

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/см³, супесь – 20 % и 1.95–1.96 г/см³.

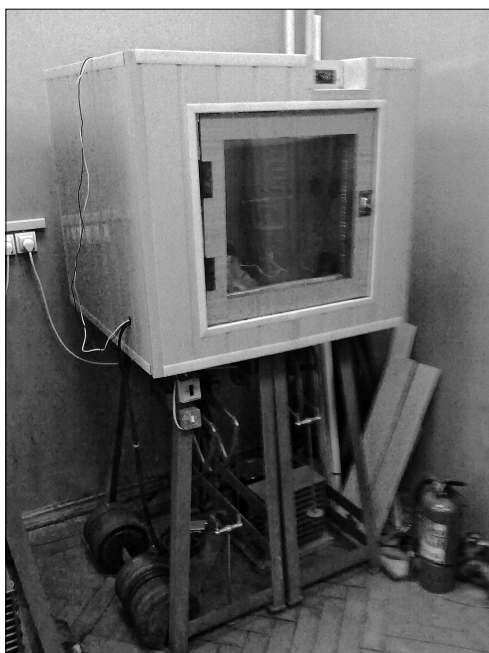


Рис. 1. Холодильный шкаф с установками одноосного сжатия.

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).

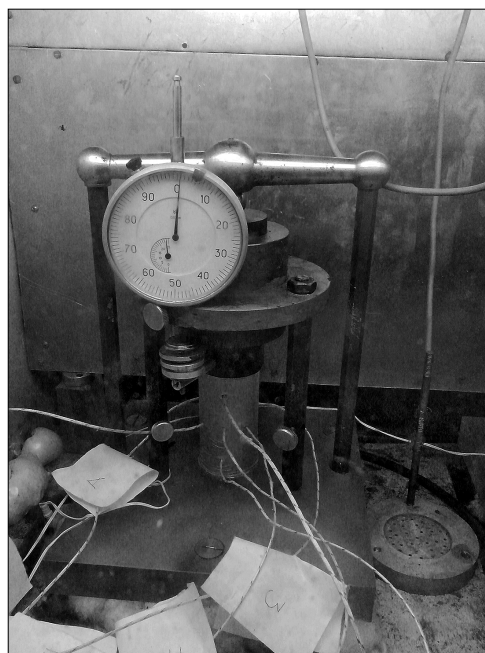


Рис. 2. Установка для испытания на одноосное сжатие.



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.

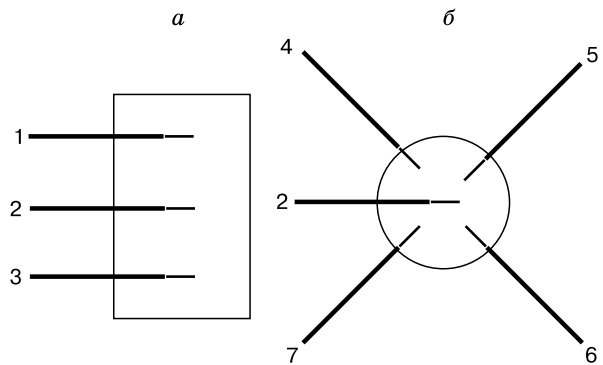


Рис. 4. Схема расположения термодпар в образце: а – по высоте образца, б – в его центральной части; 1–7 – номера термодпар.

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-

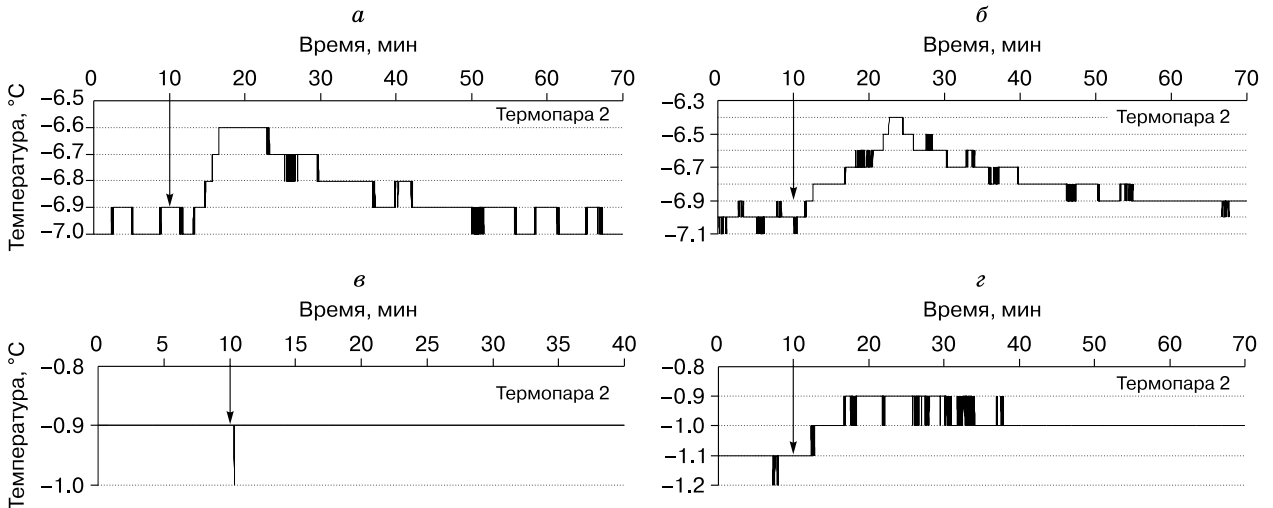


Рис. 5. Изменение температуры в центре образцов каолиновой глины (а, в) и супеси (б, г) при быстром нагружении.

Начальная температура -7°C (а, б) и -1°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°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°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-

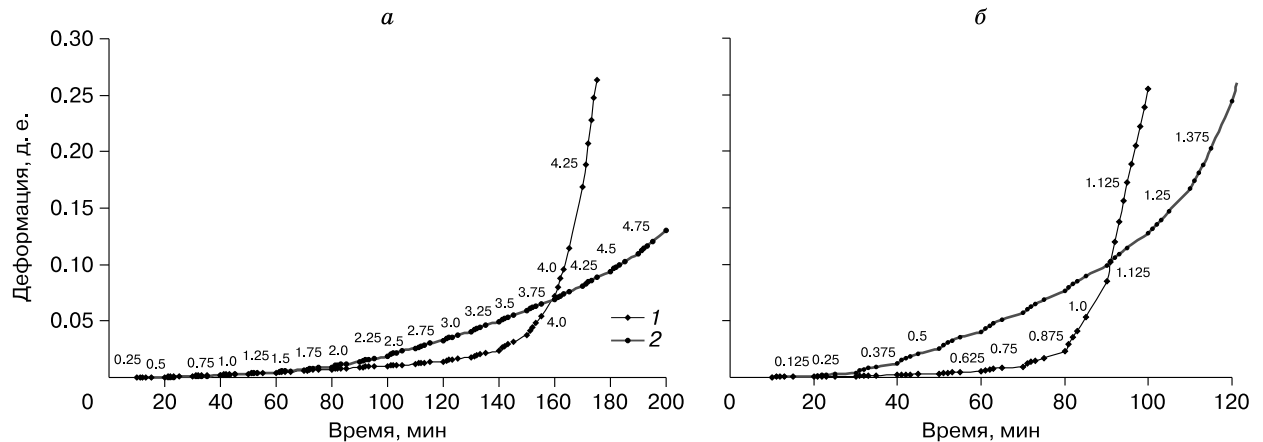


Рис. 6. Кривые ползучести мерзлой глины (1) и супеси (2) при одноосном сжатии и ступенчато возрастающей нагрузке.

Температура -7°C (а) и -1°C (б). Цифры на кривых – величина ступеней нагрузки, МПа.

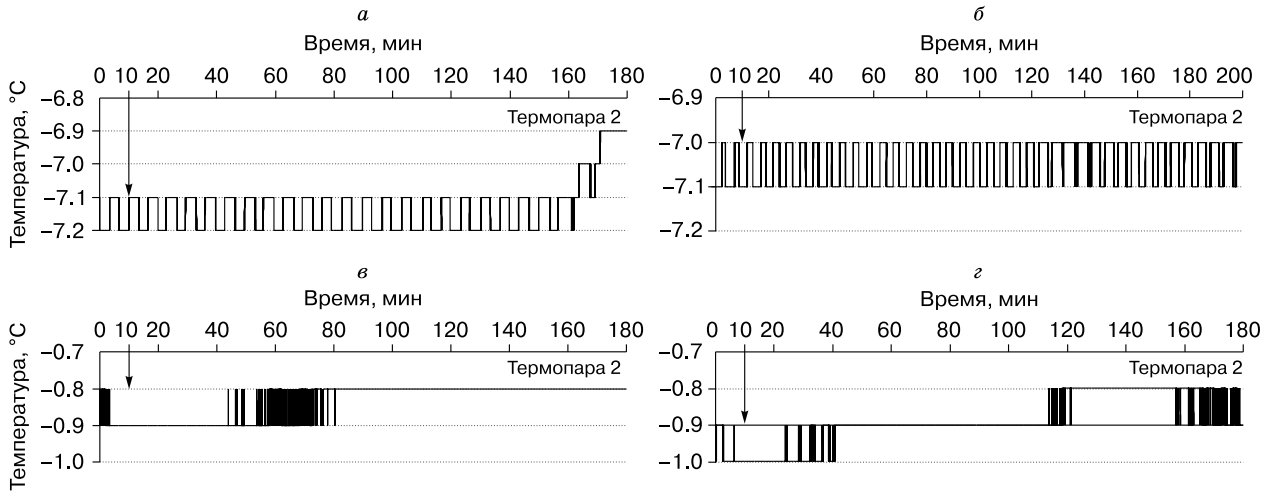


Рис. 7. Изменение температуры в центре образцов каолиновой глины (а, в) и супеси (б, г) при ступенчатом нагружении.

Начальная температура -7°C (а, б) и -1°C (в, г). Стрелкой показано начало нарушения.

це не происходило. На стадии разрушения образца (величина нагрузки более 3.75 МПа) наблюдалось повышение температуры на 0.2°C (см. рис. 7, а). При этом температура возросла во всем объеме образца. В образце мерзлой супеси, для которого не было достигнуто разрушения, изменений температуры не происходило (см. рис. 7, б).

Кривые ползучести образцов мерзлой глины и супеси, имеющих температуру -1°C , в условиях ступенчато возрастающей нагрузки представлены на рис. 6, б. Графики изменения температуры в образцах приведены на рис. 7, в, г. Из представленных на рис. 7 данных следует, что при этой температуре изменений температуры в образцах как мерзлой глины, так и мерзлой супеси практически не происходило.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученных данных испытания образцов мерзлых грунтов на одноосное сжатие показывает, что при температуре -7°C механокалорический эффект, выражающийся в повышении температуры в образцах, при быстром нагружении возникал в образцах обоих грунтов: в большей степени он проявлялся в образце супеси, в меньшей – в образце глины. При ступенчатых испытаниях указанный эффект отсутствовал, пока деформирование образцов происходило в условиях затухающей ползучести, и возникал только при их прогрессирующем течении, заканчивающемся хрупким или вязкохрупким разрушением.

При температуре -1°C механокалорический эффект проявлялся только в образце мерзлой супеси в условиях быстрого нагружения, закончившегося вязкохрупким разрушением. При пласти-

ческом деформировании и вязком разрушении образцов данный эффект не возникал в условиях как быстрого нагружения (мерзлая глина), так и ступенчатого нагружения (мерзлая глина и супесь).

Таким образом, механокалорический эффект в мерзлых грунтах при одноосном сжатии проявлялся только при хрупком или вязкохрупком разрушении образцов на стадии возникновения трещин и отсутствовал при их вязком разрушении и на стадии затухающей ползучести. Это может указывать на связь повышения температуры в образцах мерзлых грунтов с процессом трещинообразования в них.

Известно, что при росте трещины в твердых материалах вблизи ее вершины происходит разогрев материала [Партон, 1990]. Величины повышения температуры составляют 130°C для стали, 230°C для оргстекла (ПММА), 1900°C для стекла, 4400°C для кварца. Это связано с притоком энергии в вершину трещины из прилегающих участков материала, затрачиваемой на возникновение пластических деформаций и разрушение материала в непосредственной близости от этой вершины.

Связь повышения температуры в мерзлых грунтах при механическом нагружении с трещинообразованием подтверждают опыты Р.В. Максима, наблюдавшей этот эффект при испытании мерзлых грунтов вдавливанием плоского штампа под его краем, в зоне возникновения сдвиговых деформаций [Максимьяк, 1988]. В описанных выше опытах механокалорический эффект проявлялся в большей степени в твердомерзлом грунте (супесь) при минимальной температуре (-7°C) в условиях быстрого хрупкого разрушения.

Поскольку температура растет во всех точках, распределенных по объему образцов, можно сделать предположение, что их разрушению предшествует возникновение на стадии прогрессирующей ползучести во всем объеме образцов рассеянной поврежденности – микротрещин, которые при дальнейшем деформировании объединяются в магистральные трещины, и по ним происходит разрушение образцов. Небольшой температурный эффект по сравнению с твердыми телами (максимальное повышение температуры $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) связан, во-первых, с меньшей скоростью роста трещин, а во-вторых, с процессом плавления льда вблизи трещины, вызванным повышением температуры и требующим затрат теплоты, что должно приводить к понижению температуры и компенсировать механокалорический эффект.

Повышение температуры при возникновении механокалорического эффекта в мерзлом грунте должно приводить к увеличению в нем содержания незамерзшей воды, что должно ускорять прогрессирующую ползучесть, приводящую к разрушению. В то же время раскрытие микротрещин в мерзлом грунте и образование новых поверхностей должно приводить к понижению температуры на их стенках, что, в свою очередь, должно обуславливать возникновение локальных градиентов температуры в направлении вершин трещин. Это может являться одной из причин миграции незамерзшей воды из областей, прилегающих к вершинам трещин, в их полости с последующим замерзанием, что может приводить к снижению скорости прогрессирующей ползучести, упрочнению мерзлого грунта и замедлению его разрушения. Результаты, подтверждающие это предположение, приведены в работах [Волохов, 2007; Volokhov, 2008].

В заключение необходимо отметить следующее.

Наблюдаемый эффект повышения температуры в мерзлом грунте не связан с саморазогревом материала термопар, использованных для измерения температуры, под давлением от внешней нагрузки. Это следует из сравнения результатов, полученных при ступенчатых испытаниях мерзлых образцов глины и супеси при $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 6, 7). В образце мерзлой глины механокалорический эффект начал проявляться при нагрузке 4.0 МПа и относительной деформации образца 0.07 и полностью отсутствовал в образце мерзлой супеси при нагрузке 4.75 МПа и величине деформации образца 0.13.

Отверстия для термопар в образцах и сами термопары являются искусственными неоднородностями структуры мерзлого грунта и концентраторами механических напряжений и могут быть источниками зарождения трещин в грунте при его нагружении, на что косвенно указывает повышение температуры во всех точках измерения. Этот

недостаток данной методики исследований тем не менее не снижает значения вывода о роли трещинообразования в возникновении механокалорического эффекта. Как известно, в мерзлом грунте естественного сложения всегда присутствуют дефекты и неоднородности, которые при воздействии механической нагрузки могут быть источником трещин, а следовательно, описанного эффекта.

ВЫВОДЫ

1. Установлено возникновение механокалорического эффекта в мерзлых грунтах при одноосном сжатии, выражающегося в повышении температуры мерзлых грунтов.

2. Механокалорический эффект при одноосном сжатии проявляется в мерзлых грунтах только при их хрупком разрушении на стадии прогрессирующего течения и отсутствует при вязком разрушении.

3. Сделано предположение о связи повышения температуры в мерзлых грунтах с процессом трещинообразования, происходящего при их разрушении.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-05-00774-а).

Литература

- Волохов С.С.** Изменение криогенного строения мерзлых глинистых грунтов при сдвиге // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 3, с. 35–43.
- Горелик Я.Б.** Физика и моделирование криогенных процессов в литосфере / Я.Б. Горелик, В.С. Колунин. Новосибирск, Изд-во СО РАН, фил. "Гео", 2002, 317 с.
- Гречищев С.Е.** Некоторые проблемы термореологии мерзлых грунтов // Вопросы криологии Земли. М., Наука, 1976, с. 122–142.
- Гречищев С.Е.** Об основах термореологии криогенных пород // Проблемы геокриологии. М., Наука, 1983, с. 90–100.
- Гречищев С.Е.** Основы моделирования криогенных физико-геологических процессов / С.Е. Гречищев, Л.В. Чистотинов, Ю.Л. Шур. М., Наука, 1984, 231 с.
- Казакова О.В.** Изучение механокалорического эффекта в деформируемых глинистых грунтах // Изучение и прогноз криогенных физико-геологических процессов. М., ВСЕГИНГЕО, 1984, с. 86–91.
- Коновалов А.А.** Газогидраты и динамика криолитосферы при изменениях давления // Геоэкология, 1999, № 3, с. 252–259.
- Максимьяк Р.В.** Исследование структурных процессов и влагопереноса при работе мерзлого грунта под нагруженным штампом // Термодинамические аспекты механики мерзлых грунтов. М., Наука, 1988, с. 63–70.
- Партон В.З.** Механика разрушения. От теории к практике / В.З. Партон. М., Наука, 1990, 240 с.
- Volokhov S.S.** Transformation of cryogenic structure of frozen clay soils at shear // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost. Fairbanks, Alaska, USA, Inst. of North. Eng., Univ. of Alaska, 2008, p. 1863–1867.

Поступила в редакцию
26 февраля 2015 г.