

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

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.2>

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТОВ

Научная статья

Богов С.Г.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-4048-6589;

<sup>1</sup> ООО «ИСП Геореконструкция», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

**Аннотация**

Современное геотехническое строительство практически невозможно без использования буровых работ в грунтах и закачивания в них специальных жидкостей. При этом применение мониторов, инъекция силикатных, цементных и полимерных растворов и удаление выбуренных частиц грунта из лидерных скважин – это далеко не полный перечень операций, связанных с процессами в скважинах. В технологии закрепления грунтов из буровых скважин важным элементом, определяющим экономические показатели и качество закрепления, являются свойства применяемых растворов: буровых и для нагнетания – цементных. В основе технологических операций размыва струей стенок скважины для закрепления грунтов по струйной технологии, равно как при бурении, лежат схожие процессы. Цементный же раствор является главным фактором, обеспечивающим эффективность процесса закрепления. Недоучет технологических особенностей этой технологии, и как следствие, неравномерные деформации (просадка/подъем) фундаментов зданий, возникающие на строительных площадках требуют внесения обоснованных корректив, как в рецептуру растворов, так и диаметры бурения. Также необходимо учитывать то обстоятельство, что цементные растворы являются неньютоновскими жидкостями, а у таких жидкостей вязкость – величина не постоянная и зависит от напряжения и скорости сдвига.

**Ключевые слова:** струйная технология, свойства цементных растворов, реология, закрепление и гидроразрыв грунтов.

OPTIMISATION OF JET GROUTING TECHNOLOGY FOR SOIL CEMENTATION

Research article

Bogov S.G.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-4048-6589;

<sup>1</sup> ISP Georeconstruction LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation

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

**Abstract**

Modern geotechnical construction is practically impossible without the use of drilling operations in soils and injection of special fluids into them. The use of monitors, injection of silicate, cement and polymer solutions and removal of drilled out soil particles from the pilot holes is not a complete list of operations related to drilling processes. In the technology of ground consolidation from boreholes, an important element determining economic indicators and quality of consolidation is the properties of the applied solutions: drilling and cement solutions for injection. The technological operations of washing out the well walls by jetting to consolidate soils using the jetting technology, as well as drilling, are based on similar processes. The cement solution is the main factor ensuring the efficiency of the fixation process. Underestimation of technological specifics of this technology and, as a consequence, uneven deformations (subsidence/lift) of building foundations occurring on construction sites require reasonable corrections both in the formulation of mortars and drilling diameters. It is also necessary to take into account the fact that cement mortars are non-Newtonian fluids, and in such fluids viscosity is not constant and depends on the shear stress and velocity.

**Keywords:** jet grouting technology, cement slurry properties, rheology, stabilisation and fracturing of soils.

**Введение**

Основными функциями растворов в буровых скважинах является необходимость сохранения свойств применяемого раствора в процессе всего технологического цикла. Как при бурении скважин, так и при размыве требуется регулирование параметров как раствора, так и скорости размыва с целью определения количества частиц грунта попадающих в раствор и его транспортирующей способности (т.е. выноса частиц грунта). Большинство технологических деформаций (просадок/подъемов), возникающих при закреплении грунтов из буровых скважин, связаны со свойствами растворов и ухудшениями режимов их течения. Для предотвращения таких явлений, как клокот и гидроразрыв стенок скважин, подъем поверхности и фундаментов вблизи расположенных зданий необходимо обеспечить соответствующие показатели свойств растворов и режимов закачки. Применяемые растворы и режимы их течения должны обеспечивать как устойчивость стенок скважины, так и вынос частиц грунта в плановом объеме, снижение сил трения, величину гидродинамического давления на ее стенки в затрубном пространстве при отсутствии проблем излива.

Для оптимального применения струйной технологии закрепления грунтов цементные растворы должны обладать технологическими свойствами, способствующими эффективному закреплению. Существенное влияние на качество

закрепления оказывают величина превышения гидростатического давления над поровым и эффективная вязкость раствора. От эффективной вязкости зависит величина гидравлической мощности струи и возможность транспортирования извлеченных частиц из массива грунта на дневную поверхность. Эти факторы определяют актуальность проблемы контроля и регулирования свойств цементных растворов применительно к наиболее перспективной струйной технологии закрепления грунтов.

#### Неньютоновское поведение инъекционных цементных растворов

Растворы, течение которых не подчиняются закону Ньютона, как правило, называются вязко-пластичными. Оствальдом-де Вале было установлено, что их вязкость меняется с ростом градиента скорости сдвига. Это поведение было объяснено наличием у жидкости «структуры» и ее изменением в процессе течения, т. е. проявлением «структурной» или эффективной вязкости.



Рисунок 1 - Сравнение степенной модели жидкости, вязкопластической и Бингама

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.2.1>

Такого рода жидкости были названы «псевдопластическими», см. рис. 1. Течение псевдопластических жидкостей описывается [1]:

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \quad (1)$$

где:

$K$  – индекс консистенции,  $\text{Па} \cdot \text{с}^n$ ;

$n$  – показатель степени неньютоновского поведения жидкости;

$\dot{\gamma}$  – скорость сдвига,  $\text{с}^{-1}$ ;

$n$  – показатель консистенции и показатель псевдопластичности;

при  $n > 1$  уравнение (1) описывает дилатантные жидкости (при сдвиге загустевает);

при  $n < 1$  – неньютоновские жидкости;

при  $n = 1$  формула Оствальда-де Вале превращается в закон Ньютона.

Индекс консистенции увеличивается с повышением концентрации частиц, в то время как показатель  $n$  в гораздо меньшей степени подвержен влиянию концентрации. Если вязкость повышается вследствие агрегации или флокуляции частиц, то  $K$  увеличивается, а  $n$  отклоняется от единицы (раствор приобретает псевдопластичные свойства). Все цементные растворы являются псевдопластическими (или степенными) жидкостями.

Таблица 1 - Зависимости относительной вязкости от объемной концентрации твердых частиц в жидкости [2]  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.2.2>

п/п	Функция вязкости $\eta_{см}/\eta_0 = f(c_v)$	Значение концентрации твердых частиц	Метод вывода формулы	Авторы
1	$1+2,5c_v$	$c_v \ll 0,004$	теоретический	А. Эйнштейн
2	$(1 - c_v)^{-2,5}$	$c_v < 0,5$	эмпирический	О.М. Тодес
3	$(1 - c_v)^{-3,75}$	$c_v < 0,5$	теоретический	Р. Роско и др.
4	$(1 - c_v/c_{max})^{-1,85};$ $c_{max} = 0,75$	$c_v < 0,7$	теоретический	А.И. Бувич и др.
5	$(1 - c_v/c_{max})^{-2,5}$	$c_v < 0,5$	теоретический	Р.Ф. Ландел

Различие в формулах относительной вязкости связано с перераспределением твердых частиц и проявлением неньютоновских свойств жидкости см. табл. 1. Наличие сил связи между дисперсными частицами твердой фазы и воды позволяет рассматривать цементный раствор как единое физическое тело с определенными физическими, механическими и реологическими свойствами [3]. При закреплении грунтов по струйной технологии из вертикальных лидерных скважин в состав раствора включаются частицы цемента и грунта, изменяющие ее вязкость и содержание твердой фазы. Объемное приращение частиц закрепляемого массива ( $m^3/c$ ) на 1м грунтоцементного элемента определяется по формуле:

$$Q_{ч} = \frac{\pi(D_{гцэ}^2 - D_l^2)(1-n)}{4} \cdot V_{под} \quad (2)$$

где:

$n$  – пористость грунта;

$V_{под}$  – скорость подъема (приращение диаметра скважины).

Закрепление глинистых грунтов струей цементного раствора сопряжено с большими трудностями, так как они могут легко переходить в раствор, увеличивая в нем твердую фазу и снижая прочность. Наибольшее влияние оказывает коллоидная составляющая разбуживаемых глинистых минералов. Цементные растворы для этих условий должны обладать ингибирующими и недиспергирующими свойствами, малой водоотдачей. Для этой цели подбираются специальные рецептуры [4].

Чтобы увеличение диаметра не приводило к увеличению содержания (концентрации) частиц более  $j = 5...6\%$  [5], [6] и изменению НДС на стенках вертикальной скважины нужно соблюдение равенства:

$$0,785(1 - n) \cdot (D_{гцэ}^2 - D_l^2) \cong 0,06 \cdot Q_{цр} \quad (3)$$

Если предварительно задается расход цементного раствора, то можно произвести оценку процентного содержания частиц в грунтоцементном элементе на 1 метр высоты:

$$\alpha = \frac{7,64 \cdot Q_{цр}}{(1-n) \cdot (D_{гцэ}^2 - D_l^2)} \quad (4)$$

Содержание частиц внутри первого элемента будет максимальным, а прочность минимальна. Рассматривая группу сопряженных грунтоцементных элементов, например, для создания горизонтальной распорки котлована из приведенных на рис. 2 последовательно устраиваемых по номерам семи элементов. Условия создания в исходном грунте соответствуют только одному элементу – № 1. Последующие элементы № 2, № 3, № 4, № 5 на 1 п.м. скважины уже будут иметь объем частиц грунта на 8% меньше, чем № 1. Создаваемый элемент № 6 будет иметь объем грунта на 16% меньше, чем № 1, а № 7 уже меньше на 42%. При отборе проб с глубины вероятность отобрать прочность из элементов №2,3,4,5 составляет  $P(a)=0,57$ , а из элементов № 1 и № 6 и № 7 по  $P(a)=0,14$ . Таким образом, в одном и том же возрасте прочность для приведенных элементов будет разная, минимальная – у элемента № 1 и максимальная – у № 7. При последовательности устройства jet элементов (сначала нечетные) получается большая неравномерность свойств. Условия создания в исходном грунте соответствуют трем элементам – № 1, № 3, № 5, элементы № 2, № 4, № 6 будут иметь объем частиц грунта меньше на 16%, а № 7 меньше на 42%, чем № 1, № 3, № 5.

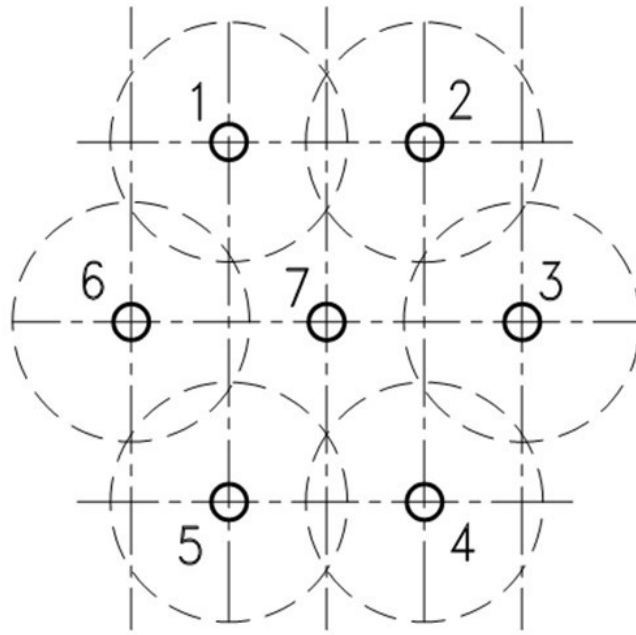


Рисунок 2 - Сопряженные вертикальные грунтоцементные элементы; 1..7 – последовательность устройства jet элементов

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.2.3>

Очевидно, что грунтоцементные элементы следует разделить по типам: тип № 1 jet элементы, устраиваемые в исходном грунте, тип № 2 с включением 1..2 ранее выполненных элементов и заключительный тип № 3 – элемент с минимальным содержанием грунтовых частиц. Для исключения явления клакажа, подъема поверхности и горизонтального смещения массива грунта технологические параметры для элементов типа № 1 и № 2 должны отличаться. При закреплении элементов типа №1 размыв следует вести с максимальным расходом и средним давлением раствора, задавая меньшую скорость подъема и большее время на размыв. Также для этой цели возможно использование сопел больших диаметров. Скорость подъема монитора из скважины с момента устройства «врубной полости» первого элемента можно определить:

$$V_{но\partial} = \frac{0,24 \cdot Q_{цр}}{\pi(D_{гцэ}^2 - D_l^2)(1-n)} \quad (5)$$

В грунтовых условиях площадки варьируя свойства цементного раствора [7] диаметрами бурения и расходом раствора можно определить максимальный диаметр частиц грунта  $d_s$ , который может быть вынесен на дневную поверхность в виде излива пульпы.

Скорость осаждения частиц грунта  $V_{ос}$  плотностью  $\rho_s$  диаметром  $d$  в движущемся со скоростью  $V_{ср}$  потоке можно рассчитать по формуле:

$$V_{ос} = \frac{69,12(\rho_s - \rho_p) d v_{ср}^2}{1,07 \tau_0 (r_l - r_s) + 3,33 \eta_p v_{ср}}; \quad (6)$$

С учетом нами установленных реологических параметров цементных растворов по формуле 6 определены скорости осаждения частиц грунта для затрубного пространства при различных диаметрах вертикальных лидерных скважин ( $d_l = 0,112$  м;  $d_l = 0,132$  м;  $d_l = 0,151$  м) и гладких буровых труб  $d_s = 0,89$  м.

С помощью полученных данных о скорости осаждения частиц грунта и гранулометрическом составе исходного грунта можно определить расчетное содержание частиц  $x_d$  диаметром  $d_s$  остающееся в первом jet элементе. Для устройства в скважинах последующих jet элементов (после первого) с учетом последовательности их устройства без клакажа расход цементного раствора на 1 м/п может быть уточнен:

$$Q_{цр} = \frac{\pi(D_{гцэ}^2 - D_l^2)(1-n) \cdot a \cdot x_d}{0,24} \quad (7)$$

Для наклонных скважин с углом более  $15^\circ$  следует учитывать, что выбуренные частицы грунта при транспортировании их к устью перемещаются преимущественно вдоль нижней стенки скважины, и при недостаточной скорости восходящего потока раствора образует «дюну» из переносимых потоком частиц [8].

**Определение гидравлических потерь давления на трение в затрубном пространстве скважин**

Параметры вязкости степенной жидкости исследованных цементных растворов [9] на основе портландцемента ЦЕМ II/A-Ш32,5 Б (М400) с В/Ц=1; В/Ц=0,75 и В/Ц=0,5 с различным содержанием добавок суперпластификатора С-3, жидкого стекла, хлористого кальция и без добавок использовались для определения гидравлических потерь с расходом 126 л/мин (см. табл. 2, табл. 3, табл. 4).

Определение гидравлических потерь давления на трение в затрубном пространстве буровых скважин различного диаметра и глубины при ламинарном режиме течения псевдопластических цементных растворов [10] производилось по формуле:

$$p_k = 2^{2+4n} \cdot K \left[ \frac{2n+1}{n} \cdot \frac{Q_{\text{цр}}}{\pi(D_1+d_s)} \right]^n \cdot \frac{l}{(D_1-d_s)^{2n+1}} \quad (8)$$

Таблица 2 - Гидравлические потери давления (кПа) на трение в затрубном пространстве цементных растворов с В/Ц=0,5 при диаметрах скважины (112 мм, 132 мм, 151 мм) на глубинах  $l = 5$  м,  $l = 10$  м,  $l = 20$  м

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.2.4>

Глубина, м	хим. добавка % от веса цемента			
	без добавок	Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	C-3 - 0,17% + Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	CaCl <sub>2</sub> - 2%
D <sub>1</sub> - d <sub>s</sub> =23мм, В/Ц=0,5				
5	19,083	25,66	23,26	14,77
10	38,17	51,32	46,51	29,53
20	76,33	102,6	93,03	59,07
Глубина, м	хим. добавка % от веса цемента			
	без добавок	Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	C-3 - 0,17% + Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	CaCl <sub>2</sub> - 2%
D <sub>1</sub> - d <sub>s</sub> =43мм, В/Ц=0,5				
5	5,07	6,91	6,35	3,62
10	10,14	13,81	12,7	7,24
20	20,27	27,63	25,4	14,5
Глубина, м	хим. добавка % от веса цемента			
	без добавок	Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	C-3 - 0,17% + Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	CaCl <sub>2</sub> - 2%
D <sub>1</sub> - d <sub>s</sub> =62мм, В/Ц=0,5				
5	2,3	3,16	2,93	1,57
10	4,6	6,33	5,86	3,13
20	9,21	12,65	11,72	6,26

Таблица 3 - Гидравлические потери давления (кПа) на трение в затрубном пространстве цементных растворов с В/Ц=0,75 при диаметрах скважины (112 мм, 132 мм, 151 мм) на глубинах  $l = 5$  м,  $l = 10$  м,  $l = 20$  м

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.2.5>

Глубина, м	хим. добавка % от веса цемента			
	без добавок	Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	C-3 - 0,17% + Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	CaCl <sub>2</sub> - 2%
D <sub>1</sub> - d <sub>s</sub> =23мм, В/Ц=0,75				
5	5,05	10,01	5,27	4,23
10	10,09	20,01	10,54	8,5
20	20,18	40,03	21,07	16,9
Глубина, м	хим. добавка % от веса цемента			
	без добавок	Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	C-3 - 0,17% + Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	CaCl <sub>2</sub> - 2%
D <sub>1</sub> - d <sub>s</sub> =43мм, В/Ц=0,75				
5	1,16	2,45	1,08	0,89
10	2,31	4,9	2,17	1,8
20	4,62	9,8	4,33	3,58
Глубина, м	хим. добавка % от веса цемента			
	без добавок	Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	C-3 - 0,17% + Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	CaCl <sub>2</sub> - 2%
D <sub>1</sub> - d <sub>s</sub> =62мм, В/Ц=0,75				
5	0,48	1,06	0,422	0,354
10	0,96	2,12	0,84	0,71
20	1,92	4,24	1,69	1,42

Таблица 4 - Гидравлические потери давления (кПа) на трение в затрубном пространстве цементных растворов с  $V/\Pi=1,0$  при диаметрах скважины (112 мм, 132 мм, 151 мм) на глубинах  $l = 5$  м,  $l = 10$  м,  $l = 20$  м  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.2.6>

Глубина, м	хим. добавка % от веса цемента			
	без добавок	Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	C-3 - 0,17% + Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	CaCl <sub>2</sub> - 2%
$D_1 - d_s=23\text{мм}, V/\Pi=1,0$				
5	3,08	4,48	3,02	2,63
10	6,16	8,95	6,04	5,26
20	12,3	17,91	12,09	10,52
Глубина, м	хим. добавка % от веса цемента			
	без добавок	Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	C-3 - 0,17% + Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	CaCl <sub>2</sub> - 2%
$D_1 - d_s=43\text{мм}, V/\Pi=1,0$				
5	0,66	0,96	0,58	0,53
10	1,32	1,92	1,16	1,05
20	2,64	3,83	2,32	2,11
Глубина, м	хим. добавка % от веса цемента			
	без добавок	Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	C-3 - 0,17% + Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub> - 1%	CaCl <sub>2</sub> - 2%
$D_1 - d_s=62\text{мм}, V/\Pi=1,0$				
5	0,263	0,38	0,22	0,202
10	0,53	0,76	0,43	0,4
20	1,05	1,53	0,87	0,81

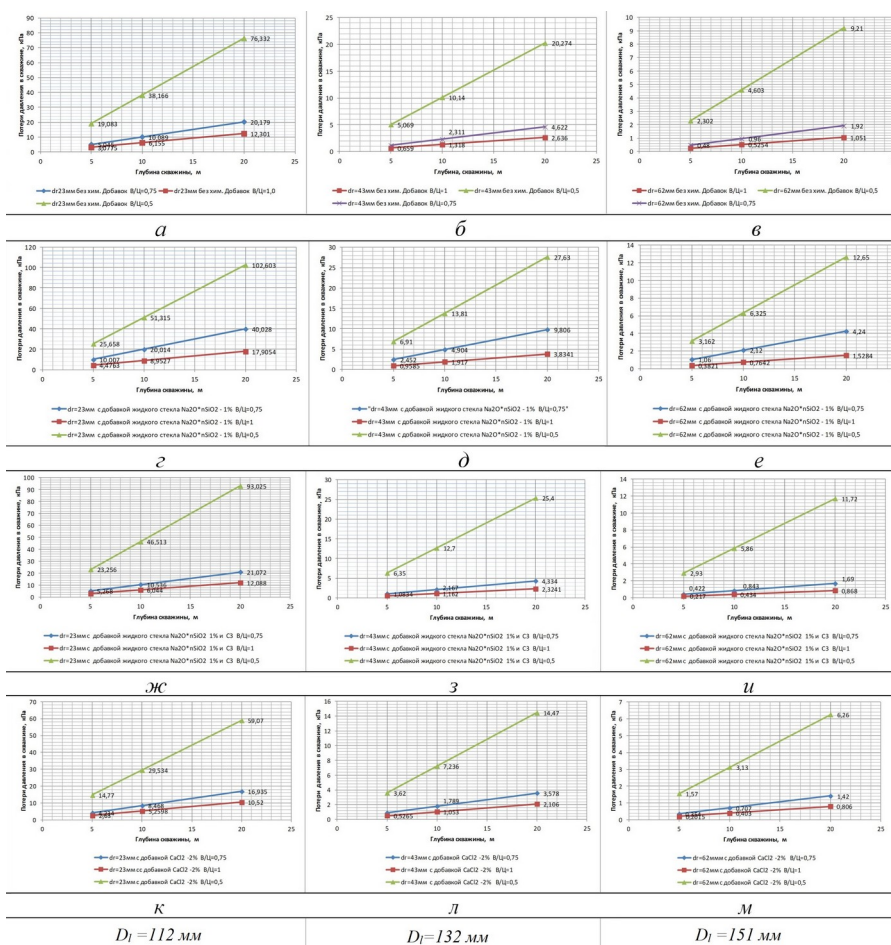


Рисунок 3 - Гидравлические потери давления на трение в затрубном пространстве вертикальных скважин при различных диаметрах и свойствах цементных растворов  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.2.7>

Очевидно, что существенное влияние на величину гидравлических потерь восходящего потока цементного раствора оказывают: его расход, примененные химические добавки, а также глубина скважин. С ростом глубины буровых скважин, величины расхода и плотности раствора и уменьшения диаметра лидерной скважины  $D_l$  в затрубном пространстве происходит линейный рост гидравлических потерь рис. 3а, 3б, 3в, 3г, которые могут превышать 102 кПа. При определенных условиях эти потери давления на стенках скважин слабого грунта может превысить значение давление гидроразрыва  $P_{zp}$ , а это снизит расход пульпы и скорость ее излива. Применение вязких растворов с добавкой жидкого стекла в глубоких лидерных скважинах малого диаметром приводит к существенному росту потерь давления и вероятности гидроразрыва. Использование же добавки  $\text{CaCl}_2$  при диаметрах бурения 112 мм позволяет минимизировать потери давления в скважине и контролировать вынос пульпы. Для устройства грунтоцементных элементов большого диаметра на значительной глубине (более 10 м) необходимо увеличивать диаметр лидерной скважины [11]. В общем случае давление гидроразрыва составляет  $P_{zp} = 0,5 \dots 0,9 p_g$  [12]. Гидростатическое давление на стенке скважины на глубине  $z$  заполненной цементным раствором плотностью  $r_g$ , определяется:

$$p_g = \frac{v}{1-v} \rho_g \cdot g \cdot z \quad (9)$$

Упругое распределение напряжений в скважинах теоретически было изучено С.Г. Лехницким [13] и показана разгрузка массива грунта со стороны скважины. В цилиндрических координатах напряжения могут быть определены:

$$\sigma_r = \lambda (\rho_r - \rho_p) z \frac{r_c^2}{r^2} - \lambda z \rho_r$$

$$\sigma_\theta = - (\lambda \rho_r - \rho_p) z \frac{r_c^2}{r^2} - \lambda z \rho_r$$

где:

$\lambda$  – коэффициент бокового распора, определяемый по формуле академика А.Н. Динника  $\lambda = \frac{v}{1-v}$  ;

$\rho_r$  – средняя плотность грунтов;

$\rho_p$  – плотность раствора;

$z$  – рассматриваемая глубина скважины;

$r_c$  – радиус скважины;

$r$  – радиус упругих напряжений

$r$  – радиус упругих напряжений.

С уменьшением радиальных напряжений  $\sigma_r$  при снижении гидростатического давления в скважине на стенке возрастают тангенциальные напряжения  $\sigma_\theta$ .

Величину плотности цементного раствора нужно ограничивать, чтобы не произошло гидравлического разрыва и потери раствора. Давление гидроразрыва всегда должно оставаться выше гидростатического давления столба раствора в скважине:

$$p_{\text{пор}} \leq \rho g h \leq p_{rp}$$

где:

$p_{\text{пор}}$  – поровое давление;

$\rho$  – плотность раствора;

$h$  – глубина;

$p_r$  – давление гидроразрыва.

По О.А. Маковецкому [13] компоненты напряжений в пластической области с учетом прочностных свойств грунта  $c$  и  $\varphi$  равны:

$$\sigma_r = (1 + \sin \varphi) p - c \cdot \cos \varphi; \sigma_\theta = (1 + \sin \varphi) p + c \cdot \cos \varphi.$$

По А.Г. Малинину [15] для определения необходимого критического давления гидроразрыва необходимо учитывать физико-механические характеристики, плотность окружающего грунта  $r_z$  и глубину  $H$  разрыва в скважине. Малинин А.Г. (2010) указывает, что учет критерия Мизеса-Шлейхера-Боткина наиболее правильно отражает реальный уровень давления гидроразрыва грунта: критическое давление, при котором начинается образование трещины разрыва, определяется, как минимальная величина:

$$p_{cr} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2\rho H + 1, 17c \\ \rho H (\sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi) + 1, 15c \end{array} \right.$$

где:

$c$  – сцепление;

$\varphi$  – угол внутреннего трения.

На примере показано, что скважине на глубине 10м гидроразрыв текучего грунта произойдет в диапазоне давлений от 160 до 167кПа, а в несвязанных грунтах от 87 до 243 кПа.

Используя близкие по составу цементные растворы В.А. Ермолаев (2013) установил [16], что давление нагнетания 250 кПа и менее в грунтовом массиве приводит к расширению полости, заполняемой раствором и развитию зон консолидационного уплотнения грунта, а повышение же давления может приводить к неконтролируемому распространению раствора в грунтовом массиве. Другие исследователи М.Т.Кулеев (1970) установили, что между давлениями разрыва и инъекции раствора может существовать разница от 3 до 5 раз. Однако для раскрытия трещин в грунте давления должны быть достаточно велики [17]. Все это является дополнительным свидетельством неньютоновского поведения цементных растворов.

По А. Камбефору [18] давление гидроразрыва зависит от глубины инъекции и механических свойств грунта. В несвязных грунтах давление гидроразрыва равно:

$$P_{\text{ГР}} = \frac{Q \cdot \rho_v \cdot \mu \cdot g}{2\pi \cdot k_0 \mu_0 \cdot e} \ln \frac{r}{r_c} \quad (10)$$

где:

$k_0$  – коэффициент фильтрации;

$\mu$  – вязкость раствора;

$\mu_0$  – вязкость воды;

$e$  – толщина потока;

$r_c$  – радиус скважины.

По формуле Хубберта-Уиллиса [12] давление гидроразрыва зависит от соотношения в скважине гидростатического и порового давлений:

$$P_{\text{ГР}} = \frac{1}{3} (p_g - p_{\text{пор}}) + p_{\text{пор}}$$

А по Б. А. Итону давление гидроразрыва равно:

$$P_{\text{ГР}} = p_{\text{пор}} + \frac{v \cdot (p_g - p)}{1 - v}$$

### Заключение

При назначении параметров цементного раствора, как правило, стремятся к минимальному пределу, при котором можно вести процесс закрепления грунта без осложнений. Однако для обеспечения качества закрепления с минимальными затратами на весь процесс должны быть оптимально подобраны технологические параметры: расход, давление цементного раствора в зависимости от глубины скважины, диаметра сопел монитора, частота вращения и скорость его подъема, размер кольцевого пространства скважины. Параметры закрепления для скважин, выполняемых первыми в исходном грунте и последующими должны отличаться иначе в пределах одного времени набора прочности они будут иметь значительный разброс.

Деформации (просадка/подъем) зданий, возникающие на строительных площадках при закреплении грунтов цементными растворами по струйной технологии требуют внесения корректив в стандартные процедуры. В соответствии с решаемой геотехнической задачей, но не допуская негативных деформаций массива грунта, должна выполняться оптимизация работ с учетом реологических свойств применяемых растворов.

Величины гидравлических потерь давления в скважинах, а значит и вероятность разрыва стенок в затрубном пространстве скважин могут оптимизироваться варьированием диаметров бурения и свойств цементных растворов. Изменение реологических свойств цементного раствора путем введения в него химических добавок, изменение его плотности, а также скорости восходящего потока позволяют исключить в стенках скважин непродуктивное расходование цемента и контролировать конечные свойства грунтоцемента путем учета количественного содержания грунтовых частиц.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.2.8>

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

International Research Journal Reviewers Community

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.58.2.8>

### Список литературы / References

1. Грей Дж.Р. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей) : пер. с англ. / Дж.Р. Грей, Г.С.Г. Дарли. — Москва : Недра, 1985. — 509 с.
2. Воробьев А.С. Снижение энергозатрат трубопроводной системы при перекачке сгущенных гидросмесей хвостов обогащения полиметаллических руд на закладочные комплексы : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.05.06 / НМСУ «Горный». — СПб., 2015. — 210 с.
3. Баженов Ю.М. Технология бетона : учебное пособие / Ю.М. Баженов. — Москва : АСВ, 2007. — 528 с.
4. Черняков А.В. Совершенствование теоретических основ и практических методов применения струйной цементации грунтов в конструктивных решениях транспортных сооружений : дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук : 05.23.11 / МАДИ. — Москва, 2011. — 411 с.
5. Мирзаджанзаде А.Х. Элементы механики разобщения пластов / А.Х. Мирзаджанзаде, М.Н. Махмудов, Т.А. Самедов. — Баку : Азернешр, 1976. — 211 с.
6. Ламбин А.И. Показатели эффективности удаления шлама при бурении наклонно направленных скважин / А.И. Ламбин // Науки о Земле и недропользование. — 2022. — Т. 45, № 3. — С. 285–293.
7. Богов С.Г. Проблемы контроля прочности закрепления грунтов и оптимизации струйной цементации / С.Г. Богов // Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий : материалы III Всерос. конф. с междунар. участием (г. Пермь, 29–31 мая 2024 г.) / под общ. ред. В.Г. Офрихтера. — Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2024. — С. 592–605.



8. Лихущин А.М. Гидродинамические методы предупреждения осложнений при бурении и цементировании скважин в неустойчивых породах : автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук : 25.00.15 / НИИ природных газов и газовых технологий — Газпром ВНИИГАЗ. — Москва, 2012. — 48 с.
9. Богов С.Г. Применение цементных растворов для струйной технологии закрепления грунтов с учетом их реологических свойств / С.Г. Богов // Гидротехника. — СПб., 2013. — № 4. — С. 84–86.
10. Осипов П.Ф. Гидравлические и гидродинамические расчёты при бурении скважин : учеб. пособие / П.Ф. Осипов. — Ухта : УГТУ, 2004. — 71 с.
11. Croce P. Jet-grouting: technology, design and control / P. Croce, A. Flora, G. Modoni. — CRC Press, 2014. — 278 p.
12. Фертль У.Х. Аномальные пластовые давления : пер. с англ. / У.Х. Фертль. — Москва : Недра, 1980. — 398 с.
13. Михеев В.Л. Технологические свойства буровых растворов / В.Л. Михеев. — Москва : Недра, 1973. — 239 с.
14. Маковецкий О.А. Расчет и конструирование искусственного основания «структурный геотехнический массив» : дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук : 05.23.02 / РУТ (МИИТ). — Москва, 2021. — 358 с.
15. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов / А.Г. Малинин. — Москва : ОАО «Издательство «Стройиздат», 2010. — 226 с.
16. Ермолаев В.А. Закрепление оснований зданий и сооружений методом гидроразрыва при неоднократном инъецировании : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.23.02 / СПбГАСУ. — СПб., 2013. — 25 с.
17. Аббуд, М. Геотехническое обоснование стабилизации осадок фундаментов с помощью инъекционного закрепления грунтов : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.23.02 / СПбГАСУ. — СПб., 2000. — 22 с.
18. Камбефор А. Инъекция грунтов / А. Камбефор. — Москва : Энергия, 1971. — 332 с.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Gray G.R. Sostav i svojstva burovyyh agentov (promyvochnyyh zhidkostey) [Composition and Properties of Drilling Fluids] : translated from English / G.R. Gray, H.C.H. Darley. — Moscow : Nedra, 1985. — 509 p. [in Russian]
2. Vorobyev A.S. Snizhenie jenergozatrata truboprovodnoj sistemy pri perekachke sgushhennyh gidromesey hvostov obogashheniya polimetallicheskikh rud na zakladochnye komplekсы [Reduction of Energy Costs in Pipeline Systems during Pumping of Thickened Hydraulic Mixtures of Tailing from Polymetallic Ore Enrichment to Backfill Complexes] : diss. for the degree of Candidate of Technical Sciences : 05.05.06 / NMSU "Gorny". — St. Petersburg, 2015. — 210 p. [in Russian]
3. Bazhenov Yu.M. Tehnologija betona [Concrete Technology] : textbook / Yu.M. Bazhenov. — Moscow : ASV, 2007. — 528 p. [in Russian]
4. Chernyakov A.V. Sovershenstvovanie teoreticheskikh osnov i prakticheskikh metodov primeneniya strujnoj cementacii gruntov v konstruktivnykh resheniyah transportnykh sooruzhenij [Improvement of Theoretical Foundations and Practical Methods of Jet Grouting in Structural Solutions for Transport Facilities] : diss. for the degree of Doctor of Technical Sciences : 05.23.11 / MADI. — Moscow, 2011. — 411 p. [in Russian]
5. Mirzadzhanzade A.Kh. Jelementy mehaniki razobshheniya plastov [Elements of Reservoir Isolation Mechanics]. — Baku : Azerneshr, 1976. — 211 p. [in Russian]
6. Lambin A.I. Pokazateli jeffektivnosti udalenija shlama pri burenii naklonno napravlennykh skvazhin [Indicators of Drilling Mud Removal Efficiency in Directional Drilling] / A.I. Lambin // Nauki o Zemle i nedropol'zovanie [Earth Sciences and Subsoil Use]. — 2022. — Vol. 45, № 3. — P. 285–293. [in Russian]
7. Bogov S.G. Problemy kontrolja prochnosti zakreplenija gruntov i optimizacii strujnoj cementacii [Problems of Strength Control in Soil Stabilization and Optimization of Jet Grouting] / S.G. Bogov // Fundamenty glubokogo zalozhenija i problemy geotekhniki territorij [Deep Foundations and Geotechnical Challenges] : proceedings of the III All-Russian Conference with International Participation (Perm, May 29–31, 2024) / ed. by V.G. Ofrikhter. — Perm : Perm National Research Polytechnic University Press, 2024. — P. 592–605. [in Russian]
8. Likhushin A.M. Gidrodinamicheskie metody preduprezhdenija oslozhnenij pri burenii i cementirovanii skvazhin v neustojchivykh porodah [Hydrodynamic Methods for Preventing Complications during Drilling and Cementing in Unstable Formations] : abstract of diss. for the degree of Doctor of Technical Sciences : 25.00.15 / Gazprom VNIIGAZ. — Moscow, 2012. — 48 p. [in Russian]
9. Bogov S.G. Primenenie cementnykh rastvorov dlja strujnoj tehnologii zakreplenija gruntov s uchetom ih reologicheskikh svojstv [Application of Cement Solutions for Jet Grouting Technology Considering Their Rheological Properties] / S.G. Bogov // Gidrotehnika [Hydrotechnics]. — St. Petersburg, 2013. — № 4. — P. 84–86. [in Russian]
10. Osipov P.F. Gidravlicheskie i gidrodinamicheskie raschjoty pri burenii skvazhin [Hydraulic and Hydrodynamic Calculations in Well Drilling] : textbook / P.F. Osipov. — Ukhta : USTU, 2004. — 71 p. [in Russian]
11. Croce P. Jet-grouting: technology, design and control / P. Croce, A. Flora, G. Modoni. — CRC Press, 2014. — 278 p.
12. Fertl W.H. Anomal'nye plastovye davlenija [Abnormal Formation Pressures] : translated from English / W.H. Fertl. — Moscow : Nedra, 1980. — 398 p. [in Russian]
13. Mikheev V.L. Tehnologicheskie svojstva burovyyh rastvorov [Technological Properties of Drilling Fluids] / V.L. Mikheev. — Moscow : Nedra, 1973. — 239 p. [in Russian]
14. Makovetsky O.A. Raschet i konstruирование iskusstvennogo osnovanija «strukturnyj geotekhnicheskij massiv» [Calculation and Design of Artificial Foundation "Structural Geotechnical Massif"] : diss. for the degree of Doctor of Technical Sciences : 05.23.02 / RUT (MIIT). — Moscow, 2021. — 358 p. [in Russian]
15. Malinin A.G. Strujnaja cementacija gruntov [Jet Grouting of Soils] / A.G. Malinin. — Moscow : Stroyizdat, 2010. — 226 p. [in Russian]
16. Ermolaev V.A. Zakreplenie osnovanij zdaniy i sooruzhenij metodom gidrorazryva pri neodnokratnom in'ektirovanii [Stabilization of Building Foundations by Hydraulic Fracturing with Repeated Injection] : abstract of diss. for the degree of Candidate of Technical Sciences : 05.23.02 / SPbGASU. — St. Petersburg, 2013. — 25 p. [in Russian]

17. Abbud M. Geotekhnicheskoe obosnovanie stabilizacii osadok fundamentov s pomoshh'ju in'ekcionnogo zakreplenija gruntov [Geotechnical Justification of Foundation Settlement Stabilization Using Soil Injection] : abstract of diss. for the degree of Candidate of Technical Sciences : 05.23.02 / SPbGASU. — St. Petersburg, 2000. — 22 p. [in Russian]
18. Cambefort H. In'ekcija gruntov [Soil Injection] / H. Cambefort. — Moscow : Energiya, 1971. — 332 p. [in Russian]