Доклады Академии наук СССР
1955. Том 104, № 6

ГЕОФИЗИКА

С. С. ВЯЛОВ

ПОЛЗУЧЕСТЬ И ДЛИТЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

(Представлено академиком В. А. Обручевым 27 VI 1955)

Исследованиями последних лет (Н. А. Цытович, В. Г Березанцев, М. Н. Гольдштейн, Н. И. Салтыков и др.) установлено, что напряженно-деформированное состояние мерзлого грунта зависит от фактора времени; детальное изучение автором этого вопроса показало, что мерзлый грунт следует рассматривать как сжимаемое упруго-пластично-вязкое тело.

Известно ([6], [8]),что прочность мерзлых грунтов обусловливается силами сцепления между слагающими грунт компонентами: минеральными частицами, льдом и незамерзшей водой. Опыты показывают, что сцепление мерзлого грунта нарушенной структуры меньше, чем грунта естественного сложения; что с повышением температуры сцепление уменьшается и резко падает при оттаивании мерзлого грунта. Однако это падение происходит не до нуля — в оттаявшем состоянии грунты обладают определенной прочностью, возрастающей при их уплотнении. Эти факты хорошо согласуются с новыми представлениями ([1]) о природе связности грунтов, согласно которым сцепление условно подразделяется на: 1) первичное или собственно молекулярное сцепление, обусловленное силами молекулярного притяжения между твердыми частицами, разделенными пленкой связанной воды; эта часть сцепления зависит от состояния плотности грунта; 2) вторичное или структурное сцепление, являющееся следствием воздействия многообразных процессов, происходящих в горных породах при их геологическом формировании; эта часть сцепления изменяется при нарушении естественного сложения грунта. Для мерзлых грунтов структурное сцепление будет отображать также и те изменения в сложении, которые вызваны промерзанием горной породы. В отличие от работы ([1]), мы выделим как самостоятельную часть сцепление мерзлого грунта, обусловленное собственно цементирующей связью между кристаллами льда и минеральными частицами; назовем эту часть сцеплением цементации (льдом). Такое выделение необходимо потому, что цементирующая связь льдом играет, как показано Н. А. Цытовичем ([6]), наиболее важную роль в прочности мерзлых грунтов. Кроме того эта часть сцепления является наименее стабильной, так как она зависит от температуры мерзлого грунта, изменяясь в соответствии с суточными и сезонными колебаниями последней и полностью исчезая в случае его оттаивания.

Нагрузка, приложенная к мерзлому грунту, вызывает концентрацию напряжений в контактах между минеральными частицами и кристаллами льда ([6]), что приводит к нарушению равновесного состояния между пленочной водой и контактирующим с ней льдом и к его оттаиванию. В то же время создается разность поверхностных натяжений в зоне воздействия нагрузок и вне ее. Под влиянием возникшего градиента влага, пополняясь в результате перехода льда в пленочную воду, перемещается в менее напряженную область, где и замерзает вновь (но частично отжимается и на свободную поверхность). Кроме того происходит отжатие воздуха,

содержащегося в мерзлом грунте. Указанные явления были установлены нами при опытах по вдавливанию штампов при уплотнении с последующим срезом и хорошо согласуются с сформулированным Н. А. Цытовичем ([7]) принципом равновесного состояния твердой и жидкой фаз воды в мерзлом грунте.

Процесс плавления льда и отжатия воды сопровождается нарушением структурных связей мерзлого грунта и перекомпановкой его частиц, в результате чего возникают необратимые деформации, протекающие во времени, т. е. явление ползучести. Отметим, что эти деформации могут появляться только при таком давлении, которое превышает силы внутреннего взаимодействия, обусловливающие равновесное состояние.

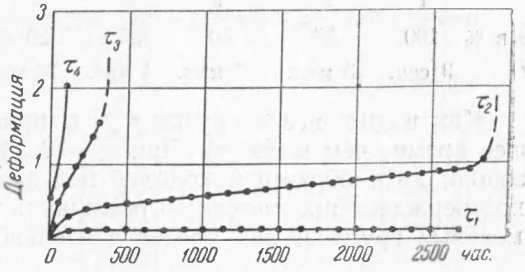


Рис. 1. Кривые ползучести мерзлого грунта при различных напряжениях: $\tau_1 < \tau_{дл}$ — затухающая ползучесть; $\tau_{дл} < \tau_2 < \tau_3 < \tau_4$ — незатухающая ползучесть

Структурные деформации приводят к более плотной упаковке частиц, т. е. к уплотнению мерзлого грунта, что в свою очередь вызывает увеличение сил молекулярного притяжения. Таким образом, под воздействием нагрузки имеет место, с одной стороны, расслабление структурного и цементационного сцепления, а с другой стороны, повышение молекулярного сцепления; т. е. упрочнения ([1]). Если нагрузка не превышает предела длительной прочности $\tau_{дл}$, то расслабление компенсируется упрочением, и деформация практически затухает. Этот процесс можно рассматривать как затухающую ползучесть (последействие ([2])), сопровождающуюся изменением объема — уплотнением. Если же нагрузка превышает указанный предел, то нарушение внутренних связей не компенсируется упрочнением, и возникает незатухающая деформация ползучести (пластическое течение ([2])).

На рис. 1 приводятся кривые развития деформаций во времени $\gamma = f(t)$, построенные по данным одного из опытов — испытания на сдвиг вдоль боковой поверхности деревянных стержней, вмороженных в грунт. Испытания проводились под постоянными, но различными для каждого образца нагрузками.

В отличие от деформации последействия упруго-вязких тел, затухающие деформации (при $\tau < \tau_{дл}$) мерзлых грунтов после разгрузки восстанавливаются неполностью. Характерно, что начальные (условно-мгновенные) деформации мерзлых грунтов весьма невелики. При $\tau > \tau_{дл}$ возникает незатухающая деформация ползучести, причем кривые $\gamma = f(t)$ имеют явно выраженные прямолинейные участки, соответствующие стадии пластично-вязкого течения с постоянной скоростью деформирования. Однако с течением времени эта стадия неизбежно переходит в стадию прогрессирующего течения (загиб кривых), заканчивающуюся разрушением. Разрушение наступает тем скорее, чем выше нагрузка. Зависимость между величиной разрушающего усилия и временем его воздействия (временем до разрушения) представлена кривой рис. 2. Начальная ордината кривой соответствует, как известно ([8]), условно-мгновенной прочности $\tau_{мгн}$, а ордината асимптоты — пределу длительной прочности $\tau_{дл}$. Таким образом,

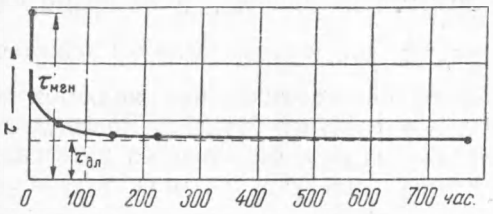


Рис. 2. Кривая длительной прочности смерзания

нагрузка, не превышающая $\tau_{дл}$, пластично-вязкого течения не вызывает и к разрушению не приводит независимо от продолжительности воздействия. Характерно, что хотя процесс расслабления продолжается достаточно долго (месяцы и даже годы), основное снижение сопротивления происходит в начальный, сравнительно небольшой период времени (рис. 2).

Аналогичная закономерность наблюдается и при испытании мерзлых грунтов на разрыв, срез и пр. Ниже приводятся данные одного из опытов, иллюстрирующие зависимость между величиной разрывающей нагрузки σ и временем до разрушения t.

	1	2	3	4	5	6	7	8
σ в %	100	50	30	25	20	13	10	8,5
t	9 сек.	3 мин.	27 мин.	4 час.	24 час.	140 час.	766 час.	не разорвалась

Как видно, все нагрузки $\sigma > \sigma_8$ привели к разрушению (за тем меньшее время, чем выше σ). При $\sigma_8 = 8{,}5\%$ σ_1 ($\sigma_1 \approx \sigma_{мгн}$) разрыва не произошло, хотя образец находился под данной нагрузкой свыше 3 лет. Это подтверждает практическую реальность такой прочностной характеристики мерзлых грунтов, как предел длительной прочности.

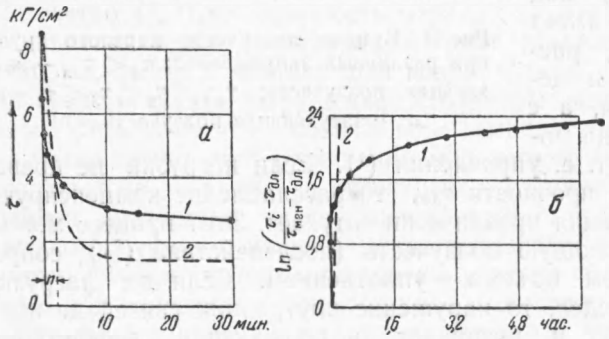


Рис. 3. Кривые релаксации сил сцепления: *1* — экспериментальная; *2* — по формуле Максвелла — Шведова

Реологические процессы в мерзлых грунтах, как это было отмечено еще ([8]) и как это доказано нашими специальными исследованиями, не подчиняются закономерностям, выведенным для идеально упруго-вязких тел ([3]), в частности, уравнению релаксации Максвелла — Шведова и уравнению последействия. Такое несоответствие объясняется переменностью времени релаксации n, обусловленной изменением вязких свойств мерзлых грунтов в процессе деформирования (вследствие изменения соотношения между льдом и незамерзшей водой, увеличения связности последней, перекомпановкой частиц и пр.). Переменность параметров n наглядно подтверждается тем, что экспериментальные точки, отложенные в полулогарифмическом масштабе, ложатся на кривую, в то время как согласно выражению $\ln \frac{\tau_{мгн} - \tau_{дл}}{\tau_i - \tau_{дл}} = \frac{1}{n} t_i$ они должны были бы ложиться на прямую (см. рис. 3). Другой причиной несоответствия является нелинейность зависимости между τ и γ для мерзлых грунтов. Более достоверно процесс деформирования мерзлых грунтов описывается интегральным уравнением теории наследственной ползучести типа $\varphi(\gamma) = \tau + \int_0^t k(t-\nu)\tau(\nu)\,d\nu$, полученным Ю. Н. Работновым ([4]) в предположении подобия кривых $\gamma = f(\tau, t)$, или приближенным уравнением ([5])

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{мгн}} + \int_0^t k'(t-\nu) f[\tau(\nu)]\,d\nu,$$

учитывающим, что нелинейная зависимость между γ и τ существует при любом времени воздействия нагрузки за исключением мгновенного ее

приложения, когда эта зависимость может быть принята линейной $\gamma_{мгн} = \tau / G_{мгн}$ (что для мерзлых грунтов подтверждается опытами).

Ядро этих уравнений (коэффициент ползучести) для мерзлых грунтов с некоторым приближением может быть принято равным ([3])

$$k'(z) = \frac{Ae^{-\beta z}}{z^{1-\alpha}},$$

где A, β, α — константы.

Применительно к вдавливанию в мерзлый грунт сферического штампа значение этих параметров для испытуемого грунта оказалось равным: $\alpha = 0{,}3$; $\beta = 0{,}2$ час$^{-1}$; $A = 0{,}09 \frac{1}{\sigma_0 D}$ (где σ_0 — начальное напряжение, а D — диаметр сферы).

Таблица 1

		t, час									
		0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
vD мм/час	теор.	0,223	0,132	0,073	0,049	0,037	0,023	0,015	0,010	0,008	0,006
	экспер.	0,250	0,140	0,075	0,050	0,035	0,022	0,015	0,013	0,011	0,008

Справедливость приведенной выше закономерности подтверждается удовлетворительным совпадением вычисленной аналитически и экспериментальной скоростей деформирования $v = \frac{d(s/D)}{dt}$, где s — осадка штампа (см. табл. 1).

Институт мерзлотоведения им. В. А. Обручева
Академии наук СССР

Поступило
15 XII 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] Н. Я. Денисов, О природе деформаций глинистых грунтов, 1951. [2] П. А. Ребиндер, Тр. Инст. физ. хим. АН СССР, в. 1 (1950). [3] А. Р. Ржаницын, Некоторые вопросы механики систем, деформирующихся во времени, 1949. [4] Ю. Н. Работнов, Изв. АН СССР, ОТН, № 6 (1948). [5] М. М. Розовский, ЖТФ, **21**, в. 11 (1951). [6] Н. А. Цытович, М. И. Сумгин, Основания механики мерзлых грунтов. Изд. АН СССР, 1937. [7] Н. А. Цытович, Изв. АН СССР, сер. геогр., № 5, (1945). [8] Н. А. Цытович, В. Г. Березанцев, Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов, Изд. АН СССР, № 1 (1953); № 2 (1954).