

СВОЙСТВА ЛЬДА И МЕРЗЛЫХ ПОРОД

УДК 551.345

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ  
ШАРИКОВЫМ ШТАМПОМ

Л.Т. Роман, П.И. Котов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; [ltr@inbox.ru](mailto:ltr@inbox.ru)

Предложена методика построения реологических кривых мерзлых грунтов по данным испытаний шариковым штампом, позволяющая получить динамическую вязкость по уравнению Стокса параллельно с определением прочностной характеристики – эквивалентного сцепления. Приведены результаты исследования зависимости динамической вязкости ряда мерзлых грунтов от температуры, гранулометрического состава и засоленности.

*Мерзлые грунты, реологическая кривая, шариковый штамп, вязкость*

DETERMINATION OF FROZEN GROUND VISCOSITY BY SPHERE PUNCH

L.T. Roman, P.I. Kotov

Lomonosov Moscow State University, Department of Geology,  
119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; [ltr@inbox.ru](mailto:ltr@inbox.ru)

A method for obtaining rheological curves of frozen ground by sphere punch has been suggested. This method gives a possibility for determining the dynamic viscosity of frozen ground by Stokes's equation together with determining strength characteristic – equivalent cohesion. The results of investigation into the dependence of dynamic viscosity of various frozen soils on temperature, granulometric composition, salinity have been presented.

*Frozen ground, rheological curve, sphere punch, viscosity*

ПРОБЛЕМА ИЗУЧЕННОСТИ ВЯЗКОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Проявление реологических свойств мерзлых грунтов, таких как ползучесть, релаксация напряжений, снижение прочности во времени, тесно связано с вязкостью.

Использование понятия вязкости в механике грунтов связано с тем, что реологическая модель неизменно включает так называемую модель Ньютона. Например, уравнение Бингама–Шведова, часто употребляемое в механике грунтов [Зарецкий, 1967], в случае одноосного напряженного состояния для определения скорости деформаций имеет вид

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\eta}(\sigma - \sigma_s) + \frac{1}{E}\dot{\sigma} \text{ при } |\sigma| > |\sigma_s|, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжение;  $\varepsilon$  – деформация;  $\dot{\sigma}$ ,  $\dot{\varepsilon}$  – производные от напряжений и деформаций по времени  $t$ ;  $E$  – модуль упругости;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости;  $\sigma_s$  – напряжение начала пластического течения ( $|\dot{\varepsilon}| > 0$ ).

Уравнение (1) выражает условие упруговязкопластической деформации. Это уравнение, вообще говоря, нелинейное. В частности, коэффициент вязкости  $\eta$  зависит от температуры, напряженно-деформированного состояния, времени, изменения структуры в процессе ползучести. Нелинейность обуславливает трудности экспериментального определения коэффициента вязкости и трактовки получаемых значений при различных методиках испытаний, приводит к большому разбросу опытных данных. Так, при обобщении опытных данных, полученных Н.Н. Масловым [1968], установлены следующие осредненные значения коэффициента динамической вязкости талой глины в зависимости от консистенции (в пуазах):

мягкопластичная –  $10^{10}$ – $10^{11}$  П;  
тугопластичная –  $10^{12}$ – $10^{13}$  П;  
полутвердая –  $10^{14}$ – $10^{15}$  П;  
твердая –  $10^{15}$ – $10^{17}$  П.

Таблица 1. Коэффициент динамической вязкости ( $\eta$ ) мерзлых грунтов

Вид грунта	$\theta, ^\circ\text{C}$	Вид одноосных испытаний	$\eta, \text{П} (10^{-1} \text{Па}\cdot\text{с})$		По данным авторов (обобщение в [Роман, 2002a])
			Бингамова вязкость	Шведова вязкость	
Суглинок, $W_{\text{tot}} = 0,29-0,33$	-3,0	Сжатие	–	$10,37 \cdot 10^{10}$	С.Е. Гречищев
		Растяжение	–	$5,8 \cdot 10^{10}$	
Суглинок, $W_{\text{tot}} = 0,29-0,39$	-10,0	Сжатие	$2,1 \cdot 10^{10}$	$8,3 \cdot 10^{11}$	Е.П. Шушерина
	-0,5		$3,3 \cdot 10^{10}$	$6,6 \cdot 10^{12}$	
	-2,0		$3,9 \cdot 10^{10}$	$6,6 \cdot 10^{12}$	
	-5,0		$5,0 \cdot 10^{11}$	$3,3 \cdot 10^{13}$	
Суглинок, $W_{\text{tot}} = 0,226$	-3,0	Сжатие	$1,1 \cdot 10^9$	$1,8 \cdot 10^{11}$	Ю.В. Кулешов

Примечание.  $W_{\text{tot}}$  – суммарная влажность, д. е.;  $\theta$  – температура,  $^\circ\text{C}$ .

Вязкость льда в зависимости от температуры, величины нагрузки и его структуры, по данным К.Ф. Войтковского [1960], изменяется от  $10^{10}$  до  $10^{15}$  П. Экспериментальные значения коэффициентов вязкости мерзлых грунтов при длительном деформировании по данным ряда авторов, обобщение которых приведено в работе [Роман, 2002a], представлены в табл. 1.

Тем не менее коэффициент вязкости в механике льда, талых и мерзлых грунтов широко используется для описания закономерностей ползучести и релаксации напряжений [Гречищев, 1972; Вялов, 1978, 2000; Зарецкий, 1986; Роман, 2002a, б].

Принципиально определить вязкость грунтов возможно при всех испытаниях, устанавливающих зависимость скорости ползучести во времени от напряжения. Однако техническая реализация определения вязкости – задача очень сложная. Согласно уравнению (1), ползучесть определяется разностью напряжений  $\sigma - \sigma_s$  ( $\sigma \geq \sigma_s$ ). При  $\sigma \leq \sigma_s$  деформации протекают с весьма малой скоростью.

Кривую зависимости скорости деформации от напряжения принято называть реологической. Вид этой кривой аналогичен таковому для твердых деформируемых тел [Вялов, 1978]. Реологическая кривая имеет характерный излом в точке  $\sigma = \sigma_s$ . В интервале  $\sigma_r < \sigma < \sigma_s$  скорость ползучести невелика, структура грунта меняется слабо, поэтому вязкость ( $\eta_{sh}$ ) можно считать постоянной:

$$\eta_{sh} = \frac{\sigma_s - \sigma}{\dot{\epsilon}_s - \dot{\epsilon}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_s$  – напряжение начала пластической деформации;  $\dot{\epsilon}_s$  – скорость деформации при  $\sigma_s$ .

Это так называемая шведова вязкость [Вялов, 1978], она является наибольшей. На кривых ползучести шведова вязкость соответствует участку установившейся ползучести.

При дальнейшем увеличении напряжения  $\sigma_s < \sigma < \sigma_f$  структура грунта сильно изменяется

( $\sigma_f$  – напряжение, при котором возникают микроразрушения грунта), скорость ползучести резко возрастает (рис. 1). Для течения ослабленной структуры также можно выделить линейный интервал изменения напряжений  $\sigma_t < \sigma < \sigma_f$  с постоянной вязкостью, называемой бингамовой ( $\eta_b$ ), значительно меньшей  $\eta_{sh}$ :

$$\eta_b = \frac{\sigma - \sigma_t}{\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_t}. \quad (3)$$

При  $\sigma > \sigma_f$  вязкость становится неопределенной, так как большие напряжения приводят к прогрессирующему разрушению, заканчивающемуся разрывом сплошности.

Таким образом, вязкость является важным показателем, характеризующим ползучесть грунтов, в том числе мерзлых. Учитывая отмеченные технические сложности ее определения, требуются дальнейшие исследования, направленные на разработку методических вопросов и установление закономерностей зависимости вязкости от определяющих факторов.

Анализ реологических кривых для грунтов, полученных при испытаниях на сжатие, показывает, что при определении вязкости необходима особая тщательность. Небольшое изменение условий

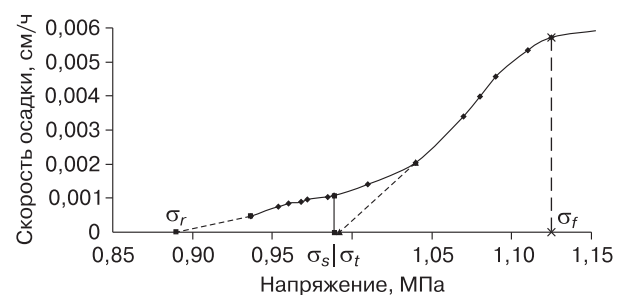


Рис. 1. Зависимость скорости осадки штампа  $\dot{S}$  от напряжения  $\sigma$  с выделением участка шведовой вязкости в диапазоне напряжений  $\sigma_r - \sigma_s$ .

Суглинок пылеватый, плотность  $\rho = 1,87 \text{ г/см}^3$ , суммарная влажность  $W_{\text{tot}} = 0,24$ , температура  $\theta = -2^\circ\text{C}$ .

опыта может привести к изменению коэффициента вязкости на порядки.

В качестве альтернативного метода получения реологических кривых существует метод вдавливания шарикового штампа.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ВДАВЛИВАНИЕМ ШАРИКОВОГО ШТАМПА

Рассматривается возможность определения коэффициента динамической вязкости мерзлых грунтов методом вдавливания шарикового штампа. В этом случае методическая сложность заключается в построении реологической кривой, возможности выделения участка шведовой вязкости. Процесс ползучести здесь идет не так, как в испытаниях на растяжение–сжатие. На первом этапе вдавливания шарикового штампа происходит разрушение структуры и интенсивное уплотнение. По мере увеличения отпечатка шарика напряжения уменьшаются, снижается скорость деформации, и только на этом участке реологической кривой ползучесть можно условно принять соответствующей представлениям о шведовой вязкости. Тем не менее, как будет показано ниже, определение динамической вязкости мерзлых грунтов вдавливанием шарикового штампа является допустимым и целесообразным.

Испытание мерзлых грунтов вдавливанием шарикового штампа, предложенное Н.А. Цытовичем [1954] и обоснованное на базе решения А.Ю. Ишлинского [1944] для определения эквивалентного сцепления [Вялов, Цытович, 1956], в настоящее время является общепризнанным [ГОСТ 12248-2010]. Метод широко используется для определения эквивалентного сцепления мерзлых грунтов, которое является исходной характеристикой для установления сопротивления нормальному давлению [СП 25.13330.2012]. Поэтому практический интерес представляет определение вязкости по данным тех же испытаний, регламентированных для эквивалентного сцепления.

Как показано в работах [Маслов, 1968; Караулова, 1973; Вялов, 1978; Зиангиров, 1984], вязкость грунтов может быть найдена путем погружения шарика на основе ее расчета по формуле Стокса, полученной для вязкой жидкости ( $\eta_{ст}$ ):

$$\eta_{ст} = \frac{(\rho_{ш} - \rho_{гр})d^2}{18\dot{S}}, \quad (4)$$

где  $\rho_{ш}$  – плотность шарика с учетом приложенного груза, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_{гр}$  – плотность грунта, г/см<sup>3</sup>;  $d$  – диаметр шарика, см;  $\dot{S}$  – постоянная скорость погружения шарика в грунт, см/с.

Следует учесть, что формула Стокса получена для ньютоновской жидкости с постоянным коэффициентом вязкости. Как указано выше, грунт, как в талом, так и в мерзлом состоянии, является

нелинейной вязкой средой и значения  $\eta$  зависят от величины нагрузки и времени ее действия.

С.С. Вяловым [1978] отмечено, что метод шарикового штампа для определения вязкости следует использовать только в диапазоне шведовой вязкости, найденной по реологической кривой от  $\sigma_r$  до  $\sigma_s$ . Выполненная нами обработка опытных данных показала, что реологические кривые для грунтов по результатам таких испытаний можно построить в координатах  $\dot{S}_t - \sigma_t$ . При этом напряжение  $\sigma_t$  определяется либо по площади отпечатка шарика в каждый момент времени  $t$  при постоянной нагрузке  $P$ :  $\sigma_t = P/(\pi d \dot{S}_t)$ , либо по величине эквивалентного сцепления  $C_{qt}$ :  $\sigma_t = C_{qt}/0,18$ . Пример реологической кривой, построенной указанным способом, приведен на рис. 1.

Как указано выше, реологические кривые грунтов, построенные по данным испытаний в условиях одноосного сжатия, компрессии, сдвига, отражают проявление шведовой вязкости на начальном этапе испытания, когда скорость ползучести обусловлена упругими и упруговязкими деформациями. При вдавливании шарикового штампа площадь его соприкосновения с поверхностью образца грунта в начальный момент времени минимальна и постепенно растет по мере увеличения осадки штампа. Соответственно напряжения, передаваемые на грунт, постепенно уменьшаются, скорость погружения шарика падает. Таким образом, сначала происходит разрушение структуры, как бы третья стадия ползучести – прогрессирующее течение, для которого уравнение (1) неприемлемо.

После того как скорость погружения шарика снижается вследствие уменьшения напряжений, на реологической кривой выделяется участок, сходный с проявлением шведовой вязкости (см. рис. 1).

Несмотря на отмеченные особенности, представляется практически важным определение вязкости на участке проявления шведовой вязкости. Этот участок на реологической кривой, построенной по данным испытания шариковым штампом, находится в диапазоне напряжений  $\sigma_r - \sigma_s$  (где  $\sigma_r$  – напряжение, при котором скорость осадки шарика равна нулю;  $\sigma_s$  – напряжение, при котором заканчивается проявление шведовой вязкости, см. рис. 1). Указанный участок, по данным испытаний вдавливанием шарикового штампа, соответствует установлению длительного эквивалентного сцепления, по которому прогнозируется длительная прочность мерзлых грунтов. Представляется целесообразным определить вязкость, отвечающую значению скорости осадки шарика при напряжении  $\sigma_s$ , так как в этом случае величина динамической вязкости будет наибольшей, а следовательно, соответствующей минимальному значению длительной прочности.

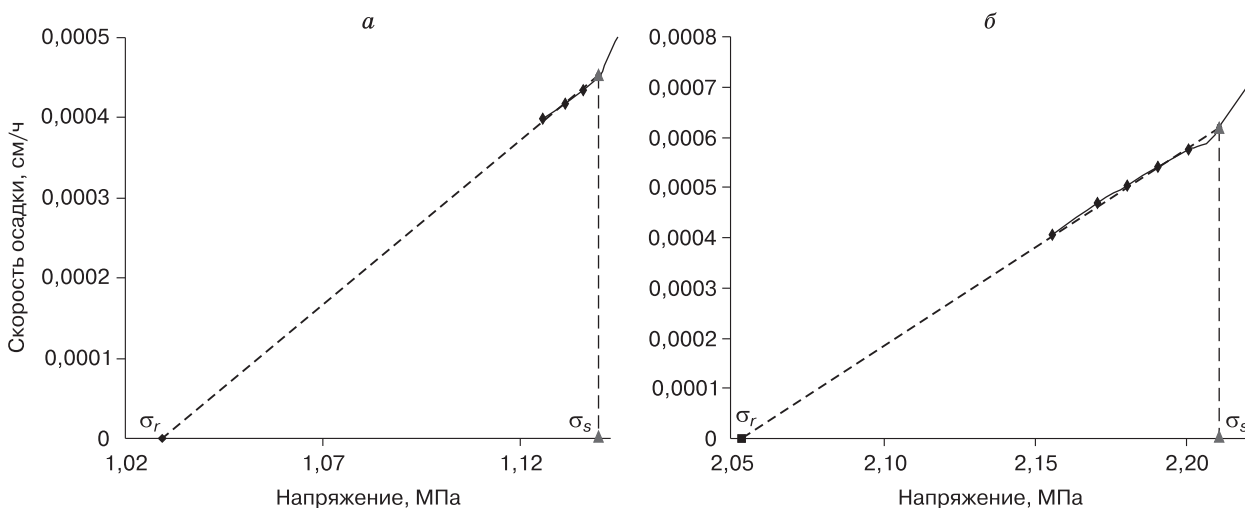
**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Полученные по экспериментальным данным вдавливания шарикового штампа реологические кривые (зависимости скорости осадки шарика  $\dot{S}$  от напряжения  $\sigma$ ) в пределах проявления шведовой вязкости для характерных видов мерзлых грунтов приведены на рис. 2–4.

Они позволяют установить влияние ряда основных факторов на ползучесть мерзлых грунтов. Диапазон реологической кривой, в пределах которого проявляется шведова вязкость, определяется по изменению величины напряжений от  $\sigma_r$  до  $\sigma_s$ . Этот участок соответствует теоретическому

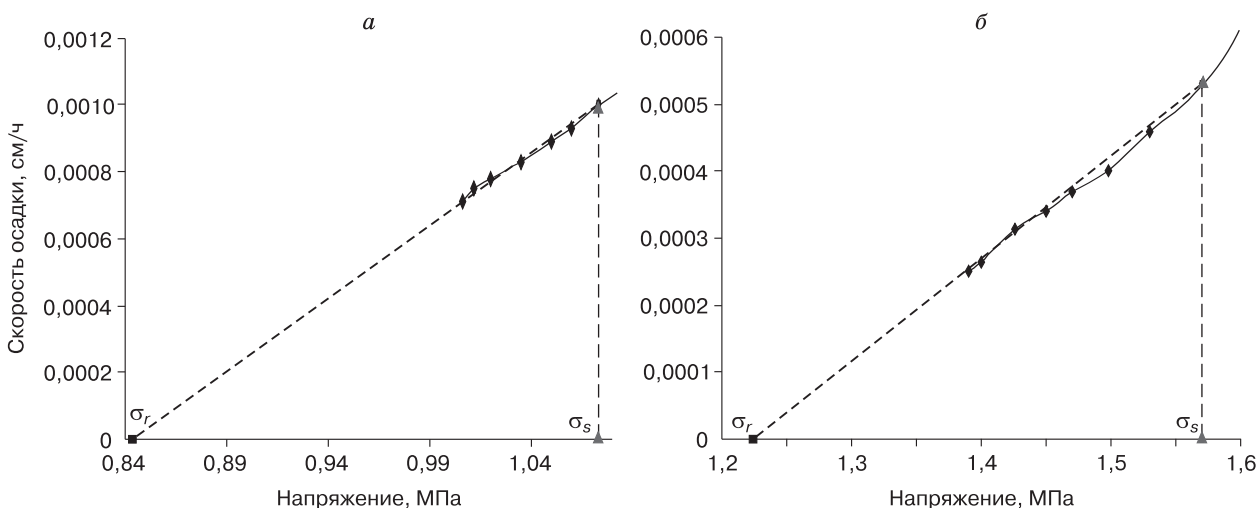
решению вычисления динамической вязкости по формуле (1) с учетом скорости осадки шарика  $\dot{S}$ . Однако, как можно видеть, скорость осадки шарика, хотя и является незначительной, возрастает от  $\sigma_r$  к  $\sigma_s$ . В связи с этим расчет динамической вязкости проведен при условии ее максимального значения на участке проявления шведовой вязкости.

Выполненные авторами экспериментальные определения реологических кривых вдавливанием шарикового штампа позволяют установить закономерности изменения вязкости от состава, свойств и температуры грунта.



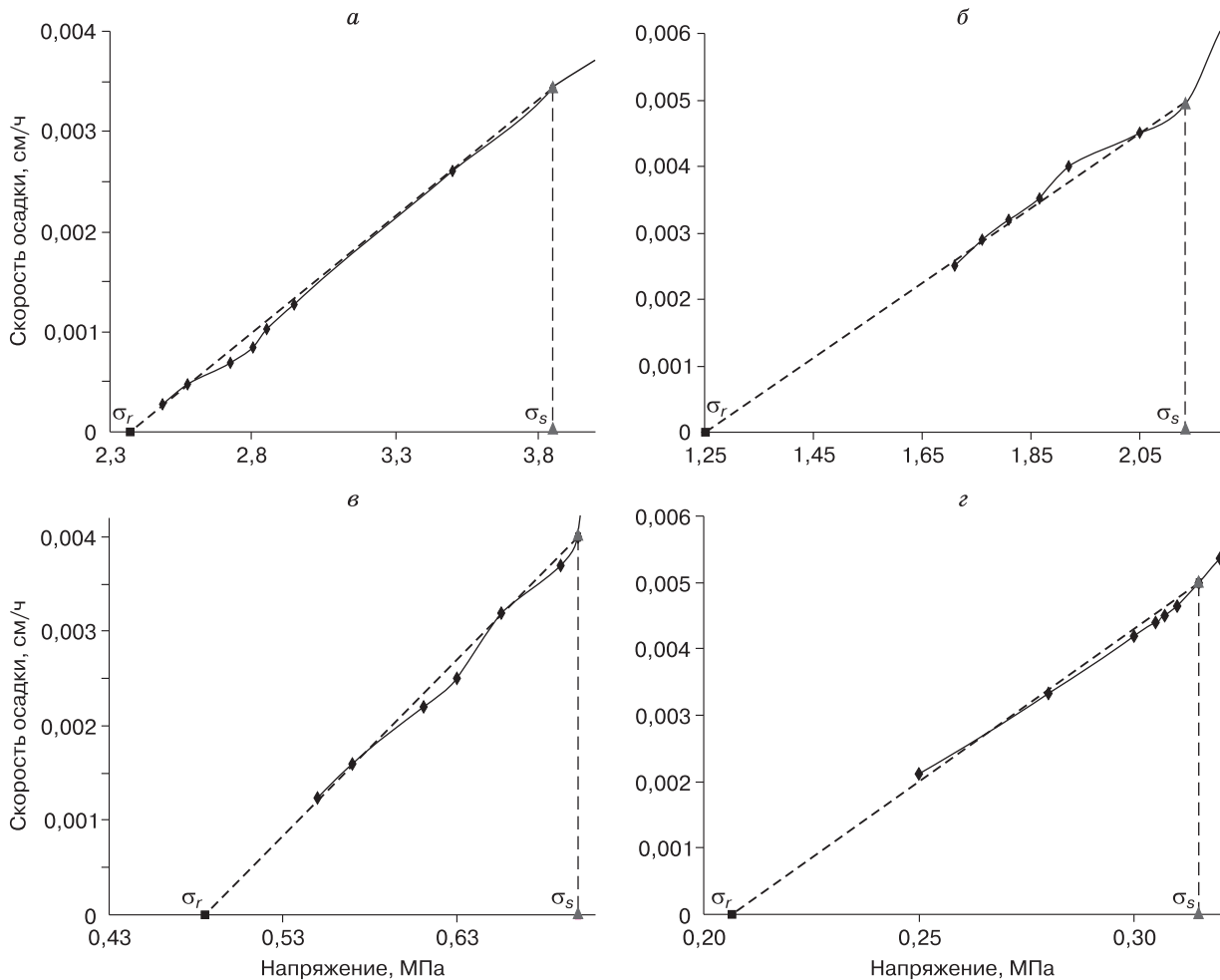
**Рис. 2. Зависимость скорости осадки  $\dot{S}$  шарикового штампа от напряжения в пределах шведовой вязкости ( $\sigma_r$ – $\sigma_s$ ) при  $\theta = -1^\circ\text{C}$ :**

*a* – суглинок,  $\rho = 2,23 \text{ г/см}^3$ ,  $W_{\text{tot}} = 0,17$ ; *б* – супесь,  $\rho = 2,15 \text{ г/см}^3$ ,  $W_{\text{tot}} = 0,11$ .



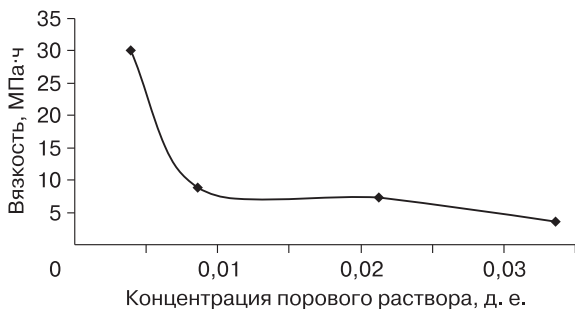
**Рис. 3. Зависимость скорости осадки шарикового штампа  $\dot{S}$  от напряжения в пределах шведовой вязкости ( $\sigma_r$ – $\sigma_s$ ) для мерзлой супеси:**

*a* –  $\theta = -1^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 2,01 \text{ г/см}^3$ ,  $W_{\text{tot}} = 0,21$ ; *б* –  $\theta = -2^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 1,83 \text{ г/см}^3$ ,  $W_{\text{tot}} = 0,24$ .



**Рис. 4.** Зависимость скорости осадки шарикового штампа  $\dot{S}$  от напряжения в пределах шведовой вязкости ( $\sigma_r - \sigma_s$ ) для засоленной супеси ( $\rho = 1,90 \text{ г/см}^3$ ,  $W_{\text{tot}} = 0,23$ ) при  $\theta = -4 \text{ }^\circ\text{C}$  и засоленности  $D_{\text{sal}}$ : а – 0,09 %; б – 0,2 %; в – 0,5 %; г – 0,8 %.

Реологические кривые, представленные на рис. 2, иллюстрируют влияние гранулометрического состава на проявление вязкости. Как видно,



**Рис. 5.** Зависимость вязкости от концентрации порового раствора супеси ( $\rho = 1,90 \text{ г/см}^3$ ,  $W_{\text{tot}} = 0,23$ ) при  $\theta = -4 \text{ }^\circ\text{C}$ .

величины  $\sigma_s$ , характеризующие вязкое деформирование при температуре  $-1 \text{ }^\circ\text{C}$ , для суглинка в 2 раза меньше, чем для супеси; физические свойства пород (кроме содержания незамерзшей воды) не должны оказывать существенного влияния.

На рис. 3 приведены реологические кривые супеси при температуре  $-1$  и  $-2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Понижение температуры всего на один градус увеличивает значения  $\sigma_s$  примерно в 1,5 раза.

Четко прослеживается закономерность снижения вязкости с увеличением засоленности (см. рис. 4). Проанализированы данные исследований Э.Г. Веретехиной [2002], выполненных при температуре  $-4 \text{ }^\circ\text{C}$  для образцов супеси, имеющих одинаковую плотность и влажность. Зависимость вязкости от концентрации порового раствора приведена на рис. 5. Как видно, с увеличением концентрации порового раствора вязкость закономерно уменьшается.

Таблица 2. Характерные показатели вязкости мерзлых грунтов

Грунт	Диапазон изменения вязкости $\eta_s$ , МПа·с	Время достижения вязкости $\eta_s$ ( $t$ , ч)
Суглинок ( $\rho = 1,94-2,15$ г/см <sup>3</sup> , $W_{tot} = 0,16-0,24$ , $\theta = -1$ °С)	2,41–6,94	8–24
Супесь ( $\rho = 1,95-2,15$ г/см <sup>3</sup> , $W_{tot} = 0,18-0,24$ , $\theta = -1$ °С)	5,64–9,20	8–24
Суглинок ( $\rho = 1,83-2,05$ г/см <sup>3</sup> , $W_{tot} = 0,18-0,26$ , $\theta = -2$ °С)	5,98–10,09	24–48
Супесь ( $\rho = 1,83-1,99$ г/см <sup>3</sup> , $W_{tot} = 0,18-0,24$ , $\theta = -2$ °С)	9,96–13,20	24–48
Супесь ( $\rho = 1,83-1,99$ г/см <sup>3</sup> , $W_{tot} = 0,18-0,24$ , $\theta = -4$ °С, $D_{sal} = 0,09-0,80$ )	3,62–30,0	48–96

Примечание.  $\rho$  – плотность, г/см<sup>3</sup>;  $W_{tot}$  – суммарная влажность, д. е.;  $\theta$  – температура, °С;  $D_{sal}$  – засоленность грунта, %.

Анализ выполненных испытаний ненарушенной структуры с различными физическими свойствами (для мерзлых суглинка и супеси) при двух-трехкратной повторности позволил установить диапазон изменения вязкости и времени от начала опытов до достижения напряжений  $\sigma_s$ , соответствующих концу периода шведовой вязкости (табл. 2). Этот период можно характеризовать как время начала погружения шарика с примерно постоянной скоростью и учитывать его значение при оценке длительного эквивалентного сцепления.

### ВЫВОДЫ

1. Предложена методика построения реологических кривых мерзлых грунтов по данным испытания шариковым штампом, позволяющая получить динамическую вязкость по уравнению Стокса параллельно с определением прочностной характеристики – эквивалентного сцепления.

2. Исследованиями по данной методике установлены закономерности изменения динамической вязкости мерзлых грунтов в зависимости от состава, температуры, физических свойств.

3. Полученные закономерности согласуются с современными представлениями о реологическом поведении мерзлых грунтов под нагрузками: понижение температуры увеличивает вязкость, увеличение концентрации порового раствора снижает вязкость. Суглинистые грунты обладают меньшей вязкостью по сравнению с песчаными при равных условиях.

### Литература

**Веретехина Э.Г.** Закономерности формирования свойств пластично-мерзлых грунтов в условиях повышения температуры и увеличения засоленности: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2002, 24 с.

**Войтковский К.Ф.** Механические свойства льда / К.Ф. Войтковский. М., Изд-во АН СССР, 1960, 99 с.

**Вялов С.С.** Реологические основы механики мерзлых грунтов / С.С. Вялов. М., Высш. шк., 1978, 447 с.

**Вялов С.С.** Реология мерзлых грунтов / С.С. Вялов. М., Стройиздат, 2000, 463 с.

**Вялов С.С., Цытович Н.А.** Оценка несущей способности связных грунтов по величине вдавливания сферического штампа // Докл. АН СССР, 1956, т. 111, № 6, с. 1193–1196.

**ГОСТ 12248-2010.** Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М., Изд-во стандартов, 2010, 109 с.

**Гречищев С.Е.** Разрушение мерзлых грунтов в условиях ползучести при переменных напряжениях // Тр. ВНИИ гидрогеологии и геологии, 1972, вып. 142, с. 4–19.

**Зарецкий Ю.К.** Теория консолидации грунтов / Ю.К. Зарецкий. М., Наука, 1967, 127 с.

**Зарецкий Ю.К.** Вязкопластичность льда и мерзлых грунтов / Ю.К. Зарецкий, Б.Д. Чумичев, А.Г. Щеболев. М., Наука, 1986, 182 с.

**Зиангиров Р.С.** Практикум по механике грунтов / Р.С. Зиангиров. М., Изд-во Моск. ун-та, 1984, с. 132–134.

**Ишлинский А.Ю.** Осесимметричная задача пластичности и проба Бриннеля / А.Ю. Ишлинский. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1944, т. 8, вып. 3, с. 201–224.

**Караулова З.М.** Коэффициент вязкости глинистых грунтов и его значение при прогнозе длительной деформации смещения подпорных сооружений // Тр. I Всесоюз. симпозиума по реологии грунтов. Ереван, Изд-во Ереван. ун-та, 1973, с. 213–221.

**Маслов Н.Н.** Длительная устойчивость и деформация смещения подпорных стенок / Н.Н. Маслов. М., Энергия, 1968, 467 с.

**Роман Л.Т.** Механика мерзлых грунтов / Л.Т. Роман. М., МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2002а, 426 с.

**Роман Л.Т.** Механика мерзлых грунтов на пороге XXI века (итоги, перспективы, пути развития) // Криосфера Земли, 2002б, т. VI, № 1, с. 3–16.

**СП 25.13330.2012.** Основания и фундаменты на вечно-мерзлых грунтах. М., СНИП, 2012, 117 с.

**Цытович Н.А.** Инструктивные указания по определению сил сцепления мерзлых грунтов // Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1954, т. 2, 175 с.

Поступила в редакцию  
4 июня 2013 г.