



ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ НА ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Обзорная статья

Поступила в редакцию 01.02.2023. Принята к публикации 22.02.2023.

© Независимый электронный журнал «ГеоИнфо», 2023

КОРОЛЁВ В.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, va-korolev@bk.ru
Адрес: Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

ФАЗЫЛОВ А.М.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
Адрес: Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

АННОТАЦИЯ

Представлен аналитический обзор исследований по вопросам влияния состава и концентрации водных растворов различных солей на фильтрационные свойства глинистых грунтов. Показано, что в зависимости от минерального типа глин, минерализации и состава фильтрующихся водных растворов солей и поглощенных катионов коэффициенты проницаемости и фильтрации глин могут меняться в несколько раз или даже на несколько десятичных порядков, что необходимо учитывать при строительстве защитных дамб с глиняным ядром, шламонакопителей и хвостохранилищ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

глинистый грунт; фильтрация; проницаемость; растворы солей; защитные дамбы.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Королёв В.А., Фазылов А.М. Влияние состава и концентрации растворов солей на фильтрационные особенности глинистых грунтов // Геоинфо, 2023, № 1, С. 6–18 doi:10.58339/2949-0677-2023-5-1-6-18

INFLUENCE OF THE COMPOSITION AND CONCENTRATION OF SALT SOLUTIONS ON THE SEEPAGE FEATURES OF CLAY SOILS

Review paper

Received 01.02.2023. Accepted 22.02.2023.

© Independent electronic journal "GeoInfo", 2023

VLADIMIR A. KOROLEV

Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia, va-korolev@bk.ru
Address: 1 Leninskiye Gory, Moscow,
119991, Russia

AIRAT M. FAZYLOV

Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia
Address: 1 Leninskiye Gory, Moscow,
119991, Russia

ABSTRACT

An analytical review of studies on the influence of the composition and concentration of aqueous solutions of various salts on the seepage properties of clay soils is presented. It is shown that, depending on the mineral type of clays, mineralization and composition of filterable aqueous solutions of salts and absorbed cations, the permeability and filtration coefficients of clays can vary several times or even by several decimal orders, which must be taken into account when constructing protective dams with clay cores, sludge reservoirs, and tailing dumps.

KEYWORDS:

clay soil; seepage; permeability; salt solutions; protection embankments.

FOR CITATION:

Korolev V.A., Fazylov A.M. Vliyaniye sostava i kontsentratsii rastvorov soley na fil'tratsionniye osobennosti glinistykh gruntov [Influence of the composition and concentration of salt solutions on the seepage features of clay soils] // GeoInfo, 2023, № 1, S. 6–18 doi:10.58339/2949-0677-2023-5-1-6-18 (in Rus.).

Введение ▶

Изучение факторов, влияющих на проницаемость глинистых грунтов, является не до конца изученной проблемой, хотя первые исследования в этой области выполнялись еще в 20–50-е годы прошлого столетия в связи с созданием глинистых экранов в противофильтрационном отношении, строительством каналов, водохранилищ и других гидротехнических сооружений, модификацией фильтрационных свойств глинистых грунтов методами технической мелиорации и др. [1, 2], а также в связи с мелиорацией почв, благодаря работам Б.Б. Польшова, В.А. Ковды, И.А. Антипова-Каратаева, П.И. Шаврыгина [3, 4]. В частности, слабо изучено влияние состава и концентрации фильтрующихся растворов, а большинство работ в этой области выполнено для воды и слабоминерализованных водных растворов солей, тогда как на практике в шламонакопителях и хвостохранилищах концентрация солевых растворов может достигать 200–250 г/л и более. Установление закономерностей влияния состава и концентрации фильтрующихся растворов солей на проницаемость глинистых грунтов позволит более качественно выявлять и решать такие проблемы с минимальными денежными затратами, а также даст



Рис. 1. Возведение земляной защитной дамбы

возможность оценить экологические риски загрязнения массива пород при захоронении сточных вод, служащих поровым раствором и взаимодействующих с водоносными и водоупорными горизонтами.

Глинистые защитные экраны, грунтовые дамбы из глинистых грунтов, широко применяемые в качестве защитных противофильтрационных сооруже-

ний по всему миру ввиду простоты и скорости возведения, дешевизны и удобства в эксплуатации, должны быть водонепроницаемыми по отношению к солевым растворам (рис. 1). Со временем глинистый защитный экран или водонепроницаемая часть дамбы (глиняное ядро, экран и диафрагма) под воздействием фильтрующихся растворов может потерять свои исходные свойства

и стать проницаемой. Это ведет к огромным техническим, инженерно-геологическим, гидрогеологическим и экологическим проблемам. Чтобы прогнозировать подобные изменения и своевременно регулировать коэффициент фильтрации глинистых грунтов, используемых в качестве ядра или противофильтрационного экрана дамбы, необходимо изучать влияние состава и концентрации фильтрующегося раствора на их проницаемость.

Глинистые грунты экранов и защитных дамб подвергаются воздействию растворов солей различной концентрации. Следовательно, при попытке определить фильтрационные свойства глинистых грунтов использование дистиллированной или водопроводной воды далеко не репрезентативно для реальных условий. Хорошо известно, что механическое и гидравлическое поведение глинистых грунтов может сильно зависеть от взаимодействия системы «грунт – раствор» [5].

Кроме того, знание влияния состава солевого раствора, сдерживаемого глинистым экраном, завесой, дамбой, позволит более грамотно определить тип глинистого грунта, необходимого для его использования в качестве непроницаемой части сооружения, а также даст возможность прогнозировать дальнейшее поведение глинистого грунта при длительной эксплуатации дамб и целенаправленно регулировать коэффициент фильтрации грунта с помощью добавления химических растворов определенных концентраций. Анализ этой проблемы весьма актуален и для решения различных экологических задач, связанных с фильтрацией сквозь глинистые грунты токсичных водных растворов солей разной концентрации и состава. Влияние растворов кислот и щелочей здесь не рассматривается, так как является предметом отдельных исследований.

В связи с этим целью настоящей работы является аналитический обзор исследований в этой области для обобщения имеющейся информации по влиянию водных растворов солей разной концентрации и состава на фильтрационные особенности глинистых грунтов.

Влияние концентрации водных растворов солей ▶

Имеется большое количество публикаций по экспериментальным работам, посвященным влиянию различных химических растворов на коэффициент фильтрации глинистых грунтов. Изуче-

нием влияния концентрации водных растворов солей на фильтрационные особенности различных глинистых грунтов занимались многие исследователи, в том числе Н.Ф. Бондаренко, Ф.М. Бочевер, И.А. Брилинг [6], Н.Н. Веригин, В.М. Гольдберг, Р.Э. Дашко [7], В.Н. Жиленков [8], Р.И. Злочевская, В.А. Королев, Л.И. Кульчицкий, Н.Н. Маслов, В.А. Мироненко [9], А.М. Монюшко, С.С. Морозов [2, 10, 11], В.М. Павилонский [12, 13], С.И. Пахомов, Б.Ф. Рельтов, А.А. Рошаль, Н.П. Скворцов [14, 15], М.М. Филатов [1], П.И. Шаврыгин [3, 4], В.М. Шестаков и многие другие.

Одной из основных особенностей водных растворов солей является то, что в отличие от растворов таких электролитов, как кислоты и щелочи, большинство солевых растворов имеет нейтральную или близкую к ней реакцию среды (рН около 6,0–6,5). Поэтому вследствие ионного обмена они могут вызывать только изменение толщины двойного электрического слоя (ДЭС) вокруг частиц, тогда как растворы кислот и щелочей могут вызывать еще и перезарядку ДЭС – смену его знака. Все это сказывается на особенностях коагуляции частиц глинистых грунтов и изменении их микростроения, вследствие которого изменяются и их фильтрационные свойства.

Проницаемость глинистых грунтов меняется с течением времени. Это связано с особенностью глинистых минералов разбухать и закупоривать поровое пространство при взаимодействии с пресной водой. При фильтрации же через глинистые породы минерализованных вод это явление развито в значительно меньшей степени. Более того, в результате процессов кристаллизации солей из минерализованных вод нередко происходит рост активной пористости грунтов, а следовательно, улучшение их фильтрационных свойств [16].

Концентрации раствора в глинистых грунтах по сечению тонких пор, особенно в случае взаимного перекрытия диффузных слоев, распределяются неравномерно. Концентрация раствора в порах (C_1) не равна концентрации объемного раствора (C_0). Направление возникающего вследствие этого капиллярно-осмотического потока зависит от величины соотношения $C_1/C_0 < 1$, что наиболее характерно для глинистых грунтов в сторону большей концентрации. Если тонкие поры в глинистых грунтах недоступны для молекул растворенного вещества (идеальная полупроницаемая

мембрана), то есть при $C_1=0$, то перенос воды осуществляется только за счет перепада осмотического давления по обе стороны глинистой мембраны в сторону раствора с большей концентрацией [17].

Имеется множество публикаций по экспериментальным работам, посвященным влиянию различных химических растворов на коэффициент фильтрации глинистых грунтов. Некоторые из этих исследований сосредоточены на водных растворах солей [12, 18–26 и др.]. При этом большинство исследователей указывают на то, что коэффициент фильтрации глинистых грунтов увеличивается с ростом концентрации водных растворов солей.

Влияние состава и концентрации водного порового раствора солей на проницаемость грунтов проявляется через изменение вязкости и структуры поровой жидкости, а также через изменение агрегатного состава грунта. Повышение концентрации раствора ведет к подавлению диффузной части ДЭС вокруг частиц и увеличению степени агрегированности частиц, что влечет за собой увеличение размера межагрегатных пор, а следовательно – к росту коэффициента фильтрации.

Изменение агрегатного состояния глинистого грунта влияет на его фильтрационную способность. Общий характер изменения коэффициентов фильтрации (K_f) в зависимости от засоления при учете только степени агрегированности грунта, которое приводит к преобразованию геометрии одного порового пространства, показан на рисунке 2. В более легких глинистых разностях при засолении порядка 1% наблюдается снижение коэффициентов фильтрации за счет диспергации породы (см. рис. 1, минимум на кривой I). Дальнейшее засоление приводит к увеличению коэффициента фильтрации. Рост содержания глинистой фракции (M_c) вызывает менее заметное влияние диспергации на изменение коэффициента фильтрации (см. рис. 2, кривая II). При высоком содержании глинистых частиц ($M_c > 50\%$) идет постепенное возрастание коэффициента фильтрации породы по мере ее засоления, причем гораздо менее интенсивное, чем для легких разностей (см. рис. 2, кривая III). Эти явления объясняются тем, что агрегация в высокодисперсных грунтах незначительно влияет на увеличение размера пор, поскольку укрупнение начинается с самых тонких коллоидных фракций и постепенно распространяется на более крупные.

Засоление литифицированных глинистых грунтов приводит к росту их микро- и макротрещиноватости, что в большой мере влияет на изменение коэффициента фильтрации грунтов. Общий характер изменения коэффициента фильтрации во времени для литифицированных глинистых грунтов (например, кембрийских глин), обладающих трещиноватостью, при различных концентрациях фильтрующихся растворов приведен на рисунке 3.

На изменение фильтрационных свойств глинистых грунтов при их взаимодействии с водными растворами солей разной концентрации также оказывают большое влияние и диффузионно-осмотические процессы. При этом важно учитывать соотношение концентрации внешнего (фильтрующегося) раствора соли (C_{ϕ}) и концентрации внутрипорового раствора грунта ($C_{п}$) вследствие возможного проявления концентрационной усадки, под которой понимается уменьшение объема грунта за счет осмотического оттока из него порового раствора при условии, что $C_{\phi} > C_{п}$. При этом уменьшается коэффициент фильтрации.

Для учета этого фактора важно знать «порог осмотической усадки» ($C_{пoy}$) изучаемого грунта (по [7]) – концентрацию порового раствора грунта, при которой концентрационной усадки не происходит. Если концентрация внешнего фильтрующегося раствора (C_{ϕ}) больше порога осмотической усадки ($C_{пoy}$), то происходит снижение степени раскрытия микротрещин и коэффициент фильтрации со временем постепенно уменьшается (см. рис. 3, кривая 1). При $C_{\phi} = C_{пoy}$ наблюдается неизменность либо постепенное закрытие трещин в процессе набухания блоков глинистых пород (см. рис. 3, кривая 2). Если же $C_{\phi} \leq C_{пoy}$, то происходит увеличение степени раскрытия микротрещин и осмотический подток раствора внутрь образца, что приводит к набуханию грунта и увеличению коэффициента фильтрации (см. рис. 3, кривая 3).

Согласно исследованиям Р.Э. Дашко [7], в процессе осмоса за счет концентрационной усадки отмечается постепенное уменьшение влажности глинистых грунтов различного гранулометрического состава (рис. 4). Исследования были проведены в широком диапазоне изменений концентраций раствора NaCl – 5; 50; 100; 200; 300 г/л в интервале влажностей глинистых грунтов от предела пластичности W_p до предела текучести W_L . Из анализа результатов

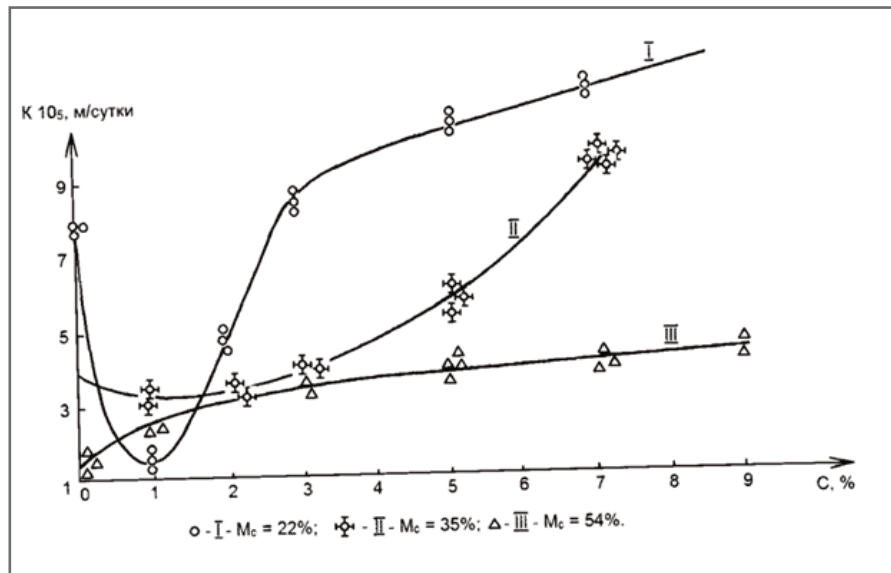


Рис.2 Изменение коэффициента фильтрации (K_{ϕ}) глинистых пород в зависимости от величины засоления (C) [7]

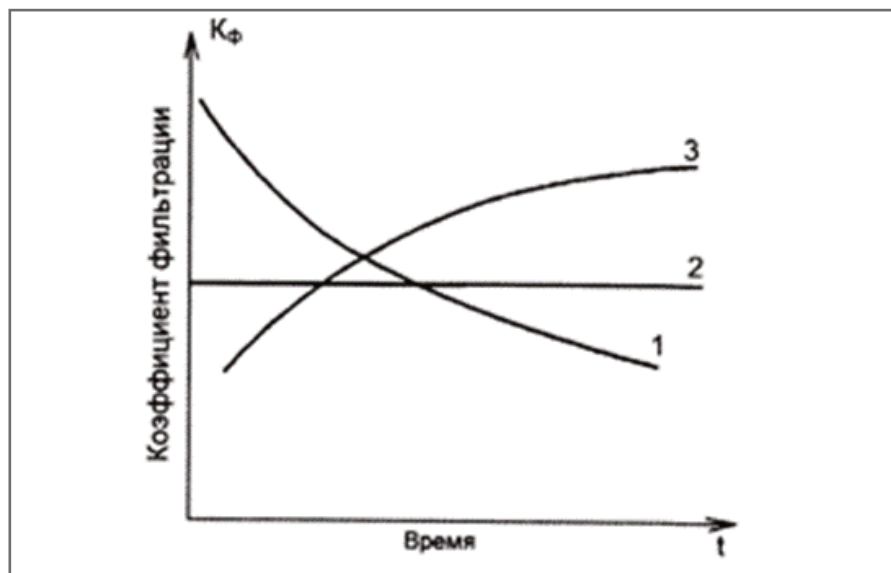


Рис.3. Общий характер изменений коэффициента фильтрации трещиноватых глинистых пород во времени в зависимости от концентрации и состава фильтрующихся растворов [7]. Графики: 1 – фильтрация воды и электролитов при $C_{\phi} < C_{пoy}$; 2 – фильтрация растворов при $C_{\phi} = C_{пoy}$; 3 – фильтрация при $C_{\phi} > C_{пoy}$

этих экспериментов следует, что интенсивное развитие осмотических процессов, приводящих к потере влаги, наблюдается при влажности грунтов выше $1,2W_p$, и по мере увеличения влажности потеря воды из грунта возрастает. Соответственно, в зависимости от влагосодержания грунта изменяется и концентрация растворов, выше которой имеет место осмотическое обезвоживание глинистого грунта. Все это сказывается и на фильтрационных особенностях глинистых грунтов.

В целом, зависимость коэффициента фильтрации высокодисперсных глин от концентрации электролита порового пространства в широком диапазоне

концентраций носит сложный характер (рис. 5). В области малых концентраций (менее 10% NaCl) их рост приводит к увеличению K_{ϕ} за счет агрегации частиц и увеличения размера межагрегатных пор. Однако дальнейший рост концентрации приводит к снижению K_{ϕ} вследствие того, что при высоких концентрациях порового раствора начинает сказываться влияние его повышенной вязкости, рост которой и ведет к снижению K_{ϕ} , что и наблюдается в экспериментах [27].

Интересно также исследование М.А. Сунцова [18], являющееся, по-видимому, одной из первых гидрогеологических работ по вопросу влияния

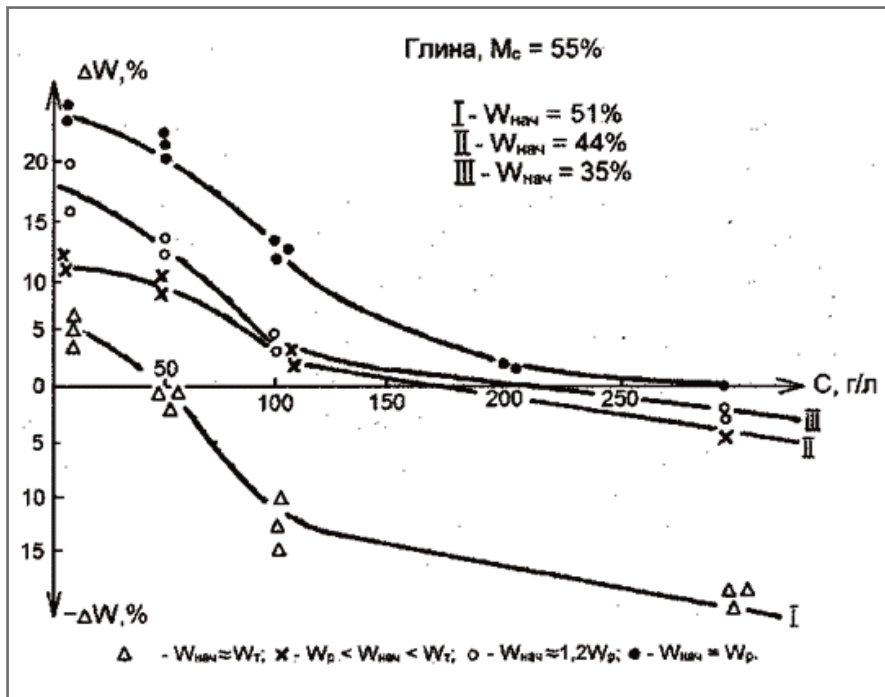


Рис. 4. Изменение влажности (ΔW) глинистых грунтов за счет осмоса при взаимодействии их с растворами разной концентрации (C) (по [7])

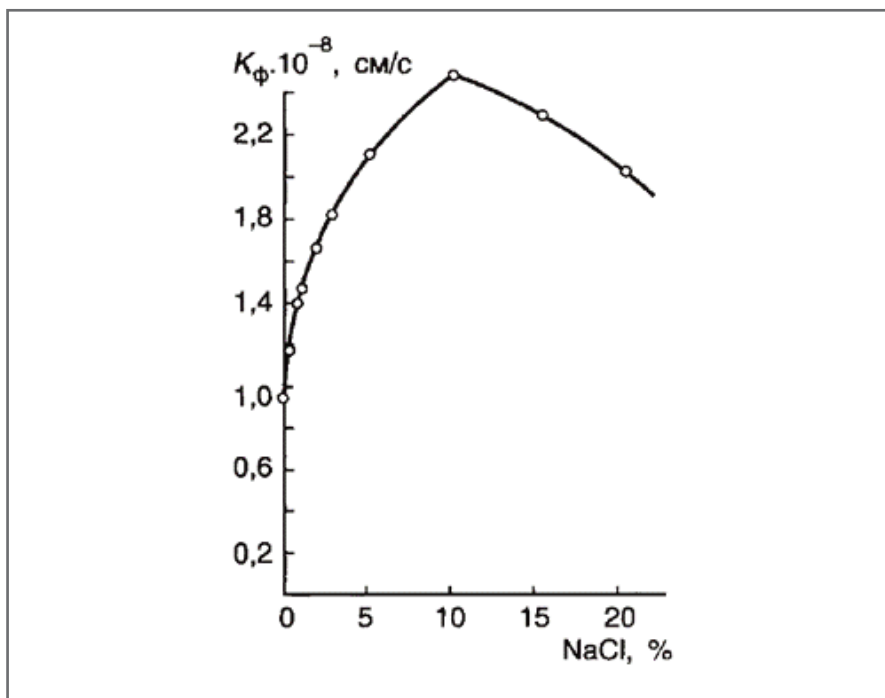


Рис. 5. Зависимость коэффициента фильтрации монтмориллонитовой глины от концентрации NaCl (по Б.В. Дерягину) [27]

подземных вод разной минерализации на проницаемость глинистых грунтов. Эксперименты проводились на образцах четвертичного суглинка, отобранного с глубин 2,0–2,5 м. В качестве фильтрующей жидкости использовались аналог поровой раствора с минерализацией 35 г/л, восьмикратно разбавленный поровый раствор и дистил-

лированная вода. Данные фильтрационных испытаний показали последовательное снижение проницаемости суглинков при переходе от раствора с минерализацией 35 г/л к его разбавленному варианту и дистиллированной воде.

Вопросу влияния фильтрующей жидкости на уплотненные глинистые грунты, используемые в качестве экра-

нов в накопителях сточных вод для снижения фильтрационных потерь, были посвящены экспериментальные исследования В.М. Павилонского [12, 13]. Экспериментально было установлено, что при фильтрации стоков, содержащих хлоридные и сульфатные соли кальция и натрия, проницаемость глин возрастает на 1–2 порядка по отношению к пресной воде (рис. 6). При этом длительная фильтрация растворов солей приводила к некоторому снижению коэффициентов фильтрации за счет структурной перестройки грунтов [12].

Р. Петров и Р. Роу [23] показали, что коэффициент фильтрации бентонита увеличивается с 10^{-11} до 10^{-8} м/с при росте концентрации NaCl от 0 до 2 н.

Д. Ачари и др. [28] подтвердили, что концентрация ионов в фильтрующейся жидкости влияет на коэффициент фильтрации глин. Концентрация ионов в растворе влияет на объем воды, адсорбированной на частицах глины. Коэффициент фильтрации глины увеличивается, когда проникает фильтрат с высокой концентрацией ионов, из-за увеличения ассоциаций микроагрегатов частиц типа «скол-скол», что приводит к коагуляции и росту размера пор.

Й. Джо и др. [25] экспериментально исследовали коэффициент фильтрации Са-бентонита в диапазоне плотностей его скелета от 1,0 до 1,8 г/см³. Их результаты показывают, что коэффициент фильтрации увеличивается с ростом концентрации только тогда, когда плотность бентонита является относительно низкой. Для бентонитов с плотностями 1,0 и 1,2 г/см³ коэффициенты фильтрации при фильтрации 0,4 н раствора NaCl увеличиваются больше тех, которые получаются в случае дистиллированной воды (в 7 и 3 раза соответственно). Однако для бентонита с плотностью скелета выше 1,4 г/см³ концентрация раствора оказывает незначительное влияние на коэффициент фильтрации и последний почти постоянен в диапазоне концентраций NaCl от 0 до 0,4 н.

Такое поведение глинистых грунтов, возможно, объясняется следующим образом. При фильтрации растворов через бентонит концентрация катионов в поровой воде увеличивается, и это вызывает сжатие диффузного слоя. Сокращение толщины двойного электрического слоя может привести к изменению отталкивающих сил между глинистыми частицами. Если отдельные частицы глины смогут свободно перемещаться, то могут произойти изменения микро-

структуры из-за открытия микропор, что приведет к увеличению коэффициента фильтрации.

Кроме того, при фильтрации концентрированного раствора в глине может происходить концентрационная усадка из-за осмотического эффекта, рассмотренного выше. –

Наряду с рассмотренными выше факторами, объясняющими изменение коэффициента фильтрации глинистых грунтов при взаимодействии с растворами солей за счет изменения параметров ДЭС, необходимо учитывать и влияние концентрации солей порового раствора на начальный градиент фильтрации глинистых грунтов. Известно, что начальный градиент фильтрации, проявляющийся в глинистых грунтах, обусловлен аномальными структурными особенностями граничных слоев связанной воды вблизи твердой минеральной поверхности грунта. Вследствие этого граничные слои обладают повышенными вязкостью и предельным напряжением сдвига. Поэтому чем больше объемная доля таких слоев в объеме порового пространства глины, тем больше начальный градиент фильтрации, и наоборот.

Соли, растворенные в поровом растворе грунта, влияют на структурные особенности граничных слоев воды, поскольку разные катионы и анионы могут оказывать как упорядочивающее, так и разупорядочивающее влияние на их структуру. Аналогичное воздействие оказывают и катионы обменного комплекса глин. Для анализа этого явления необходимо учитывать ионы как положительной, так и отрицательной гидратации. К сожалению, исследований влияния солей на начальный градиент фильтрации пока проведено недостаточно.

Влияние состава водных растворов солей ▶

Исследованием влияния состава водных растворов солей на фильтрационные особенности глинистых грунтов занимались многие ученые, в том числе Г.М. Березкина [19], И.А. Брилинг [6], В.М. Гольдберг [29], Р.Э. Дашко [7], С.С. Морозов [2, 10, 11], Е.Ф. Мосьяков [30], В.М. Павилонский, Е.М. Сергеев, Н.П. Скворцов, П.И. Шаврыгин и многие другие.

Работами С.С. Морозова [2] на примере солей нитратов натрия, стронция и алюминия в ходе опытов по фильтрации, по-видимому, впервые была обнаружена замена катионов обменного комплекса на соответствующий фильт-

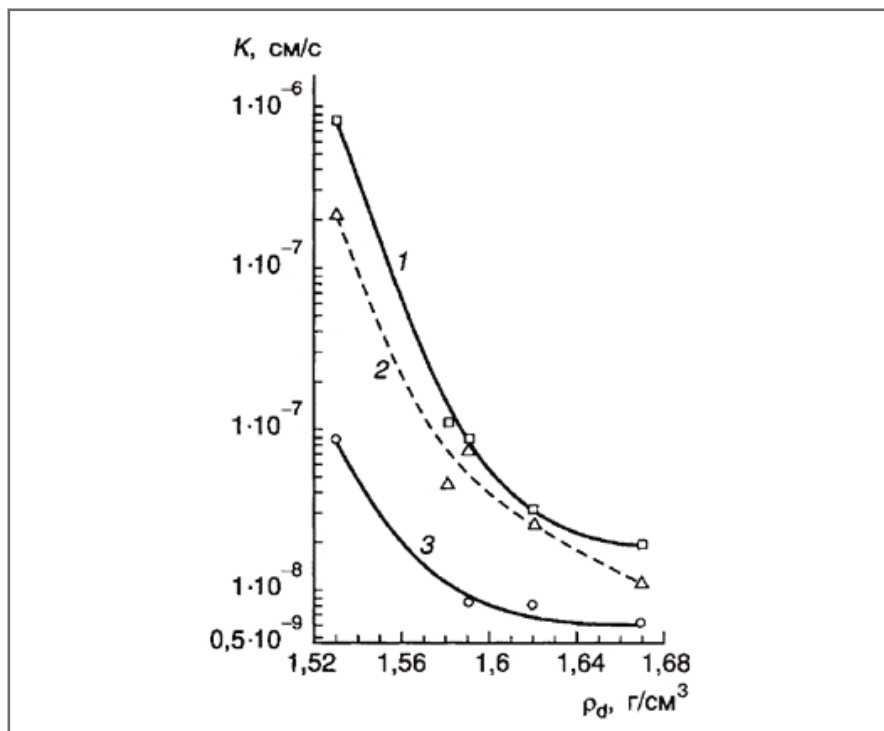


Рис. 6. Зависимость коэффициентов фильтрации раствора соли (кривые 1 и 2 соответственно для максимальных значений и минимальных при длительной фильтрации) и воды (кривая 3) от плотности скелета суглинка (по [12])

рующий катион, что сказывалось на водопроницаемости глин.

Было установлено, что состав обменных катионов глинистых грунтов, а также почв, заторфованных грунтов, илов и других высокодисперсных грунтов существенно отражается на их фильтрационных свойствах прежде всего за счет изменения их агрегатного состояния. Каждый прывносимый в грунт ион Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} в зависимости от его содержания следует рассматривать либо как диспергатор, либо как коагулянт. Соли одновалентных ионов при их содержании в количестве 1–2% действуют в основном как диспергаторы, а при дальнейшем повышении их содержания оказывают коагулирующее действие. Соли двухвалентных ионов при содержании более 0,5–0,6% и трехвалентных при содержании более 0,06–0,08% способствуют агрегации тонких фракций в породе [7].

Влияние обменных катионов на фильтрационные свойства глин рассматривалось Е.Ф. Мосьяковым [21]. Исследовались глины монтмориллонит-каолинитового состава, насыщенные одно-, двух- и трехвалентными катионами. Автор, отмечая влияние валентности катионов и энергии их активации на уплотненность (пористость) глинистых паст, установил зависимость между коэффициентом фильтрации K_f и пористостью n : $K_f = an^b$, где a, b – эмпири-

ческие коэффициенты. При этом независимо от n коэффициент фильтрации уменьшался в следующем ряду: $\text{Al}^{3+} < \text{Fe}^{3+} < \text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{K}^+ < \text{Ca}^{2+}$. Подобная зависимость обусловлена неоднородностью результирующего влияния факторов: размера ионов, их валентности, химической активности.

Е.Ф. Мосьяков и Ю.Б. Мерков [30] изучали структурные и фильтрационные изменения глинистых грунтов в шламонакопителях. Так, при многолетних сроках эксплуатации в глинистых экранах происходят структурные изменения за счет роста кристаллов солей на поверхности глинистых частиц и в поровом пространстве. А это, в свою очередь, приводит к изменению фильтрационных свойств глинистого экрана. Установлено, что количественное содержание водорастворимых солей в глинистом экране и подстилающих четвертичных грунтах имеет тесную корреляционную связь с коэффициентами пористости. Изменение пористости глинистого экрана и подстилающих суглинков [30] связано с процессами кристаллизации солей.

Рост кристаллов солей, находящихся в ограниченном поровом пространстве, создает значительное кристаллизационное давление, которое раздвигает минеральную скелетную часть грунта, увеличивая его пористость. В поровом пространстве образуются кристаллы

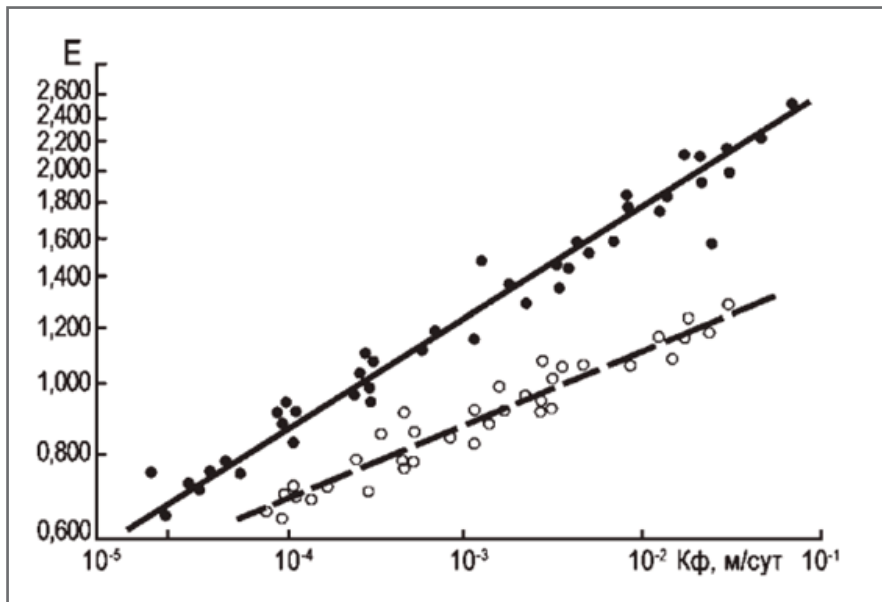


Рис. 7. Зависимость между коэффициентом пористости (e) и коэффициентом фильтрации (K_f) глинистого экрана (черные кружки) и четвертичных грунтов (белые кружки) (по [30])

CaCl₂ и NaCl. С увеличением пористости сильно возрастает коэффициент фильтрации глинистых пород (рис. 7).

Г.М. Березкиной [19] проводились исследования влияния обменных катионов на абсолютную величину коэффициента проницаемости (K_n) каолиновых и монтмориллонитовых глин. Как показали исследования, проницаемость этих глин, содержащих ионы Na⁺, на порядок ниже, чем у глин, в поглощенном комплексе которых содержится Ca²⁺.

Кроме того, Г.М. Березкина изучала изменения проницаемости во времени в связи с оценкой влияния структурно-текстурных показателей глины на ее фильтрационные свойства. Было отмечено, что при длительных фильтрационных испытаниях проницаемость глинистых пород может значительно уменьшиться. Однако сколько-нибудь значительных изменений в структуре и текстуре глин под влиянием временного фактора не наблюдалось.

Исследованиям изменений водопроницаемости глин во времени при фильтрации водных растворов солей также посвящены работы А.Г. Баламирзоева и др. [31]. Установлено, что фильтрация может существенно меняться во времени в связи с растворением и выщелачиванием солей из глинистого грунта. Ими были определены изменения концентрации раствора во времени на нижней границе промываемой толщи грунта и получены формулы, воспользовавшись которыми можно квалифицировать коэффициенты конвективной диффузии и растворения со-

лей при одномерной фильтрации воды в грунтах конечной толщины.

А.М. Монюшко и С.П. Пахомов [32] также определили, что интенсивность воздействия нейтральных солевых растворов определяется степенью отличия их состава от состава порового раствора глинистой породы. При этом основная роль здесь принадлежит катионам. Различаются два случая: изменение состава порового раствора приводит к набуханию или усадке грунта. Первый случай наблюдается при существенно натриевом составе воздействующего раствора, если его минерализация ниже концентрации натрия в поровом растворе. При длительном воздействии содержание натрия в поровом растворе приближается к его концентрации в фильтрующей через породу жидкости.

Если воздействующий раствор по сравнению с поровым обогащен двухвалентными катионами, то последние вытесняют натрий из поглощенного комплекса глинистых минералов. Сжатие диффузных оболочек глинистых частиц приводит к уплотнению скелета и образованию макропористости, расслаивания и других видов дезинтеграции. Наблюдается усадка и значительное повышение проницаемости глинистой породы. Аналогичный эффект возникает при действии на глинистый грунт натриевых растворов высокой концентрации. В этом случае повышение содержания натрия в поровом растворе приводит к понижению степени диссоциации натриевых форм глинистых мине-

ралов, что является причиной сжатия диффузных оболочек.

Растворы калиевых солей при малых концентрациях близки по характеру к растворам натриевых солей. Но при более высоких концентрациях в экспериментах с некоторыми монтмориллонитовыми глинами наблюдалась необратимая фиксация ионов калия, приводящая к гидрослюдизации глинистых минералов.

В.М. Гольдберг и Н.П. Скворцов [29] изучали влияние хлоридных, сульфатных и нитратных растворов на проницаемость глин. В результате исследований оказалось, что по степени влияния на интенсивность роста коэффициента проницаемости (k_n), рассматриваемые хлоридные соли располагаются в следующем ряду: FeCl₃>CaCl₂>KCl>NaCl. Принимая во внимание одинаковый анионный состав растворов данных солей, катионные составляющие этого ряда можно записать в следующей последовательности: Fe³⁺>Ca²⁺>K⁺>Na⁺.

С увеличением минерализации растворов NaCl и CaCl₂ коэффициент проницаемости (k_n) глин возрастает (рис. 8). Основной прирост значений k_n наблюдается в области концентраций до 10–30 г/л. Так, при переходе от дистиллированной воды к хлоридным растворам с концентрацией 10 г/л проницаемость в зависимости от типа глины и раствора возрастает в 1,5–6,3 раза, а с увеличением концентрации от 10 до 55–60 г/л – в 1,3–2,3 раза. При увеличении же концентрации раствора от 55–60 до 100–115 г/л коэффициент проницаемости практически не меняется.

Наибольший рост проницаемости отмечается в Na-монтмориллонитовых глинах: при переходе от дистиллированной воды к раствору CaCl₂ с концентрацией 55 г/л величина k_n увеличилась в 13 раз, а при переходе от дистиллированной воды к раствору NaCl с той же концентрацией – в 4,2 раза. В Ca-монтмориллоните при тех же условиях проницаемость в случае раствора NaCl выросла в 2 раза; в случае CaCl₂ – в 2,7 раза.

На рисунке 8, б показано влияние минерализации на проницаемость естественной каолиновой глины. Результаты этих экспериментов также свидетельствуют о том, что с ростом минерализации хлоридных растворов проницаемость каолинита возрастает. В диапазоне минерализации от 0 до 150 г/л величина k_n увеличивается примерно в 2,5 раза при фильтрации раствора NaCl, в 1,34–2,3 раза – при фильтрации

раствора CaCl_2 . Наиболее значительные изменения коэффициента проницаемости отмечаются в диапазоне минерализации от 0 до 10 г/л. Так, уже при минерализации 3 г/л значение k_n увеличилось почти в 1,5 раза. В области концентраций от 10–30 до 150 г/л изменение проницаемости менее значительно.

При фильтрации сульфатных растворов максимальный эффект увеличения проницаемости отмечается для растворов Na_2SO_4 и K_2SO_4 . Прирост проницаемости по сравнению с дистиллированной водой для Na_2SO_4 и K_2SO_4 соответственно составил 2,76 и 3,08. Исследования показали, что при фильтрации растворов двухвалентных металлов эффект изменения проницаемости оказался минимальным: k_n возрастает лишь в 1,38 и 1,62 раза, то есть гораздо меньше, чем в случаях растворов одновалентных металлов, что соответствует изменению проницаемости при фильтрации хлоридных растворов (NaCl , KCl , CaCl_2). При сравнительном анализе результатов выявлен неодинаковый масштаб увеличения k_n для хлоридных и сульфатных растворов с одинаковым катионным составом. Так, при фильтрации растворов NaCl и KCl коэффициент проницаемости возрастает по сравнению с дистиллированной водой в 1,25 и 1,43 раза, а при фильтрации растворов Na_2SO_4 и K_2SO_4 – в 2,76 и 3,08 раза соответственно.

При изучении влияния нитратных растворов эксперименты выявили аналогичный с рассмотренным выше характер изменений проницаемости: максимальное изменение величины k_n по сравнению с дистиллированной водой отмечалось для растворов таких солей одновалентных щелочных металлов, как NaN_3 и KNO_3 (в 3,25 и 3,30 раза соответственно) и в меньшей степени для раствора соли двухвалентного металла $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – в 1,4 раза. Это показывает, что с ростом валентности катионов в глинах значение k_n возрастает, поскольку при этом возрастает содержание связанной воды, уменьшается содержание осмотической воды и сокращается толщина диффузного слоя.

К. Шейкельфорд и др. [24] исследовали коэффициент фильтрации грунтов, насыщенных растворами NaCl , ZnCl_2 , CaCl_2 , и установили, что поровый раствор с высокой концентрацией одновалентных катионов, а также с низкой концентрацией двухвалентных катионов вызывает значительное увеличение коэффициента фильтрации. Авторы объясняют это тем, что увеличение

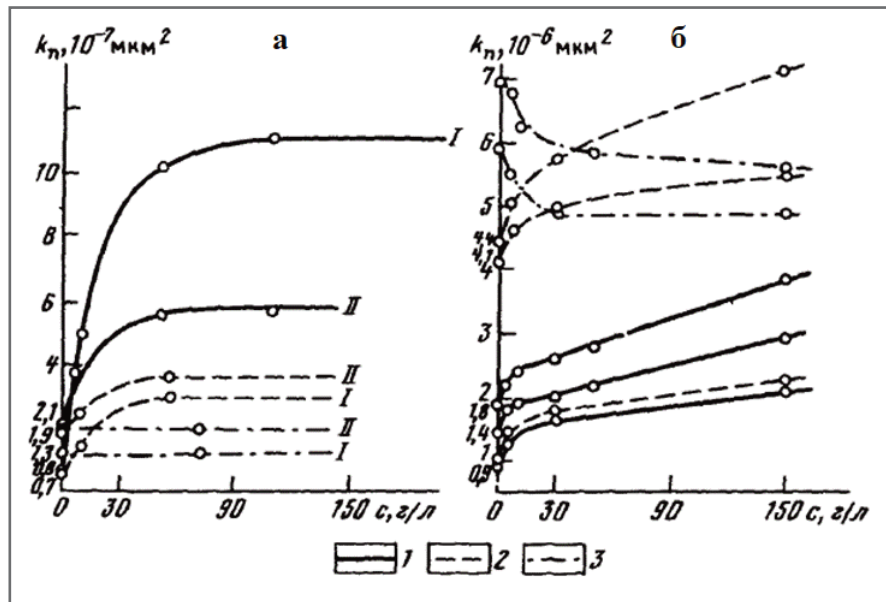


Рис 8. Графики зависимостей коэффициента проницаемости Na- и Ca-монтмориллонитовой (а) и каолинитовой (б) глин от минерализации и состава фильтрующей жидкости. Глины: I – Na-монтмориллонит, II – Ca-монтмориллонит. Растворы: 1 – NaCl , 2 – CaCl_2 , 3 – Na_2SO_4 (по [29])

концентрации уменьшает адсорбционный слой, что, в свою очередь, ведет к увеличению коэффициента фильтрации. Это неверное заключение, так как толщина адсорбционного слоя не зависит от концентрации электролита, тогда как толщина диффузного слоя, наоборот, зависит от нее.

Й. Джо и др. [25] провели испытания по определению коэффициента фильтрации Na-бентонита с использованием растворов KCl в концентрации 100 ммоль/л и CaCl_2 в концентрациях 20 и 40 ммоль/л. Было обнаружено, что величина k_f бентонита уменьшается с уменьшением концентрации соли. При относительно низкой концентрации раствор CaCl_2 оказывал большее влияние на k_f по сравнению с той же концентрацией раствора NaCl . Для проникающих растворов с двухвалентными катионами при увеличении концентрации происходят более значительные и быстрые изменения k_f и влажности. Это происходит в результате более быстрого замещения катионов натрия в обменном комплексе двухвалентными катионами в проникающем растворе.

В ходе испытаний с раствором KCl с концентрацией 100 ммоль/л не произошло практически никаких изменений коэффициента фильтрации и коэффициента пористости по сравнению с дистиллированной водой, даже если K^+ заменял Na^+ в обменном комплексе. С другой стороны, напротив, для растворов CaCl_2 (20 ммоль/л и 40 ммоль/л)

коэффициент фильтрации увеличивался, а свободное набухание и влажность уменьшались по мере обмена Ca^{2+} на Na^+ . Заметные изменения проницаемости и обменного комплекса произошли при испытаниях с раствором CaCl_2 в концентрации 40 ммоль/л. Коэффициент фильтрации, полученный при использовании 20 ммоль/л CaCl_2 был меньше, а влажность больше, чем в случае использования 40 ммоль/л CaCl_2 ($2,6 \times 10^{-8}$ см/с против $6,7 \times 10^{-8}$ см/с, или 122% против 111% и 3,2 против 2,9 соответственно). То есть в бентоните, пропитанном более разбавленным раствором CaCl_2 , удерживается больше воды, несмотря на то что оба бентонита в конце испытаний становятся Ca-бентонитами.

Кроме того, Й. Джо и др. [25] провели исследование влияния предварительной гидратации дистиллированной водой бентонитов на их коэффициенты фильтрации. Предварительно гидратированный бентонит имеет более низкий k_f ($1,9 \times 10^{-8}$ см/с), чем бентонит, сразу пропитанный раствором CaCl_2 в концентрации 40 ммоль/л ($6,7 \times 10^{-8}$ см/с). Это позволяет предположить, что более низкий коэффициент фильтрации обусловлен удержанием связанной воды. Проникающие растворы с более высокой концентрацией, вероятно, вызывают большее вытеснение молекул воды, поскольку осмотический градиент между свободной и связанной водой больше.

А. Таммативат и У. Чимой [33] исследовали влияние растворов солей од-

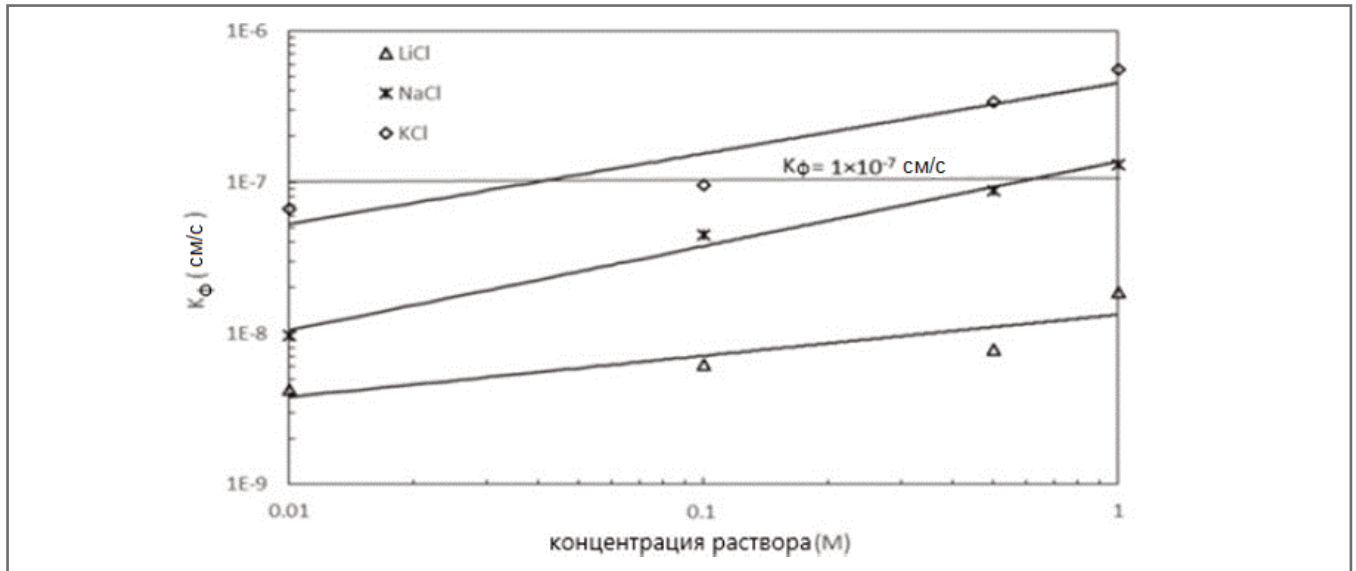


Рис. 9. Изменение коэффициента фильтрации в зависимости от концентрации различных солей-электролитов [35]

новалентных (LiCl, NaCl, KCl), двухвалентных (CaCl_2 , MgCl_2 , CuCl_2) и трехвалентных (FeCl_3) металлов на набухание и коэффициент фильтрации глинистых грунтов и подтвердили, что при одинаковой концентрации набухание грунтов больше при одновалентных катионах, чем при двухвалентных и трехвалентных. Для грунтов, насыщенных растворами, содержащими двух- или трехвалентные катионы, наблюдались более высокие значения коэффициента фильтрации по сравнению с одновалентными катионами или дистиллированной водой. Это объясняется уменьшением толщины диффузного слоя, что в свою очередь приводит к увеличению пористости грунта.

К. Сюэ и др. [34] изучали влияние растворов солей в высокой концентрации (MgCl_2 , CaCl_2 , NaCl, KCl) на коэффициент фильтрации бентонитов и подтвердили, что k_{ϕ} увеличивается в несколько раз при фильтрации растворов более высокой концентрации по сравнению с проницаемостью грунтов с дистиллированной водой. Ими подтверждено, что коэффициент фильтрации монтмориллонитовых глин в зависимости от состава солей порового раствора увеличивается в ряду: $\text{CaCl}_2 > \text{MgCl}_2 > \text{KCl} > \text{NaCl}$.

С ростом валентности катионов в глинах k_{ϕ} возрастает, поскольку при этом увеличивается содержание связанной воды и, наоборот, уменьшается содержание осмотической воды, так как сокращается толщина диффузного слоя. Представленный ряд находится в соответствии с аналогичным рядом активности катионов по энергии их поглощения

(адсорбции) глинами. Степень диссоциации глинистых минералов в водной среде обуславливает образование диффузного слоя, который определяется характером катионов. По убыванию степени диссоциации устанавливается ряд: $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$. Отсюда следует, что наиболее мощный диффузный слой, а следовательно, наименьшую проницаемость можно ожидать у монтмориллонитовых глин, содержащих катионы натрия. И наоборот, относительно слабо развитый диффузный слой и поэтому более высокую проницаемость следует ожидать у каолинитовых глин, в особенности содержащих катионы кальция или трехвалентного железа. Все это позволяет увязывать фильтрационные свойства глин с составом обменных катионов и их емкостью обмена, а также регулировать их с помощью ионного обмена.

В случае сравнительного анализа влияния катионов одинаковой валентности необходимо учитывать различия радиусов гидратированных катионов и их влияние на коэффициент фильтрации. Этот фактор изучали Т.В. Бхарат и П. Дас [35]. Они провели три серии испытаний с использованием различных электролитов с катионами одинаковой валентности. Серии состояли из 0,01-; 0,1-; 0,5- и 1-молярного водного раствора LiCl, NaCl и KCl. Они установили, что с уменьшением катионного радиуса обменных ионов коэффициент фильтрации увеличивается (рис. 9). Увеличение было значительным при концентрации 1 М, при которой коэффициент фильтрации в присутствии иона Li^+ составлял $1,88 \times 10^{-8}$ см/с, а в

присутствии иона K^+ он наблюдался на уровне $5,58 \times 10^{-7}$ см/с, то есть увеличился почти в 29 раз. Однако наименьшее увеличение наблюдалось для концентрации 0,01 М. Таким образом, уменьшение радиуса катионов одинаковой валентности приводит к увеличению степени их гидратации и росту коэффициента фильтрации. Это связано с увеличением агрегированности частиц с ростом радиуса катионов, что в свою очередь приводит к увеличению эффективного размера пустот, изменяя их от микропор до макропорам, в результате чего увеличивается коэффициент фильтрации грунтов.


Заключение ►

Таким образом, фильтрационная проницаемость глинистых грунтов существенно зависит от минерализации и состава фильтрующейся жидкости: под влиянием концентрированных водных растворов солей проницаемость значительно возрастает по сравнению с проницаемостью того же грунта в случае пресной воды. В зависимости от минерального типа глин, минерализации и состава фильтрующейся жидкости и поглощенных катионов коэффициент проницаемости и коэффициент фильтрации глин могут меняться в несколько раз или даже на несколько десятичных порядков. Увеличение проницаемости глин обусловлено сложными процессами физико-химического взаимодействия фильтрующейся жидкости с грунтом. В условиях длительной фильтрации изменение проницаемости существенно зависит от фактора времени.

Результаты исследований влияния состава (и минерализации) растворов солей показывают, что для различных видов фильтрующихся растворов проницаемость глин выше, чем для пресной воды. При взаимодействии глинистых грунтов с растворами солей в результате катионного обмена одновалентных ионов на многовалентные происходит уменьшение толщины диффузного слоя, которая будет

также подавляться под влиянием роста концентрации раствора, вследствие чего происходит изменение структуры порового пространства и рост фильтрационных характеристик глинистых грунтов.

Анализ опубликованной литературы по данной теме показал, что основные закономерности под влиянием состава и концентрации растворов солей на фильтрационные характеристики гли-

нистых грунтов уже установлены и подтверждены многими учеными. Тем не менее имеются некоторые пробелы в изучении изменения микростроения глинистых грунтов, их начального градиента фильтрации под влиянием состава и концентрации фильтрующихся растворов солей, мало работ проведено для грунтов природного сложения, что требует дальнейшего изучения. 

Список литературы ►

1. Филатов М.М. Стабилизация дорожных грунтов прогревом, солями, битуминозными дегтевыми и другими материалами // Стабилизация грунтов. М.: Изд-во Гущосдор, 1938. С. 5–33.
2. Морозов С.С., Полтев Н.Ф., Самойлов В.Г. К вопросу создания водоемов в ЦЧО на сильнофильтрующих грунтах // Вестник МГУ. Сер. физ-мат. и естеств. наук. 1951. Вып. 8, № 12.
3. Шаврыгин П.И. Физические свойства почв в зависимости от состава поглощенных оснований // Труды Почвенного института им. В.В. Докучаева. 1936. С. 51–99.
4. Шаврыгин П.И. Солевой режим почв и почвенных растворов центральной части Барабы // Труды Почвенного института АН СССР. 1954. Т. 42. С. 104–171.
5. Mitchell J.K. Fundamentals of soil behavior (2nd ed.). New York: Wiley, 1993. P. 236–271.
6. Брилинг И.А. Фильтрация в глинистых породах: обзор. М.: ВИЭМС, 1984. 57 с.
7. Дашко Р.Э. Инженерно-геологический анализ и оценка водонасыщенных глинистых пород как оснований сооружений. С.-Пб.: Геореконструкция, 2015. 382 с.
8. Жиленков В.Н. Водопроницаемость экранов из глинистых грунтов (опытные исследования) // Материалы Всесоюзных научно-технических совещаний «Фильтрационные исследования и расчеты при проектировании гидротехнических сооружений», Нарва, 18–20 мая 1982 г. Л.: 1983. С. 119–127.
9. Мироненко В.А., Румынин В.Г., Учаев В.К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. Л.: Недра, 1980. 320 с.
10. Морозов С.С., Самойлов В.Г., Лужина Л.Г. Создание водо- и растворопроницаемых экранов из дисперсных грунтов известкованием // Труды совещания по теоретическим основам технической мелиорации грунтов, 1–4 февраля 1960 г. М.: Изд-во МГУ, 1961. С. 216–224.
11. Морозов С.С., Васильева В.И., Дьячкова Н.Г. Изменение микроагрегатного состава и физико-механических свойств грунтов при взаимодействии с растворами солей, кислот и щелочей // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. Вып. 2. М.: Изд-во МГУ, 1968. С. 401–415.
12. Павилонский В.М. Изменение проницаемости суглинка при длительной фильтрации растворов едкого натра // Труды ВОДГЕО. 1977. Вып. 68. С. 6–9.
13. Павилонский В.М. Изменение проницаемости уплотненных глинистых грунтов в процессе долговременной фильтрации растворов электролитов // Труды ВСЕГИНГЕО. М., 1983. Вып. 152. С. 86–96.
14. Скворцов Н.П. Результаты исследования начального градиента фильтрации в глинах // Труды ВСЕГИНГЕО. М.: 1983. Вып. 152. С. 66–75.
15. Скворцов Н.П. Изучение влияния гидрохимических условий на проницаемость глинистых водоупоров в связи с оценкой защищенности подземных вод от загрязнений // Тезисы докладов Всесоюзного совещания «Использование и охрана подземных вод Урала». Свердловск, 1983. С. 72–74.
16. Попов В.Г., Абдрахманов Р.Ф. Ионнообменная концепция в генетической гидрогеохимии / под ред. В.Г. Попова. Уфа: Гилем, Башкирская энциклопедия, 2013. 356 с.
17. Габибов Ф.Г. Теория и практика улучшения свойств структурно-неустойчивых глинистых грунтов при решении геотехнических и инженерно-геоэкологических проблем. Баку: Элм, 2011. 422 с.
18. Сунцов М.А. О фильтрации воды в структурных глинистых породах // Гидрогеохимические минералы. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 62–76.
19. Березкина Г.М. Влияние структуры и текстуры глинистых пород на процесс фильтрации. Объекты и методика исследований // Физико-химические процессы в глинистых породах. М.; Изд-во МГУ, 1980. С. 100–142.
20. Гольдберг В.М. Исследование фильтрации в глинах с учетом влияния на этот процесс физико-химических и термодинамических условий // Труды ВСЕГИНГЕО. М., 1983. Вып. 152. С. 6–14.
21. Мосьяков Е.Ф. Об уплотнении и фильтрационных свойствах глинистых грунтов с различными обменными катионами // Геология и разведка. 1976. № 9. С. 9–13.

22. Березкина Г.М., Брилинг И.А., Корякина Н.С., Краснушкин А.В. Экспериментальные исследования движения влаги и солей в глинистых породах // Взаимодействие поверхностного и подземного стока. М.: Изд-во МГУ, 1976. Вып. 4. С. 195–271.
23. Petrov R.J., Rowe R.K. Geosynthetic clay liner (GCL) – chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance // Canadian Geotechnical Journal. 1997. Vol. 34. P. 863–885.
24. Shackelford C.D., Benson C.H., Katsumi T., Edil T.B., Lin L. Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids // Geotextiles and Geomembranes. 2000. Vol. 18. P. 133–162.
25. Jo Y.H., Katsumi T., Benson C.H., Edil T.B. Hydraulic conductivity and swelling of non-prehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 2001. Vol. 127. № 7. P. 557–567.
26. Mishra A.K., Ohtsubo M., Li L., Higashi T., Park J. Effect of salt of various concentrations on liquid limit, and hydraulic conductivity of different soil-bentonite mixtures // Environmental Geology. 2009. Vol. 57. № 5. P. 1145–1153.
27. Грунтоведение / Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А. и др. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
28. Achari G., Joshi R.C., Bentley L.R., Chatterji S. Prediction of the hydraulic conductivity of clays using the electric double layer theory // Canadian Geotechnical Journal. 1999. Vol. 36. P. 783–792.
29. Гольдберг В.Н., Скворцов Н.П. Проницаемость и фильтрация в глинах. Москва: Недра, 1986. 160 с.
30. Мосьяков Е.Ф., Мерков Ю.Б. Структурные и фильтрационные изменения глинистых грунтов в шламонакопителях Стерлитамакского содово-цементного комбината // Стратиграфия и корреляция плиоцена и плейстоцена Предуралья. Уфа: БФАН СССР, 1976. С. 79–84.
31. Баламирзоев А.Г., Зербалиев А.М., Курбанов К.О. Математическое моделирование выщелачивания солей при одномерной фильтрации воды в грунтах конечной толщины // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. № 2 (41). С. 118–125.
32. Монюшко А.М., Пахомов С.П. Основные закономерности, определяющие устойчивость глинистых грунтов к воздействию обводнения и промстоков (по экспериментальным данным) // Инженерная геология. 1985. № 6. С. 35–45.
33. Thammathiwat A., Chimoye W. Effect of permeant liquid on the swell volume and permeability of geosynthetic clay liners // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2010. Vol. 15. P. 1183–1197.
34. Xue Q., Zhang Q., Liu L. Impact of high concentration solutions on hydraulic properties of geosynthetic clay liner materials // Materials. 2012. Vol. 5. P. 2326–2341. URL: doi.org/10.3390/ma5112326.
35. Bharat T.V., Das P. Effect of inorganic salt solutions on the hydraulic conductivity and diffusion characteristics of compacted clay // Problematic Soils and Geoenvironmental Concerns, Proceedings of IGC 2018. 2020. P. 99–111.

References ►

1. Filatov M.M. Stabilizatsiya dorozhnyh gruntov progrevom, solyami, bituminoznymi degtevyami i drugimi materialami [Stabilization of road soils by heating, salts, bituminous-tar and other materials] // Stabilizatsiya gruntov. M.: Izd-vo Gushosdor, 1938. S. 5–33 (in Rus.).
2. Morozov S.S., Poltev N.F., Samoilov V.G. K voprosu sozdaniya vodoyemov v TSCHO na sil'nofil'truyushchih gruntah [On the issue of creating water reservoirs in the Central Black Earth region on highly seepagable grounds] // Vestnik MGU. Ser. fiz-mat. i estestv. nauk. 1951. Vyp. 8, № 12 (in Rus.).
3. Shavrygin P.I. Fizicheskie svoystva pochv v zavisimosti ot sostava pogloshchennyh osnovaniy [Physical properties of soils depending on the composition of absorbed bases] // Trudy Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchayeva. M., 1936. S. 51–99 (in Rus.).
4. Shavrygin P.I. Solevoy rezhim pochv i pochvennyh rastvorov tsentral'noy chasti Baraby [Salt regime of soils and soil solutions in the central part of Baraba] // Trudy Pochvennogo instituta AN SSSR. 1954. T. 42. S. 104–171 (in Rus.).
5. Mitchell J.K. Fundamentals of soil behavior (2nd ed.). Wiley, New York, 1993. P. 236–271.
6. Briling I.A. Fil'tratsiya v glinistyh porodah: obzor [Seepage in clayey soils: overview]. M.: VIEMS, 1984. 57 s. (in Rus.).
7. Dashko R.E. Inzhenerno-geologicheskii analiz i otsenka vodonasyshchennyh glinistyh porod kak osnovaniy sooruzheniy [Engineering-geological analysis and assessment of water-saturated clayey soils as foundations for structures]. S.-Pb.: Georekonstruktsiya, 2015. 382 s. (in Rus.).
8. Zhilenkov V.N. Vodopronitsaemost' ekranov iz glinistyh gruntov (opytnye issledovaniya) [Water permeability of screens of clayey soils (experimental studies)] // Materialy Vsesoyuznyh nauchno-tehnicheskikh soveshchaniy «Fil'tratsionnyye issledovaniya i raschety pri proyektirovaniy gidrotehnicheskikh sooruzheniy», Narva, 18–20 maya 1982 g. L.: 1983. S. 119–127 (in Rus.).
9. Mironenko V.A., Rumynin V.G., Uchaev V.K. Ohrana podzemnyh vod v gornodobyvayushchih rayonah [Groundwater protection in mining areas]. L.: Nedra, 1980. 320 s. (in Rus.).
10. Morozov S.S., Samoilov V.G., Luzhina L.G. Sozdaniye vodo- i rastvoronepronitsaemykh ekranov iz dispersnyh gruntov izvestkovaniem // Trudy soveshchaniya po teoreticheskim osnovam tehnikoskoy melioratsii gruntov, 1–4 fevralya 1960 g. M.: Izd-vo MGU, 1961. S. 216–224 (in Rus.).
11. Morozov S.S., Vasil'yeva V.I., D'yachkova N.G. Izmeneniye mikroagregatnogo sostava i fiziko-mehaniicheskikh svoystv gruntov pri vzaimodeystvii s rastvorami soley, kislot i shchelochey [Changes in the microaggregate composition and physical-mechanical properties of soils when interacting with solutions of salts, acids and alkalis] // Voprosy inzhenernoy geologii i gruntovedeniya. Vyp. 2. M.: Izd-vo MGU, 1968. S. 401–415 (in Rus.).

12. Pavilonskiy V.M. Izmeneniye pronitsayemosti suglinka pri dlitel'noy fil'tratsii rastvorov yedkogo natra [Changes in loam permeability during long-term seepage of caustic soda solutions] // Trudy VODGEO. 1977. Vyp. 68. S. 6–9 (in Rus.).
13. Pavilonskiy V.M. Izmeneniye pronitsaemosti uplotnennykh glinistyyh gruntov v protsesse dolgovremennoy fil'tratsii rastvorov elektrolitov // Trudy VSEGINGEO. M., 1983. Vyp. 152. S. 86–96 (in Rus.).
14. Skvortsov N.P. Rezul'taty issledovaniya nachal'nogo gradiyenta fil'tratsii v glinah // Trudy VSEGINGEO. M., 1983. Vyp. 152. S. 66–75 (in Rus.).
15. Skvortsov N.P. Izucheniye vliyaniya gidrohimicheskikh usloviy na pronitsaemost' glinistyyh vodouporov v svyazi s otsenkoy zashchishchennosti podzemnykh vod ot zagryazneniy // Tezisy dokladov Vsesoyuznogo soveshchaniya «Ispol'zovaniye i ohrana podzemnykh vod Urala». Sverdlovsk, 1983. S. 72–74 (in Rus.).
16. Popov V.G., Abdrakhmanov R.F. Ionoobmennaya kontseptsiya v geneticheskoy gidrogeohimii [Ion exchange concept in genetic hydrogeochemistry] / pod red. V.G. Popova. Ufa: Gilem, Bashkirskaya ehntsiklopediya, 2013. 356 s. (in Rus.).
17. Gabibov F.G. Teoriya i praktika uluchsheniya svoystv strukturno-neustoychivyyh glinistyyh gruntov pri reshenii geotekhnicheskikh i inzhenerno-geoekologicheskikh problem [Theory and practice of improving the properties of structurally unstable clay soils in solving geotechnical and engineering-geoecological problems]. Baku: Elm, 2011. 422 s. (in Rus.).
18. Suntsov M.A. O fil'tratsii vody v strukturnyyh glinistyyh porodah // Gidrogeohimicheskkiye mineraly [On water seepage in structural clay soils]. M.: Izd-vo AN SSSR, 1963. S. 62–76 (in Rus.).
19. Berezkina G.M. Vliyaniye struktury i tekstury glinistyyh porod na protsess fil'tratsii. Ob'ekty i metodika issledovaniy [Influence of the structure and texture of clay soils on the seepage process. Objects and methods of the research] // Fiziko-himicheskkiye protsessy v glinistyykh porodah. M.; Izd-vo MGU, 1980. S. 100–142 (in Rus.).
20. Gol'dberg V.M. Issledovaniye fil'tratsii v glinah s uchedom vliyaniya na etot protsess fiziko-himicheskikh i termodinamicheskikh usloviy // Trudy VSEGINGEO. M., 1983. Vyp. 152. S. 6–14 (in Rus.).
21. Mos'yakov E.F. Ob uplotnenii i fil'tratsionnykh svoystvakh glinistyyh gruntov s razlichnymi obmennymi kationami [On the compaction and filtration properties of clay soils with various exchangeable cations] // Geologiya i razvedka. 1976. № 9. S. 9–13 (in Rus.).
22. Berezkina G.M., Briling I.A., Koryakina N.S., Krasnuskin A.V. Eksperimental'nyye issledovaniya dvizheniya vlagi i soley v glinistyykh porodah [Experimental studies of the movement of moisture and salts in clayey soils] // Vzaimodeystviye poverhnostnogo i podzemnogo stoka. M.: Izd-vo MGU, 1976. Vyp. 4. S. 195–271 (in Rus.).
23. Petrov R.J., Rowe R.K. Geosynthetic clay liner (GCL) – chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34: 863–885.
24. Shackelford C.D., Benson C.H., Katsumi T., Edil T.B., Lin L. Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids. Geotextiles and Geomembranes, 2000. 18: 133–162.
25. Jo Y.H., Katsumi T., Benson C.H., Edil T.B. Hydraulic conductivity and swelling of non-prehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 2001, 127 (7): P. 557–567.
26. Mishra A.K., Ohtsubo M., Li L., Higashi T., Park J. Effect of salt of various concentrations on liquid limit, and hydraulic conductivity of different soil-bentonite mixtures. Environmental Geology, 2009, 57 (5): 1145–1153.
27. Gruntovedeniye [Ground science] / Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesenskiy E.A. i dr. M.: Izd-vo MGU, 2005. 1024 s. (in Rus.).
28. Achari G., Joshi R.C., Bentley L.R., Chatterji S. Prediction of the hydraulic conductivity of clays using the electric double layer theory. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36: 783–792.
29. Gol'dberg V.N., Skvortsov N.P. Pronitsaemost' i fil'tratsiya v glinah [Permeability and seepage in clays]. Moskva: Nedra, 1986. 160 s. (in Rus.).
30. Mos'yakov E.F., Merkov Yu.B. Strukturnyye i fil'tratsionnyye izmeneniya glinistyyh gruntov v shlamonakopitel'yakh Sterlitamakskogo sodovo-tsementnogo kombinata [Structural and seepage changes of clayey soils in sludge reservoirs of the Sterlitamak Soda-Cement Plant] // Stratigrafiya i korrelyatsiya pliotsena i pleistotsena Predural'ya. Ufa: BFAN SSSR, 1976. S. 79–84 (in Rus.).
31. Balamirzoev A.G., Zerbaliyev A.M., Kurbanov K.O. Matematicheskoye modelirovaniye vyshchelachivaniya soley pri odnomernoy fil'tratsii vody v gruntah konechnoy tolshchiny [Mathematical modeling of salt leaching during one-dimensional water seepage in soils of finite thickness] // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Tehnicheskkiye nauki. 2016. № 2 (41). S. 118–125 (in Rus.).
32. Monyushko A.M., Pahomov S.P. Osnovnyye zakonomernosti, opredelyayushchiye ustoychivost' glinistyyh gruntov k vozdeystviyu obvodneniya i promstokov (po eksperimental'nym dannym) [The main regularities that determine the resistance of clay soils to the effects of flooding and industrial wastes (according to experimental data)] // Inzhenernaya geologiya. 1985. № 6. S. 35–45 (in Rus.).
33. Thammathiwat A., Chimoye W. Effect of permeant liquid on the swell volume and permeability of geosynthetic clay liners. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 15: 1183–1197.
34. Xue Q., Zhang Q., Liu L. Impact of high concentration solutions on hydraulic properties of geosynthetic clay liner materials. Materials, 2012, 5: 2326–2341. URL: doi.org/10.3390/ma5112326.
35. Bharat T.V., Das P. Effect of inorganic salt solutions on the hydraulic conductivity and diffusion characteristics of compacted clay. Problematic Soils and Geoenvironmental Concerns, Proceedings of IGC 2018. 2020. P. 99–111.

Информация об авторах

КОРОЛЕВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., г. Москва, Россия

ФАЗЫЛОВ АЙРАТ МУХАРАМОВИЧ

Аспирант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Information about the authors

VLADIMIR A. KOROLEV

DSc (Geology and Mineralogy), professor at the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

AIRAT M. FAZYLOV

Postgraduate student at the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Независимый электронный журнал **ГеоИнфо**

**С 2022 года журнал «ГеоИнфо»
выходит в формате *PDF.
10 выпусков в год.**



WWW.GEOINFO.RU

ООО НПП «ГЕОТЕК» - ВЕДУЩИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬ ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ, МЕРЗЛЫХ, КРУПНООБЛОМОЧНЫХ И СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ.

ПРИБОРЫ КРИОЛОГИЧЕСКИЕ СЕРИИ СТАНДАРТ

ХИТ продаж

Прибор компрессионный криологический ГТ 1.1.11



Прибор срезной криологический ГТ 1.2.14



Прибор шариковый штамп криологический ГТ 1.6.2



Температура окружающей среды **+5 (±2) С°**

Прибор разработан для эксплуатации в холодильной камере (камера не входит в состав прибора)

ВОЗМОЖНОСТИ:

- автоматизированный режим испытания с поддержанием заданной отрицательной температуры каждого образца;
- прибор работает при пониженных температурах;
- автоматическое управление температурой образца;
- испытание до трех образцов в одном приборе;
- измерение температуры каждого образца.

ПРИБОРЫ ОБЕСПЕЧИВАЮТ ПРОВЕДЕНИЕ СЛЕДУЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ:

- **Прибор компрессионный криологический ГТ.1.1.11**
-испытание по ГОСТ 12248.10-2020 на сжатие и сжатие с оттаиванием;
- **Прибор срезной криологический ГТ 1.2.14**
-испытания по ГОСТ 12248.8-2020 на срез по поверхности смерзания;
-испытания по ГОСТ Р56726-2015 по определению касательных сил морозного пучения;
- **Прибор шариковый штамп криологический ГТ 1.6.2**
-испытания по ГОСТ 12248.7-2020 шариковым штампом.

ПОЧЕМУ ВЫБИРАЮТ НАС



Высокое качество



Выгодная цена



Надежный сервис



Экономия бюджета испытаний

440004, Россия, г. Пенза, ул. Центральная, строение 1М,
+7(8412) 999-189, 8-800-200-16-05 (звонок по России бесплатный),
sales@npp-geotek.ru, npp-geotek.com

*На правах рекламы