency of Jet Grouting Technology] / M.S. Zasorin // Geotekhnika [Geotechnics]. — 2017. — № 3. — P. 40–45. [in Russian]
20. Malinin A.G. Struynaya tsementatsiya gruntov [Jet Grouting of Soils] / A.G. Malinin. — Moscow : OAO "Stroyizdat Publishing House", 2010. — 226 p. [in Russian]
21. Ulitsky V.M. Osnovaniya i fundamentey rekonstruiemykh zdaniy [Foundations and Footings of Reconstructed Buildings] : textbook / V.M. Ulitsky, V.N. Paramonov, A.G. Shashkin [et al.]. — Saint Petersburg : Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 2017. — 94 p. [in Russian]
22. Bakhtin B.M. Uchet vliyaniya vibratsii na soprotivleniye peschanogo grunta sdvigu [Accounting for the Effect of Vibration on the Shear Resistance of Sandy Soil] / B.M. Bakhtin // Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical Construction]. — 2012. — № 1. — P. 42–47. [in Russian]