

ХАРАКТЕРНЫЕ ЧЕРТЫ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ МЕРЗЛЫХ ЗАСОЛЕННЫХ ГРУНТОВ

Ю.Д. Зыков, О.П.Червинская*, А.Д. Фролов **

Московский государственный университет, геологический ф-т, 119899, Москва, Воробьевы Горы, Россия

** Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве, 105085, Москва, Окружной проезд, 18, Россия*

*** Российский государственный гуманитарный университет, 125267, Москва, Миусская пл., д.6, Россия*

Упругие, прочностные и другие свойства мерзлых грунтов, связанные с деформируемостью, обусловлены в основном их пространственной криогенной кристаллизационно-коагуляционной структурой (ПККС). В статье рассматриваются характерные черты и особенности ПККС мерзлых засоленных песчано-глинистых грунтов, начинающие формироваться при определенных критических исходных концентрациях ($C_{кр}$) насыщающих растворов. Величина $C_{кр}$ обусловлена глинистостью грунта и типом его засоления.

Приводятся и обсуждаются результаты лабораторных экспериментов по определению динамических модулей упругости и некоторых характеристик прочности в широком диапазоне концентраций и составов поровых растворов, насыщавших образцы, которые являлись моделями грунтов с морским, континентальным и смешанным типами засоления. Установлены закономерности изменения изучавшихся характеристик в зависимости от засоленности и температуры и показаны весьма существенные (в особенности для песков) отличия их значений от пресных мерзлых грунтов того же состава. Экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с оцененными величинами $C_{кр}$, основными концепциями физико-химической механики и спецификой ПККС засоленного грунта.

Упругие и прочностные свойства, засоленные мерзлые грунты, концентрация порового раствора

THE FEATURES OF SALINE FROZEN SOIL DEFORMABILITY

Yu.D. Zykov, O.P. Chervinskaya*, A.D. Frolov**

Moscow State University, Department Geology, 119899, Moscow, Vorobjovy Gory, Russia

** Production and Research Institute for Engineering Construction Survey (PNIIS), 105058, Moscow, Okružhnoi pr., 18, Russia*

*** Russian State University for Humanities, 125267, Moscow, Miooskaya sq., 6, Russia*

The elastic and strength properties of frozen soils are conditioned by species of their spatial cryogenic crystalline-coagulant structure (SCCS). In this paper we discuss principal features of saline frozen soils which start to form shape at certain critical initial concentration (C_{cr}) of saturating pore solutions. The C_{cr} value depends on solution composition and clayeyness of the soil. The experimental data on dynamic elastic moduli and strength characteristic of frozen soils in a wide range of initial concentrations and compositions of pore solutions are presented and discussed. The sea, continental and mixed types of frozen soil salinization have been modelled.

The mechanical properties (including moduli of elasticity) of saline frozen soils considerably change compared to the same nonsaline frozen soils especially for the sands. Experimental data are in a good agreement with the evaluated C_{cr} values, with the main principles of physics-chemical mechanics and the established features of saline soil SCCS.

Elastic and strength properties, saline frozen soils, concentration of pore solution

Исходя из основных представлений физико-химической механики, развитых П.А.Ребиндером, Е.Д.Щукиным и их школой, упругие, прочностные и другие свойства мерзлых грунтов, связанные с деформируемостью, обусловлены в основном их пространственной криогенной кристаллизационно-коагуляционной структурой (ПККС) [Фролов, 1976]. Отличие засоленных

мерзлых грунтов от пресных в свете этих представлений заключается, в первую очередь, в понижении температуры фазовых переходов порового раствора и соответственно в увеличении содержания жидкой фазы, находящейся в грунте в виде полудискретных или дискретных скоплений в межзерновых граничных зонах. Одновременно происходят изменения энергетического

состояния жидкости [Фролов и др., 1993]. Существенно иной в мерзлых грунтах оказывается и ледяная матрица, которая представляет собой более мелкокристаллический соленый лед, состоящий из примесных кристаллов и содержащий жидкую фазу. Эти явления, зависящие от химического состава растворенных солей, количественного их содержания, минералогического состава зерен, определяющего адсорбционную активность, а также дисперсности, от которой зависит величина активной поверхности, в конечном счете находят отражение в изменении показателей прочности и параметров упругости рассматриваемых пород.

В самых общих чертах при формировании ПККС мерзлых грунтов с различной исходной концентрацией порового раствора (C_{ps}), могут наблюдаться два, существенно отличающихся друг от друга случая. В первом из них (при малых концентрациях) преобладающее влияние оказывает минеральная матрица. Этот вариант может рассматриваться, как характерный для незасоленных грунтов. Во втором случае, значительно большее содержание жидкой фазы, определяемое ионным составом и концентрацией солей, а также соленый поровый лед существенным образом изменяют все свойства грунта, в том числе и характер его реакции на прилагаемые механические нагрузки. Такие грунты следует считать засоленными.

Вполне естественно, что существует некоторая критическая концентрация ($C_{кр}$), разграничивающая эти два случая. В определенной степени это отражено в СНиП 2.02.04-88. Критическая концентрация порового раствора, делящая грунты по их свойствам и кинетике промерзания на засоленные и пресные, не является константой. В первую очередь она зависит от литологического состава. Если в песках даже незначительное увеличение C_{ps} приводит к заметному изменению их свойств, то в глинах ионно-обменные процессы на границе минеральных зерен и раствора существенно нивелируют влияние повышения его концентрации. Анализ результатов измерения диэлектрической проницаемости песков и данных о прочности мерзлых грунтов различного литологического состава, засоленных хлористым натрием, позволил оценить значения критической концентрации для этой соли в дисперсных грунтах и установить монотонный её рост при увеличении их глинистости [Фролов, 1993] (рис.1).

Сложности, связанные с проведением массовых механических испытаний мерзлых грунтов, и относительная простота акустических экспериментов по определению динамических модулей упругости позволяют отдать предпочтение последним при установлении специфических особенностей формирования ПККС грунтов

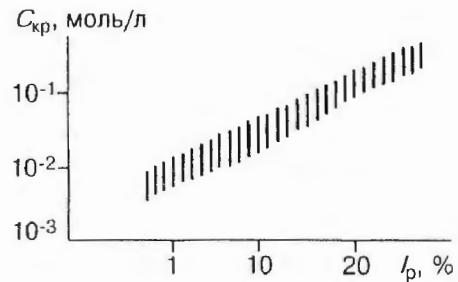


Рис. 1. Критическая исходная концентрация порового раствора NaCl для песчано-глинистых грунтов.

I_p — число пластичности.

различного литологического состава, температуры, ионного состава поровых растворов и их концентрации.

Ниже приводятся некоторые данные, полученные при специально спланированных экспериментах, выполнявшихся на искусственно приготовленных мерзлых грунтах с массивной криогенной текстурой и с заранее заданными параметрами состава (число пластичности, влажность, состав солей, концентрация) в диапазоне температур от -20 до 0°C . С помощью ультразвукового просвечивания или профилирования по известной методике [Зыков и др., 1989; Фролов, 1976] измерялись скорости продольных, поперечных и Релеевских волн, значения которых вместе с данными о плотности образцов использовались для расчета динамических модулей: Юнга E_d , сдвига G , всестороннего сжатия K и коэффициента Пуассона ν .

Выполненные эксперименты показали, что увеличение исходной концентрации поровых растворов во всех грунтах однозначно вызывает снижение скоростей упругих волн и значений модуля Юнга (рис. 2). Тем не менее имеют место существенные отличия в конкретном проявлении этой закономерности, которая вполне объяснима с упомянутых выше позиций. Во-первых, отмечаемый спад E_d начинается с разных значений, соответствующих слабозасоленным грунтам. Так, для песков при $t = -5^\circ\text{C}$ оно составляет ~ 15 ГПа, а для глин ~ 10 ГПа. Интенсивность спада в песках значительно большая. При изменении C_{ps} с 0,3 до 20 г/л E_d в песках уменьшается почти в 4 раза, тогда как в глинах только в 1,5 раза. Переход к малым интенсивностям этого уменьшения в песках наступают раньше (при ~ 30 г/л), чем в глинах ($C_{ps} > 60-80$ г/л).

В результате кривые $E_d(C_{ps})$ для разных по литологическому составу грунтов пересекаются в окрестностях концентрации $\sim 10-15$ г/л.

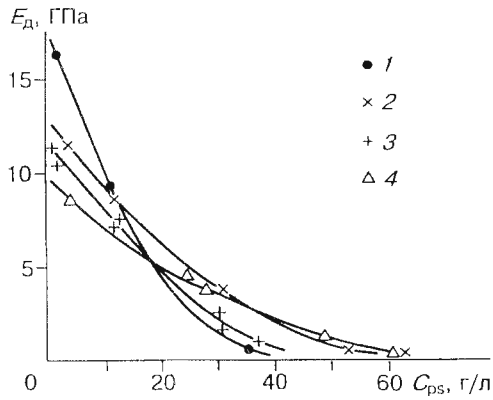


Рис. 2. Зависимость модуля Юнга от концентрации порового раствора для мерзлых грунтов разного состава при полном заполнении пор.

1 — песок пылеватый; 2 — супесь, $I_p = 3,2\%$; 3 — суглинок, $I_p = 11,2\%$; 4 — глина, $I_p = 17,8\%$; $t = -5^\circ\text{C}$.

Другими словами для конкретных температур и химического состава солей существует такое значение их концентрации, при которой грунты любого литологического состава будут характеризоваться практически одним и тем же значением модуля Юнга. Зависимости модуля Юнга от числа пластичности мерзлых засоленных грунтов имеет разный характер при различных степенях концентрации порового раствора. При малых значениях C_{ps} эта зависимость выражается ниспадающими кривыми. При повышении концентрации она выполаживается и при $C_{ps} \sim 10-15$ г/л становится практически горизонтальной. Дальнейшее повышение концентрации солей приводит к увеличению модуля Юнга при возрастании числа пластичности грунтов.

Существование критической концентрации наиболее ярко проявляется при рассмотрении результатов определения коэффициента Пуассона. В мерзлых песках при $C_{ps} > 0,3-0,5$ г/л наблюдается резкое возрастание ν с 0,2 до 0,33—0,35. Дальнейшее увеличение концентрации вызывает медленный рост ν до 0,37—0,39, приблизительно соответствующих значениям в талых песках. Характерные участки на аналогичных зависимостях для глин — иные. Возрастание ν начинается только с $C_{ps} > 10$ г/л. При больших концентрациях ν также достигает значений, соответствующих талым глинам (0,44—0,45). Величину C_{ps} , при которой начинается быстрый рост коэффициента Пуассона в обоих случаях следует рассматривать как критическое значение. В интервале от 0,5 до 10 г/л значение ν изменяется слабо. Для песка и глины оно близко ($\sim 0,35$), хотя первые в этом диапазоне C_{ps} являются засоленными, а вторые — практически пресными.

В связи с тем, что, как при квазистатических (механические испытания), так и при динамических (акустика) воздействиях в формировании соответствующих свойств лежат одни и те же причины физико-химического характера, есть все основания предположить наличие достаточно тесных связей между ними [Зыков и др., 1995]. Действительно, увеличение исходной концентрации порового раствора в обоих случаях приводит к ярко выраженному снижению и упругости, и прочности.

По техническим причинам, а именно относительной простоте выполнения измерений, в качестве сопоставляемых параметров нами были взяты скорости распространения продольных волн и величины эквивалентного сцепления (рис. 3). Последние определялись при испытаниях шаровым штампом по известной методике.

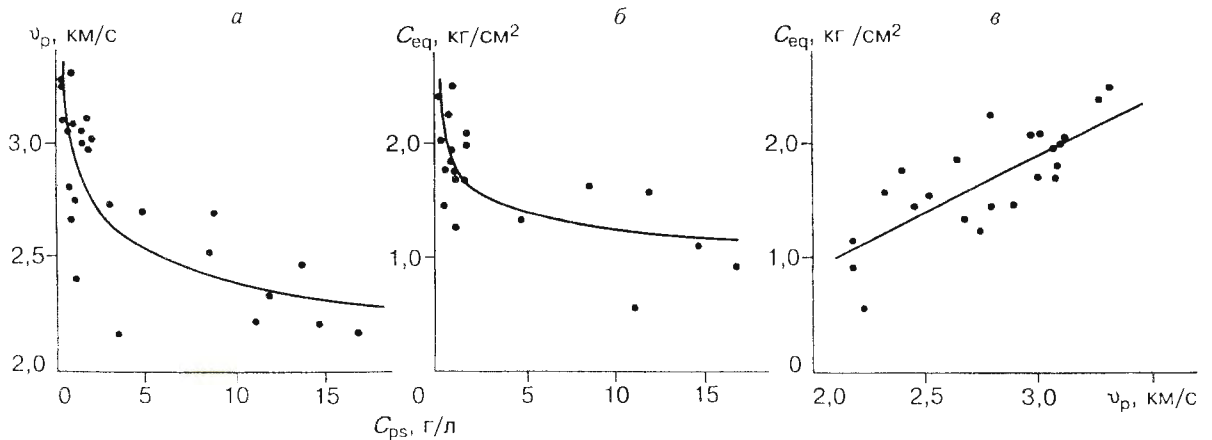


Рис. 3. Зависимости эквивалентного сцепления C_{eq} (а) и скорости продольных волн v_p (б) от концентрации порового раствора; в — корреляционная связь между v_p и C_{eq} . Супесь, $t = -3^\circ\text{C}$.

В результате было установлено, что при увеличении C_{ps} , например, в супесях от $\sim 0,3$ до 18 г/л скорости продольных волн при $t = -3^\circ\text{C}$ уменьшаются с 3300 до 2200 м/с, а C_{eq} от 240 до 100 кПа. Зависимости v_p и C_{eq} от C_{ps} при этом описываются сходными эмпирическими уравнениями, имеющими вид $y = e^a \cdot C_{ps}^b$ с небольшими различиями коэффициентов a и b для грунтов разного минерального состава. Поэтому оказалось возможным установить прямую корреляционную связь между v_p и C_{eq} (см. рис. 3, в): $C_{eq} = 0,10 \cdot v_p - 108,3$; $r = 0,78$ (v_p в м/с; C_{eq} в кПа). Оказалось, что, если на плоскость $v_p - C_{eq}$ разместить данные для всех испытанных грунтов (от песков до глин) при фиксированной температуре, экспериментальные точки образуют достаточно плотное облако, которое осредняется одной зависимостью, описываемой при $t = -3^\circ\text{C}$ следующим уравнением регрессии: $C_{eq} = 1,8 \cdot 10^{-5} \cdot v_p^{1,75}$; $r = 0,81$ (v_p в м/с; C_{eq} в МПа). На основании достаточно высокого значения коэффициента корреляции и широкого диапазона изменения параметров состава исследованных грунтов можно говорить об определенной универсальности полученного выражения и возможности определения C_{eq} мерзлых засоленных грунтов по данным акустических измерений.

Для оценки влияния состава солей в поровом растворе эксперименты проводились на образцах одного и того же суглинка, насыщавшихся растворами ($C_{ps} = 30$ г/л) хлоридов (морской тип засоления), карбонатов и сульфатов (континентальный тип). Катионами служили натрий и магний. Кроме того, для насыщения использовалась морская вода [Зыков и др., 1990].

Полученные температурные зависимости во всех случаях аналогичны хорошо известным для пресных грунтов [Зыков и др., 1989; Фролов, 1976]. Понижение температуры вызывает увеличение скоростей упругих волн. Начало замерзания проявляется достаточно резким скачком скоростей, приуроченным к соответствующей температуре (t_{bf}), связанной с составом солей и их концентрацией хорошо известной функциональной зависимостью [Некрасов, 1973]. По этому параметру (температура начала замерзания) все полученные зависимости могут быть разделены на две группы: 1 — хлориды, 2 — карбонаты с сульфатами. Для хлоридов t_{bf} существенно ниже. Второй отличительной чертой является разница в абсолютных значениях v_p . Во всем температурном интервале измерений карбонатно-сульфатная группа характеризуется более высокими значениями, приближающимися к известным для пресных грунтов. Все это объяснимо с точки зрения кинетики фазовых переходов и формирования твердой матрицы ПККС. При

сульфатном и гидрокарбонатном засолении (температура эвтектики соответственно $-1,2$ и $-2,1^\circ\text{C}$) в интервале до -5°C происходит практически полное выпадение кристаллогидратов, поровый раствор опресняется, и значения скоростей распространения упругих волн становятся близкими к соответствующим для пресных грунтов. При хлоридном засолении температура эвтектики в опытах не достигалась. Фазовые переходы здесь протекают медленнее на первом этапе (до -5°C) и быстрее при более низких температурах, чем во второй группе. Все это хорошо иллюстрирует схематически изображенная зависимость dv_p/dt от t , представленная на рис. 4.

Насыщение растворами смеси солей первой и второй групп в различных пропорциях показывает, что скорости распространения упругих волн при температуре грунтов ниже -5°C увеличиваются линейно от значений, отвечающих хлоридному типу засоления до значений при сульфатном и гидрокарбонатном составе растворов. Вполне естественно, что интенсивность роста при более низких температурах ниже. В области более высоких температур линейный характер роста нарушается, кривые v_p от соотношения солей выполаживаются, скорости упругих волн, а, соответственно, и другие механические свойства пород слабо зависят от состава насыщающих растворов, в особенности вблизи t_{bf} .

Результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод о том, что засоленные мерзлые грунты представляют собой специфические среды, существенно отличающиеся от пресных характером деформируемости, определяемой особенностями формирования и эволюцией их пространственной кристаллизационно-коагуляционной структуры, которые могут быть изучены комплексом различных физических методов. Одна из главных ролей в нем должна быть

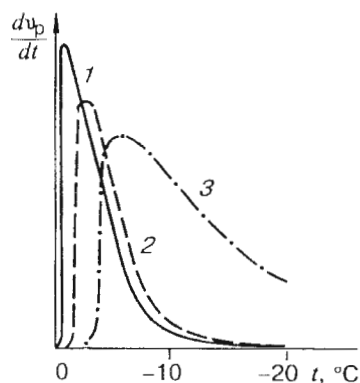


Рис. 4. Изменение градиента dv_p/dt при понижении температуры суглинка.

Суглинок: 1 — пресный; 2 — засоленный сульфатами и карбонатами; 3 — засоленный хлоридами.

отведена акустическим исследованиям, по результатам которых может быть оценена прочность засоленных мерзлых грунтов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 97-05-64961.

Литература

Зыков Ю.Д., Червинская О.П. Акустические свойства льдистых грунтов и льда. М., Наука, 1989.

Зыков Ю.Д., Красовский А.Г., Мозганова Е.Я., Червинская О.П. Электрические и акустические свойства засоленных мерзлых грунтов // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений / Ред. С.С. Вялов. М.; Наука, 1990, с. 128—135.

Зыков Ю.Д., Червинская О.П. Оценка деформационных и прочностных свойств мерзлых грунтов акустическим методом // Геофизические исследования криолитозоны. Науч. тр., вып. 1 / Ред. А.Д. Фролов. М., 1995, с. 12—22.

Некрасов Б.В. Основы общей химии. М., Химия, 1973, т.1, 656 с.

Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства криогенных пород. М., Недра, 1976.

Фролов А.Д. и др. Специфика фазовых превращений в криогенных засоленных песках // Мат-лы объединенного русско-американского семинара по криологии и глобальным изменениям. Пушино, 1993, с. 262—271.

*Поступила в редакцию
17 июня 1997 г.*