Доклады Академии наук СССР
1955. Том 104, № 4

МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ

С. С. ВЯЛОВ и член-корреспондент АН СССР Н. А. ЦЫТОВИЧ

СЦЕПЛЕНИЕ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Прочность мерзлых грунтов определяется прочностью внутренних связей в системе: минеральные частицы, лед, незамерзшая вода. Эти связи обычно называют сцеплением (3). В отличие от сцепления идеального упруго-пластического тела, сцепление мерзлого грунта (1) не является постоянной величиной, а зависит от фактора времени, расслабляясь при длительном воздействии нагрузки в результате плавления льда под повышенным давлением в контактах минеральные частицы — лед и перемещения влаги в менее напряженные зоны (5).

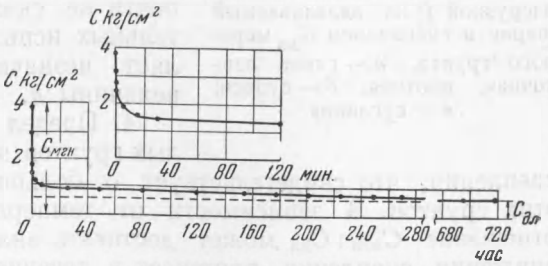


Рис. 1. Кривая релаксации сил сцепления мерзлого грунта. *A* — начальный участок кривой

Для определения сцепления мерзлых грунтов Н. А. Цытовичем (4) предложен метод шариковой пробы, аналогичный известной пробе Брюнелля и заключающийся во вдавливании в образец грунта стального шарика диаметром D под постоянной нагрузкой P (кг) и в измерении величины остаточной деформации, т. е. глубины погружения (осадки) шарика h.

Б. Ю. Ишлинский (2) показал, что для упруго-пластичного неупрочняющегося тела, подчиняющегося условию пластичности Сен-Венана ($\tau = C = \text{const}$), отношение числа твердости к пределу текучести есть величина постоянная, равная 0,34 ÷ 0,36. Отсюда сцепление может быть определено по выражению

$$C \approx 0{,}18 \frac{P}{\pi D h}$$

Благодаря вязким свойствам мерзлого грунта погружение шарика происходит не мгновенно, а во времени, и соответственно изменяется во времени сцепление — от наибольшего, мгновенного значения $C_{мгн}$, отвечающего $h_{мгн}$, до наименьшего — предела длительного сцепления $C_{дл}$, отвечающего стабилизованной деформации $h_{дл}$

$$C_{(t)} \approx 0{,}18 \frac{P}{\pi D h_{(t)}}. \qquad (1)$$

Следовательно, измеряя на приборе величину погружения шарика в различные моменты времени, можно, пользуясь формулой (1), построить кривую релаксации сил сцепления при данной температуре θ (рис. 1) и определить наиболее важную характеристику $C_{дл}$ (4). Отметим, что этот метод в чистом виде применим для мерзлых (а также талых) грунтов, обладающих относительно небольшим, по сравнению с сцеплением, внутренним трением.

Результаты исследований показали следующее.

1. При определении $C_{мгн}$ получается сравнительно большой разброс точек, но с течением времени вследствие релаксации льда этот разброс уменьшается. Испытание шариками различного диаметра (15 и 60 мм)* показало, что значение $C_{дл}$ инвариантно; это также подтверждается сопоставлениями результатов испытаний мерзлого грунта на сдвиг (на односрезном приборе).

2. Зависимость между h и P не вполне подчиняется линейному уравнению (1); соответственно, с увеличением P несколько увеличивается C. Однако в силу большой плотности мерзлых грунтов эффект упрочнения сравнительно невелик (рис. 2), и для практических целей можно приближенно принимать $C = \text{const}$ (при $\theta = \text{const}$).

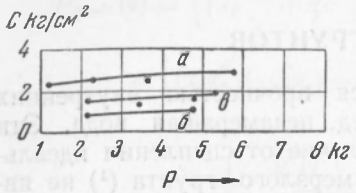


Рис. 2. Зависимость между нагрузкой P на вдавливаемый шарик и сцеплением $C_{дл}$ мерзлого грунта. *а* — глина ленточная, плотная; *б* — супесь; *в* — суглинок

3. Осадка шарика включает в себя, кроме остаточной, также и упругую часть деформации $h_у$, которая проявляется в течение всего процесса деформирования, что, однако, почти не сказывается на результатах длительных испытаний, при которых $h_у$ составляет незначительную часть от суммарной величины h.

4. Предел длительного сцепления мерзлых грунтов значительно ниже мгновенного сцепления, что свидетельствует о больших релаксационных свойствах этих грунтов. В зависимости от температуры и типа мерзлого грунта отношение $C_{мгн} : C_{дл}$ может достигать значительной величины. Процесс снижения сцепления протекает в течение довольно продолжительного времени — от 300 до 1000—2000 час. Однако наиболее интенсивно сцепление релаксирует в начальный, небольшой период времени (рис. 1).

Время релаксации при диапазоне $\theta°$ от —0,3 до —4° колеблется от 2 до 5 мин. (и до 40 мин. для особо плотных грунтов).

Отметим, что процесс релаксации мерзлых грунтов не вполне подчиняется закону Максвелла — Шведова $C = C_{дл} + (C_{мгн} - C_{дл})\, e^{-\frac{t}{\tau}}$, выведенному для идеального упруго-вязкого тела. Это несоответствие объясняется прежде всего изменяемостью вязких свойств мерзлого грунта в процессе деформирования, что обусловливает в свою очередь переменность времени релаксации τ.

Таблица 1

Зависимость C (в %) от влажности мерзлого грунта (грунт — суглинок ненарушенной структуры)

Естеств. влажность в % к сух. навеске	Влажность при границе текучести в %	C в %
28	27	100
34	34	88
43	38	61

5. Наиболее важным фактором, определяющим величину сцепления мерзлого грунта, является его температура, с понижением которой C возрастает, а релаксационные свойства уменьшаются.

Зависимость между C и θ хорошо описывается формулой

$$C_{дл} = A + B\sqrt{|\theta|}, \qquad (2)$$

где параметр A соответствует сцеплению при некоторой известной температуре, например при $\theta = 0°$.

6. Сцепление мерзлого грунта в определенной степени зависит также от типа грунта, его плотности и влажности.

---

* В качестве основного был принят $D = 15$ мм. Все испытания проводились при неизменных температурах.

При увеличении влажности до некоторого предела (соответствующего примерно полной влагоемкости ([4])) значение C возрастает. Увеличение же W за этим пределом приводит к снижению C.

Интересно отметить, что нарушение естественной структуры мерзлого грунта (например, путем его оттаивания, перемешивания и замораживания вновь) приводит к существенному снижению C, что свидетельствует о роли структурного сцепления. В заключение укажем, что сцепление мерзлого грунта значительно выше сцепления талого грунта, причем в тем большей степени, чем ниже температура первого.

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

Поступило
21 IV 1955

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] В. Г. Березанцев, Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов, 1, Изд. АН СССР, 1953. [2] Б. Ю. Ишлинский, Прикл. мат. и мех., 8, № 3 (1944). [3] Н. А Цытович, М. И. Сумгин, Основания механики мерзлых грунтов, Изд. АН СССР, 1937. [4] Н. А. Цытович, Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов, Изд. АН СССР, 1, 2, 1953 и 1954. [5] С. С. Вялов, ДАН, 104, № 6 (1955).