



# Расчет деформаций насыпей в районах мерзлоты



Евгений АШПИЗ  
Evgeny S.ASHPIZ

Татьяна ВАВРИНЮК  
Tatiana S.VAVRINUK



*Ашпиз Евгений Самуилович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).  
Вавринюк Татьяна Сергеевна – инженер научно-исследовательской мерзлотной лаборатории, аспирант МИИТ.*

**Исследуется деформируемость насыпей на слабом оттаивающем основании в районах распространения вечномерзлых грунтов. Учет влияния теплофизических процессов, изменяющих начальное температурное поле при отсыпке насыпи, и процесса консолидации грунтов основания. Реализованы сравнительные расчеты деформируемости насыпи с использованием метода конечных элементов и разработанной трехслойной модели основания. Объект исследования – опытный участок строящейся в сложных инженерно-геокриологических условиях железнодорожной линии Томмот – Якутск.**

*Ключевые слова:* инженерная геокриология, железная дорога, насыпи на слабом оттаивающем основании, консолидация грунтов основания, трехслойная модель основания, метод конечных элементов.

**С**троительство железных дорог в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов в России диктует интерес к развитию теоретической и экспериментальной базы в этой области. Как показывает опыт возведения и эксплуатации земляного полотна, применение типовых конструкций на просадочных при оттаивании грунтах недопустимо и приводит к печальным последствиям. Специфичность грунтов основания, объясняемое циклическим изменением его состояния, является причиной сложности инженерных расчетов, цель которых правильный выбор конструкции и технологии возведения, прогноза строительных и эксплуатационных деформаций.

Изменение прочностных и деформационных характеристик грунтов в процессе промерзания/оттаивания обусловлено большим количеством факторов и остается неизменным модулятором напряженно-деформированного состояния (НДС) в основании земляного полотна. В связи с этим возникают трудности с выбором модели расчета и получением корректных результатов. А отсюда и стремление адекватно оценить деформативность насыпей на про-

садочном при оттаивании основании с использованием метода конечных элементов при расчетах по трем различным схемам.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ПРЕДПОСЫЛКИ, ДОПУЩЕНИЯ

Многие авторы [1,2,3,4] в своих трудах придают большое значение консолидационным процессам в оттаивающих грунтах и указывают на неправильность их игнорирования в стандартных методах расчета. Пренебрежение изменением во времени прочностных характеристик при консолидации грунтов становится причиной существенных ошибок в проектировании.

Несмотря на то, что в ходе экспериментальных исследований получено большое количество нелинейных зависимостей характеристик оттаивающих грунтов, учитывать весь объем параметров консолидационного процесса при деформационных расчетах оказывается технически невозможно. Ведь, как известно, нелинейный характер деформирования зависит от многих факторов, задающих грунту темп оттаивания и изменяющих его физико-механические свойства, а именно: величина и время действия нагрузки, состав грунта, его льдистость, температура и скорость ее изменения, зависящая от сезонного перепада температуры воздуха и отепляющего влияния тела земляного полотна.

На практике проектировщики часто производят расчеты, в которых задаются максимальная глубина оттаивания и наилучшие прочностные характеристики оттаявшего грунта (неконсолидированного). Такие расчеты нередко показывают потерю устойчивости насыпи, хотя в действительности этого не происходит по причине консолидации грунта по ходу его оттаивания, в результате чего рассеивается избыточное поровое давление и грунт упрочняется. С другой стороны, если задавать для всей толщи оттаивающего грунта характеристики уже упрочнившегося грунта, ре-



Рис. 1. Общая схема расчетов.

зультаты, очевидно, покажут завышенную прочность и меньшую деформативность, что также не отражает реальность поведения основания земляного полотна.

Для устранения противоречия нами предлагается трехслойная модель с подвижной границей раздела между слоями мерзлого и талого грунта; в ней задается три набора параметров для грунта основания — мерзлого, оттаивающего неконсолидированного, талого консолидированного. Размеры промежуточного слоя неконсолидированного грунта определяются из соотношения скорости оттаивания (по результатам теплотехнического расчета) и скорости консолидации грунта (по итогам лабораторных исследований).

На рис. 1 показана общая схема расчетов, а на рис. 2 приведены три метода задания модели грунта основания. Согласно им было выполнено три примера расчета, которые наглядно показывают, насколько существенной или несущественной является разница в результатах и как она может повлиять на выбор принципа проектирования земляного полотна. Расчеты были выполнены с помощью программного комплекса PLAXIS (PLAXIS b.v. company, The Netherlands), предназначенного для конечно-элементного анализа деформаций и устойчивости конструкций в проектах, связанных с геотехнической инженерией.

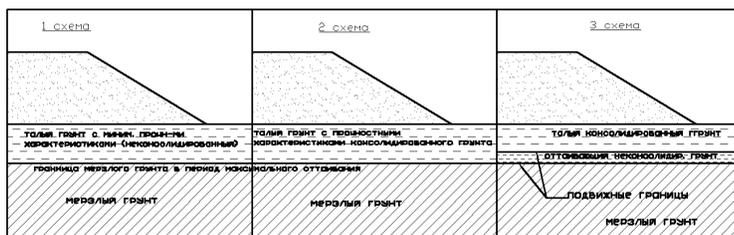


Рис. 2. Три схемы расчетов.



Свойства материала дорожной насыпи и основания

Параметры	Обозначение	Грунт тела земляного полотна	Грунт основания			Ед. изм.
		Скальный грунт с зап-лем 20% (rocky ground)	Суглинок текучий мерзлый (loam_1)	Суглинок текучий талый консолидированный (loam_2)	Суглинок текучий оттаивающий неконсолидированный (loam_3)	
Модель материала	Model	Мора-Кулона	Линейной упругости	Упрочняющегося грунта	Упрочняющегося грунта	-
Тип поведения	Type	Дренир.	Непорист.	Недрен.	Недрен.	-
Удельный вес грунта	$\gamma_{\text{unsat}}$	18,5	22,0	21,7	21,7	кН/м <sup>3</sup>
Удельный вес насыщенного грунта	$\gamma_{\text{sat}}$	21,6	-	21,7	21,7	кН/м <sup>3</sup>
Горизонт. проницаемость	$k_x$	10	-	0,005	0,005	м/сут
Вертикал. проницаемость	$k_y$	10	-	0,005	0,005	м/сут
Модуль Юнга	$E_{\text{ref}}$	50000	500000	8000	4000	кН/м <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона	$\nu$	0,27	0,13	0,33	0,35	-
Сцепление	$c_{\text{ref}}$	1	-	25	5	кН/м <sup>2</sup>
Угол трения	$\varphi$	35	-	18	5	°

Теплофизическая задача по определению движения границы оттаивания во времени решалась посредством программы «Тепло» (расчет теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами, свидетельство № 940281 Рос-АПО, 1994).

Уже общепризнано, что мерзлый грунт следует разделять на твердомерзлый и пластичномерзлый, это отражено в научных трудах, нормативных документах [6]. Так, например, в одной из своих работ [3] Ю. К. Зарецкий вводит понятие о трех зонах, образующихся, когда мерзлый грунт подвергается воздействию внешних сил и источника тепла:

- зона **A**, в которой температура грунта выше температуры фазовых переходов;
- зона **B**, где грунт находится в пластично-мерзлом состоянии;
- зона **C**, в которой грунт имеет мерзлое состояние.

Аналогично мы в своих расчетах разделили зону оттаивания, в которой происходят фазовые переходы, на два слоя – оттаивающий неконсолидированный и талый консолидированный – и реализовали расчеты, при этом в каждом слое задавалась определенная модель поведе-

ния грунта с соответствующими значениями сцепления ( $C$ , кПа), угла внутреннего трения ( $\varphi$ , град), модуля деформации ( $E$ , кН/м<sup>2</sup>), коэффициента Пуассона и др.

Характеристики грунта определялись в ходе лабораторных исследований. Для мерзлого грунта мы приняли модель линейной упругости (linear elastic), при описании которой основными показателями являются эффективный модуль упругости  $E_{\text{ref}}$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ . В оценке талого и оттаивающего грунта считали целесообразным использовать модель упрочняющегося грунта (HS), в основу которой положена гиперболическая зависимость между вертикальными деформациями и девиаторным напряжением при первичном трехосном нагружении. Описывают эту модель такие прочностные характеристики, как  $E_{50}^{\text{ref}}$ ,  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ ,  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ ,  $C_{\text{ref}}$ ,  $m$ ,  $\phi$ ,  $\psi$ . Получить их можно в ходе стабилометрических испытаний (в приборе трехосного сжатия), где:

$E_{50}^{\text{ref}}$  – модуль деформации (первичное нагружение),

$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$  – одометрический модуль (первичное нагружение),

$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  – модуль упругости при разгрузке/повторном нагружении,

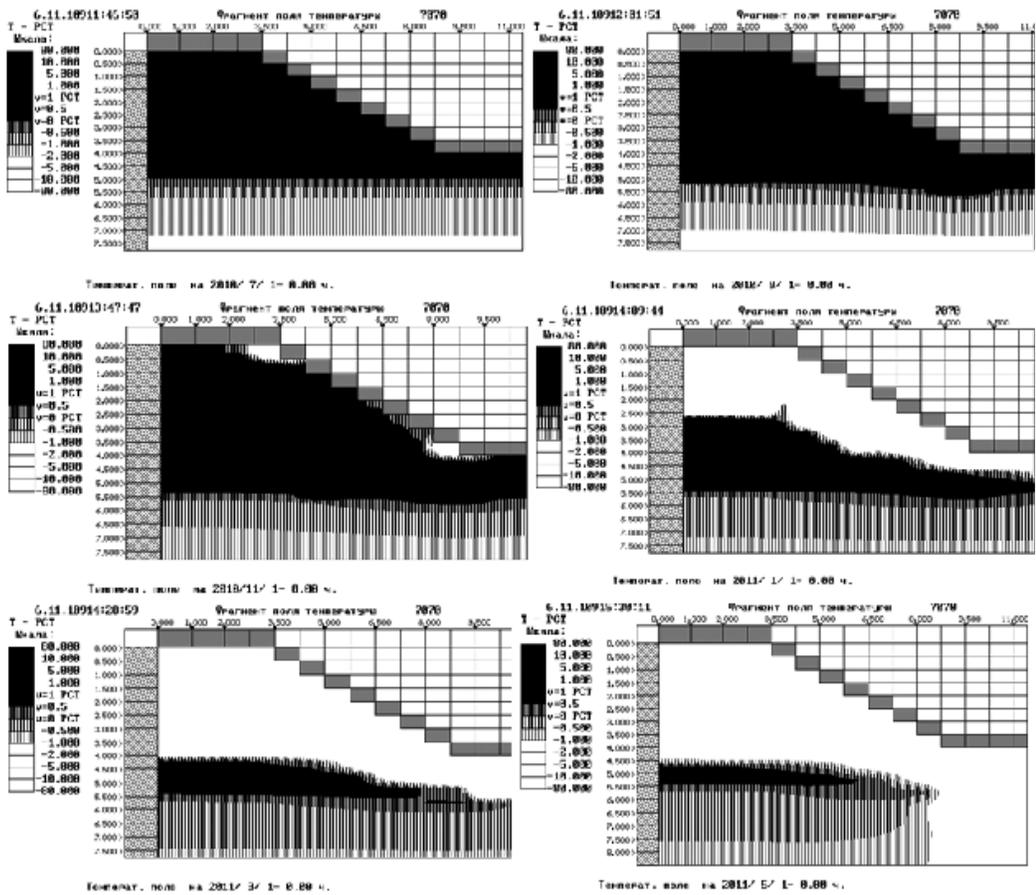


Рис. 3. Фрагменты теплотехнического расчета на 1-й год эксплуатации (Л. Н. Хрусталева, Московский государственный университет им. Ломоносова, 2009).

- $m$  — степень зависимости жесткости от напряжения,
- $C_{ref}$  — сцепление,
- $\phi$  — угол внутреннего трения,
- $\psi$  — угол дилатансии.

### ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

Расчет был проведен для условий строящейся железной дороги Томмот–Якутск. Расчетный поперечник на ПК 7070+00 принадлежит опытному участку. Насыпь высотой 4,0 м с шириной основной площадки 7,0 м и заложением откосов 1:1,5 возводится в летнее время (июнь), что неизбежно повлечет оттаивание основания земляного полотна. Основание насыпи сложено из суглинка просадочного, текучего при оттаивании и мерзлого суглинка. Поездная нагрузка прикладывалась статично. Для определения температурного поля в основании насыпи был выполнен теплотехнический расчет (рис. 3).

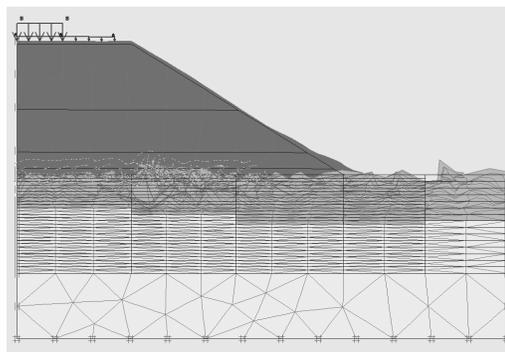


Рис. 4. Первая схема расчетов. Деформированная сетка после приложения поездной нагрузки (разрушение). Коэффициент устойчивости  $k_{уст} < 0,6$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

По первой схеме расчетов произошло разрушение модели, что отчетливо видно на деформированной сетке (рис. 4). Некоторые из результатов расчетов по второй и третьей схемам представлены в таблице 2 и рис. 5–7.



Сравнение результатов расчета по двум схемам

Показатель	2-й вариант расчета (двухслойная модель)	3-й вариант расчета (трехслойная модель)
Величина максимального горизонтального перемещения, см	0,37	48,72 (локальное разрушение подошвы насыпи)
Величина максимального вертикального перемещения, см	1,98	10,03 (локальное разрушение подошвы насыпи)
Максимальные эффективные главные напряжения, кН/м <sup>2</sup>	-78,77	-101,02
Величина максимального избыточного порового давления, кН/м <sup>2</sup>	-23,13	-21,93
Максимальное вертикальное перемещение основания (осадка), см	-0,57	-2,454
Коэффициент устойчивости откосов	1,32	1,16

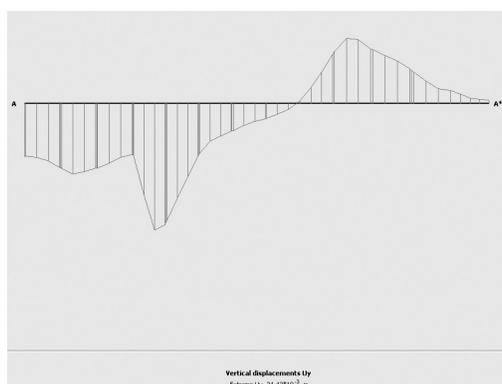
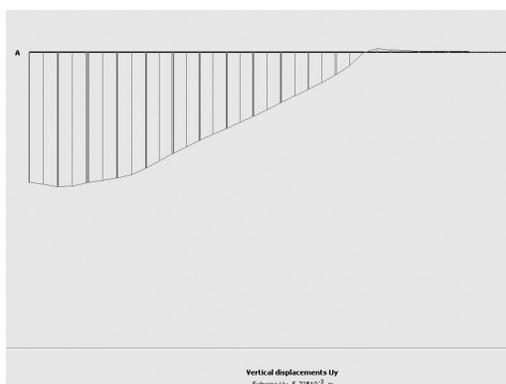


Рис. 5. Вертикальные перемещения основания (слева – расчет по 2-й схеме, величина максимального вертикального перемещения – 0,57 см; справа – по 3-й схеме, величина максимального вертикального перемещения – 2,45 см).

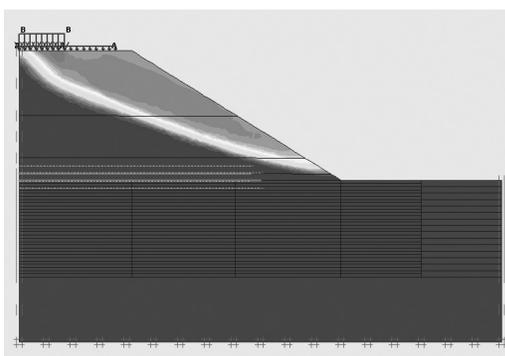


Рис. 6. Расчет устойчивости откоса насыпи при 2-й схеме расчета. Коэффициент = 1,32.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных расчетов существенно отличаются. Так, по 1-й схеме произошло разрушение модели, по 2-й мы наблюдаем наименьшие деформации. А 3-я модель дала промежуточные результаты, позволила увидеть неравномерную осадку основания, механизм разрушения подошвы насыпи и образование зоны выпора грунта основания вблизи подошвы насыпи.

Следует отметить, что рассчитанная величина осадки, приведенная в таблице 2, не включает осадку тепловую, величина которой определяется относительной просадочностью грунта и толщиной оттаявшего слоя и является базовой частью общей осадки основания.

Подчеркнем также, что приведенный пример расчета не отражает окончательный результат – мы привели расчет лишь на первый сезон оттаивания. Можно с определенной уверенностью говорить, что в последующие несколько лет глубина оттаивания будет расти (это подтверждено теплотехническими расчетами на 50 лет) в связи с утепляющим влиянием тела земляного полотна, и следовательно, разница в результатах на больший расчетный период ожидается более существенной. Это подчеркивает необходимость проведения расчетов по двум схемам – мгновенной и длительной устойчивости – при проектировании земляного полотна на оттаивающих слабых основаниях.

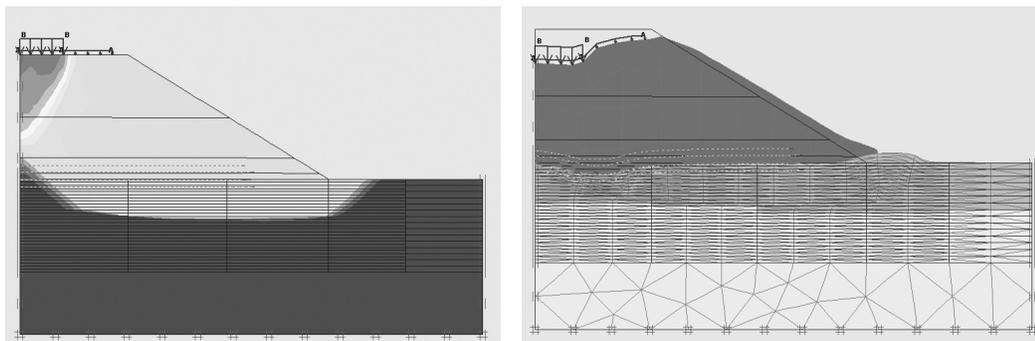


Рис. 7. Расчет устойчивости откоса насыпи при 3-й схеме расчета. Куст = 1, 16. Хорошо виден характер деформирования насыпи на момент разрушения (справа).

На наш взгляд, выполненные расчеты показали важность учета консолидационных процессов в оттаивающем основании сооружения при проектировании и требуют дальнейшего совершенствования. Правильное моделирование задачи поможет не только более корректно оценивать и прогнозировать деформативность насыпи, выбирать противодеформационные мероприятия, но и использовать ее, например, для расчетов оптимального времени консолидации грунтов основания на разных этапах строительства, чтобы обеспечить нужную устойчивость земляного полотна.

Упрощенная модель и применение современных программных комплексов делают расчеты незанимающими длительное время. А качественно разные результаты влекут за собой возможность применения других конструкций, которые помимо обеспеченной надежности сооружения могут дать и определенный экономический эффект. Сказанное не снимает,

естественно, и необходимости тщательных лабораторных испытаний грунтов для исследуемых объектов, поскольку описанные расчеты очень жестко привязаны к реальному месту.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1973.
2. Хрусталева Л. Н. Основы геотехники в криолифтоне: Учебник. – М.: МГУ, 2005.
3. Зарецкий Ю. К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. – М.: Стройиздат, 1988.
4. Цытович Н. А., Григорьева В. Г., Зарецкий Ю. К. Исследования консолидации оттаивающих льдонасыщенных грунтов//Основания и фундаменты. – М., 1966.
5. Ашпиз Е. С. Мониторинг эксплуатируемого земляного полотна. Теоретические основы и практические решения/Дис... док. техн. наук. – М., 2002.
6. Численные методы расчетов в практической геотехнике: Сб. статей научно-технической конференции/СПбГАСУУ. – СПб., 2012.
7. Хрусталева Л. Н. Прогноз динамики границы промерзания-оттаивания в основании и теле земляного полотна на опытных объектах железнодорожной магистрали Томмот–Якутск/Отчет. – М.: МГУ, 2009.
8. СП 25.13330.2011. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. ●

## COMPUTATION OF DEFORMATIONS OF EMBANKMENTS IN PERMAFROST AREAS

**Ashpiz, Evgeny S.** – D.Sc. (Tech), professor, head of the department of track and track facilities of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

**Vavrinnuk, Tatiana S.** – engineer of research permafrost laboratory, Ph.D. student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

The authors study deformability of embankments on weak thawing out beddings in the areas of permafrost soils. They consider impact of thermal physic processes, which change the initial temperature field during filling of embankment, and of the process of consolidation of the foundation soil. They propose comparative computation of deformability of embankments with the use of finite element method and of their own three-layer model of bedding. The method is used for the study of a test section of railway Tommot – Yakutsk, built in difficult engineer and cryopedological conditions.

**Key words:** engineering cryopedology, railway, embankments, thawing out bedding, consolidation of foundation soil, three-layer model of foundation, finite element method.

Координаты авторов (contact information): Ашпиз Е. С. – geonika@inbox.ru, Вавринюк Т. С. – tanyaوخ@list.ru.

