

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.51>**ХРОНОЛОГИЯ ПОВЕДЕНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ**

Научная статья

Кудряшов М.А.^{1,*}, Головин К.А.²¹ORCID : 0000-0003-4053-1343;^{1,2}Тульский государственный университет, Тула, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ua3pkb[at]mail.ru)

Аннотация

Рассмотрены общепринятые источники по механике горных пород на предмет представления исследователями хронологии реакции водонасыщенного грунта на статически прикладываемую нагрузку. Разобраны вопросы компрессионного сжатия и сдвига (испытаний на прочность). Выделены два основных типа поведения горной породы. Определены соответствующие представления прочности и используемые модели горной породы. В результате обобщения найден общий хронологический критерий выбора модели деформирования водонасыщенного грунта. Выводы сопоставлены с решением задачи на компрессию глинистого слоя, выполненным с помощью метода конечных элементов. При моделировании использованы хронологически различные внешние воздействия.

Ключевые слова: горное дело, механика грунтов, геотехнология, гидроструйная цементация, хронология, внешнее воздействие, модель линейного деформирования.

CHRONOLOGY OF WATER-SATURATED ROCK BEHAVIOUR

Research article

Kudryashov M.A.^{1,*}, Golovin K.A.²¹ORCID : 0000-0003-4053-1343;^{1,2}Tula State University, Tula, Russian Federation

* Corresponding author (ua3pkb[at]mail.ru)

Abstract

Conventional sources on rock mechanics are reviewed with regard to the researchers' presentation of the chronology of the response of water-saturated soil to a statically applied load. Compression and shear (strength tests) are discussed. Two main types of rock behaviour are distinguished. The corresponding strength representations and the rock models used are defined. A general chronological criterion for the selection of a water-saturated soil deformation model is found as a result of generalisation. The conclusions are compared with the solution of the clay layer compression problem performed using the finite element method. Chronologically different external influences were used in the modelling.

Keywords: mining, soil mechanics, geotechnology, hydro-jet cementation, chronology, external influence, linear deformation model.

Введение

Проектирование строительных конструкций, выполняемых по технологии гидроструйной цементации, сопряжено с исследованием их взаимодействия с массивом горной породы. Известно, что указанная геотехнология наиболее практична при работе с водонасыщенными грунтами [1], [2], [3]. Изучение «взаимодействия», предполагает выбор модели механики сплошной среды, согласно которой: внутренние силы соотносятся с нагрузками извне, в первую очередь статическими.

Обратимся к известной работе [4]. В ней, ученые, соотносят модели механики сплошной среды с типами решаемых с их помощью задач. Определяют: теории линейного деформирования — применяемые для «наиболее простых расчетных моделей...: для расчетов конечных напряжений и стабилизированных осадок» [4, С. 72–73]; теории предельного напряженного состояния — пригодные для прогнозирования «несущей способности, прочности, устойчивости и давления грунта на ограждения» [4, С. 75–78]; теории фильтрационной консолидации — описывающие «деформирование во времени полностью водонасыщенного грунта» [4, С. 75] и теории нелинейного деформирования — необходимые в тех случаях, когда «связь между напряжениями и деформациями существенно нелинейна» [4, С. 78].

Так что, согласно [4], моделирование «взаимодействия» в рамках струйной геотехнологии, однозначно необходимо осуществлять с помощью теории фильтрационной консолидации. Однако в самих научных работах по теории фильтрационной консолидации: во-первых, также присутствует множество научных подходов к решению практических задач; во-вторых, не приводится количественных критериев, позволяющих — как выбрать расчетную модель, так и оценить адекватность трудоемкого учета фильтрации. Авторы обращают внимание на тот факт, что они уникальны для каждого конкретного практического случая. Но все же, анализ «в первом приближении» необходим — он, очевидно, позволит избежать реализации чрезмерно сложных расчетных моделей и определиться с условиями строительства.

В связи с чем цель нижеследующего: поиск критерия выбора расчетной модели массива водонасыщенной горной породы, а также его оценка при статическом внешнем воздействии, прикладываемом плавно и ступенчато.

В исследовании проанализировано содержание базы источников, по геомеханике и геотехнике, в рамках представления авторами хронологии реакции горной породы на статическое внешнее воздействие. Результаты сопоставлены с простым численным экспериментом, проведенным с помощью метода конечных элементов.

Основная часть

Ю. К. Зарецкий в книге [6], с математической строгостью доказывает правомерность следующего представления напряжений в водонасыщенном грунте (двухфазной дисперсной системе) [6, С. 20–23]:

$$\sigma = \sigma' + u; \quad u = E * (-p_w), \quad (1)$$

где:

σ, σ' и u — соответственно тензоры полных, эффективных и нейтральных (порových) напряжений;

p_w — давление поровой жидкости;

E — единичный тензор.

А также, в монографии [7], — обобщая работы К. Терцаги, Н. М. Герсегованова, В. А. Флорина, Н. А. Цытовича, Д. Е. Польшина, В. Г. Веригина, Л. Рендулика, Н. Карилло, Р. Баррона, Р. Гибсона и Д. Тейлора, — детализирует ее следующими формулировками: «...поровая жидкость — идеальная; ...минеральный скелет мгновенно-деформирующийся и подчиняющийся только компрессионной зависимости... Фазы грунта рассматриваются как «автономные системы...» Эти системы давлений связаны лишь общими уравнениями равновесия. Считается, что нейтральное давление (т. е. поровое давление) не вызывает в «скелете» грунта каких-либо дополнительных объемных деформаций... Закономерность изменения во времени соотношения фаз грунта в единице объема определяется законом фильтрации воды через пористый «скелет» грунта и условиями неразрывности жидкой и твердой фаз» [7, С. 13–14].

Учитывая, что нагрузка статическая (приложенная малыми ступенями) и движение фаз дисперсной системы на каждой ступени периода ее приложения соответствует соотношению (1) вместе с указанными к нему замечаниями — исследуем, как авторы работ [4], [9], [17], [21] представляют реакцию горной породы.

Согласно Н. Н. Маслову [8], одна ступень компрессии порождает в объеме горной породы следующие явления: «... нагрузка в первый момент времени воспринимается водой, заключенной в порах грунта... что и ведет к появлению в ней того или иного давления... Очевидно, что при этом на скелет грунта... нагрузка совсем не передается... Вместе с тем, под напором, определяемым величиной возникающего порового давления... начинается отход воды из грунта, сопровождаемый его уплотнением. В дальнейшем по мере уплотнения грунта и отхода из него воды поровое давление постепенно уменьшается и на момент достижения грунтом плотности-влажности, эквивалентной нагрузке... поровое давление снижается до нуля.

...сопротивляемость грунта сдвигу... в момент приложения нагрузки... остается... равной своему исходному значению, например природной нагрузке. Вместе с тем при завершении процесса уплотнения грунта... сопротивляемость грунта сдвигу будет соответствовать своему конечному значению, эквивалентному нагрузке... [8, С. 364–365].

Н. М. Герсегованов [9] отмечает монотонность процесса уплотнения: «После приложения нагрузки... вся вода и грунтовой скелет переходят в движение, которое постепенно развивается, а затем постепенно замирает, по мере того как грунтовая масса приближается к новому статическому равновесию, приравновешенному к новой нагрузке» [9, С. 74].

Ю. К. Зарецкий [6], характеризуя указанные Н. Н. Масловым и Н. М. Герсеговановым явления, обращает внимание на связь между длительностью уплотнения и величиной действующих сил: «При статических воздействиях для многих грунтов характерно запаздывание деформаций относительно напряженного состояния... для заданного постоянного напряженного состояния деформации устанавливаются не мгновенно, а изменяясь, стабилизируются через некоторый промежуток времени... время установления... деформаций зависит от уровня напряжений» [6, С. 403–404].

Аналогично и Н. А. Цытович [10], — опираясь на исследования Ю. М. Абелева, Н. Я. Денисова, А. А. Мустафаева, В. И. Курдюмова, В. Г. Березанцева, В. А. Ярошенко, а также перечисленных выше и других ученых, — характеризует процесс стабилизации состояния грунта как продолжительный, а приводящую к равновесному состоянию грунта всю совокупность циклов нагружения называет «фазой уплотнения» [10, С. 113]. Отмечает, что «...грунт в фазе уплотнения приобретает более плотную структуру...» [10, С. 113]. Максимальное давление, при котором грунт еще не покинет фазы уплотнения, автор именует «начальной критической нагрузкой» (рис. 1) [10, С. 113].

С. Б. Ухов, В. В. Семенов, В. В. Знаменский, З. Г. Тер-Мартirosян и С. Н. Чернышев, в работе [4], ассоциируют фазу уплотнения с ограниченными условиями прочности фазой упругого состояния сплошной среды, причем с замечанием: «...правильнее говорить: ...линейно деформируемого состояния, так как наличие петли гистерезиса при разгрузке не позволяет рассматривать грунт как упругое тело». Процесс же уплотнения, «...сопровождающийся отжатием воды из пор...» [4, С. 69], исследователи, — как и в обобщении авторы всех уже затронутых работ [4], [7], [10], — называют «фильтрационной консолидацией», которую представляют уравнением К. Терцаги и Н. М. Герсегованова.

Важно, что С. С. Вялов [11], — как и авторы книг [4], [11], [18], [21] (за исключением [9], [12], [15], [16]; ученый упоминает рассматриваемых в настоящей публикации авторов, но еще и исследования Д. Е. Польшина, Н. Н. Веригина, Н. Н. Павловского, С. А. Роза, Л. Шукле, М. Био, А. Казагранде, Б. Хансена, Н. Х. Артуняна, Х. Пурушасба, М. И. Горбунова-Посадова), — обращает внимание на два различных вида осадки: «...вследствие фильтрации и вследствие ползучести. Первая часть осадки определяется решением уравнения консолидации, вторая часть — решением уравнения вязкопластического деформирования грунтового скелета... Отметим, что разделять осадку на первичную и вторичную можно только для одномерной задачи. При пространственном напряженно-деформированном состоянии грунтового массива в различных его точках время окончания фильтрационного процесса будет различным и

установить хронологическую границу между первичной и вторичной консолидацией не представляется возможным» [11, С. 260]. В связи с чем С. С. Вялов приводит обобщенные соотношения, полученные Ю. К. Зарецким «на случай пространственного напряженного состояния грунта с учетом одновременного протекания (по линейному закону) первичной и вторичной консолидации и изменения во времени напряжений в любой точке массива, а также неполной передачи внешнего давления на воду в начальный момент действия нагрузки» (Подробно, см. книгу [6]).

Условимся, что реологические свойства «скелета» осадочной горной породы в предмет данного исследования не включены. На этом основании: графики на рис. 1 следует понимать как иллюстрации заверщенного и незавершенного процесса фильтрационной консолидации; или считать уплотнение исключительно процессом фильтрационной консолидации. В частности, С. С. Вялов — со ссылкой на исследования А. Казагранде, Д. Тейлора и Б. Хансена, отмечает справедливость такого подхода при степени консолидации не превышающей 60% [11, С. 258] (М. Н. Гольдштейн приводит значение 80% [5, С. 137]); либо, упоминая работы Н. Н. Маслова, для грунтов с консистенцией близкой к текучей [11, С. 262].

Дополнительно подчеркнем замечание Н. Н. Маслова [8]: «...нагрузка в... начале стадии уплотнения будет восприниматься структурным скелетом и будет передаваться на поровую воду лишь постепенно, по мере деформации самого скелета грунта... ход процесса уплотнения будет тормозиться и определяться... проявлением... структурного сцепления (p_{str} , рис. 1)» [8, С. 366].

Также заметим: при описании процесса статического нагружения, Н. Н. Маслов обращает внимание на то обстоятельство, что условия прочности формулируются исследователями «...при завершении процесса уплотнения грунта... когда сопротивляемость грунта сдвигу будет соответствовать своему конечному значению, эквивалентному нагрузке p_0 ... так что изменение сопротивляемости грунта сдвигу в процессе его уплотнения... идет лишь за счет изменения во времени воздействия на грунт нормального напряжения от 0 до p_0 » [8, С. 364–365] (рис. 16). Таким образом, предел прочности связан с хронологией приложения усилия — следовательно, заострим внимание на том, как условия прочности, их экспериментальные исследования и время соотнесены в работах [4], [10], [19], [21].

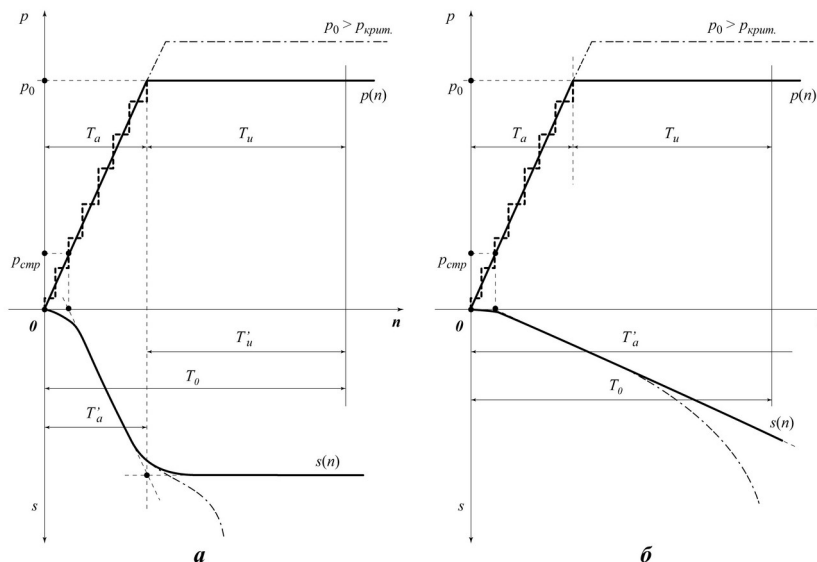


Рисунок 1 - Эскиз фазы уплотнения в завершенном (а) и незавершенном (б) состояниях при действии «статической» нагрузки

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.51.1>

Примечание: показана хронология нагрузки $p(n)$ и осадок $s(n)$, n — количество циклов знакопостоянного положительного нагружения равной продолжительности [19, С. 82]; штрихпунктирной линией показана нагрузка, превышающая начальную критическую и соответствующая осадка [10, С. 65]

К. Терцаги и Р. Пек [12] представляют условия прочности при действии статической нагрузки и ассоциируют их с «предельным сопротивлением грунтов сдвигу при прямом плоскостном срезе» [10, С. 44] (Термин «срез» также присутствует в [5, С. 218]). Ученые различают три вида такого испытания: «медленное», консолидированно-быстрое» и «быстрое»: «В медленном испытании и вертикальная и сдвигающая силы прикладываются так медленно, что влажность даже водонасыщенного грунта с низкой проницаемостью будет изменяться почти в полном соответствии с изменением напряжений. В консолидированно-быстром испытании за полной консолидацией под вертикальными нагрузками следует сдвиг при неизменной влажности. В быстром испытании влажность образца остается практически неизменной при действии как вертикальной, так и сдвигающей силы» [12, С. 106]. Также авторы обращают внимание на испытания в приборе трехосного сжатия, считая их более практичными при исследовании связных грунтов [12, С. 121].

М. Н. Гольдштейн [5] тоже обращает внимание на «...связь прочности с консолидацией грунта... и, ...в зависимости от характера фазовых напряжений различает следующие виды испытаний грунта на прочность:

консолидированно-дренированный (КД), или медленный (*аналогично К. Терцаги и Р. Пеку*)...; консолидированно-недренированный (КН), или ускоренный (*консолидированно-быстрый по К. Терцаги и Р. Пеку*)...; неконсолидированно-недренированный (НН), или быстрый срез, — ...сразу же после приложения вертикального давления следует быстрый срез, так что влажность образца не успевает измениться ни от вертикального давления, ни от сдвигающего усилия» [5, С. 227–228].

Д. Тейлор [13], в отличие от авторов [5], [8], [12] рассматривая хронологию сдвига в срезном приборе, приводит формулы для прочности, включающие параметр времени (считая сцепление и угол внутреннего трения функциями времени) и соответствующие эксперименты, после чего исследует дренированный и недренированный сдвиги [13, С. 377–404]. Напротив, А. А. Бартоломей, Н. М. Герсевич и Б. И. Дидух [9], [14], [15] формально не характеризуют влияние времени на срез, но: А. А. Бартоломей пишет об испытаниях «без предварительного уплотнения» и, соответственно, «с предварительным уплотнением», а также сопротивление сдвигу неконсолидированных грунтов [14, С. 67–71]; Б. И. Дидух отмечает широкое распространение таких опытов [15, С. 43], но подробно рассматривает эксперимент на трехосное нагружение и иллюстрирует линейное возрастание нагрузки до некоторого значения без описания хронологии [15, С. 46]; Н. М. Герсевич [9] замечает: «Что касается практикуемых многими исследователями определений этой величины (*угла внутреннего трения*) путем срезывания образцов грунта... то такие опыты весьма далеки от условий сдвига внутри разрушающегося сплошного массива, не говоря уже о том, что такой способ определения недопустим с точки зрения теории напряжений» [9, С. 141]. Далее автор научной работы [9] отмечает практическую ценность эмпирических исследований с возможностью определения главных напряжений (опыты на трехосное сжатие) после завершения консолидации на каждой из ступеней нагружения.

В. А. Флорин [16] исследует опыт на плоскостной срез со следующим характером: «после полного затухания осадки... срезывается посредством постепенного увеличения ступенями горизонтальной сдвигающей силы... выжидая перед каждым увеличением сдвигающей силы полного затухания горизонтального смещения от предыдущей силы» [16, С. 38–39]. Аналогично, М. Харр [17] и Э. М. Добров [18] — рассматривают дренированное испытание на срез с постепенным увеличением сдвигающего усилия [17, С. 154], [18, С. 90]. Также ученые пишут о трех видах испытаний в трехосном приборе (в приведенной выше классификации Н. М. Гольдштейна, причем М. Харр указывает в качестве ее автора А. Казагранде [17, С. 158]). М. Харр отмечает, что: «Некоторые авторы называют недренированное испытание быстрым, а дренированное медленным» [17, С. 158]. Э. М. Добров при описании лабораторных испытаний, использует термины: «быстрый сдвиг», полагаясь на теорию плотности-влажности Н. Н. Маслова; и, соответственно «медленный сдвиг», упоминая работы К. Терцаги и Н. М. Герсевича [18, С. 91–93]. Заметим, что Э. М. Добров обращает внимание на методики исследования трехосного напряженного состояния (упоминая в качестве первоисточника работы Г. Б. Яппа и Н. В. Лалетина), а также «уникальные методики испытания грунтов... в условиях сложного напряженного состояния» (отмечая исследования З. Г. Тер-Мартirosяна, Е. А. Воробьева и Н. А. Цытовича) [18, С. 95].

Н. А. Цытович в своей работе [10] рассматривает опыты и на срез, и на трехосное сжатие, а также дает описание ряда полевых эмпирических исследований. Автор умалчивает хронологию экспериментов во всех случаях, кроме полевого по методу шарового штампа, при описании которого упоминает «мгновенную» и «установившуюся», принимаемую в расчетах силу сцепления [10, С. 61].

Авторы книги [4] также разбирают эксперименты с простым и сложным напряженным состоянием. Первый из них ученые иллюстрируют следующим образом: «при постоянном значении *вертикального давления*... к верхней каретке прибора также ступенями прикладывается горизонтальное усилие...» [4, С. 103]. Хронологию же трехосного нагружения исследователи не приводят, но резюмируют: «изложенное... соответствует проведению испытаний грунтов в стабилизированном состоянии, т. е. когда осадка образца от действия сжимающего напряжения прекратилась... такой режим нагружения имитирует медленное возрастание нагрузок... например при строительстве сооружений» [4, С. 111].

М. Ю. Абелев [19], характеризуя прочность слабых и водонасыщенных грунтов, отмечает: «...на основе многочисленных экспериментов разработана новая методика определения характеристик прочности... учитывающая изменчивость этих характеристик» [19, С. 18] и, далее, рассматривает комплексное испытание, состоящее из двух стадий: ускоренный консолидированный сдвиг (предложенное Н. Н. Масловым) [19, С. 18]; и эксперимент проводимый «...с учетом совместной работы сооружения и основания, в зависимости от расчетной схемы вероятной потери устойчивости фундаментов, с учетом типа сооружения, скорости его возведения и нагрузок...» [19, С. 19]. К исследованиям второго типа автор относит: неконсолидированный сдвиг с предварительным уплотнением; консолидированный (стабилизированный) сдвиг; сдвиг без предварительного уплотнения. Ученый, в зависимости от проектной ситуации, обосновывает использование срезного прибора, стабилометров и полевых испытаний с приведенной хронологией нагружения [19, С. 19–20]. Также исследователь характеризует обобщение условий прочности на пространство трех измерений: «Как показали испытания, для подавляющего большинства исследуемых грунтов теория прочности Кулона–Мора достаточно хорошо отвечает требованиям инвариантности параметров прочности» [19, С. 16].

Н. С. Бульчев в научной работе [20] не рассматривает экспериментальные исследования подробно. Используя их результаты, автор погружается в математические формулировки условий прочности и характеризует механизм сдвига обращая внимание на черты изменения формы. Ученый отождествляет критерий прочности Кулона–Мора с условием развития пластической деформации: «Для характеристики пластических свойств (прочности) горных пород, а также материалов крепи горных выработок и обделок подземных сооружений применяется пластическая модель (теория прочности Кулона–Мора)» [20, С. 50]. Обобщает результат опыта в срезном приборе на случай трех измерений, — приводит соотношения в терминах главных напряжений (условия Мизеса–Боткина), — и не указывает хронологию нагружения.

П. Л. Иванов [21], исследуя прочность грунтов при статическом нагружении, упоминает разнообразие лабораторного оборудования: «сдвиговые приборы, приборы одно- и трехосного сжатия, приборы для испытаний на перекося, кручение и др.» [21, С. 48]. Определяет два основных класса экспериментов: в стабилизированном и нестабилизированном состояниях. Для последнего приводит условия прочности Кулона–Мора отнесенные к конкретному времени наблюдения и записывает «основное уравнение сопротивления грунта сдвигу в нестабилизированном состоянии» [21, С. 51], учитывающее избыточное поровое давление (аналогично у Д. Тейлора [13]). Для обоих типов состояний ученый использует модель линейно деформируемой среды («модель среды теории упругости» [21, С. 82]), а нарушение условий прочности характеризует развитием пластического формоизменения.

Ю. К. Зарецкий в работе [6] указывает: «допредельное» — ему свойственна стабилизация формоизменения; и «предельное» — отличающееся прогрессирующим накоплением деформаций, состояния грунта [6, С. 122–123]. Именуя разграничивающее их условие «условием предельно-длительной прочности», автор безусловно подразумевает изменение прочности во времени. Замечая, что: «при разрушении грунта путем среза накапливаются... деформации сдвига...» [6, С. 127], — ученый ассоциирует прочность с механизмом сдвига и изображает соответствующие ему деформации: пластические и вязкопластические. Соответственно записывает условия прочности в смысле формул, устанавливающих область определения модели линейного деформирования (предела упругости) с параметрами длительной прочности. В книге без указания типа хронологии нагружения упомянуты соотношения: Кулона–Мора; Треска–Хилла; Мизеса–Боткина, а также с помощью параметра Лоде [6, С. 132–143] оценены границы их правомерности для различных траекторий нагружения (инвариантности). Более того, изложение, — с неконкретизированным характером внешнего воздействия, — исследователь дополняет рассмотрением критериев Дж. Уэта, Л. Н. Рассказова, А. Л. Крыжановского и «новой энергетической концепцией прочности» [6, С. 152]. На ее основании им проведено сравнение всех упомянутых условий прочности и показано хорошее совпадение экспериментальных данных: при простом нагружении — с уравнениями Кулона–Мора; а при испытаниях в стабилометре — с зависимостями Мизеса–Боткина [6, С. 151–157].

В четвертой главе книги [11], С. С. Вялов не характеризует хронологию нагружения и именует соотношения Кулона–Мора, а также варианты их обобщения на случай трехмерного пространства — условиями предельного состояния, то есть условиями, ограничивающими область применения упругой модели сплошной среды [11, С. 5]. Тем не менее ученый замечает, что: «условия предельного напряженного состояния можно рассматривать как условие прочности сыпучесвязных тел, а условие пластичности — как условие прочности пластичных тел, хотя иногда все эти три термина рассматривают как синонимы» [11, С. 97]. Хронологию деформации и разрушения грунта ученый рассматривает в последующих главах, используя термины «первичная и вторичная консолидация», «ползучесть», а также «длительная прочность» [11, С. 248, 263, 310]. При этом ученый различает «постоянные», «ступенчато-прилагаемые нагрузки» [11, С. 181], «быстрое» («условно-мгновенное») и длительное внешнее воздействия, рассматривая «временное сопротивление сдвигу» и «длительную прочность» [11, С. 263–264]. В ходе изложения С. С. Вялов утверждает: «...предел длительной прочности... соответствует напряжению, до превышения которого... разрушение не происходит при любом практически наблюдаемом времени воздействия нагрузки; при превышении же... возникает незатухающая ползучесть, приводящая с течением времени к разрушению» [11, С. 264]. Автор записывает условия прочности Кулона–Мора, считая связность и угол внутреннего трения функциями времени (аналогично у П. Л. Иванова и Д. Тейлора [13], [21]) и, на основе экспериментов Н. К. Пекарской и П. А. Ребиндера, указывает, что они «изменяются от условно-мгновенных... до предельно-длительных..., соответственно... сопротивление сдвигу... будет иметь наибольшее условно-мгновенное значение и наименьшее — предельно-длительное» [11, С. 278]. В целом, С. С. Вялов случай, изображенный на рис. 16 именует «условно-мгновенной деформацией» и рассматривает с помощью упругой, упругопластической и вязкопластической моделей механики сплошных сред — «...в которых до превышения предельного напряжения происходят только упругие или вязкие деформации, а при достижении этого предела возникает пластическое течение» [11, С. 123]. Прочность в случае сдвига при стабилизированном состоянии грунта (рис. 1а) автор ассоциирует не иначе, как с «длительной».

Таким образом, из материалов изданий [4], [10], [12], [21], следует, что реакцию двухфазной дисперсной системы на внешнее воздействие (сжатие и сдвиг) возможно оценить по хронологическому критерию: отношению времени приложения нагрузки к продолжительности времени стабилизации грунта.

Результаты

Обобщая источники, реакция грунта на статическую нагрузку следующая:

1. Если процесс консолидации происходит так, что при компрессии, периоды T_a , T'_a равны и малы по отношению к продолжительности наблюдения T_o , а T_u , T'_u также равны и с ней сопоставимы (рис.: 1а, 2а):

$$T_a \approx T'_a; \quad T_u = T'_u; \quad T_a, T'_a \ll T_o; \quad T_u, T'_u \approx T_o \quad (2)$$

и нагрузка такова, что напряженное состояние грунта не нарушает соответствующих условий прочности, — то, практически, в течение всего наблюдения среда стабилизирована. К расчетам принимается модель линейного деформирования. Подчеркнем, что в этом случае: консолидация завершается на каждой ступени приложения нагрузки и, таким образом, в масштабе времени T_o в грунте наблюдаемы только эффективные напряжения; условия Кулона–Мора (или их обобщение на случай трех измерений, условия Мизеса–Боткина) для стабилизированного состояния грунта формулируются авторами в рамках терминов «длительная» или «установившееся прочность». Им соответствуют лабораторные опыты на сдвиг, плоскостной срез или испытание в стабилометре с характерной

терминологией: «медленное» (К. Терцаги и Р. Пек [12]), «консолидированно-дренированное» (М. Н. Гольдштейн [5]), «с постепенным приложением нагрузки» (В. А. Флорин [16]).

2. Когда же процесс уплотнения в течение времени T_0 не завершается (рис.: 1б, 2б), то есть:

$$T_a < T'_a; \quad T'_a \approx T_0; \quad (3)$$

и если, снова, нагрузка такова, что напряженное состояние грунта не нарушает соответствующих условий прочности, — среда находится в процессе консолидации. В этом случае, авторы [4], [10], [13], [21] используют модель линейного деформирования вместе с уравнениями фильтрационной консолидации, а также условием прочности, соответствующем термину «условно-мгновенная деформация». Лабораторные испытания, типичные для нестабилизированного поведения грунта, соотносят с терминами: «быстрые» и «неконсолидированно-недренированные» (К. Терцаги и Р. Пек [12], М. Н. Гольдштейн [5]).

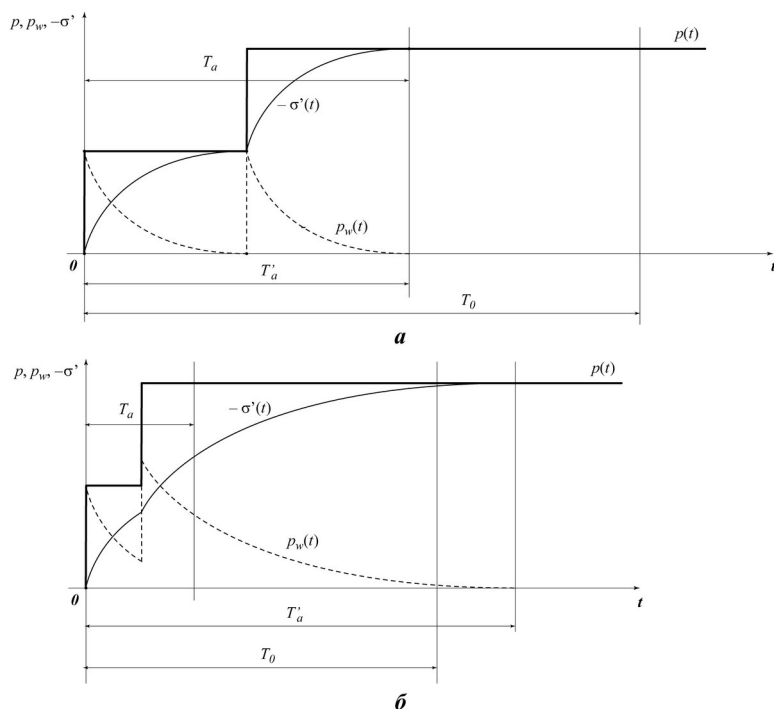


Рисунок 2 - Эскиз представлений хронологий реакции грунта (2) и (3) на статическое воздействие

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.51.2>

Примечание: тонкой сплошной и пунктирными линиями показаны эффективные напряжения и поровое давление, полное давление равно величине действующего усилия (сплошная жирная линия)

Обсуждения

При плавно-прилагаемой статической нагрузке — версия хронологии (2) соответствует: такому «продолжительному» ее приложению и в том же смысле «продолжительному» переходу грунта в стабильное или уплотненное состояние, что изменение порового давления не наблюдается (рис. 1а, 2б); либо нагружению не нарушающему крепость горной породы, когда она ведет себя как сцементированное (однофазное) тело.

Соотношения же (3) иллюстрируют: серию состояний грунта, при которых на каждом цикле приложения нагрузки происходит монотонное изменение порового давления, также монотонно уравнивающееся за счет приращения эффективных напряжений (рис. 2б) (Основоположник теории фильтрационной консолидации Н. Н. Павловский этот случай именует «условием неразрывности движения грунтовых вод» [10, С. 185]), чему соответствует фильтрационная консолидация; либо случай мгновенного приложения одной ступени нагрузки и более длительного, нежели время наблюдения процесса перехода грунта в стабильное состояние.

В таблице 1 приведены масштабы хронологии, найденные в рассмотренных источниках, а также соответствующие расчетные модели грунта.

Таблица 1 - Масштаб времени расчетных моделей в работах

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.51.3>

Нагрузка	Реакция среды по отношению ко времени		Масштаб времени	Модель механики сплошной среды и дополнительные соотношения
Статическая, прилагаемая ступенями	Неизменная	Фаза уплотнения	Годы	Модель теории упругости. Условия прочности с параметрами, соответствующими эффективным значениям угла внутреннего трения и сцепления.
	Изменяемая		Месяцы, сутки	Модель теории упругости. Уравнения фильтрационной консолидации. Условия прочности с параметрами, соответствующими эффективным значениям угла внутреннего трения и сцепления («длительная» прочность).
	Неизменная	Фаза сдвига	Месяцы, сутки	Модели теории упругости и пластического течения. Условия прочности с параметрами, соответствующими понятиям «остаточная» прочность.
	Изменяемая		Годы, месяцы, сутки	Модели теории упругости и пластического течения. Уравнения фильтрационной консолидации. Условия прочности с параметрами, в зависимости от масштаба хронологии, соответствующими понятиям прочности: «мгновенная», «остаточная» и

Нагрузка	Реакция среды по отношению ко времени		Масштаб времени	Модель механики сплошной среды и дополнительные соотношения
				«длительная».

Примечание: по ист. [4], [9], [16], [21]

На нижеследующих иллюстрациях (рис. 3–5) показаны результаты численного моделирования осадок и порового давления в слое насыпи из глинистого грунта высотой 5 м, для различных вариантов приложения равномерно распределенной «статической» нагрузки вдоль вертикальной оси.

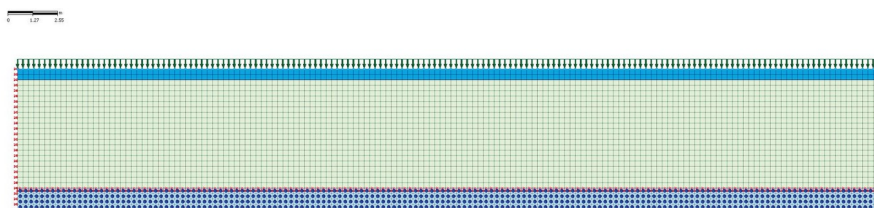


Рисунок 3 - Объект численного моделирования: компрессионное испытание в масштабе строительного сооружения
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.51.4>

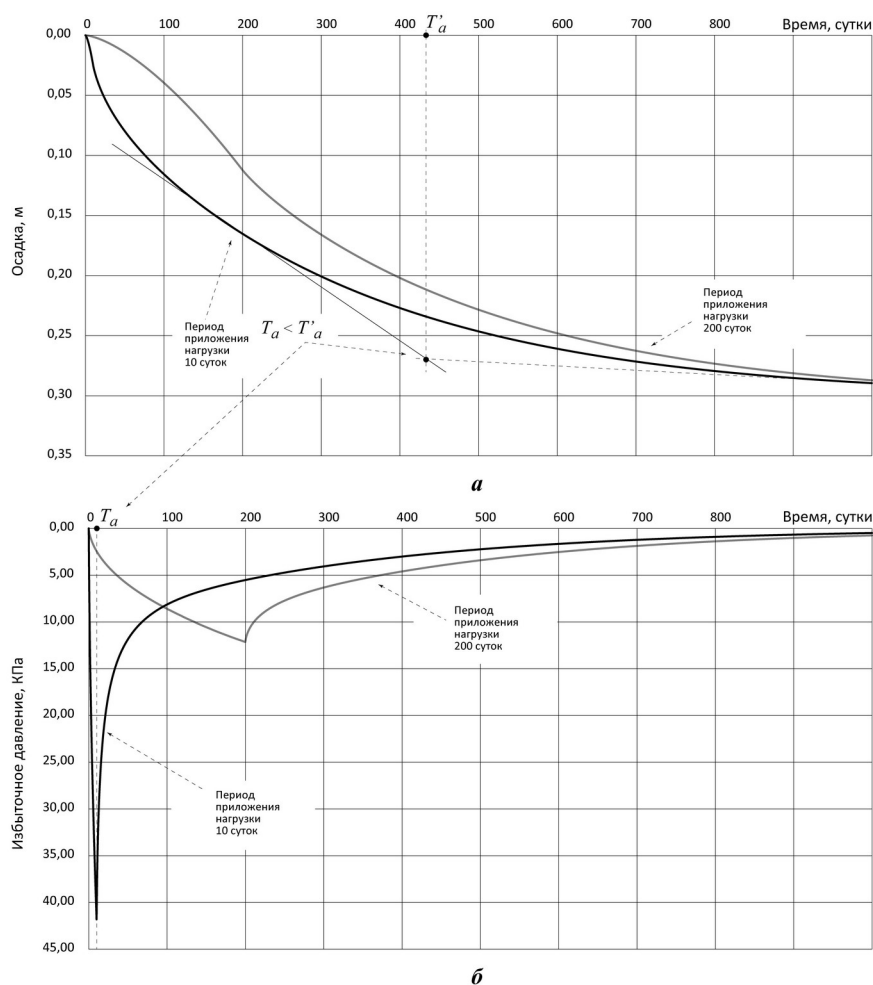


Рисунок 4 - Осадка (а) и поровое давление (б) в центральной точке вскрыши слоя глины при линейно возрастающей нагрузке

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.51.5>

Примечание: 400 Кпа; штриховой вертикальной линией показан примерный интервал времени стабилизации

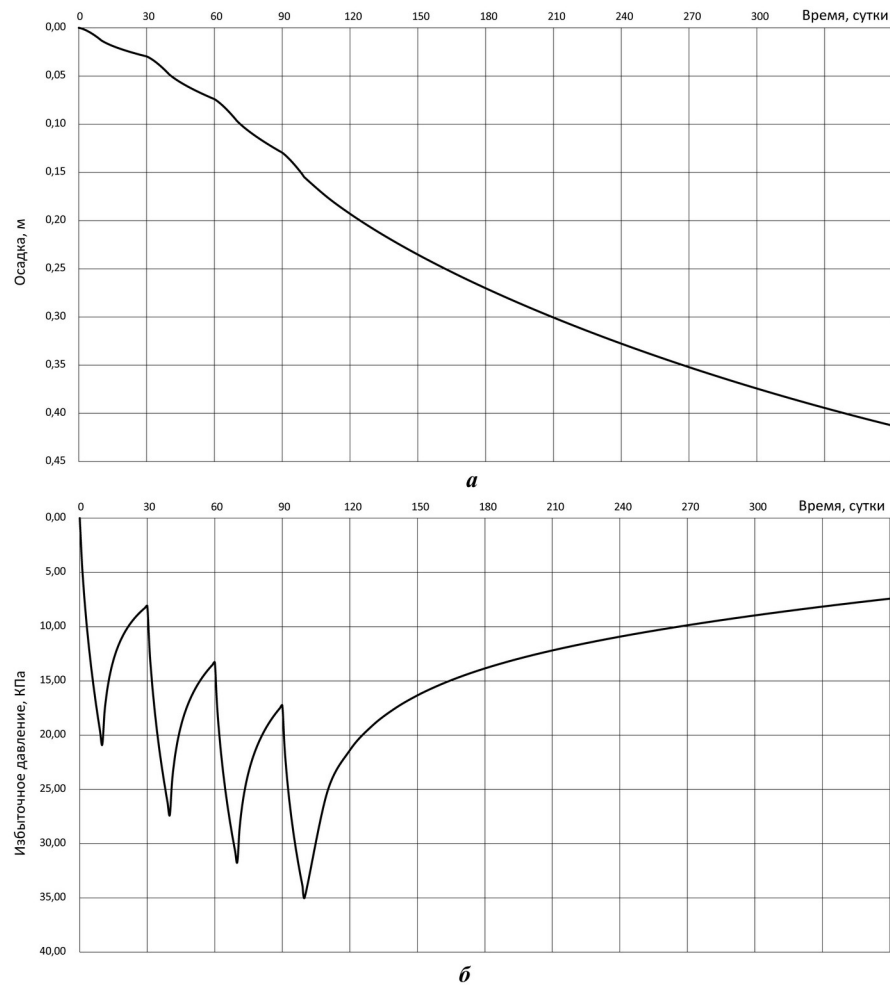


Рисунок 5 - Осадка (а) и поровое давление (б) в центральной точке вскрыши слоя глины при ступенчато возрастающей нагрузке

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.51.6>

Примечание: заданы четыре стадии нагружения (по 100 КПа каждая) длительностью по тридцать суток; интервал времени приложения всех нагрузок — десять суток

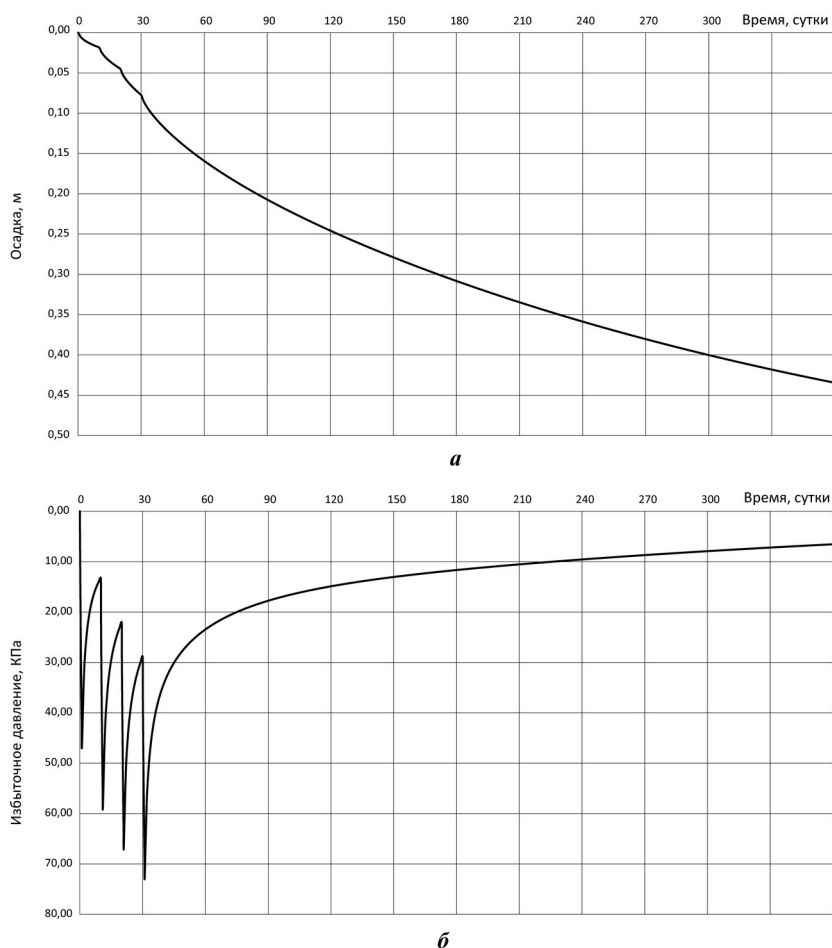


Рисунок 6 - Осадка (а) и поровое давление (б) в центральной точке вскрыши слоя глины при ступенчато возрастающей нагрузке

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.51.7>

Примечание: заданы четыре стадии нагружения (по 100 КПа каждая) длительностью по семь суток; интервал времени приложения усилия на всех ступенях — сутки

Вычисления произведены на основании: модели линейного деформирования; уравнения неразрывности потока поровой жидкости; и условия прочности Кулона–Мора с параметрами, соответствующими термину «длительная прочность». Расчет выполнен в программном комплексе *Midas GTX NX*, с помощью метода конечных элементов на квадратной сетке: линейный размер одного элемента в начальном состоянии составляет 0,25 м, а всей целостности — 40 на 5 м. Условия на границах таковы, что дренаж поровой жидкости происходит только на внешней поверхности. Перемещения каких-либо границ слоя грунта происходят только вдоль вертикальной оси, но смещение основания исследуемого объекта ограничено в обоих направлениях. Горная порода полностью насыщена водой на всех стадиях расчета, поровая жидкость является капиллярной. Таким образом моделируется лабораторный эксперимент, но в масштабе массива грунта.

Результаты, изображенные на рисунках, подтверждают представленное выше различие интервалов времени приложения нагрузки и времени реакции грунта вследствие процесса рассеивания порового (избыточного) давления. С увеличением периода приложения нагрузки амплитуда избыточного давления уменьшается. Полученный результат совпадает выводами, указанными М. Ю. Абелевым (см. рисунок 3.1 в книге М. Ю. Абелева [19, С. 82]). Графики, показанные на рисунках 4–6 удовлетворяют соотношениям (2) и (3), а также представлениям, сделанным на рис. 1 и 2. Таким образом, следствия, полученные с помощью анализа содержания научных работ [4], [14], [18], [21] являются состоятельными.

Заключение

Оценка продолжительности реакции массива грунта, отнесенная к периоду приложения внешнего воздействия, позволяет выбрать расчетную модель.

В дополнение заметим, что ее количественную оценку не сложно произвести по известной формуле Н. Н. Маслова. А также, приведем присутствующее в рассмотренных работах [4], [7], [13], [21] замечание: условия прочности с эффективными значениями сцепления и угла внутреннего трения, по отношению к нестабилизированному состоянию грунта (фаза сдвигов) дают заниженное значение предельных касательных

напряжений [11, С. 279–283]. «В тех случаях, когда ведут расчет... не допуская развития незатухающих деформаций и больших сдвигов, за расчетную характеристику нужно принимать предел длительной прочности» [11, С. 283].

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Фазылзянов Р.Р., Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань
Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.51.8>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Fazilzyanov R.R., Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.51.8>

Список литературы / References

1. Бройд И.И. Струйная геотехнология / И.И. Бройд. — Москва: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2004. — 448 с.
2. Croce P. Jet Grouting. Technology, Design and Control / P. Croce, A. Flora, G. Modoni. — Boca Raton: London: New York: CRC Press; Taylor & Francis Group, 2014. — 284 p.
3. Бреннер В.А. Разработка оборудования для закрепления массивов неустойчивых горных пород методом гидроструйной цементации / В.А. Бреннер, К.А. Головин, А.Е. Пушкарев. — Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. — 206 с.
4. Ухов С.Б. Механика грунтов, основания и фундаменты / С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский и др. — Москва: Высшая школа, 2002. — 556 с.
5. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. — Москва: Стройиздат, 1979. — 304 с.
6. Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов / Ю.К. Зарецкий. — Ростов-На-Дону: Издательство Ростовского университета, 1989. — 608 с.
7. Зарецкий Ю.К. Теория консолидации грунтов / Ю.К. Зарецкий. — Москва: Наука, 1967. — 272 с.
8. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов / Н.Н. Маслов. — Москва: Высшая школа, 1989. — 608 с.
9. Герсегованов Н.М. Основы динамики грунтовой массы. / Н.М. Герсегованов. — Москва: Ленинград: Главная редакция строительной литературы, 1937. — 242 с.
10. Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс) / Н.А. Цытович. — Москва: Высшая школа, 1983. — 288 с.
11. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов / С.С. Вялов. — Москва: Высшая школа, 1978. — 447 с.
12. Терцаги К. Механика грунтов в инженерной практике / К. Терцаги, Р. Пек. — Москва: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1958. — 608 с.
13. Taylor D.W. Fundamentals of soil mechanics / D.W. Taylor. — Bombay: Asia Publishing House, 1948. — 716 p.
14. Бартоломей А.А. Механика грунтов / А.А. Бартоломей. — Москва: АСВ, 2004. — 304 с.
15. Дидух Б.И. Механика грунтов / Б.И. Дидух. — Москва: Изд-во УДН, 1990. — 92 с.
16. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Том. I / В.А. Флорин. — Москва: Ленинград: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1959. — 360 с.
17. Харр М.Е. Основы теоретической механики грунтов / М.Е. Харр. — Москва: Издательство литературы по строительству, 1971. — 320 с.
18. Добров Э.М. Механика грунтов / Э.М. Добров. — Москва: Академия, 2008. — 272 с.
19. Абелев М.Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах / М.Ю. Абелев. — Москва: Стройиздат, 1983. — 248 с.
20. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений / Н.С. Булычев. — Москва: Недра, 1994. — 382 с.
21. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений / П.Л. Иванов. — Москва: Высшая школа, 1985. — 352 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Broid I.I. Struinaya geotekhnologiya [Jet Geotechnology] / I.I. Broid. — Moscow: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2004. — 448 p. [in Russian]
2. Croce P. Jet Grouting. Technology, Design and Control / P. Croce, A. Flora, G. Modoni. — Boca Raton: London: New York: CRC Press; Taylor & Francis Group, 2014. — 284 p.
3. Brenner V.A. Razrabotka oborudovaniya dlya zakrepleniya massivov neustoychivikh gornikh porod metodom gidrostruinoi tsementatsii [Development of equipment for fixing unstable rock masses using hydro-jet cementation] / V.A. Brenner, K.A. Golovin, A.E. Pushkarev. — Tula: TulSU Publishing House, 2007. — 206 p. [in Russian]
4. Uxov S.B. Mexanika gruntov, osnovaniya i fundamenti' [Soil mechanics, foundations and foundations] / S.B. Uxov, V.V. Semenov, V.V. Znamenskij et al. — Moscow: Vy'sshaya shkola, 2002. — 556 p. [in Russian]
5. Gol'dshtejn M.N. Mexanicheskie svojstva gruntov [Mechanical properties of soils] / M.N. Gol'dshtejn. — Moscow: Strojizdat, 1979. — 304 p. [in Russian]
6. Zaretskij Yu.K. Lektsii po sovremennoi mekhanike gruntov [Lectures on Modern Soil Mechanics] / Yu.K. Zaretskij. — Rostov on Don: Rostov University Publishing House, 1989. — 608 p. [in Russian]
7. Zareczkij Yu.K. Teoriya konsolidacii gruntov [Soil consolidation theory] / Yu.K. Zareczkij. — Moscow: Naukaj, 1967. — 272 p. [in Russian]

8. Maslov N.N. Osnovy' inzhenernoj geologii i mexaniki gruntov [Fundamentals of Engineering Geology and Soil Mechanics] / N.N. Maslov. — Moscow: Vy'sshaya shkola, 1989. — 608 p. [in Russian]
9. Gersevanov N.M. Osnovi dinamiki gruntovoi massi. [Fundamentals of Soil Mass Dynamics] / N.M. Gersevanov. — Moskva: Leningrad: The main editorial office of the construction literature, 1937. — 242 p. [in Russian]
10. Cy'tovich N.A. Mexanika gruntov (kratkij kurs) [Soil Mechanics (short course)] / N.A. Cy'tovich. — Moscow: Vy'sshaya shkola, 1983. — 288 p. [in Russian]
11. Vyalov S.S. Reologicheskie osnovy' mexaniki gruntov [Rheological principles of soil mechanics] / S.S. Vyalov. — Moscow: Vy'sshaya shkola, 1978. — 447 p. [in Russian]
12. Tertsagi K. Mekhanika gruntov v inzhenernoi praktike [Soil Mechanics in Engineering Practice] / K. Tertsagi, R. Pek. — Moscow: State Publishing House of Literature on Construction, Architecture and Building Materials, 1958. — 608 p. [in Russian]
13. Taylor D.W. Fundamentals of soil mechanics / D.W. Taylor. — Bombay: Asia Publishing House, 1948. — 716 p.
14. Bartolomej A.A. Mexanika gruntov [Soil mechanics] / A.A. Bartolomej. — Moscow: ASV, 2004. — 304 p. [in Russian]
15. Didukh B.I. Mekhanika gruntov [Soil mechanics] / B.I. Didukh. — Moscow: Publishing house of UDN, 1990. — 92 p. [in Russian]
16. Florin V.A. Osnovi mekhaniki gruntov. Tom. I [Fundamentals of Soil Mechanics. Volume I] / V.A. Florin. — Moskva: Leningrad: State Publishing House of Literature on Construction, Architecture and Building Materials, 1959. — 360 p. [in Russian]
17. Kharr M.E. Osnovi teoreticheskoi mekhaniki gruntov [Fundamentals of theoretical soil mechanics] / M.E. Kharr. — Moscow: Publishing house of literature on construction, 1971. — 320 p. [in Russian]
18. Dobrov E'.M. Mexanika gruntov [Soil mechanics] / E'.M. Dobrov. — Moscow: Akademiya, 2008. — 272 p. [in Russian]
19. Abelev M.Yu. Stroitel'stvo promy'shlenny'x i grazhdanskix sooruzhenij na slaby'x vodonasy'shhenny'x gruntax [Construction of industrial and civil structures on weak water-saturated soils] / M.Yu. Abelev. — Moscow: Strojizdat, 1983. — 248 p. [in Russian]
20. Buly'chev N.S. Mexanika podzemny'x sooruzhenij [Mechanics of underground structures] / N.S. Buly'chev. — Moscow: Nedra, 1994. — 382 p. [in Russian]
21. Ivanov P.L. Grunty' i osnovaniya gidrotexnicheskix sooruzhenij [Soils and foundations of hydraulic structures] / P.L. Ivanov. — Moscow: Vy'sshaya shkola, 1985. — 352 p. [in Russian]