Ключевые слова: деформационные характеристики, оттаивающие грунты, коэффициенты оттаивания и сжимаемости.

СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРИ ОТТАИВАНИИ

М.Н. ЦАРАПОВ, канд. геол.-минерал. наук,
П.И. КОТОВ, аспирант (МГУ)

В начале 2012 г. ОАО «Корпорация развития» сделала сообщение о том, что рассматривается возможность сооружения железнодорожной ветки к Ванкорскому месторождению вблизи Норильска, а также транспортировки углеводородов в направлении перерабатывающих предприятий и портов Северо-Запада России. Для составления проекта строительства и подсчета затрат необходимо знать геологическое строение данного района, свойства грунтов, а также учесть все негативные процессы, которые могут возникнуть при этом.

Ванкорское месторождение находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов. Территория представляет собой плоскую, слаборасчлененную аккумулятивную равнину, сложенную с поверхности мощной толщей рыхлых четвертичных отложений. Здесь выделяются два генетических типа рельефа: абразионно- и эрозионно-аккумулятивный. Климат области суровый, заполярный, среднегодовая температура воздуха −11,3 °С. В геологическом строении трассы на глубину воздействия сооружений отмечаются четвертичные отложения. Основные генетические типы грунтов представлены песками пылеватыми, по генезису относящимися к среднеплейстоценовым отложениям салехардской свиты [m,gm IIsh] морского и ледниково-морские генезиса, которые с поверхности перекрыты прибрежно-морскими отложениями верхнеплейстоценового возраста [pm IIIkz] — песками мелкими, озерно-аллювиальными (супеси) [la IIIkz] и аллювиальными отложениями (суглинки и глины) верхнеплейстоценового возраста [a IIIkr] (рис. 1). Все названия грунтов даны в соответствии с нормативными документами [5]. Грунты всех инженерно-геологических элементов содержат включения гравия и гальки до 5 %. Льдистость исследуемых грунтов изменяется в пределах 0,2—0,6 долей единицы.

При эксплуатации железнодорожных линий, построенных в криолитозоне за последние десятилетия, проявляются многочисленные деформации земляного полотна, связанные с деградацией мерзлоты. Это обусловливает необходимость постоянного исправления пути, вызывает ограничения скоростей движения поездов, значительно увеличивает эксплуатационные расходы. Главная причина деформаций — отепляющее влияние земляного полотна на мерзлые грунты основания, которые при оттаивании теряют свою несущую способность. Данные особенности не всегда в достаточной мере учитываются при проектировании и строительстве на мерзлоте, что приводит к ошибочным решениям, влекущим за собой серьезные экономические потери.

Наиболее распространенные деформации земляного полотна в условиях мерзлоты — осадки насыпей на основаниях, сложенных льдистыми грунтами, ко-

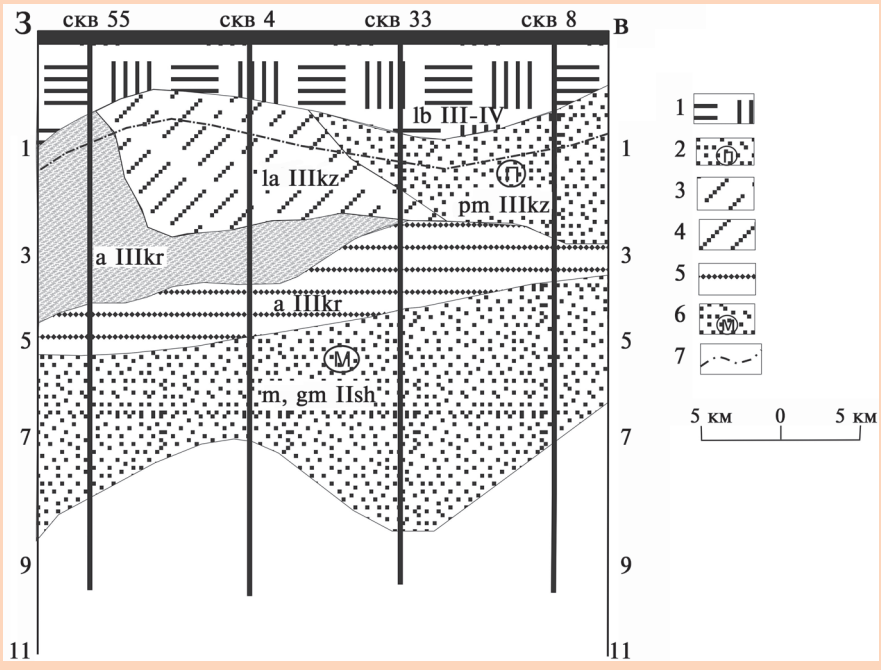

Рис. 1. Схема разреза района:
1 — торф; 2 — песок пылеватый; 3 — супесь; 4 — суглинок; 5 — глина; 6 — песок мелкий; 7 — граница многолетнемерзлых грунтов

а) б)

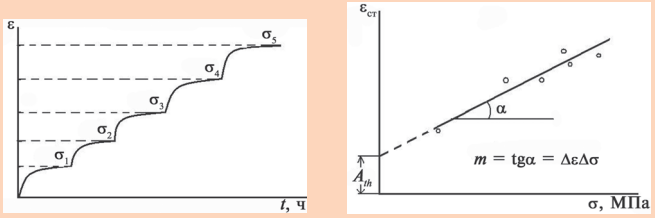

Рис. 2. Зависимость развития относительной осадки ε от времени (а) при каждой ступени нагружения, стабилизированной $\varepsilon_{ст}$ от напряжения) σ (б)

торые при оттаивании имеют III и IV категории просадочности [2]. Сооружение насыпи вызывает нарушение естественных условий теплообмена между атмосферой и грунтовым массивом:

в зоне сезонного оттаивания-промерзания слой торфа или переувлажненного суглинка заменяется на дренирующий маловлажный грунт;

уменьшается испарение и увеличивается, во-первых, инфильтрация атмосферных осадков через оголенные поверхности контура насыпи и, во-вторых, поглощение солнечной радиации поверхностями контура насыпи по сравнению с естественными ландшафтами;

ухудшаются условия стока поверхностных вод, что приводит к образованию термокарста [1].

Таким образом, при проектировании земляного полотна на мерзлоте для участков, сложенных в основании грунтами III и IV категории просадочности, необходимо учитывать изменения напряженно-деформированного состояния и теплообмена поверхности. Принимая во внимание сложные инженерно-геокриологические условия Ванкорского поднятия, очень важно определять деформационные свойства грунтов при оттаивании для расчета максимальной осадки и принятия необходимых технических решений в целях безаварийной эксплуатации железнодорожной линии.

Методика определения свойств грунтов

Основные физические характеристики исследуемых грунтов определяли в грунтовой лаборатории в соответствии с действующими нормативами [5].

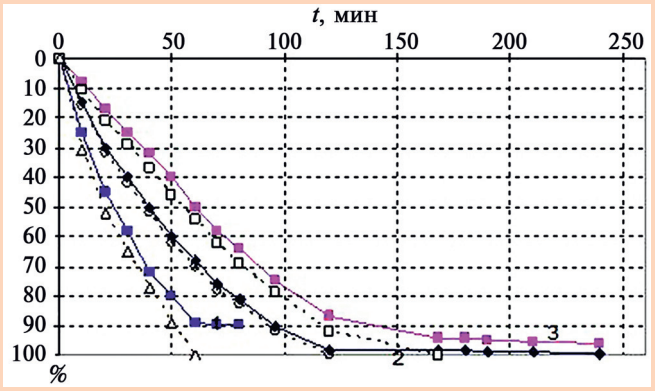

Рис. 3. Ход оттаивания (штриховая линия) и характер консолидации (сплошная) под бытовой нагрузкой:
1 — песок пылеватый; 2 — супесь текучая; 3 — суглинок текучий

Экспериментальные исследования проводили на образцах мерзлых грунтов ненарушенного сложения с природной влажностью и льдистостью.

Образцы имели форму цилиндра диаметром 71,4 мм и высотой 35 мм. Их готовили в холодильной камере (температура −3 °С) вдавливанием в керны металлических колец при помощи гидравлического пресса. Затем в холодильной камере образец переносили в рабочее кольцо прибора, предварительно охлажденного и выдержанного вместе с образцом в холодильной камере не менее 12 ч. Одометр устанавливали на станину под пресс, потом центрировали. На рычаг прикладывали кратковременную уплотняющую нагрузку, создающую максимальное напряжение.

После снятия нагрузки к образцу плавно без ударов прикладывали нагрузку первой ступени нагружения, создающее напряжение, равное давлению на глубине отбора образца: происходило его оттаивание и уплотнение, соответствующее воздействию собственного веса.

В основе эксперимента лежала стандартная методика компрессионного сжатия мерзлых грунтов при оттаивании с учетом рекомендаций, разработанных Н.А. Цытовичем и специалистами кафедры геокриологии МГУ им М.В. Ломоносова [3, 8, 12]. Процесс осадки мерзлого грунта при оттаивании исследовали в условиях сжатия без возможности бокового расширения. Для опытов использовали одометры из оргстекла, что обеспечивало тепловую изоляцию образцов по боковой поверхности и позволяло выполнять плоскопараллельное оттаивание. Линейность оттаивания достигалась благодаря относительно стабильным условиям подачи тепла на поверхность грунта. В течение всего опыта велись наблюдения за осадкой грунта во времени. По достижении полного оттаивания наблюдение продолжали до стабилизированного состояния.

Затем образец уплотняли ступенчатым нагружением. Приращение давления на последующих ступенях для глинистых грунтов составляло 0,05, для песков — 0,075 МПа. Каждую ступень выдерживали до условной стабилизации деформации (менее 0,01 мм за 12 ч).

По результатам опыта строили зависимости относительной осадки от времени (рис. 2, а) и стабилизированной от напряжения (рис. 2, б). По графикам определяли коэффициент оттаивания A_{th}, равный относительной осадке при оттаивании без нагрузки, и коэффициент сжимаемости m — отношение приращения относительной осадки к приращению напряжения (Δσ). Указанные коэффициенты вычисляли по прямой наименьшего приближения к экстремальным точкам.

Результаты исследований

В ходе экспериментов по изучению деформационных характеристик мерзлых грунтов при оттаивании было выполнено и проанализировано более ста опытов на различных видах грунтов. Продолжительность исследований составляла от 5—7 (песчаные и супесчаные грунты) до 30 сут (глинистые). Глинистые грунты характеризовались как сильнольдистые (i > 0,4).

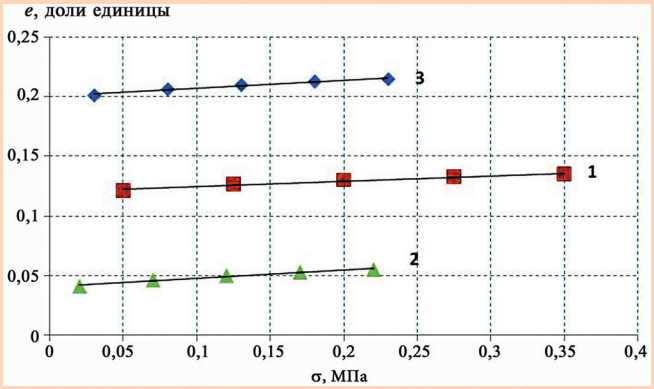

Рис. 4. Зависимость относительной осадки в процессе оттаивания от нагрузки:
1 — песок пылеватый; 2 — супесь текучая; 3 — суглинок текучий

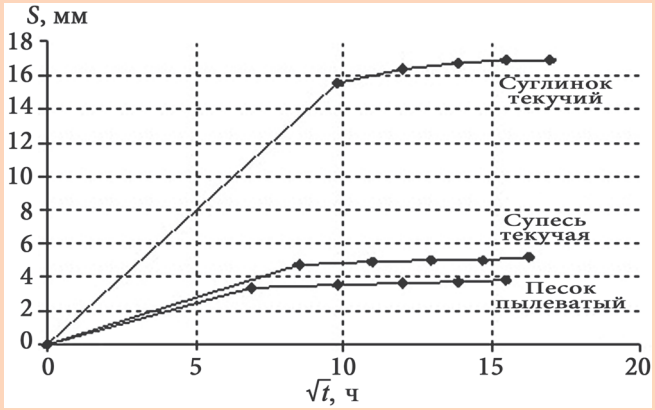

Рис. 5. Зависимость осадки при оттаивании от времени для различных видов грунтов

Несмотря на существенные различия физических свойств испытываемых грунтов, характер консолидации при оттаивании сильнольдистых грунтов остается одинаковым: осадка во времени следует за оттаиванием (рис. 3). Для всех грунтов Ванкорского месторождения характерна линейная зависимость условно-стабилизированной осадки уплотнения на каждой ступени (рис. 4), что дает основание рекомендовать для данного месторождения стандартную методику исследований в соответствии с ГОСТ 12248-96* по определению деформационных характеристик оттаивающих грунтов [10]. Для мерзлых грунтов основная осадка в условиях компрессии протекает в период оттаивания. Осадка за период оттаивания для песков пылеватых составляет 70—89 % полной стабилизированной осадки, для супесей 73—98 %, а для суглинков 73—94 %. Это в полной мере согласуется с утверждением, что прогноз протекания осадок во времени при оттаивании дисперсных грунтов должен учитывать возможность неполной консолидации, так как для такого вида грунтов скорость уплотнения под действием собственного веса меньше скорости оттаивания [13].

Анализ результатов экспериментов показал, что независимо от скорости оттаивания с момента установления стационарного теплого режима в образце графики абсолютной осадки в координатах $\sqrt{t}$ при всех нагрузках для трех видов грунтов спрямляются (рис. 5).

К моменту полного оттаивания наблюдается перегиб на графике, который свидетельствует об изменении характера данного процесса. Объяснить это можно тем, что наиболее интенсивно первичная текстура разрушается, когда давление от вышележащих слоев оттаивающего грунта воспринимается в основном водой (повышенное поровое давление). По мере отфильтровывания воды минеральные частицы грунта сближаются, возрастают контактные напряжения, и снижается поровое давление. По достижении равенства порового давления и сопротивления сдвигу связанной воды фильтрационная консолидация, а также разрушение текстуры грунта завершаются [7]. Дальше наступает стадия вторичной консолидации за счет переноса связанной воды, и происходит релаксация напряжений в поровой воде и скелете грунта — развиваются деформации ползучести.

* Действовал до 31.12.11.

Согласно данным исследований одного из авторов статьи М.Н. Царапова (2007 г.), в сильнольдистых грунтах (суглинке и глине) при влажности, близкой или равной влажности полного водонасыщения оттаивающего грунта, прикладываемая нагрузка в оттаявшем слое не полностью воспринимается поровой влагой (для всех опытов коэффициент порового давления β_w — отношение порового давления uw к приложенной вертикальной нагрузке σ — меньше единицы), что не противоречит теории фильтрационной консолидации и согласуется с представлениями профессоров Н.Н. Маслова и Н.Я. Денисова [6, 9, 11]. Причем с возрастанием нормальной нагрузки как для суглинка, так и для глины характерно уменьшение β_w. По мере оттаивания повышенное поровое давление поддерживается только вблизи границы оттаивания и полностью рассеивается в момент полного оттаивания. Характер распределения порового давление в оттаивающем образце в общем виде представлен на рис. 6.

Деформационные характеристики основных видов грунтов (песков мелкого и пылеватого, супеси, суглинка и глины), отобранных в районе Ванкорского поднятия приведены в таблице, данные которой рассчитывали в соответствии с ГОСТ 20522-96 [4].

Анализ таблицы показывает, что для каждого вида грунта природного сложения характерен широкий диапазон деформационных характеристик. Это можно объяснить следующим. При оттаивании мерз-

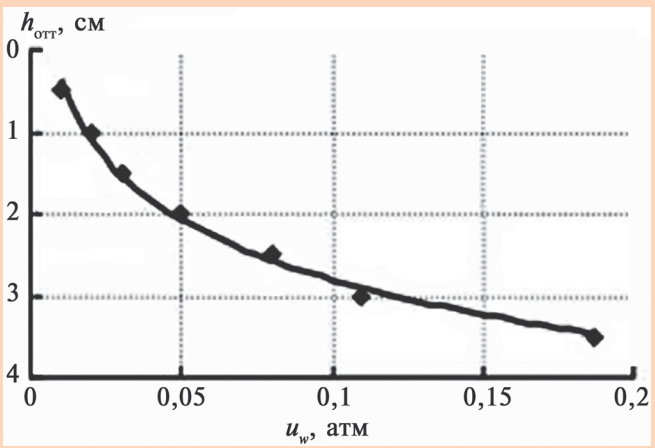

Рис. 6. Распределение порового давления по глубине оттаивающего суглинка

Средние значения деформационных характеристик оттаивающих грунтов

Вид грунта	Предел текучести W_c, доли единицы	Предельная плотность ρ_d	Коэффициент пористости e_f	Коэффициент оттаивания A, доли единицы	Коэффициент сжимаемости m, МПа$^{-1}$	Модуль деформации E, МПа
Песок пылеватый (m, gm IIsh)	0,210	1,61	0,65	0,0175	0,0208	49,3
Песок мелкий (pm IIIkz)	0,193	1,66	0,61	0,0408	0,0141	75,0
Супесь текучая (la IIIkz)	0,299	1,42	0,904	0,105	0,077	17,1
Суглинок текучий (a IIIkr)	0,544	1,06	1,715	0,2121	0,3571	3,6
Глина текучий (a IIIkr)	0,622	1,00	1,502	0,2423	0,3573	3,1

лого грунта разрушение текстуры в значительной степени зависит от фильтрационных свойств оттаивающего грунта, которые, в свою очередь, обусловлены текстурой мерзлого грунта. Поэтому деформирование мерзлых грунтов одного и того же литологического состава в значительной степени зависит от типа и вида криогенной текстуры. Если последняя горизонтально-слоистая, деформирование определяется изгибом минеральных прослоек, расположенных между шлирами льда с передачей нагрузки на воду. По мере снижения порового давления (см. рис. 6) увеличивается давление на минеральные перемычки, в результате чего текстурные элементы сближаются. Данные минеральные прослойки смыкаются в местах вытаивания ледяных шлиров.

Несколько другой характер носит процесс разрушения мерзлых грунтов сетчатой текстуры. Он заключается в сближении текстурных элементов (минеральных прослоек) и развитии пластических деформаций. При оттаивании грунтов сетчатой криогенной текстуры возрастает фильтрационная проводимость грунта, способствуя более быстрому разрушению текстуры и сближению ее элементов, что приводит к более высоким деформационным характеристикам по сравнению с грунтами слоистой текстуры.

Изучение распределения влажности показали следующее. В песках при оттаивании перераспределение влажности незначительно даже при высокой начальной влажности. В глинистых грунтах изменение физических свойств и возникновение порового давления в приконтактном слое происходит более интенсивно при приближении начального состояния грунта к полному водонасыщению. Это существенно снижает прочность оттаивающего грунта на границе оттаивания. После окончания последнего в переувлажненных грунтах влага фильтруется, агрегаты разуплотняются, размеры пор уменьшаются, увеличивается плотность, поровое давление падает до минимума.

Выводы

1. По стандартной методике экспериментально получены деформационные характеристики основных генетических комплексов мерзлых грунтов Ванкорского поднятия при оттаивании.

2. Основная осадка оттаивания в условиях компрессии протекает в период оттаивания.

3. Для всех исследованных видов грунтов характерна прямолинейная зависимость осадки уплотнения от ступенчатой нагрузки.

4. Для прогноза осадок сильнольдистых грунтов в процессе оттаивания применима теория фильтрационной консолидации.

5. Полученные данные можно использовать для прогноза осадок мерзлых грунтов при оттаивании, находящихся во взаимодействии с инженерными сооружениями, возводимыми в данном районе.

Список литературы

1. Ашпиз Е.С. Проектирование земляного полотна железных дорог в зоне многолетнемерзлых грунтов / Е.С. Ашпиз // Транспортное строительство. — 2012. — № 4. С. 18—21.

2. ВСН 61-89. Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты // ЦНИИС Минтранстроя СССР. — М.: ЦНИИС, 1990. — 208 с.

3. ГОСТ 12248-96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. — М.: Минстрой России, 1997. — 109 с.

4. ГОСТ 20522-96. Грунты. Метод статистической обработки результатов определений характеристик. — М.: Госкомитет по делам строительства, 1996. — 13 с.

5. ГОСТ 25100-95. Грунты. Классификация. — М.: Госкомитет по делам строительства, 1995. — 30 с.

6. Денисов Н.Я. Принцип эффективных напряжений и устойчивость глинистых грунтов / Н.Я. Денисов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1963. С. 5—8.

7. Ершов Э.Д. Деформации и напряжения в промерзающих и оттаивающих породах / Э.Д. Ершов. — М.: Изд-во МГУ, 1985. — 167 с.

8. Лабораторные методы исследования мерзлых пород; под ред. Э.Д. Ершова. — М.: Изд-во МГУ, 1985. — 350 с.

9. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии / Н.Н. Маслов. — М.: Высшая школа, 1968. — 629 с.

10. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов / Л.Т. Роман // М.: МАИК «Наука / Интерпериодика». — 2002. 426 с.

11. Царапов М.Н. Методика определения прочностных характеристик оттаивающих грунтов с учетом порового давления / М.Н. Царапов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2007. — № 4. С. 16—19.

12. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов/ Н.А. Цытович. — М.: Высшая школа, 1973. — 446 с.

13. Цытович Н.А., Григорьева В.Г., Зарецкий Ю.К. Исследования консолидации оттаивающих льдонасыщенных грунтов / Н.А. Цытович, В.Г. Григорьева, Ю.К. Зарецкий // НИИ оснований. — М.: Госстройиздат, 1966. — С. 97—141.

П.И. Царапов — аспирант кафедры геокриологии МГУ им. М.В. Ломоносова. E-mail: tsarapov@geol.msu.ru