

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВО ЛЬДУ И МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

УДК 624.139:624.131

МЕХАНОКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ  
ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

С.С. Волохов

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; volokhov@geol.msu.ru*

Изложены результаты исследования механокалорического эффекта, возникающего при испытании мерзлых грунтов на одноосное сжатие. Установлены условия его возникновения. Сделано предположение о ведущей роли трещинообразования в этом процессе.

*Мерзлый грунт, одноосное сжатие, механокалорический эффект, трещинообразование*

MECHANOCALORICAL EFFECT IN FROZEN GROUND UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

S.S. Volokhov

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geology,  
119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; volokhov@geol.msu.ru*

Results of research of mechanocalorical effect occurring at the uniaxial compression testing of frozen ground are reported. The conditions of its occurrence are revealed. An assumption about the leading role of crack formation in this process is made.

*Frozen ground, uniaxial compression, mehanocalorical effect, crack formation*

ВВЕДЕНИЕ

Исследование механокалорического эффекта в мерзлых грунтах относится к проблемам термо-реологии мерзлых, промерзающих и протаивающих пород, изучающей взаимосвязь и взаимовлияние во времени полей механических напряжений и деформаций, температуры и фазового состава поровой влаги в этих породах [Гречищев, 1983]. Под механокалорическим (баротермическим, термомеханическим) эффектом понимают изменение температуры грунтов при воздействии на них механических нагрузок.

Научные публикации, посвященные изучению механокалорического эффекта в мерзлых грунтах, немногочисленны. С.Е. Гречищевым [1976] описаны эксперименты на одноосное сжатие мерзлых образцов бентонитовой глины, песка и торфа при постоянной скорости деформирования. Было зафиксировано повышение температуры в исследованных грунтах: в глине – на 0.5 °С, в песке – на 0.7 °С, в торфе – на 1.0 °С. Автор такое повышение температуры объясняет эффектом связанной упруговязкопластичности (по аналогии с эффектом связанной термоупругости в твердых

телах – изменением температуры материала вследствие деформации).

О.В. Казаковой [Гречищев и др., 1984; Казакова, 1984] проводились эксперименты по компрессионному нагружению влажной пасты суглинка в режиме нагружения–разгрузки. Изменения температуры грунта составляли около 0.006 °С в стороны понижения и повышения, что связывается с поглощением и выделением теплоты при переходе связанной воды в свободное состояние и обратно.

В работе [Максимьяк, 1988] представлены эксперименты по деформированию глинистых мерзлых грунтов плоским штампом. Отмечено, что под штампом в зоне формирования ядра уплотнения наблюдается понижение температуры грунтов, которое объясняется поглощением теплоты при плавлении льда в грунте. Под краем штампа и ниже ядра уплотнения, где отмечалось формирование трещин в грунте, наблюдалось повышение температуры. Это явление автор связывает с выделением теплоты при трещинообразовании. Величины изменения температуры мерзлых грунтов в данной публикации не указаны.

В работе [Коновалов, 1999] зафиксировано понижение температуры мерзлого образца в процессе его уплотнения под нагрузкой. Я.Б. Горелик и В.С. Колунин [2002] в экспериментах по компрессионному сжатию мерзлых образцов глины и супеси также наблюдали понижение температуры грунтов, которое назвали баротермическим эффектом. Величина понижения температуры составила 0.10–0.15 °С. Данный эффект авторы объяснили фазовым переходом лед–вода.

Исследование механокалорического эффекта в мерзлых грунтах еще далеко от завершения, требуется анализ причин его возникновения в различных условиях напряженно-деформированного состояния мерзлых грунтов и объяснение физических механизмов его проявления. Настоящая работа посвящена изучению механокалорического эффекта в различных по дисперсности мерзлых грунтах в условиях одноосного сжатия при разных отрицательных температурах и различных режимах нагружения.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исследуемых грунтов использовались каолинистая глина (г. Челябинск) и супесь (пос. Бованенково, п-ов Ямал). Испытания проводились на образцах грунтов нарушенного сложения. Суммарная влажность и плотность грунтов соответственно составляли: глина каолинистая – 50 % и 1.55–1.56 г/см<sup>3</sup>, супесь – 20 % и 1.95–1.96 г/см<sup>3</sup>.



Рис. 1. Холодильный шкаф с установками одноосного сжатия.

Испытания на одноосное сжатие проводились на модернизированных приборах КПр-1, оборудованных холодильными камерами (рис. 1) и снабженных специальными центрирующими устройствами (рис. 2). Последние обеспечивали вертикальное центрирование испытываемых образцов и строгую осевую направленность приложения на них внешней нагрузки. Каждый прибор был снабжен индикаторами часового типа, измеряющими деформацию с точностью 0.01 мм.

Экспериментальная установка позволяла задавать температуру в диапазоне от +20 до –20 °С и поддерживать ее с точностью ±0.1 °С. Измерение температуры в образцах осуществлялось с помощью логгеров температуры Testo-176-T4 и семи термопар, обеспечивающих точность измерения 0.1 °С (рис. 3).

Образцы мерзлых грунтов имели цилиндрическую форму, их высота составляла 90 мм, диаметр 45.15 мм. Образцы помещались в резиновые оболочки для предотвращения их сублимации.

В подготовленных образцах проводилось сверление семи отверстий диаметром 1 мм для термопар (рис. 4). Три отверстия глубиной 26 мм просверливались вдоль вертикальной образующей в точках, расположенных в середине каждой трети высоты образца (см. рис. 4, а). Таким образом, средняя термопара располагалась в центре образца. Четыре других отверстия глубиной 10 мм просверливались по окружности в середине образца радиально под углом 90° по отношению друг к другу (см. рис. 4, б).

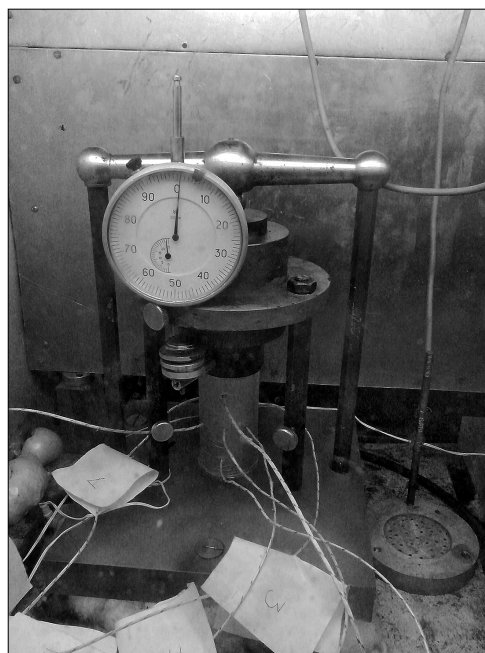


Рис. 2. Установка для испытания на одноосное сжатие.



Рис. 3. Логгеры Testo-176-T4 для измерения температуры с комплектом термодпар.

Перед испытанием образец устанавливался в нагрузочный прибор с индикатором для измерения деформации, в отверстия в образце помещались термодпары и к ним подключались логгеры измерения температуры. Образцы не теплоизолировались. Каждый образец выдерживался при температуре опыта не менее 24 ч.

Исследование механокалорического эффекта проводилось при температурах  $-7$  и  $-1$  °С в двух режимах испытания образцов на одноосное сжатие.

*1-й режим.* Быстрое нагружение мерзлых образцов супеси и глины со скоростью возрастания нагрузки на образец 0.125 и 0.0615 МПа/с соответственно при температуре  $-7$  и  $-1$  °С с доведением образцов до разрушения.

*2-й режим.* Нагружение образцов ступенчато возрастающей нагрузкой. Ступени нагрузки на образцы составляли 0.25 и 0.125 МПа соответственно при  $-7$  и  $-1$  °С. Каждая ступень нагрузки выдерживалась 10 мин. Во всех случаях, кроме мерзлой супеси при температуре  $-7$  °С, образцы были доведены до разрушения. На каждой ступени нагрузки деформация образцов измерялась через 1, 2, 3, 5 и 10 мин после ее приложения.

Температура в образцах измерялась семью термодпарами, расположенными в разных частях образцов с интервалом 1 с (см. рис. 4). Для определения исходной температуры, величин ошибки ее измерения и разброса по объему образцов измерение температуры начиналось за 10 мин до начала нагружения при испытании образцов на одноосное сжатие. Установленная погрешность измерения не превышала 0.1 °С. Исходная температура отличалась по высоте и объему образцов на 0.2 °С. В большинстве экспериментов измерение температуры продолжалось после разрушения и разгрузки образцов.

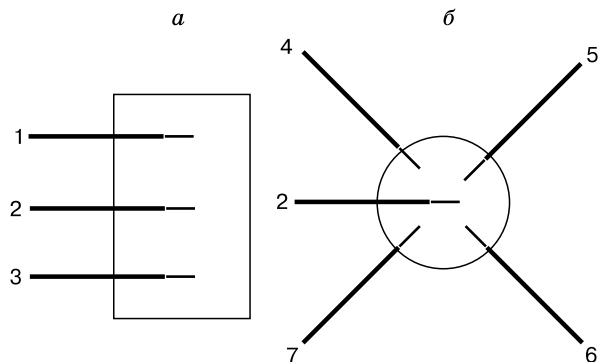


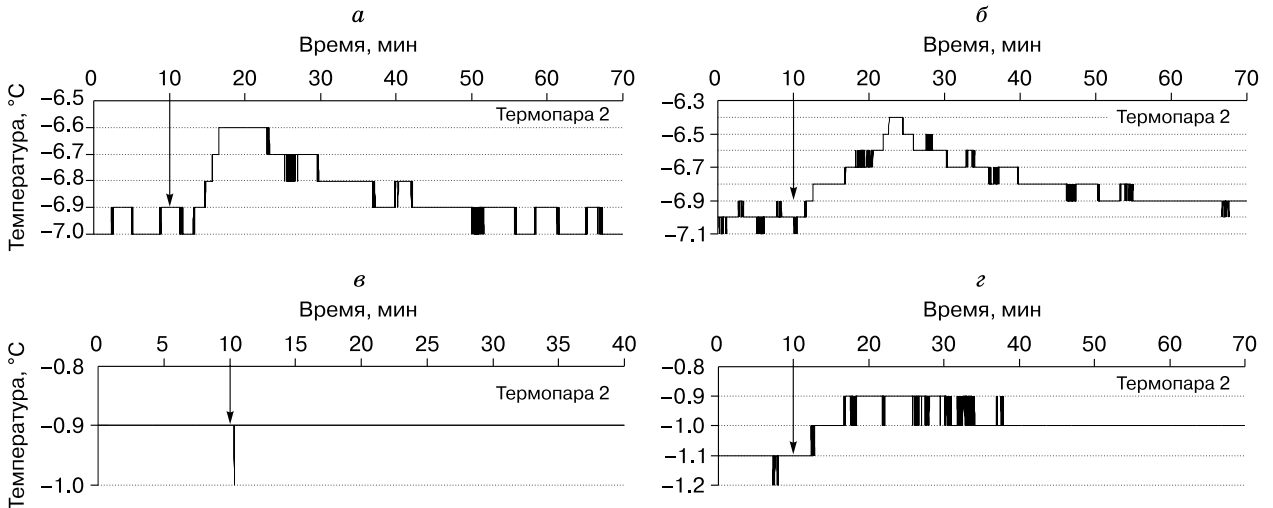
Рис. 4. Схема расположения термодпар в образце: а – по высоте образца, б – в его центральной части; 1–7 – номера термодпар.

По результатам проведенных экспериментов строились кривые ползучести для испытаний ступенчато возрастающей нагрузкой и графики изменения температуры во времени в образцах для всех термодпар. Ниже приводятся графики изменения температуры в образцах для центральной термодпары (термодпара 2). Время начала нагружения соответствует 10 мин. При этом колебания температуры в пределах 0.1 °С (до и в процессе нагружения, а также в течение разгрузки образцов) не превышают установленную погрешность измерения, т. е. являются “шумом”.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В проведенных экспериментах наблюдался следующий характер разрушения образцов мерзлых грунтов. При температуре  $-7$  °С и быстром нагружении образец мерзлой супеси разрушался хрупко по магистральной трещине, ориентированной примерно под углом 45° к вертикальной образующей образца. При ступенчатом нагружении образец мерзлой супеси не был доведен до разрушения. Образцы мерзлой глины при той же температуре разрушались вязко-хрупко с образованием ряда трещин по образцу как при быстром нагружении, так и при ступенчатом. Началу трещинообразования предшествовало пластическое деформирование образцов, причём они приобретали форму бочки. При температуре  $-1$  °С вязко-хрупко разрушался только образец мерзлой супеси при быстром нагружении. Образец мерзлой глины при быстром нагружении и образцы глины и супеси при ступенчатом нагружении разрушались вязко с образованием формы бочки без видимого трещинообразования.

При температуре  $-7$  °С и быстро возрастающей нагрузке в образцах мерзлой глины и супеси после приложения максимальной нагрузки, соста-



**Рис. 5.** Изменение температуры в центре образцов каолиновой глины (*а, в*) и супеси (*б, г*) при быстром нагружении.

Начальная температура  $-7^{\circ}\text{C}$  (*а, б*) и  $-1^{\circ}\text{C}$  (*в, г*). Стрелкой показано начало нагружения.

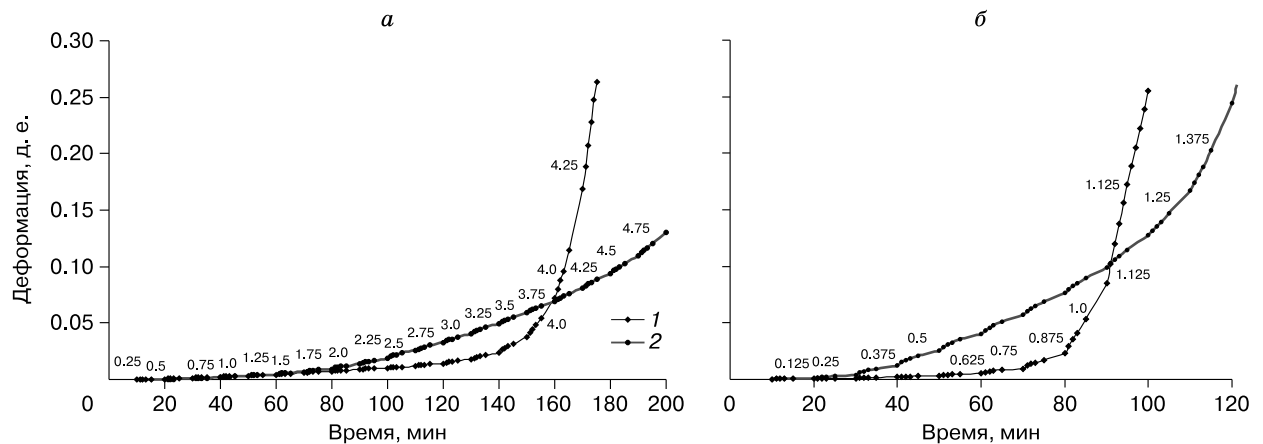
вишей для мерзлой глины 4.75 МПа, для мерзлой супеси 6.75 МПа, в процессе последующего деформирования в течение 8–13 мин и разрушения наблюдалось повышение температуры соответственно на 0.3–0.4 и 0.4–0.5  $^{\circ}\text{C}$  (рис. 5, *а, б*). При этом повышение температуры зафиксировано во всех точках ее измерения с разницей значений 0.1  $^{\circ}\text{C}$ . После разрушения образцов и их разгрузки температура в образцах постепенно снижалась до начального значения.

В образце мерзлой глины при температуре  $-1^{\circ}\text{C}$  и быстро возрастающей нагрузке до максимальной величины 1.67 МПа изменения температуры в процессе деформирования и разрушения в течение 1 мин не наблюдалось ни в одном из

участков образца (см. рис. 5, *в*). В образце мерзлой супеси при быстром нагружении до 2.38 МПа и разрушении в течение 3.5 мин отмечалось повышение температуры на 0.1–0.2  $^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 5, *г*). Наиболее отчетливо это видно в средней части образца.

Кривые ползучести образцов мерзлой глины и супеси, имеющих температуру  $-7^{\circ}\text{C}$ , при одноосном сжатии в условиях ступенчато возрастающей нагрузки представлены на рис. 6, *а*. Соответствующие графики изменения температуры в образцах приведены на рис. 7, *а, б*.

На рис. 7 видно, что в образце мерзлой глины на ступенях нагрузки, соответствующих затухающей ползучести, изменений температуры в образ-



**Рис. 6.** Кривые ползучести мерзлой глины (1) и супеси (2) при одноосном сжатии и ступенчато возрастающей нагрузке.

Температура  $-7^{\circ}\text{C}$  (*а*) и  $-1^{\circ}\text{C}$  (*б*). Цифры на кривых – величина ступеней нагрузки, МПа.