

СВОЙСТВА ЛЬДА И МЕРЗЛЫХ ПОРОД

УДК 624.139:536.7

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(24-31)

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ВОДОГАЗОНАСЫЩЕНИЯ
НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Л.Т. Роман¹, В.П. Мерзляков², А.Н. Малеева¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т,

119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; ltr@inbox.ru

²Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН,

101000, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, Россия; cryo2@yandex.ru

Выполнен анализ температурных деформаций компонентов мерзлого грунта: скелета, льда, газа и незамерзшей воды при фазовом переходе. Экспериментально исследованы температурные деформации мерзлого песка, супеси и суглинка с различными значениями содержания воды и степени газонасыщения при нагревании в интервале температур от -9 до -1 °С. Выявлено закономерное увеличение температурных деформаций с ростом степени газонасыщения. Получены значения времени стабилизации деформаций на разных ступенях изменения температуры при различной дисперсности грунта.

Мерзлые грунты, температурные деформации, влажность, пористость, степень газонасыщения, не-установившиеся и установившиеся деформации

THERMAL DEFORMATION OF FROZEN SOILS:
ROLE OF WATER AND GAS SATURATION

L.T. Roman¹, V.P. Merzlyakov², A.N. Maleeva¹

¹Lomonosov Moscow State University, Department of Geology,

1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; ltr@inbox.ru

²Sergeev Institute of Environmental Geoscience, RAS,

13, build. 2, Ulansky per., Moscow, 101000, Russia; cryo2@yandex.ru

Thermal deformation of different components in frozen soil (soil skeleton and pore ice, unfrozen water and gas) is considered theoretically. The experiments are applied to frozen sand, silt and clay silt with different moisture contents and gas saturation degrees in the $-9...-1$ °C temperature range. Deformation is higher at greater gas saturation. Transient deformation has different relaxation times depending on temperature and grain sizes of soils.

Frozen soils, temperature, strain, moisture, porosity, gas saturation, transient deformation, stationary deformation

ВВЕДЕНИЕ

В процессе изменения температуры мерзлые грунты претерпевают значительные внутренние изменения. В первую очередь это относится к структуре и фазовому составу воды. Температурная деформация* – наиболее чувствительная характеристика по отношению к этим свойствам.

В экспериментальных работах [Вотяков, 1963, 1966; Вотяков, Гречищев, 1969; Гречищев, 1970; Шушерина и др., 1970, 1973; Шушерина, Крылова, 1977; Гречищев и др., 1980; Роман, 1987, 2002; Ершов и др., 1989, 2001] предпринимались

более или менее успешные попытки изучения температурных деформаций мерзлых грунтов в зависимости от гранулометрического состава скелета, влажности, степени водонасыщения, фазового состава воды и других характеристик при изменении температуры. Анализировалось влияние пористости главным образом при полном влагонасыщении. Показано [Ершов и др., 1989], что грунт ведет себя по-разному в случае быстрого предварительного промораживания и в случае плавного понижения температуры. Отмечалось [Шушерина и др.,

* Ниже рассматриваются деформации образцов, свободных от действия внешних сил. Используются традиционные выражения “температурное расширение” или “тепловое расширение”. “Сокращение” обозначается знаком минус, как отрицательное расширение.

1973; Ершов и др., 1989], что при неполном влагонасыщении эффект увеличения или уменьшения объема при фазовом переходе воды уменьшается. Совсем не принималась во внимание степень газонасыщения. Высказывалось мнение, что несмотря на достаточно большие температурные деформации газообразного компонента в свободном состоянии, в грунте они не реализуются из-за жесткости скелета.

Однако еще в классической литературе по механике грунтов отмечалось, что “горные породы с газообразной составляющей в порах отличаются по своим свойствам от тех же пород, не содержащих ее”. Особое значение в этом смысле имеет воздух в породах, изолированный от наружной атмосферы, так называемый защемленный воздух [Приклонский, 1949]. По отношению к температурным деформациям такой вывод подтверждается результатами исследований мерзлого торфа [Роман, 1987]. Доли разделения внутрипоровых газов на “защемленные” и сообщающиеся с атмосферой являются важными параметрами, роль которых в процессе деформации требует дальнейшего исследования.

Большая часть известных экспериментов проводилась при понижении температуры образцов с исключением области интенсивных фазовых переходов. Повышение температуры, вообще говоря, приводит к иной зависимости деформирования, т. е. имеет место гистерезис. Для песчаных грунтов, например, при достаточной выдержке при низких температурах гистерезис невелик. При более высоких температурах гистерезис становится существенным.

Характерными температурами дилатометрических кривых являются температуры экстремумов деформаций, при которых температурный коэффициент линейного расширения α меняет знак. Таким образом, можно выделить интервалы, где происходит монотонное изменение размеров образцов при изменении температуры. Каждый такой интервал соответствует определенной группе процессов, поэтому имеет свои особенности. Можно ожидать, что в каждом таком интервале и другие характеристики, например прочностные свойства, будут зависеть от температуры по-разному.

Состояние образца в начальный момент испытания в значительной степени зависит от его предыстории. Поэтому изменение температуры, прерванное выдержкой при каком-либо ее значении или переходом от понижения температуры к ее повышению, может привести к заметному изменению результата, полученного на том же интервале при других условиях.

* Имеются в виду внутренние температурные напряжения на уровне структуры грунта. Температурные напряжения, возникающие в релаксметре [Гречищев и др., 1980], отличаются от них вследствие принципиально иной силовой схемы, проявления ползучести, а в случае сжатия также и консолидации [Власов и др., 1998].

Важную роль играет время стабилизации температурной деформации при ступенчатом изменении температуры. Графики неустановившихся температурных деформаций отражают выравнивание температурного поля образца, релаксацию температурных напряжений* и стабилизацию других внутренних свойств мерзлого грунта, которые находятся в тесной взаимозависимости. Измеренное в данном случае время стабилизации есть наибольшее время релаксации указанных процессов [Гречищев, 1970; Мерзляков, 2012].

СОБСТВЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ КОМПОНЕНТОВ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Из законов термодинамики следует, что температурные деформации отдельных компонентов мерзлого грунта в свободном состоянии при изменении температуры на ΔT градусов могут быть представлены следующими выражениями.

Для кристаллических частиц, к которым можно отнести лед, температурные деформации ε_c имеют вид

$$\varepsilon_c = \alpha \Delta T, \quad (1)$$

где $\alpha \approx (1-6) \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$ – значение температурно-коэффициента линейного расширения.

Для воды, переходящей в лед, и льда, переходящего в воду [Мерзляков, 1980], температурные деформации ε_{ph} принимают вид

$$\varepsilon_{ph} = \beta \frac{\partial W_w}{\partial T} \Delta T, \quad (2)$$

где $\beta = -\frac{1}{3}(v_i - v_w)(1-n)\rho_d$; $v_i = 1.091$ см 3 /г – удельный объем льда; $v_w = 1.0$ см 3 /г – удельный объем незамерзшей воды; n – пористость грунта; W_w – влажность образца по незамерзшей воде; ρ_d – плотность сухого грунта, г/см 3 . Принимая $\rho_d = 1.36$ г/см 3 , $n = 0.5$, получим $\beta \approx -0.02$. Оценка производной $\frac{\partial W_w}{\partial T}$ для супесей и суглинков при температуре -1 °С дает $\frac{\partial W_w}{\partial T} \approx 0.03$ град $^{-1}$. Поэтому $\varepsilon_{ph} \approx -6 \cdot 10^{-4} \Delta T$.

Формула (2) с учетом принятых знаков дает уменьшение размеров при повышении температуры и увеличение их при понижении температуры.

Оценки показывают, что в диапазоне изменения температуры, в котором проводились эксперименты с мерзлыми грунтами, свободную температурную деформацию газового компонента можно рассчитать по формуле

$$\varepsilon_g = \gamma \Delta T, \quad (3)$$

где $\gamma \approx \frac{1}{3} \frac{1}{273.15 \text{ К}} = 1.22 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$.

В равенствах (1)–(3) T – абсолютная температура, К. Выражения $\beta \frac{\partial W_w}{\partial T}$ и γ , так же как и α , являются коэффициентами линейного расширения. Поэтому в формулах (2) и (3) появляется множитель $1/3$, “коэффициент перевода” объемной деформации в линейную.

Вышеуказанные собственные деформации компонентов грунта (1), (2) и (3) несовместны. Их совмещение друг с другом сопровождается возникновением и изменением внутренних напряжений в материале, которые влияют на температурные деформации образца в целом. Ввиду принципиальной важности понятия совместности деформаций приведем краткое пояснение на простом примере. Рассмотрим три стержня одинаковой длины, выполненных из различных материалов, расположенных параллельно и так, чтобы положение левых торцов совпадало. Пусть изменение температуры ΔT в каждом стержне одинаковое. Если стержни не скреплены, то при изменении температуры они будут иметь разную продольную деформацию, обусловленную различными значениями α (деформации несовместны). Если стержни скрепить по контакту, то деформация будет одинаковой (деформации совместны). Но при этом температурная деформация образца $\varepsilon_s \neq (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \Delta T$. Рассмотренный пример относится к сплошным средам. Наличие пор и включений приводит к многочисленным дополнительным вариантам несовместности. Вследствие чего температурные деформации образца, вообще говоря, не являются суммой собственных деформаций отдельных компонентов.

Что касается газового компонента, то могут проявляться не столько его собственные деформации, сколько деформации оболочек, образованной скелетом или льдом, если газ “защемлен”. Из равенства (3) следует, что с увеличением температуры “защемленного” газа давление в порах будет расти. Это может привести к дополнительным деформациям скелета.

Например, представим себе тонкостенную трубку, наполненную газом, давление в котором изменилось на величину Δp . Тогда напряжение в

стенке трубки σ изменится на величину $\Delta \sigma = \Delta p d / (2\delta)$, где d – диаметр трубки; δ – толщина тонкой стенки. Представим также, что диаметр трубки – это средний размер замкнутой поры, а толщина стенки – соответствующий размер скелета грунта. Если в этом случае принять $\Delta p = 10$ кПа, $d = 1$ мм, $\delta = 10$ мкм, то $\Delta \sigma = 500$ кПа, что приведет к заметной разнице в деформациях с учетом и без учета этих напряжений. Рассмотренный пример не означает, что все обстоит именно так. Могут иметь место и другие модели, объясняющие эффект косвенного увеличения деформаций скелета.

ХАРАКТЕРИСТИКА ГРУНТОВ И МЕТОДИКА ОПЫТОВ

Исследования проводились для трех видов грунтов: песка, супеси, суглинка. Песок и супесь аллювиального генезиса отобраны в обнажении высокого берега р. Чара (север Забайкальского края). Суглинок отобран на Ен-Яхинском нефтегазовом конденсатном месторождении. Гранулометрический состав грунтов определялся ареометрическим и ситовым методами (табл. 1) в соответствии с [ГОСТ 12536-79, 2008]. Водные свойства глинистых грунтов приведены в табл. 2.

Образцы изготавливались с заданными значениями физических свойств (плотности, влажности) с неполным водонасыщением, обеспечивающим заметное содержание газов. Усредненные значения физических свойств исследуемых грунтов приведены в табл. 3.

Содержание незамерзшей воды рассчитано по методике из [Роман, 2002]. Зависимость содержания незамерзшей воды в грунтах от температуры и начальной влажности приведена на рис. 1.

Образцы грунтов изготавливали из паст заданных влажности и плотности при комнатной температуре. Изготовление осуществляли в цилиндрических формах высотой 90 мм, диаметром 35 мм, с послойным уплотнением. Внутреннюю поверхность формы предварительно смазывали вазелином. Для обеспечения плоскопараллельного промерзания перпендикулярно оси образца наружная поверхность была теплоизолирована. Для

Таблица 1. Гранулометрический состав (%) глинистых и песчаных грунтов

Наименование по [ГОСТ 25100-2011, 2013]	Фракция, мм									
	10–5	5–2	2–1	1–0.5	0.5–0.25	0.25–0.1	0.1–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	<0.005
Супесь пылеватая*	–	0.93	1.10	2.50	1.28	1.90	3.07	61.30	24.91	3.01
Суглинок легкий*	–	–	–	–	–	0.22	10.33	22.37	27.74	39.34
Песок средней крупности**	0.40	2.02	4.11	35.40	56.97	0.47	0.63***	–	–	–

* Определения проведены ареометрическим методом.

** Определения выполнены ситовым методом.

*** Фракция менее 0.1 мм.

Таблица 2. **Водные свойства грунтов**

Вид грунта	Влажность на границе		Число пластичности I_p
	раскатывания W_p	текучести W_L	
Супесь пылеватая	0.20	0.26	0.06
Суглинок легкий	0.21	0.32	0.11

Таблица 3. **Значения физических свойств грунтов**

Вид грунта	W_{tot}	W_f	Плотность, г/см ³			e	S_r	S_w/S_g при θ			
			ρ_s	ρ	ρ_d			-7 °C	-5 °C	-3 °C	-1 °C
Песок	0.10	0.31	2.65	1.59	1.45	0.83	0.32	0.35	0.35	0.34	0.34
	0.15	0.34		1.60	1.39	0.90	0.44	0.65	0.65	0.66	0.66
	0.20	0.34		1.68	1.40	0.89	0.59	0.48	0.48	0.47	0.47
Супесь	0.20	0.35	2.70	1.65	1.37	0.97	0.56	0.52	0.52	0.53	0.53
	0.22	0.36		1.66	1.36	0.98	0.60	0.64	0.64	0.64	0.64
	0.25	0.38		1.66	1.32	1.04	0.65	0.36	0.36	0.36	0.36
Суглинок	0.20	0.32	2.71	1.74	1.45	0.87	0.62	0.60	0.60	0.60	0.58
	0.25	0.34		1.76	1.41	0.92	0.73	0.40	0.40	0.40	0.42
	0.30	0.39		1.71	1.32	1.06	0.77	0.65	0.65	0.64	0.63
								0.35	0.35	0.36	0.37
								0.70	0.70	0.69	0.68
								0.30	0.30	0.31	0.32
								0.67	0.66	0.66	0.65
								0.33	0.34	0.34	0.35
								0.79	0.78	0.78	0.76
								0.21	0.22	0.22	0.24
								0.82	0.82	0.81	0.79
								0.18	0.18	0.19	0.21

Примечание. W_{tot} – суммарная влажность, д. ед.; W_f – влажность при полной влагоемкости, д. ед.; ρ_s – плотность частиц грунта, г/см³; ρ – плотность мерзлого грунта, г/см³; ρ_d – плотность сухого грунта, г/см³; e – коэффициент пористости; S_r – степень водонасыщения, д. ед.; S_w – степень заполнения пор грунта водой и льдом, д. ед.; S_g – степень заполнения пор газом, д. ед.; θ – температура грунта, °C.

предотвращения иссушения грунта формы с образцами дополнительно изолировали полиэтиленовой пленкой. С целью предотвращения миграции влаги в процессе эксперимента осуществляли предварительное замораживание образца в холодильной камере при температуре -25 °C с выдержкой не менее суток. После промерзания образцы извлекали из форм, верхние торцевые части зачищали и к ним примораживали пластиковые пластинки для размещения датчиков перемещений. Общий вид установки представлен на рис. 2.

Вертикальные деформации измеряли датчиками линейных перемещений АСИС. Образцы помещали в короб, теплоизолированный капролоном с целью нейтрализации инерционности холодильной камеры. Датчики жестко закрепляли на поверхности образцов и в крышке короба. Температура измерялась электронными термометрами, установленными в камере и в дополнительных образцах каждого вида грунта, не оборудованных датчиками перемещений.

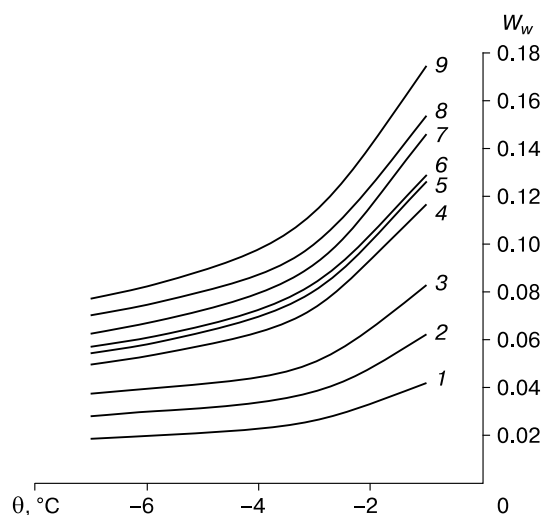


Рис. 1. Содержание незамерзшей воды (W_w) в исследуемых грунтах в зависимости от температуры (θ) и начальной влажности:

1 – 0.10, 2 – 0.15, 3 – 0.20 (для песка); 4 – 0.20, 5 – 0.22, 6 – 0.25 (для супеси); 7 – 0.20, 8 – 0.25, 9 – 0.30 (для суглинка).

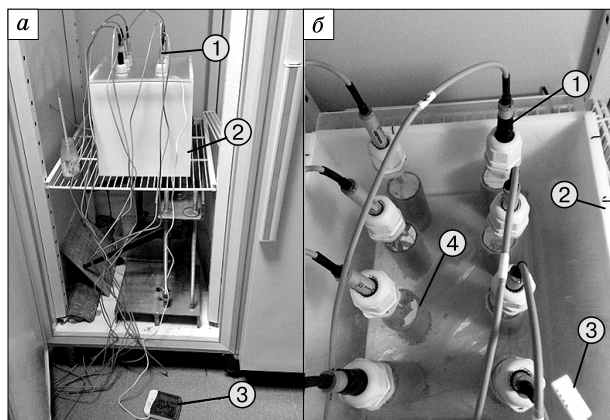


Рис. 2. Установка для измерения температурных деформаций:

a – общий вид; *б* – вид сверху; 1 – датчики; 2 – теплоизоляционный короб; 3 – электронный термометр; 4 – образец.

Опыты проводили в режиме увеличения температуры в диапазоне от -9 до -1 °С. Устанавливали начальную температуру -9 °С. Далее осуществляли ступенчатое повышение температуры до следующих значений: -7 , -5 , -3 и -1 °С. Измерения перемещений верхнего торца образца отсчитывались от начала температурной ступени через 10 с (6 замеров), 1 мин (5 замеров), 5 мин (5 замеров), 10 мин (3 замера), 30 мин (8 замеров), 1 ч (19 замеров), через 4 ч (14 замеров). Далее – через 7 ч до стабилизации деформаций. Критерий стабилизации деформаций составлял 0.001 – 0.002 мм за 12–14 ч.

Все испытания проводили с трехкратной повторностью. Выполняли статистическую обработ-

ку результатов эксперимента в соответствии с [ГОСТ 20522-2011, 2012].

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ

По данным измеренных перемещений построены кривые развития неустановившихся температурных деформаций во времени для каждой ступени. Здесь авторы, нарушая установившуюся традицию, полагают относительное расширение грунта положительным, как это принято в механике сплошной среды и в сопротивлении материалов.

Из рис. 3 следует, что в начальный период деформации супеси имеют значительный разброс, не проявляя четкой зависимости от влажности температур. Скорее всего, это связано со случайным характером фазовых переходов в неравновесных термодинамических состояниях. Проведенные эксперименты показали, что в еще большей степени это относится к суглинку. В песке этот эффект не наблюдался (рис. 4). Из сравнения графиков следует, что характерные времена стабилизации для каждого типа грунта можно считать не зависящими от суммарной влажности W_{tot} в указанном диапазоне ее изменения.

Рассмотренные графики перестраивались в графики зависимости стабилизированных приращений деформаций на соответствующих ступенях от температуры:

$$\Delta \varepsilon_i = \Delta h_i / h_{i-1}, \quad (4)$$

где $\Delta h_i = h_i - h_{i-1}$ – стабилизированное приращение высоты образца при конечной температуре ступени (θ_i , °С); h_{i-1} – высота образца при начальной температуре ступени (θ_{i-1} , °С), $i = 1, 2, 3, 4$.

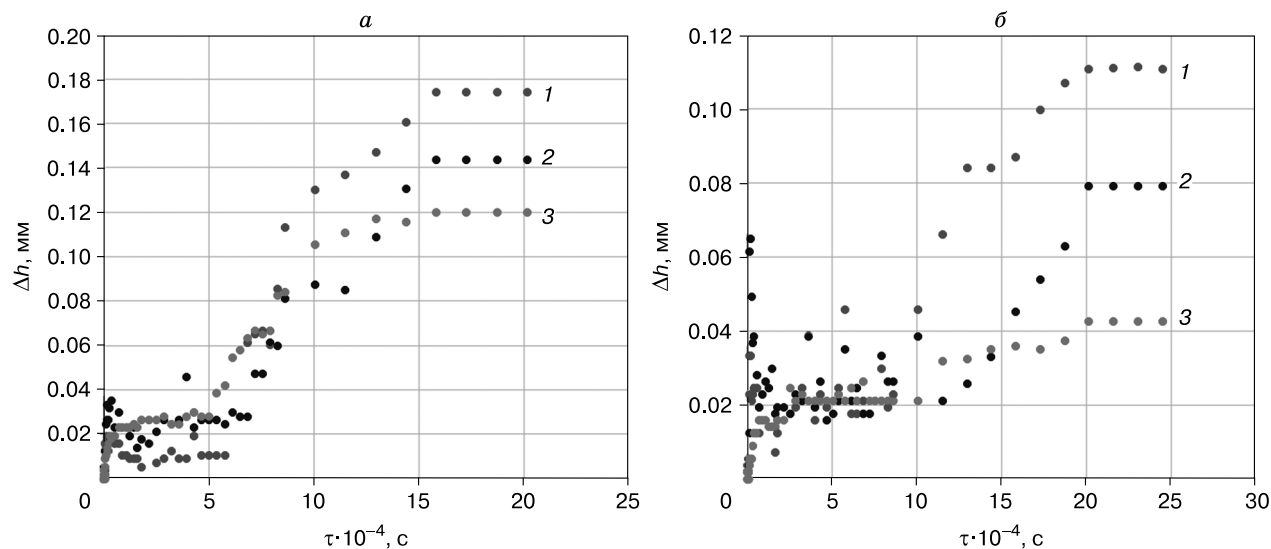


Рис. 3. Изменение высоты образца супеси Δh во времени τ :

a – температура от -9 до -7 °С; *б* – температура от -3 до -1 °С; 1 – $W_{tot} = 0.20$; 2 – $W_{tot} = 0.22$; 3 – $W_{tot} = 0.25$.

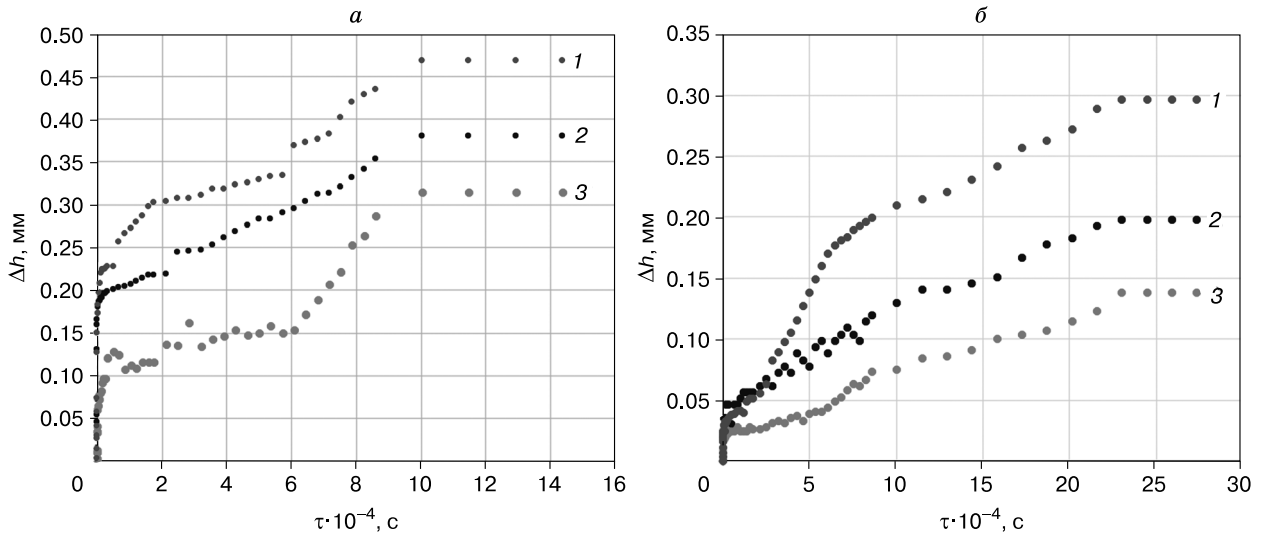


Рис. 4. Изменение высоты образца песка Δh во времени τ :

a – температура от -9 до -7 °C; *б* – температура от -3 до -1 °C; 1 – $W_{tot} = 0.10$; 2 – $W_{tot} = 0.15$; 3 – $W_{tot} = 0.20$.

Зависимости стабилизированных приращений деформаций от степени заполнения пор газами представлены на рис. 5. Здесь же указаны температуры последовательных ступеней (°C).

Наблюдается четкая зависимость приращений деформаций на каждой температурной ступени от степени водонасыщения и объема воздуха в порах: наибольшие деформации соответствуют

наименьшей влажности и наибольшему объему газового компонента в грунте, особенно это проявляется в области низких температур.

Значения температурных коэффициентов линейного расширения вычислялись для относительного изменения характерного размера образца, свободного от внешних нагрузок, при нагревании на 1 °C:

$$\alpha_i = \frac{\Delta h_i}{h_{i-1}} (\theta_i - \theta_{i-1}). \quad (5)$$

Температурные коэффициенты линейного расширения, вычисленные по стабилизированным значениям деформаций на каждой ступени, в зависимости от общей влажности приведены в табл. 4.

Таблица 4. Значения температурных коэффициентов линейного расширения (α) в указанных диапазонах температуры для разных типов грунтов и влажности (W_{tot})

W_{tot}	$\alpha \cdot 10^5, \text{град}^{-1}$			
	$-9 \dots -7$ °C	$-7 \dots -5$ °C	$-5 \dots -3$ °C	$-3 \dots -1$ °C
<i>Песок</i>				
0.10	271	240	200	172
0.15	220	182	143	115
0.20	182	145	101	80
<i>Супесь</i>				
0.20	140	101	65	36
0.22	104	83	46	34
0.25	88	70	25	22
<i>Суглинок</i>				
0.20	61	47	35	20
0.25	45	32	19	14
0.30	35	28	7	2.5

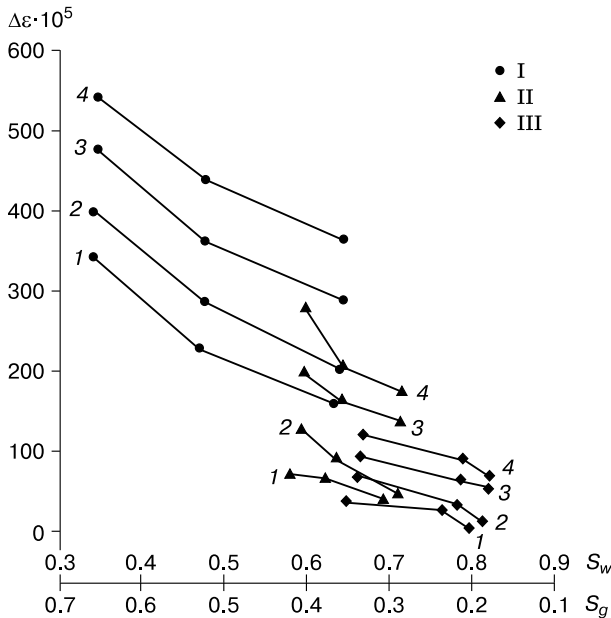


Рис. 5. Зависимости стабилизированных приращений температурных деформаций $\Delta \epsilon$ от степени водо- и газонасыщения (S_w, S_g) в диапазоне температуры от -9 до -1 °C:

I – песок; II – супесь; III – суглинок. Температуры последовательных ступеней: -1 °C (1); -3 °C (2); -5 °C (3); -7 °C (4).

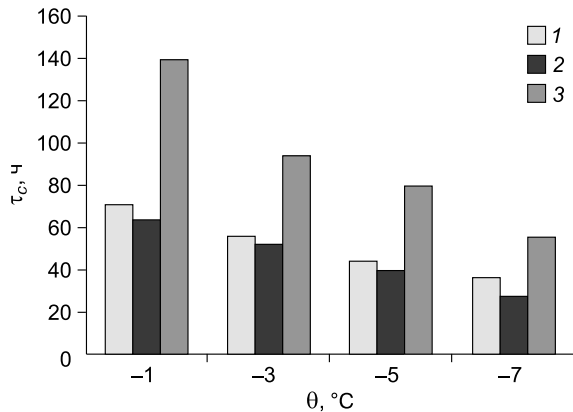


Рис. 6. Диаграмма, характеризующая время стабилизации (τ_c) деформаций супеси (1), песка (2) и суглинка (3).

Ряды данных соответствуют температурам последовательных ступеней изменения θ .

Таким образом, эксперименты с грунтами нарушенной структуры показали, что температурные деформации образцов, предварительно выдержанных при температуре $-25\text{ }^\circ\text{C}$, при нагревании выше $-10\text{ }^\circ\text{C}$ обнаруживают закономерную зависимость от степени газонасыщения. Авторы связывают этот эффект в первую очередь с влиянием “защемленных” газов (воздуха и паров воды). Влияние фазового перехода воды в песке невелико, в супеси и суглинке оно, по-видимому, значительно больше. Возможно, этим объясняются малые значения деформаций суглинка.

На рис. 6 приведена диаграмма, характеризующая время стабилизации деформаций для песка, супеси и суглинка. Диаграмма состоит из четырех рядов данных, соответствующих температурам последовательных ступеней изменения температуры.

Видно, что наименьшее время стабилизации температурных деформаций имеет песок. Увеличение дисперсности грунта приводит к задержке выравнивания температурного поля и затуханию возникающих в неустановившемся режиме внутренних напряжений. Ступенчатое повышение температуры грунта до -7 , -5 , -3 , $-1\text{ }^\circ\text{C}$ также приводит к увеличению времени стабилизации деформаций вследствие возрастания количества незамерзшей влаги. Для грунтов каждого типа повышение температуры грунта в интервале $-9\text{...}-1\text{ }^\circ\text{C}$ приводит к увеличению времени стабилизации деформаций примерно в 2 раза.

ВЫВОДЫ

Полученные экспериментальные результаты и численные оценки позволяют сделать следующие выводы.

1. Температурные деформации различных компонентов мерзлого грунта неаддитивны, т. е. деформация образца не является суммой деформаций отдельных компонентов.

2. Стабилизированные значения деформаций на соответствующих ступенях повышения температуры в интервале $-9\text{...}-1\text{ }^\circ\text{C}$ при различных значениях влажности тем больше, чем больше степень газонасыщения (меньше степень водонасыщения).

3. Для объяснения эффекта увеличения температурных деформаций мерзлого грунта с увеличением степени газонасыщения на одной и той же ступени повышения температуры выдвигается гипотеза “защемления” воздуха и паров воды.

4. Время стабилизации температурных деформаций на каждой температурной ступени увеличивается с ростом дисперсности грунта. Для грунтов одного типа повышение температуры грунта в интервале от -9 до $-1\text{ }^\circ\text{C}$ приводит к увеличению времени стабилизации деформаций примерно в 2 раза.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры геокриологии МГУ М.Н. Царапову и П.И. Котову за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-05-0491/15).

Литература

- Власов А.Н., Лисин Л.Д., Мерзляков В.П., Талонов А.В.** К возможности фильтрационной консолидации пластично-мерзлой супеси // Криосфера Земли, 1998, т. II, № 2, с. 65–68.
- Вотяков И.Н.** Температурные коэффициенты расширения мерзлых грунтов // Прочность и ползучесть мерзлых грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 157–162.
- Вотяков И.Н.** Объемные изменения мерзлых дисперсных грунтов в связи с фазовыми переходами воды при температурных колебаниях // Материалы VIII Всесоюз. междувед. совещ. по геокриологии. Якутск, Якуткнигоиздат, 1966, вып. 5, с. 11–21.
- Вотяков И.Н., Гречищев С.Е.** О временном эффекте последствий температурных деформаций и напряжений в мерзлых грунтах // Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Красноярск, Краснояр. пром-стройНИИпроект, 1969, с. 41–60.
- ГОСТ 25100-2011.** Грунты. Классификация. М., Стандартинформ, 2013, 38 с.
- ГОСТ 12536-79.** Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М., ИПК Изд-во стандартов, 2008, 17 с.
- ГОСТ 20522-2011.** Грунты. Метод статистической обработки результатов испытаний. М., НИИОСП им. Н.И. Герсеванова, 2012, 23 с.
- Гречищев С.Е.** К основам методики прогноза температурных напряжений и деформаций в мерзлых грунтах // С.Е. Гречищев. М., ВСЕГИНГЕО, 1970, 53 с.

- Гречищев С.Е.** Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз / С.Е. Гречищев, Л.В. Чистотинов, Ю.Л. Шур. М., Недр, 1980, 382 с.
- Ершов Э.Д., Чеверев В.Г., Николаева Г.В., Брушков А.В., Шевченко Л.В.** Природа аномальных температурных деформаций мерзлых грунтов // Геокриологические исследования. М., Изд-во Моск. ун-та, 1989, с. 171–182.
- Ершов Э.Д., Комаров И.А., Брушков А.В., Хорс М.А.** Температурные деформации мерзлых дисперсных льдонасыщенных пород при низких отрицательных температурах // Материалы Второй конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001, с. 81–87.
- Мерзляков В.П.** Влияние незамерзшей воды на тепловые деформации промерзающих глинистых грунтов // Изв. вузов. Стр-во и архитектура, 1980, № 8, с. 20–24.
- Мерзляков В.П.** Коэффициент теплового расширения как характеристика мерзлых грунтов // Геоэкология, 2012, № 2, с. 159–167.
- Приклонский В.А.** Грунтоведение. Ч. 1 / В.А. Приклонский. М., Гос. изд-во геол. лит., 1949, 410 с.
- Роман Л.Т.** Мерзлые торфяные грунты как основания сооружений / Л.Т. Роман. Новосибирск, Наука, 1987, 219 с.
- Роман Л.Т.** Механика мерзлых грунтов / Л.Т. Роман. М., МАИК "Наука/Интерпериодика", 2002, 426 с.
- Шушерина Е.П., Барковская Е.Н., Ревина Л.А.** Исследования температурных деформаций дисперсных мерзлых пород в зависимости от их состава и температуры в диапазоне от -0.5 до -55° // Мерзлотные исследования. М., Изд-во Моск. ун-та, 1973, вып. XIII, с. 212–227.
- Шушерина Е.П., Крылова Л.С.** Исследование температурных деформаций мерзлых глин // Мерзлые породы и снежный покров. М., Наука, 1977, с. 70–81.
- Шушерина Е.П., Рачевский Б.С., Отрощенко О.П.** Исследование температурных деформаций мерзлых горных пород // Мерзлотные исследования. М., Изд-во Моск. ун-та, 1970, вып. X, с. 273–283.

*Поступила редакцию
10 ноября 2015 г.*