

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

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.2>

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ ЦЕМЕНТНЫМИ РАСТВОРАМИ

Научная статья

Богов С.Г.<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-4048-6589;<sup>1</sup> ООО «ИСП Георекострукция», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

## Аннотация

Деформационные и физико-механические свойства слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов, расположенных в пределах исторической части Санкт-Петербурга, не отвечают современным требованиям строительства. На большинстве строительных площадок непосредственно под слоем техногенных грунтов залегают водонасыщенные слабые глинистые отложения, их мощность может достигать до полутора десятков метров. При реконструкции и строительстве новых зданий эти грунты неизбежно вовлекаются в зону влияния. Такие грунты не могут рассматриваться в качестве надежного основания для старых зданий, а особенно новых с развитой подземной частью и часто требуют проведения их улучшения — закрепления. В настоящее время закрепление грунтов цементными растворами выполняют тысячи кубометров. Однако для характеристики основного агента технологии — цементного раствора — используют вискозиметр Марша, т.е. воронку для уточнения вязкости или конус АзНИИ для контроля его растекаемости. Получаемые данные измерений это секунды или миллиметры.

Цель статьи — определить числовые значения вязкости цементных растворов различных составов в зависимости от скорости сдвига в размерности физической величины. Определить коэффициенты неньютоновского поведения цементных растворов степенной модели Оствальда-де Вале. Для определения реологических параметров и тиксотропных свойств цементных растворов были проведены исследования на шестискоростном вискозиметре Fann 35SA.

Использование полученных экспериментальных данных, позволило формализовать параметры струйной технологии. Установлено, что оптимизация технологий закрепления грунтов цементными растворами может достигаться введением химических добавок, объем и свойства которых позволяют управлять свойствами цементных растворов, а за счет повышения водоцементного отношения позволяет снижать расход цемента в конструкции.

**Ключевые слова:** напорная инъекция грунтов, струйная технология, реологические свойства цементных растворов.

## TECHNOLOGICAL ASPECTS OF SOIL STABILISATION WITH CEMENT MIXTURES

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

The deformation and physical-mechanical properties of weak water-saturated silty clay soils located within the historic part of St. Petersburg do not meet modern construction requirements. At most construction sites, water-saturated weak clayey sediments lie directly beneath the layer of technogenic soils, and their thickness can reach up to a dozen and a half metres. During the reconstruction and construction of new buildings, these soils inevitably become involved in the zone of influence. Such soils cannot be viewed as a reliable foundation for old buildings, and especially new ones with developed underground parts, and often require improvement — reinforcement. Currently, thousands of cubic metres of soil are being stabilised with cement mixtures. However, to characterise the main agent of the technology — cement mixture — a Marsh viscometer, i.e. a funnel for determining viscosity, or an AzRI cone for controlling its spreadability, is used. The measurement data obtained are in seconds or millimetres.

The aim of this article is to determine the numerical values of the viscosity of cement mixtures of various compositions, depending on the shear rate in the dimension of the physical quantity. To determine the coefficients of non-Newtonian behaviour of cement mixtures using the Ostwald–de Waele model. To determine the rheological parameters and thixotropic properties of cement mixtures, studies were conducted on a six-speed Fann 35SA viscometer.

The use of the obtained experimental data made it possible to formalise the parameters of jet grouting. It has been established that the optimisation of soil stabilisation technologies using cement mortars can be achieved by introducing chemical additives, the volume and properties of which allow the properties of cement mixtures to be controlled, and by increasing the water-cement ratio, which reduces the consumption of cement in the structure.

**Keywords:** pressure grouting, jet grouting, rheological properties of cement mixtures.

## Введение

Инженерно-геологические условия Санкт-Петербурга характеризуются наличием толщи слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов, толщина которых достигает 25 м [1]. Они характеризуются наличием слоистости, повышенной деформативностью, анизотропией свойств и фракционно изменяются от глин до супесей и пылеватых песков и часто для

строительных целей требуют превентивной стабилизации. Исследование возможности закрепления грунтов Санкт-Петербурга цементами, как по манжетной, так и по струйной технологии и их разновидностей ведется достаточно давно. Проблемы, имеющие место на строительных площадках, такие как: «отсутствие» следов цемента в контактной зоне «фундамент – пылеватые грунты основания», а также деформации стен зданий из-за неравномерного подъема/просадки фундаментов при инъекции портландцементов через манжетные трубы, связаны с физической невозможностью проведения инъектирования в поровую структуру грунта – методом пропитки. Инъекция возможна только путем неуправляемого разрыва грунта или использования микроцементов. Но и при инъекции микроцементных растворов объемы закрепленного грунтоцемента получаются в 0,7 раз меньше расчетных, а прочность закрепленных песков резко снижается от стенки скважины к периферии [2]. Причиной снижения объемов закрепления по радиусу закрепления являются процессы, связанные с изменением реологических и физических свойств цементных растворов по пути фильтрации в порах песков. Также влияние оказывают гранулометрический состав песка, его коэффициент фильтрации  $K_f$ , а также расходы, режимы и продолжительность инъекции цементных растворов [2], [3], [4].

К недостаткам струйной технологии, как правило, относят большой расход вяжущего при относительно небольшом диаметре, дорогое оборудование, используемое для работы с высокими давлениями, а также получение грунтоцементных элементов «переменных» сечений по высоте.

Важной целью, которая имеет большое практическое значение, является исследование свойств и адекватного применения различных составов цементных растворов. Задачей являлось определение реологических параметров цементного раствора для формализации технологических процессов и проведения расчетов в противовес значениям «принятым по опыту» или используя воронку Марша для уточнения вязкости или конус АзНИИ для контроля растекаемости цементного раствора.

Определение параметров нелинейной модели течения Освальда-де Вале для цементных растворов различных составов, а также величины изменения их вязкости в зависимости от скоростей сдвига являются актуальной задачей т.к. позволяют и минимизировать негативные воздействия на грунтовый массив и окружающие здания. Прогностические расчеты технологических режимов позволяют осуществлять управление процессами закрепления и расширить сферу применения за счет минимизации непродуктивного расхода цемента.

### Проблемы напорной инъекции цементных растворов в грунты

Классификация физико-химических способов закрепления различных грунтов приведена профессором Б.А. Ржаницыным в зависимости от убывания коэффициента фильтрации [5]. Закрепление цементами методами «пропитки» возможно, проводить только хорошо фильтрующие пески с  $k_f > 80$  м/сут. Цементные растворы фактически нельзя инъектировать в грунты более мелкозернистые, чем крупные пески [6]. Коэффициент  $N$  показал свою эффективность [7]. Его определяют по соотношению размеров частиц (диаметров с массовым содержанием 15%) закрепляемого песка и размеров частиц (диаметров с массовым содержанием 95%) цемента:

$$N = \frac{D_{15}}{d_{85}} \quad (1)$$

При  $N > 24$  инъекция возможна, при  $N < 11$  инъекция невозможна. При росте давлений произойдет образование трещин и гидроразрыв грунта.

Применяемые для закрепления песчаных грунтов микроцементные растворы с В/Ц = 3, представляют собой сильно разбавленные, нестабильные водные суспензии, которые как в статическом состоянии, так и при ламинарной фильтрации подвергаются непрерывному расслаиванию. Цементные частицы в растворе седиментируют, а интенсивность и объем расслаивания зависят от концентрации – его плотности [2].

Традиционно, рассматривая фильтрационные движения жидкости в грунтах, исходят из того, что закон фильтрации, связывающий градиент давления со скоростью фильтрации, линейен и подчиняется закону Дарси (Н. Darcy, 1856). Для случая медленного стационарного движения несжимаемой жидкости в неподвижной изотропной пористой среде уравнение баланса импульса было получено в работах [8], [9], [10].

В отсутствии массовых сил жидкость в пористой среде движется из областей больших давлений в сторону меньших давлений. При числах Рейнольдса  $Re \ll 1$  и  $g=0$  закон Дарси приобретает вид:  $u = -grad p \frac{k}{\mu}$ . Для вязкой несжимаемой жидкости при динамической вязкости  $\mu = const$  уравнение Навье-Стокса имеет вид:

$$\rho \frac{dv}{dt} = -grad p + \rho g + \mu \Delta v \quad (2)$$

В геотехнической практике закон Дарси применяется в виде равенства пьезометрического напора и скорости фильтрации:

$$H = H(x, y, z, t) = \frac{p}{\rho g} + z$$

где  $z$  – вертикальная координата рассматриваемой точки.

Скорость фильтрации:  $u = -C grad H$ ;  $C = \frac{k \rho g}{\mu}$ ;

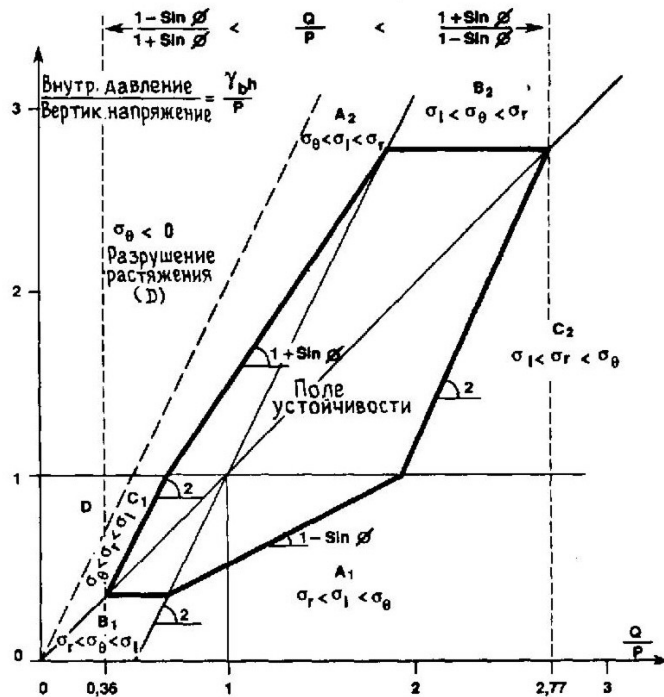
$C$  – коэффициент фильтрации, который зависит от свойств пористой среды и жидкости.

При фильтрации жидкостей в анизотропных средах (осадочных грунтах) [9], [10] их проницаемость характеризуется не одним числом  $k$ , а входящим в формулу Дарси симметричным тензором проницаемости  $k_{ij}$ .

$$u_i = -\frac{k_{ij}}{\mu} (\nabla^j p - \rho g^j).$$

Перед инъекцией в грунте производится устройство лидерной скважины, в результате которого происходит нарушение естественного состояния в грунтовом массиве приствольной зоны. В процессе устройства скважины давление в грунте

определяется главными нормальными напряжениями: радиальным ( $\sigma_r$ ), тангенциальным ( $\sigma_\theta$ ) и вертикальным ( $\sigma_z$ ). Для инъекции через скважины характерно, что они заполнены раствором, который создает избыточное противодавление на ее стенки. Сравнение теоретических значений напряжений  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  с критерием Кулона-Мора в скважинах песчаного грунта позволило [11] выделить типы сдвигового разрушения «типы A1, A2, B2» и один растяжения «тип D» ( $\sigma_{\text{раст}}$ ) – разрушение при растяжении образуется трещина и гидроразрыв рисунках 1 и 2.



По абсциссе:  $\frac{Q}{P} = \frac{\text{Горизонтальные (изотропные) напряжения}}{\text{Вертикальное напряжение}}$

По ординате:  $\frac{\gamma_b h}{P} = \frac{\text{Внутреннее давление } (\gamma_b - \text{плотность бурового раствора})}{\text{Вертикальное напряжение}}$

При условии:  $C = 0$ ,  $\phi = 28^\circ$ , критерий Кулона.

Рисунок 1 - Устойчивость скважин от соотношения действующих напряжений

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.2.1>

Примечание: по А. Гено. Источник [11]

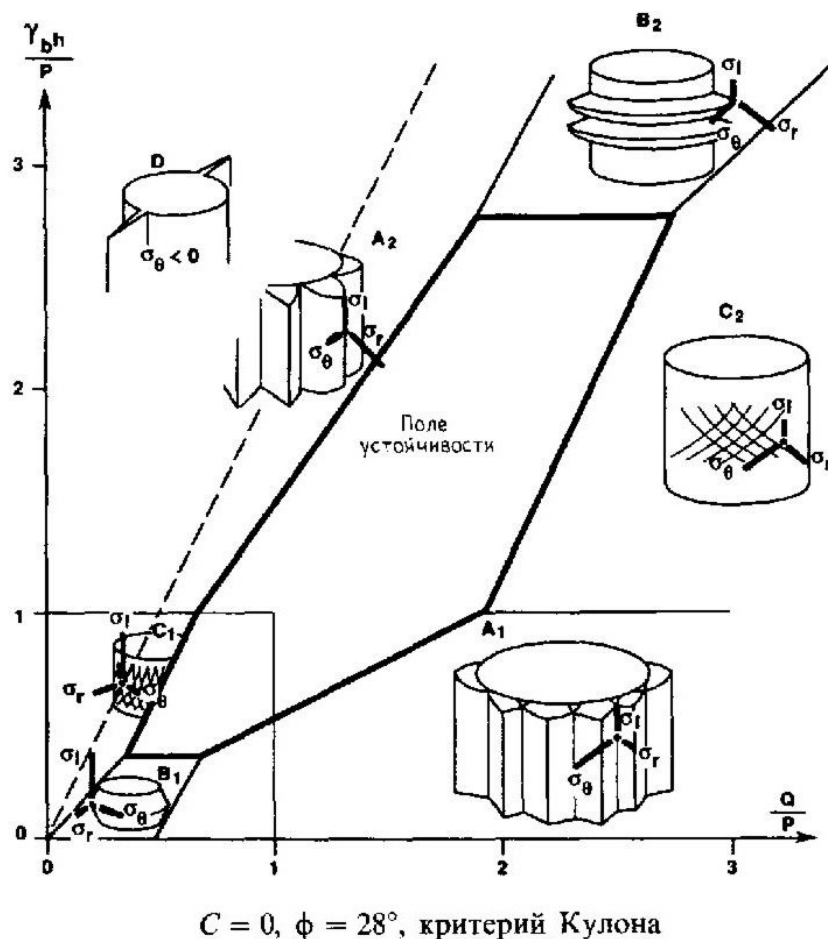


Рисунок 2 - Типы сопутствующих сдвиговых разрушений в скважинах  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.2.2>

Примечание: источник [11]

Проведенными исследованиями рациональных режимов инъекции трещин в грунтовых массивах [12] установлена скорость течения цементных растворов, которую необходимо поддерживать для сохранения течения раствора, исключения закупорки устья трещины за счет осаждения цементных частиц:

$$V_{кр} = (1,113 \pm 0,018) \frac{\sqrt{g \cdot h}}{1 - \varepsilon};$$

где  $V_{кр}$  – критическая скорость движения цементной суспензии, м/с; при которой прекращается осаждение цементных частиц суспензии;  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $h$  – высота сечения трещины, м;  $\varepsilon$  – объемное содержание твердой фазы в растворе.

При инъекции цементного раствора в трещине высотой  $h$  возникает гидравлическое сопротивление  $\Delta P$ , которое зависит от критической скорости  $V_{кр}$ , от динамической вязкости цементного раствора  $\mu$  (Па·с), а также от  $R$  радиуса цементного осадка (м):

$$\Delta P = 193,8 \frac{\mu \cdot R \cdot V_{кр}}{h^2}$$

Важной характеристикой инъекционных цементных растворов является их плотность и прочность, а технологической задачей является управляемое снижение их вязкости. С целью регулирования свойствами нагнетаемых цементных растворов в них вводят различные химические добавки. Это, как правило, реагенты многофункционального действия. В практике с увеличением водоцементного отношения (В/Ц) вязкость цементных растворов снижается, а прочность падает, при этом реологическое поведение одного и того же цементного раствора сразу после затворения подчиняются одной реологической модели, а концу гидратации цемента другой [13]. Вода, вводимая в раствор при затворении цемента, должна, прежде всего, смочить всю суммарную поверхность цементных частиц. Но между молекулами воды, находящимися в ее поверхностном слое на границе раздела фаз, действуют значительные силы сцепления, препятствующие ее распределению на твердых частицах цемента, так как вода обладает значительным поверхностным натяжением [14]. Существенно снизить поверхностное натяжение воды на поверхности раздела фаз способны поверхностно-активные химические вещества. Известно, что добавки ПАВ являются дефлокулянтами цемента, повышая эффективность его использования. Портландцементы в ходе реакции способны химически связать от своей массы до 30% воды. И большое количество воды в растворе нужно для того, чтобы получить раствор удобный для перекачивания насосами. Одним из методов получения раствора повышенной плотности является введение добавок солей в жидкость затворения. Хлорид кальция обеспечивает

сцепление цементного камня с глинами и приводит к повышению прочности раствора, однако при повышенной концентрации приводит к коррозии металла.

### Реологическое поведение цементных растворов

В потоках жидкости обычно выделяют действие следующих сил: давления, тяжести, вязкого трения, инерции. Нелинейность закона фильтрации цементных растворов вызывается такими причинами как влиянием инерционных сил, потерями при расширении потока, так и при движении в порах грунта, когда локальное число Рейнольдса превосходит единицу. В результате закон фильтрации оказывается нелинейным, который описывается формулой Форхгеймера [15]:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{k} (w + \beta w^2) \quad (3)$$

где  $w$  – модуль вектора скорости фильтрации, м/с;  $\mu$  – вязкость;  $\beta$  – константа пористой среды, определяемая экспериментально.

Причиной нелинейности фильтрации цементных растворов является их неньютоновское реологическое поведение при движении. Цементные растворы – это неньютоновские жидкости (смеси воды – ньютоновской жидкости и твердых частиц). Они обладают переменной вязкостью, которая зависит от их скорости движения. Растворам со степенными кривыми течения соответствует степенной закон фильтрации:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \rightarrow \frac{dp}{dx} = -C|w|^{n-1} \cdot w \quad (4)$$

где  $\dot{\gamma}^n$  – скорость сдвига;  $\tau$  – напряжение сдвига;  $K$  – коэффициент консистенции, Па·с <sup>$n$</sup> ,  $n$  – показатель неньютоновского поведения.

Чем меньше размеры пор и проницаемость грунтов: мелких, пылеватых песков, супесей, чем выше их удельная поверхность, чем больше в их составе глинистых частиц, тем сильнее проявляются физико-химические взаимодействия между нагнетаемым раствором и грунтовым «скелетом» грунта [15].

Движение цементных растворов наиболее хорошо описывается степенной моделью вязкости  $\eta = K(c \cdot \dot{\gamma})^{n-1}$ .

Влияние параметра  $n$  для неньютоновских жидкостей на реологический профиль скоростей течения очень существенно (см. рис. 3).

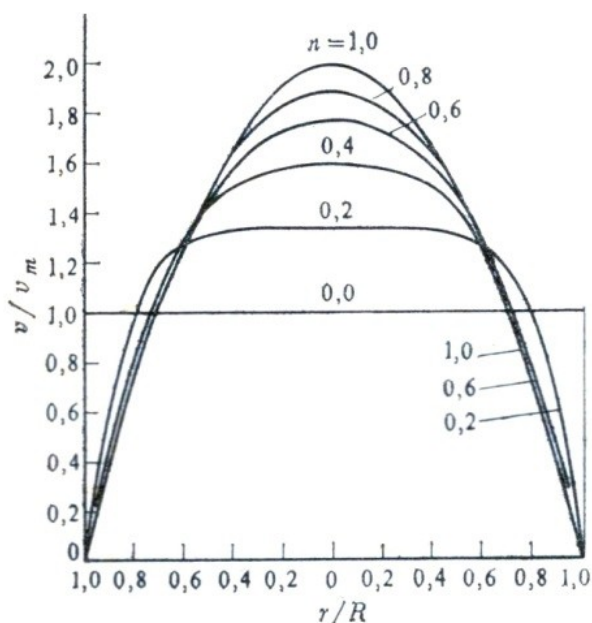


Рисунок 3 - Влияние показателя  $n$  на профиль скоростей при ламинарном течении раствора

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.2.3>

Примечание: источник [13]

Для исследования влияния содержания цемента (М400), водоцементного отношения цементных растворов и химических добавок на реологические свойства нами была проведена серия экспериментов. С помощью ротационного вискозиметра Fann 35SA были определены реологические параметры  $n$  и  $K$  для цементных растворов степенной модели течения Освальда-де Вала различного состава (см. табл. 1):

$$n = 1,048 \cdot \frac{\varphi_{300} \cdot \varphi_{600}}{\varphi_{100} \cdot \varphi_{200}}, \quad (5)$$

$$K = 0,4788 \cdot \frac{(\varphi_{100} \cdot \varphi_{200})^{0,5}}{240^n}, \text{Па} \cdot \text{с}^n \quad (6)$$

Таблица 1 - Коэффициенты  $n$  и  $K$ DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.2.4>

№	Состав цементного раствора	В/Ц	$n$	$K, \text{Па} \cdot \text{с}$
1	без химических добавок	1	0,677	0,066
2	с добавкой жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ -1%		0,68	0,096
3	с комплексной добавкой жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 1% и суперпластификатора С-3		0,76	0,042
4	с добавкой $\text{CaCl}_2$ -2%		0,72	0,046
5	без химических добавок	0,75	0,67	0,11
6	с добавкой жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 1%		0,58	0,37
7	с комплексной добавкой жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 1% и суперпластификатора С-3		0,72	0,092
8	с добавкой $\text{CaCl}_2$ -2%		0,69	0,086
9	без химических добавок	0,5	0,52	1,003
10	с добавкой жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 1%		0,51	1,41
11	с комплексной добавкой жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 1% и суперпластификатора С-3		0,50	1,333
12	с добавкой $\text{CaCl}_2$ -2%		0,58	0,555

Изменения вязкости цементных растворов с различными значениями В/Ц, а также влияния химических добавок в зависимости от частоты вращения цилиндра вискозиметра Fann 35SA приведены в таблицах 2, 3, 4.

Таблица 2 - Вязкость цементного раствора при В/Ц=1,0

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.2.5>

№ $n/n$	В/Ц	Химические добавки к раствору	$\eta, \text{мПа} \cdot \text{с}$					
			при $n$ , об/мин					
			600	300	200	100	6	3
1	1,0	без химических добавок	7,12	8,88	10,11	12,62	31,07	38,78
2		с добавкой жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ -1%	10,35	12,92	14,71	18,6	45,19	56,41
3		с комплексной добавкой жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 1% и суперпластификатора С-3	7,92	9,35	10,31	12,18	23,92	28,25
4		с добавкой $\text{CaCl}_2$ -2%	6,58	7,93	8,85	10,67	22,81	27,51

Таблица 3 - Вязкость цементного раствора при В/Ц=0,75

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.2.6>

№ $n/n$	В/Ц	Химические добавки к раствору	$\eta, \text{мПа} \cdot \text{с}$					
			при $n$ , об/мин					
			600	300	200	100	6	3
1	1,0	без химических добавок	10,7 8	13,93	16,19	20,9 2	59,25	76,58
2		с добавкой жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ -1%	19,7 6	26,44	31,35	41,9 4	133,13	182,93
3		с комплексной добавкой жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 1% и суперпластификатора С-3	12,7 7	15,61	17,56	21,4 7	48,55	59,36
4		с добавкой $\text{CaCl}_2$ -2%	9,95	12,33	13,98	17,3 3	41,46	73,32

Таблица 4 - Вязкость цементного раствора при В/Ц=0,5

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.2.7>

№ п/п	В/Ц	Химические добавки к раствору	$\eta$ , мПа·с					
			при $n$ , об/мин					
			600	300	200	100	6	3
1	0,5	без химических добавок	34,24	47,7 5	58,01	65,72	312,28	435,55
2		с добавкой жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ -1%	45,31	63,6 4	77,61	109,00	432,72	607,73
3		с комплексной добавкой жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 1% и суперпластификатора С-3	40,42	57,6 0	70,00	99,00	404,23	571,67
4		с добавкой $\text{CaCl}_2$ -2%	25,19	39,0 4	46,29	61,93	201,93	270,16

На рисунке 4 приведены графики течения цементных растворов. Показано, что их вязкость не постоянна и зависит от содержания цемента в растворе, а также скорости его течения. Скорость сдвига варьировалась от  $1022 \text{ с}^{-1}$  до  $5,11 \text{ с}^{-1}$ . Экспериментально установлены значения вязкости и подтверждено, что величина вязкости цементных растворов не постоянна и растет со снижением скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ .

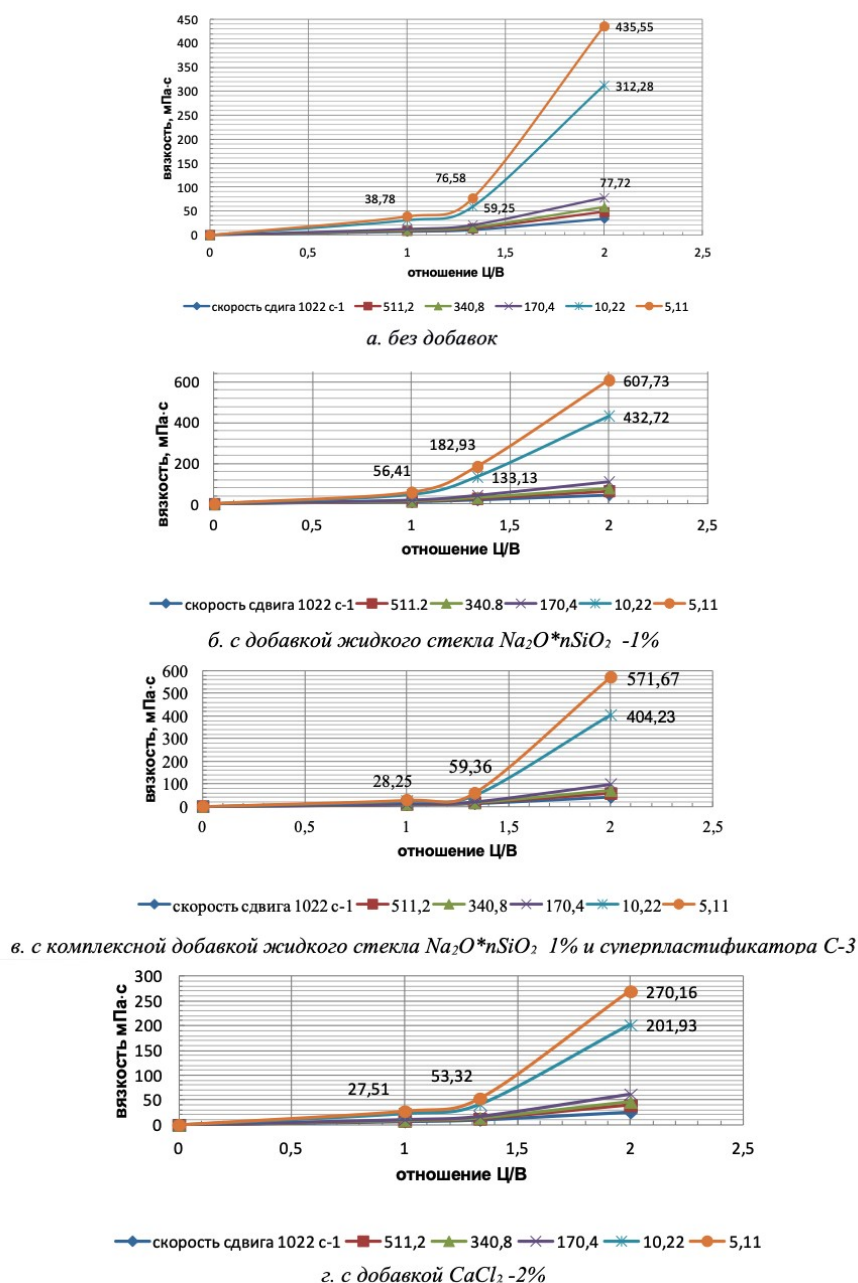


Рисунок 4 - Изменение вязкости цементного раствора с Ц/В=0...2 от наличия химических добавок и скоростей сдвига  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.2.8>

#### Расчет технологических параметров струйной технологии цементных растворов с учетом их нелинейного поведения

Применению струйной технологии для цели закрепления грунтов посвящено большого количества исследований, но до настоящего времени методики для расчета параметров технологического процесса с учетом реологического поведения цементных растворов разработано не было [16], [17], [18].

Для прогнозирования, управления и повышения эффективности струйного закрепления грунтов цементными растворами в первую очередь необходимо определить требуемое давление для размыва грунта на нужной глубине обеспечивающее проектный диаметр элемента – на проектной глубине  $L$  [19].

Далее для обеспечения прочности грунтоцемента необходимо определить расход цементного раствора  $Q_{up}$  по скорости выноса частиц грунта в затрубном пространстве [20] и расчетного условия выноса объема частиц (22).

Для определения потерь давления раствора по степенной модели в затрубном пространстве скважины [13], [21] в зависимости от типа течения (ламинарный или турбулентный) определяются соответствующие ему числа Рейнольдса, критические расход и скорость течения раствора:

$$Re_{к.кр} = \frac{4848}{\frac{(2n+1)^2}{n} \left( \frac{1}{2+n} \right)^{\frac{n+2}{n+1}}} \quad (7)$$

В качестве критерия определяется, критический расход раствора в затрубном пространстве скважины:



$$Q_{\text{цр.к.кр}} = \frac{\pi}{4} (D_l^2 - d_s^2) \left[ \frac{Re_{\text{к.кр}} K \left( \frac{2n+1}{n} \right)^n}{12^{1-n} (D_l^2 - d_s^2)^n \rho} \right]^{\frac{1}{2-n}}; \quad (8)$$

В том случае, если расход цементного раствора меньше критического  $Q_{\text{цр}} < Q_{\text{цр.к.кр}}$  давление в скважине для разрыва грунта стенки определяется по формуле:

$$p_k = 2^{2+4n} \cdot K \left[ \frac{2n+1}{n} \cdot \frac{Q_{\text{цр}}}{\pi(D_l + d_s)} \right]^n \cdot \frac{l}{(D_l - d_s)^{2n+1}}; \quad (9)$$

Гидравлические потери давления цементного раствора на трение в затрубном пространстве снижаются путем введения специальных химических добавок и увеличением размера кольцевого зазора между трубами и стенкой скважины. При ламинарном течении использование цементного раствора с добавкой  $\text{CaCl}_2$ : с В/Ц=0,5 снижает потери давления до 50%; с В/Ц=0,75 до 35 %, а с В/Ц=1,0 до 30%, в сравнении с раствором без добавок.

При использовании цементного раствора с комплексной добавкой жидкого стекла и пластификатора С-3 с В/Ц=0,75 потери снижаются до 150%, в сравнении с применением к раствору одной добавки жидкого стекла. Гидравлические потери давления при растворе с В/Ц=1,0 снижаются до 75%, а с В/Ц=0,5 на 10% [20].

Если  $Q_{\text{цр}} > Q_{\text{цр.к.кр}}$  скорость раствора в затрубном пространстве определяется по формуле  $v_k = \frac{4Q_{\text{цр}}}{\pi(D_l^2 - d_s^2)}$ ; а число Рейнольдса по формуле:

$$Re = 12^{1-n} \left( \frac{3n}{2n+1} \right)^n \frac{v_k^{2-n} (D_l - d_s)^n \rho}{K}; \quad (10)$$

При этом потери давления на стенках скважины будут равны:

$$p_K = \frac{0,09}{Re^{0,125}} \cdot \frac{\rho l v_k^2}{2(D_l - d_s)} \quad (11)$$

Расчет может производиться, циклически меняя входные параметры для получения оптимального результата.

#### Определения скоростей размыва грунта, подъема и вращения монитора

Используя формулу снижения средней скорости по длине струи  $l$  в скважине, текущий диаметр струи  $d_m$  может быть выражен:

$$d_m = d_0 + 2l \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = d_0 + 0,374 \cdot l \quad (12)$$

Сила воздействия гидромониторной струи раствора на вертикальную преграду равна:

$$N = mv = \rho \frac{\pi d_0^4}{4} v^2$$

В результате разрушения грунта струей цементного раствора образуется первичная врубная полость. При углублении полости размыва в точке интенсивность разрушения затухает, снижается и интенсивность внедрения струи в массив. Одновременно в результате высоких давлений цементного раствора (свыше 10 МПа) и перемещения струи на стенках скважины происходит расширение полости. Используя методику определения удельного расхода воды на размыв объема грунта [22], оценим величину скорости вращения монитора в лидерной скважине  $d_l$ . Известно, что скорость распространения продольных упругих волн в массиве равна:

$$V_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho_{\text{гр}}(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{EK_v}{\rho_{\text{гр}}}} \quad (13)$$

где  $E$  – модуль упругости грунта, Па;

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

Подкоренное выражение для песков и супесей  $\sqrt{K_{\text{вп}}} = 1,16$ ; для суглинков  $\sqrt{K_{\text{вс}}} = 1,27$ ; для глин  $\sqrt{K_{\text{вт}}} = 1,6$

В нашем случае время  $T$  прохождения упругих волн в области предельно-напряженного состояния  $R_{\text{размыв}}$ :

$$T = \frac{D_{\text{размыв}}}{2V_l} = \frac{D_{\text{гцэ}} - d_l}{2V_l} \quad (14)$$

При достижении давления струи  $P_{\text{эф}} > P_u$  в массиве образуется область предельного состояния глубиной  $R_{\text{размыв}}$ . Приращение силы, при  $N_{\text{эф}} > N_u$  определяющей скорость внедрения струи и выпор грунта можно представить:

$$\Delta N_{\text{стр}} = N_{\text{эф}} - N_u = M \cdot a \quad (15)$$

где  $N_{\text{эф}}$  – сила действия струи раствора на массив грунта, Н;

$N_u$  – сила, необходимая для разрушения грунта, Н;

$M$  – масса грунта разрушаемого струей, которому сообщается ускорение, кг;

$a$  – величина ускорения,  $\text{м/с}^2$ .

Масса грунта в области предельного напряженного состояния:

$$M = R_{\text{размыв}} \cdot \rho_{\text{гр}} \cdot S_{\text{гр}} = 0,5 \cdot D_{\text{размыв}} \cdot \rho_{\text{гр}} \cdot S_{\text{гр}}$$

где  $S_{\text{гр}}$  – средняя площадь сечения объема разрушаемого струей  $d_m$  грунта силой  $N_{\text{эф}}$ , м<sup>2</sup>;

$R_{\text{размыв}} = \frac{1}{2} \cdot D_{\text{размыв}}$  – радиус размыва, м;  $\rho_{\text{гр}}$  – плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>.

За время  $T$  прохождения волны деформации величина скорости внедрения равна скорости размыва –  $V_{\text{размыва}}$ , тогда подставляя (13) в (14) получаем:

$$a = \frac{V_{\text{размыва}}}{T} = \frac{2V_{\text{размыва}}}{D_{\text{ГЦЭ}} - d_l} \sqrt{\frac{EK_v}{\rho_{\text{гр}}}}; \quad (16)$$

$$\Delta N_{\text{стр}} = N_{\text{эф}} - N_u = \frac{\pi d_l^2}{4} (P_{\text{эф}} - P_u) = S_{\text{гр}} \rho_{\text{гр}} V_{\text{размыва}} \sqrt{\frac{EK_v}{\rho_{\text{грунта}}}} \quad (17)$$

$$S_{\text{гр}} = \frac{\pi d_m^2}{4} = \frac{\pi}{4} (d_0 + 0,187 \cdot D_{\text{размыв}})^2 \quad (18)$$

Таким образом, скорость размыва будет равна:

$$V_{\text{размыва}} = \frac{\Delta N_{\text{стр}}}{S_{\text{гр}} \rho_{\text{гр}}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{гр}}}{EK_v}} = \frac{4\Delta N_{\text{стр}}}{\pi(d_0 + 0,48 \cdot \frac{1}{d_0} \cdot \rho_{\text{гр}})} \sqrt{\frac{\rho_{\text{гр}}}{EK_v}} = \frac{\pi(P_{\text{эф}} - P_u)}{4\rho_{\text{гр}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{гр}}}{EK_v}} \quad (19)$$

$$V_{\text{лин}} = V_{\text{размыва}} = \frac{\pi D_{\text{размыв}}}{T};$$

После подстановки (17 и 18) в (19)

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2V_{\text{размыв}}}{D_{\text{размыв}}} = \frac{8\Delta N_{\text{стр}}}{\pi \rho_{\text{гр}} \cdot D_{\text{размыв}} (d_0 + 0,187 \cdot D_{\text{размыв}})^2} \sqrt{\frac{\rho_{\text{гр}}}{EK_v}} \quad (20)$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot (P_{\text{эф}} - P_u)}{2\rho_{\text{гр}} (D_{\text{ГЦЭ}} - d_l)} \sqrt{\frac{\rho_{\text{гр}}}{EK_v}} \quad (21)$$

Подкоренное выражение в формуле (21) для песков и супесей равно:  $0,86 \sqrt{\frac{\rho_{\text{гр}}}{E}}$ ; для суглинков  $0,79 \sqrt{\frac{\rho_{\text{гр}}}{E}}$ ; для глин  $0,626 \sqrt{\frac{\rho_{\text{гр}}}{E}}$ . В условии глинистых грунтов скорость вращения монитора в лидерной скважине должна быть ниже на 37%, чем в песках и супесях и на 26% ниже, чем в суглинках.

Скорость вращения монитора зависит от ряда факторов: превышения эффективного давления струи над предельным давлением грунтового массива на необходимой глубине, также от диаметра ГЦЭ и свойств грунта. Чем выше будет величина приращения эффективного давления над предельным и чем ниже будет плотность грунта, а также содержание в нем глинистых частиц и ниже диаметр размыва, тем скорость вращения может быть выше.

Чтобы увеличение диаметра не приводило к росту напряженно-деформированного состояния в стенках скважины (за счет роста концентрации в растворе грунтовых частиц более  $\phi \approx 6\%$ ) требуется соблюдение равенства:

$$0,785(1-n) \cdot (D_{\text{ГЦЭ}}^2 - d_l^2) \cong 0,006 \cdot Q_{\text{цр}} \quad (22)$$

Скорость подъема монитора из лидерной скважины с момента устройства «врубной полости» грунтоцементного элемента (ГЦЭ) можно определить:

$$V_{\text{под}} = \frac{0,24 \cdot Q_{\text{цр}}}{\pi(D_{\text{ГЦЭ}}^2 - d_l^2)(1\mu n)} \quad (23)$$

Чем выше пористость грунта –  $n$ , расход цементного раствора и ниже требуемый диаметр грунтоцементного элемента тем выше может быть скорость подъема монитора из лидерной скважины. Объем размываемого грунта  $W_{\text{гр}}$  (м<sup>3</sup>) равен:

$$W_{\text{гр}} = S_{\text{гр}} \pi D_{\text{размыв}} = \frac{\pi D_{\text{размыв}} (d_0 + 0,187 D_{\text{размыв}})^2}{4} \quad (24)$$

Оценку прочности создаваемого ГЦЭ с единичной площадью и объемом можно произвести с учетом расхода цементного раствора:

$$\frac{W_{\text{гр}}}{Q_{\text{цр}}} = \frac{\pi^2 (D_{\text{ГЦЭ}} - d_l) (d_0 + 0,187(D_{\text{ГЦЭ}} - d_l))^2}{52,3(1-n) \cdot (D_{\text{ГЦЭ}}^2 - d_l^2)} \quad (25)$$

## Заключение

1. Закрепление портландцементными возможно произвести только хорошо фильтрующие пески. В зависимости от задач по закреплению при инъектировании цементных растворов в грунты следует учитывать их нелинейное поведение – рост вязкости с уменьшением скорости сдвига.

2. Одним из путей управления процессом закрепления грунтов является введение в цементные растворы химических добавок в т.ч. ПАВ. Использование химических модифицирующих добавок позволяет управлять реологическими свойствами цементных растворов, и уменьшать расход цемента и стоимости конструкции в деле.

3. Проведенные экспериментальные работы позволили определить коэффициенты в нелинейной модели течения Освальда-де Вале для различных цементных растворов, а также уточнить величины изменения вязкости в зависимости от скоростей сдвига.

4. В свою очередь расчетный выбор технологических параметров закрепления грунтов по струйной технологии с учетом степенной модели поведения цементного раствора является очевидным путем повышения экономической эффективности и безопасности применения струйной технологии.

5. Проведение расчета оптимальных параметров: давления, расхода, размера кольцевого пространства в скважине позволяет использовать обоснованные скорости вращения и извлечения монитора из скважины для бездефектного создания ГЦЭ.

### 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. Фурса В.М. Строительные свойства грунтов Ленинграда / В.М. Фурса. — Ленинград : Стройиздат ; Ленинградское отделение, 1975. — 142 с.
2. Ибрагимов М.Н. Особенности технологии и проектирования закрепления песчаных грунтов инъекцией цементных растворов / М.Н. Ибрагимов // Вестник НИЦ «Строительство». — 2019. — Т. 23. — № 4. — С. 60–68.
3. Баженова О.Ю. Определение соответствия пригодности смесей на основе микроцементов в технологии цементации по методу инъекционной пропитки / О.Ю. Баженова, В.А. Алексеев // Инновации и инвестиции. — 2022. — № 12. — С. 152–154.
4. Харченко И.Я. Современные технологии цементационного закрепления грунтов / И.Я. Харченко, В.А. Алексеев, К.А. Исрафилов [и др.] // Вестник МГСУ. — 2017. — Т. 12. — № 5 (104). — С. 552–558. — DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.552-558.
5. Ржаницын Б.А. Химическое закрепление грунтов в строительстве / Б.А. Ржаницын. — Москва : Стройиздат, 1986. — 264 с.
6. Ермолаев В.А. Закрепление оснований зданий и сооружений методом гидроразрыва при неоднократном инъектировании : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / В.А. Ермолаев. — Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2013. — 25 с.
7. Mitchell J.K. Soil improvement. State of the Art Report / J.K. Mitchell // Stockholm, Sweden, 1981. — P. 509–565.
8. Баренблатт Г.И. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик. — Москва : Недра, 1984. — 208 с.
9. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации : учебное пособие / Н.Е. Леонтьев. — 2-е изд. — Москва : МАКС Пресс, 2017. — 88 с.
10. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон. — Москва : Мир, 1964. — 216 с.
11. Мори В. Механизмы разрушения в стенках скважин, подземных сооружений и выработок / В. Мори; под ред. В. Мори, Д. Фурментро // Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти. — Москва : Мир, 1994. — 416 с.
12. Максимчук Ю.А. Обоснование рационального режима инъектирования цементных суспензий с целью совершенствования цементации трещиноватых пород в подземном строительстве : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.06.06 / Ю.А. Максимчук. — Днепропетровск : Днепропетровский горный институт им. Артема, 1986. — 15 с.
13. Маковей Н. Гидравлика бурения / Н. Маковей; пер. с румын. — Москва : Недра, 1986. — 536 с.
14. Тараканов О.В. Химические добавки в растворы и бетоны : монография / О.В. Тараканов. — Пенза : ПГУАС, 2016. — 156 с.
15. Мирзаджанзаде А.Х. Гидродинамика в бурении / А.Х. Мирзаджанзаде, В.М. Ентов. — Москва : Недра, 1985. — 196 с.
16. Shrof A.V. Developments in Design and Execution in Grouting Practice / A.V. Shrof // Indian Geotechnical Journal. — 2010. — Vol. 40. — № 2. — P. 85–115.
17. Croce P. Jet-grouting: technology, design and control / P. Croce, A. Flora, G. Modoni. — CRC Press, 2014. — 278 p.
18. Черняков А.В. Совершенствование теоретических основ и практических методов применения струйной цементации грунтов в конструктивных решениях транспортных сооружений : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.11 / А.В. Черняков. — Москва : МАДИ, 2011. — 411 с.
19. Богов С.Г. К вопросу теоретического определения диаметра закрепления грунтов по струйной технологии / С.Г. Богов // Современное строительство и архитектура. — 2025. — № 8 (63). — DOI: 10.60797/mca.2025.63.1.
20. Богов С.Г. Оптимизация технологии цементации грунтов / С.Г. Богов // Современное строительство и архитектура. — 2025. — № 3 (58). — DOI: 10.60797/mca.2025.58.2.
21. Осипов П.Ф. Гидравлические и гидродинамические расчёты при бурении скважин : учебное пособие / П.Ф. Осипов. — Ухта : УГТУ, 2004. — 71 с.

22. Старцев В.А. Физико-механическое обоснование параметров гидромониторной разработки россыпей направленным бурением скважин : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.22 / В.А. Старцев. — Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2018. — 119 с.

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

1. Fursa V.M. Stroitel'nye svoystva gruntov Leningrada [Construction properties of Leningrad soils] / V.M. Fursa. — Leningrad : Strojizdat ; Leningrad Branch, 1975. — 142 p. [in Russian]
2. Ibragimov M.N. Osobennosti tekhnologii i proektirovaniya zakrepleniya peschanykh gruntov in'ekciej cementnykh rastvorov [Features of technology and design of sandy soil stabilization by cement grout injection] / M.N. Ibragimov // Vestnik NIC "Stroitel'stvo" [Bulletin of the Research Center "Construction"]. — 2019. — Vol. 23. — № 4. — P. 60–68. [in Russian]
3. Bazhenova O.Yu. Opredelenie sootvetstviya prigodnosti smesey na osnove mikro cementov v tekhnologii cementacii po metodu in'ekcionnoj propitki [Determination of the suitability compliance of microcement-based mixtures in cementation technology by injection impregnation method] / O.Yu. Bazhenova, V.A. Alekseev // Innovacii i investicii [Innovations and Investments]. — 2022. — № 12. — P. 152–154. [in Russian]
4. Kharchenko I.Ya. Sovremennye tekhnologii cementacionnogo zakrepleniya gruntov [Modern technologies of cementation soil stabilization] / I.Ya. Kharchenko, V.A. Alekseev, K.A. Israfilov [et al.] // Vestnik MGSU [MGSU Bulletin]. — 2017. — Vol. 12. — № 5 (104). — P. 552–558. — DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.552-558. [in Russian]
5. Rzhantsyn B.A. Himicheskoe zakreplenie gruntov v stroitel'stve [Chemical soil stabilization in construction] / B.A. Rzhantsyn. — Moscow : Strojizdat, 1986. — 264 p. [in Russian]
6. Ermolaev V.A. Zakreplenie osnovanij zdaniy i sooruzhenij metodom gidrorazryva pri neodnokratnom in'ektirovanii [Stabilization of building and structure foundations by hydraulic fracturing method with repeated injection] : abstract of dis. ... of PhD in Engineering : 05.23.02 / V.A. Ermolaev. — Saint Petersburg : SPbGASU, 2013. — 25 p. [in Russian]
7. Mitchell J.K. Soil improvement. State of the Art Report / J.K. Mitchell // Stockholm, Sweden, 1981. — P. 509–565.
8. Barenblatt G.I. Dvizhenie zhidkostey i gazov v prirodnykh plastakh [Movement of liquids and gases in natural reservoirs] / G.I. Barenblatt, V.M. Entov, V.M. Ryzhik. — Moscow : Nedra, 1984. — 208 p. [in Russian]
9. Leontyev N.E. Osnovy teorii fil'tracii [Fundamentals of filtration theory] : textbook / N.E. Leontyev. — 2nd edition. — Moscow : MAKSPress, 2017. — 88 p. [in Russian]
10. Wilkinson U.L. Nen'yutonovskie zhidkosti [Non-Newtonian Fluids] / U.L. Wilkinson. — Moscow : Mir, 1964. — 216 p. [in Russian]
11. Mori V. Mehanizmy razrusheniya v stenkakh skvazhin, podzemnykh sooruzhenij i vyrabotok [Failure mechanisms in wellbores, underground structures and excavations] / V. Mori; edited by V. Mori, D. Furmentro // Mehanika gornyh porod primenitel'no k problemam razvedki i dobychi nefi [Rock mechanics applied to oil exploration and production problems]. — Moscow : Mir, 1994. — 416 p. [in Russian]
12. Maksimchuk Yu.A. Obosnovanie racional'nogo rezhima in'ekcirovaniya cementnykh suspenzij s cel'yu sovershenstvovaniya cementacii treshchinovatykh porod v podzemnom stroitel'stve [Justification of rational injection regime of cement slurries for improving the cementation of fractured rocks in underground construction] : abst. of dis. ... of PhD in Engineering : 05.06.06 / Yu.A. Maksimchuk. — Dnepropetrovsk : Artem Dnipropetrovsk Mining Institute, 1986. — 15 p. [in Russian]
13. Makovey N. Gidravlika bureniya [Drilling hydraulics] / N. Makovey; transl. from Romanian. — Moscow : Nedra, 1986. — 536 p. [in Russian]
14. Tarakanov O.V. Himicheskie dobavki v rastvory i betony [Chemical admixtures for mortars and concretes] : monograph / O.V. Tarakanov. — Penza : PGUAS, 2016. — 156 p. [in Russian]
15. Mirzadzhanzade A.H. Gidrodinamika v bureni [Hydrodynamics in drilling] / A.H. Mirzadzhanzade, V.M. Entov. — Moscow : Nedra, 1985. — 196 p. [in Russian]
16. Shrof A.V. Developments in Design and Execution in Grouting Practice / A.V. Shrof // Indian Geotechnical Journal. — 2010. — Vol. 40. — № 2. — P. 85–115.
17. Croce P. Jet-grouting: technology, design and control / P. Croce, A. Flora, G. Modoni. — CRC Press, 2014. — 278 p.
18. 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 application in structural solutions of transport facilities] : dis. ... of Grand PhD in Engineering : 05.23.11 / A.V. Chernyakov. — Moscow : MADI, 2011. — 411 p. [in Russian]
19. Bogov S.G. K voprosu teoreticheskogo opredeleniya diametra zakrepleniya gruntov po strujnoj tekhnologii [On the theoretical determination of the stabilization diameter of soils by jet technology] / S.G. Bogov // Sovremennoe stroitel'stvo i arhitektura [Modern Construction and Architecture]. — 2025. — № 8 (63). — DOI: 10.60797/mca.2025.63.1. [in Russian]
20. Bogov S.G. Optimizaciya tekhnologii cementacii gruntov [Optimization of soil cementation technology] / S.G. Bogov // Sovremennoe stroitel'stvo i arhitektura [Modern Construction and Architecture]. — 2025. — № 3 (58). — DOI: 10.60797/mca.2025.58.2. [in Russian]
21. Osipov P.F. Gidravlicheskie i gidrodinamicheskie raschety pri bureni skvazhin [Hydraulic and hydrodynamic calculations in well drilling] : textbook / P.F. Osipov. — Ukhta : USTU, 2004. — 71 p. [in Russian]
22. Startsev V.A. Fiziko-mekhanicheskoe obosnovanie parametrov gidromonitornoj razrabotki rossypej napravlenym bureniem skvazhin [Physical and mechanical justification of parameters for hydraulic monitor development of placers by directional well drilling] : dis. ... of PhD in Engineering : 25.00.22 / V.A. Startsev. — Yekaterinburg : Ural State Mining University, 2018. — 119 p. [in Russian]