

Вторушин В.Н., к.т.н., заместитель генерального директора по инновационной деятельности и научно-исследовательской работе ОАО «ПИиНИИ ВТ «Ленаэропроект», Санкт-Петербург.

Вавринюк Т.С. к.т.н., инженер-геотехник ООО «Миакон», Санкт-Петербург.

Федоренко Е.В. к.г.-м.н., гл. инженер, ООО «Миакон», Санкт-Петербург.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТТАИВАНИЯ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ ВСЛЕДСТВИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В РАЙОНАХ СО СЛОЖНЫМИ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ СВЯЗАННЫХ С ЭТИМ ПРОЦЕССОМ ДЕФОРМАЦИЙ

В последние годы уделяется особое внимание потеплению климата в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (далее ММГ) и необходимости учета изменений климата при проектировании транспортных и других сооружений. В вопросе о глобальном потеплении климата ученые так и не пришли к единому заключению, однако факт существенного изменения климата в последнее время признан многими исследователями. В работе [1] в качестве примера приводится негативное влияние изменения климата на эксплуатационное состояние одного из аэродромов, расположенного в арктической зоне РФ. *Повышение среднегодовых температур приземной части воздуха за период с 2004 по 2007 г. по сравнению с климатическими показателями, приведенными в СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» и принимаемые для теплотехнического расчета протаивания аэродромных конструкций, составило более 1 °С. Возросла также продолжительность годовых периодов с положительными температурами воздуха. Это привело к ежегодному увеличению теплового воздействия на грунтовое основание аэродрома, в т.ч. на верхнюю кровлю ММГ, ее растеплению и увеличению толщины деятельного слоя. В результате на отдельных участках аэродрома заложенная проектом в начале 50-х гг. толщина термоизолирующей насыпи стала недостаточной. Это обусловило протаивание льдистых ММГ, а на отдельных участках вызвало дополнительное обводнение основания, разуплотнение грунтов и снижение их несущей способности, образование просадок плит покрытия аэродрома с появлением недопустимых по величине*

уступов. Проведенными исследованиями было установлено, что основной причиной снижения несущей способности участков аэродромных покрытий, включая просадки плит, а также роста дефектов на покрытиях явилась продолжающаяся тенденция потепления климата в арктическом регионе страны.

Анализ имеющихся данных по многолетним мониторинговым наблюдениям (данные из статей журнала «Криосфера Земли») о потеплении [2,3] показывает, что в течение последних сорока лет зафиксированы тренды повешения температуры воздуха в районах Западной Сибири и Севера, обусловленные влиянием климата и техногенным воздействием (таблица 1). С повышением температуры воздуха связано устойчивое увеличение мощности сезонно-талого слоя (далее СТС) грунтов. Удаление растительности на торфяниках приводит к формированию на его месте болот. Кровля ММГ под этими болотами понижается до 2-3 м, а температура пород повышается [4].

Таблица 1

Зафиксированные повышения температуры воздуха (T_B) за 1961–2003 (2005) г. на севере России по данным мониторинга климата и криолитозоны [3].

Регион	Число пунктов	Повышение T_B за 1965–2005 гг.
Европейский Север	6	1,2
Север Западной Сибири	6	1,8
Средняя Сибирь	7	1,8
Якутия	10	2,1
Южная Сибирь	4	2,0
Прибайкалье, Забайкалье	3	1,7

Повышение среднегодовых температур может оказать большое влияния на сооружения, возведенные на ММГ. Известно, что сооружения в криолитозоне возводятся по двум принципам – с сохранение мерзлого грунта в основании в течение всего периода эксплуатации (I принцип) или с допущением оттаивания грунта основания на некоторую расчетную величину (II принцип). Толщина отсыпаемых слоев сооружений рассчитывается на основе соблюдения данных принципов, и от этого зависит надежность конструкции. Повышение среднегодовых температур, которое не учитывалось при проектировании, может вызвать дополнительное оттаивание грунтов основания, что в свою очередь может повлечь за собой крайне

негативные последствия – обводнение основания, недопустимые деформации, потеря его несущей способности. В статье [5] показано, что потепление на севере Западной Сибири по сравнению с климатической нормой 1960-1990 гг., привело к уменьшению несущей способности оснований зданий и сооружений в среднем по региону на 17%, в некоторых районах до 45%. В этой же статье приводятся данные, что, по некоторым оценкам, температура ММГ на глубине нулевых годовых колебаний увеличилась на 0,5 – 2,0% за последние 20-30 лет в целом по криолитозоне России. Вызывают большой интерес работы проф. Л.Н. Хрусталева (МГУ, кафедра Геокриологии), который рассчитал несущую способность типичных фундаментов в г. Якутске и пришел к выводу, что увеличение среднегодовой температуры воздуха на 1,5°C может привести к разрушению практически всех фундаментов в этом городе.

Для прогнозирования оттаивания грунтового основания вследствие изменений климата в районе со сложными природно-климатическими условиями в качестве примера рассмотрен тепловой расчет конструкции аэродромного покрытия. Для показательного сравнения выполнено 2 расчета – при начальных климатических параметрах, принимаемых согласно нормам [7] или по имеющимся данным метеостанций, и с учетом гипотетического повышения среднегодовой температуры воздуха на +1,5 °С, для того чтобы выявить, как скажется потепление на конструкцию сооружения. Численное моделирование теплофизических процессов в грунтах выполнено в программно-вычислительном комплексе *GeoStudio 2007* с использованием модуля *TEMP/W*, предназначенного для анализа изменения температуры в грунтах с учетом таких факторов, как природно-климатические условия, теплофизические свойства грунтов, влияние теплоизолирующих прослоек, толщина снежного покрова и др. В качестве граничных условий приняты климатические данные, характерные для условий полуострова Ямал. Этот регион был выбран для расчета, исходя из той информации, что по результатам исследований [3] западная часть севера Западной Сибири испытала более серьезное потепление. Например, среднегодовая температура воздуха на п-ове Ямал и п-ове Тазовский повысилась на 0,8-1,1 °С, а максимальное потепление характерно для дельты реки Обь и южных районов Тазовского п-ова, включая Тарко-Сале, Уренгой, север п-ова Ямал. За дату начала моделирования принято 01 ноября.

Принималось, что естественное основание должно сохраняться в постоянном

мерзлом состоянии (I принцип). Для этого рассчитывались необходимые толщины слоев покрытия и теплоизоляции (рисунок 1).

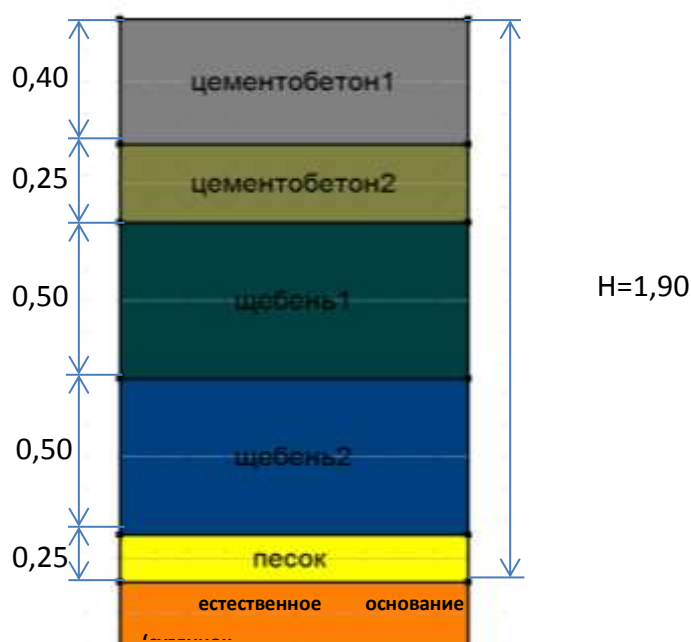


Рисунок 1- Конструкция аэродромного покрытия

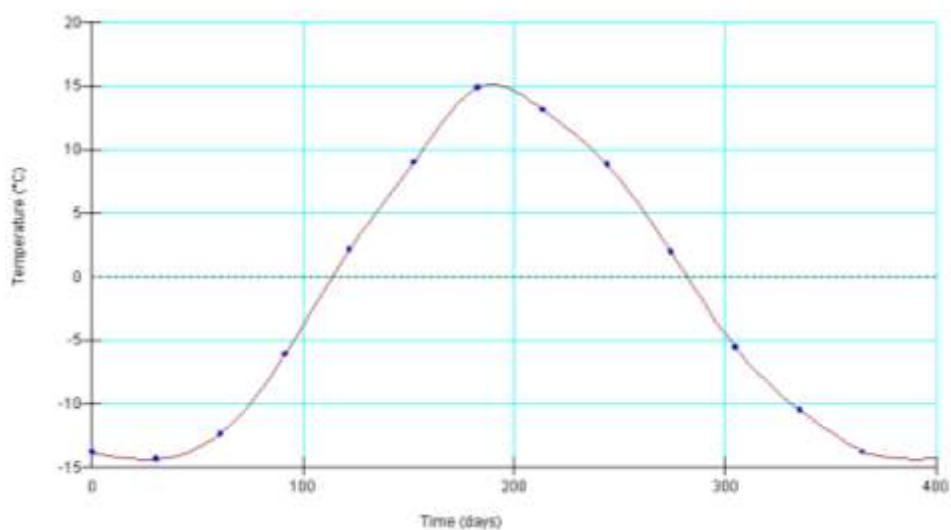


Рисунок 2 – График среднемесячных температур на поверхности покрытия (без учета потепления)

На рисунке 3 приведен ход температур в нижнем слое основания сооружения после без учета потепления. Как видно, основание находится в мерзлом состоянии в течение всего времени, что соответствует I принципу возведения сооружения.

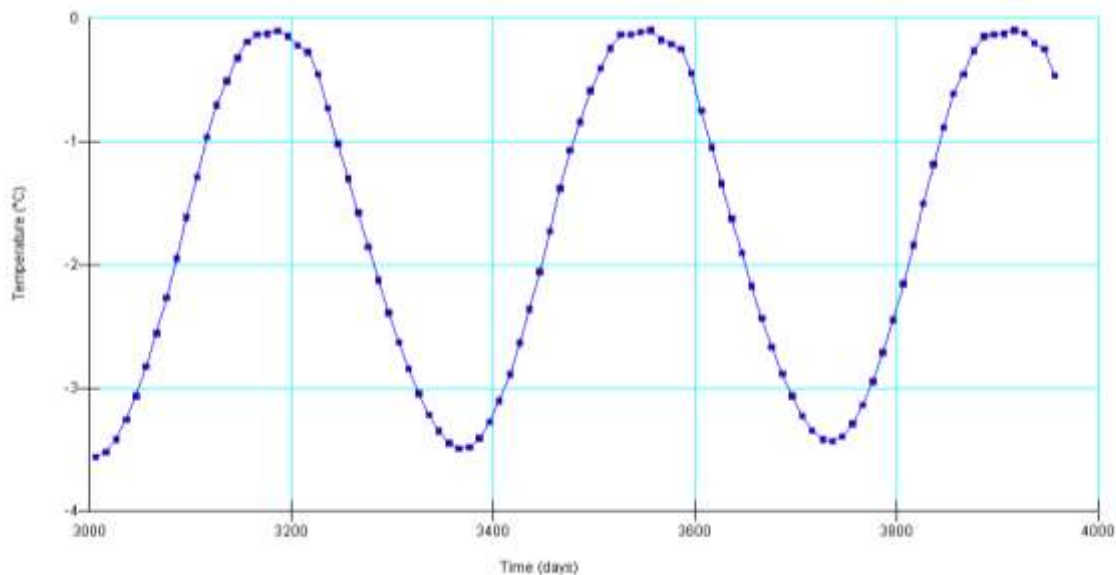


Рисунок 3 – Ход температур в нижнем слое аэродромного покрытия

Максимальная температура в основании покрытия – минус $0,10^{\circ}\text{C}$. Нулевая изотерма в период максимального оттаивания проходит на глубине 1,85 м, т.е. на 5 см выше основания аэродромного покрытия (рис.4).

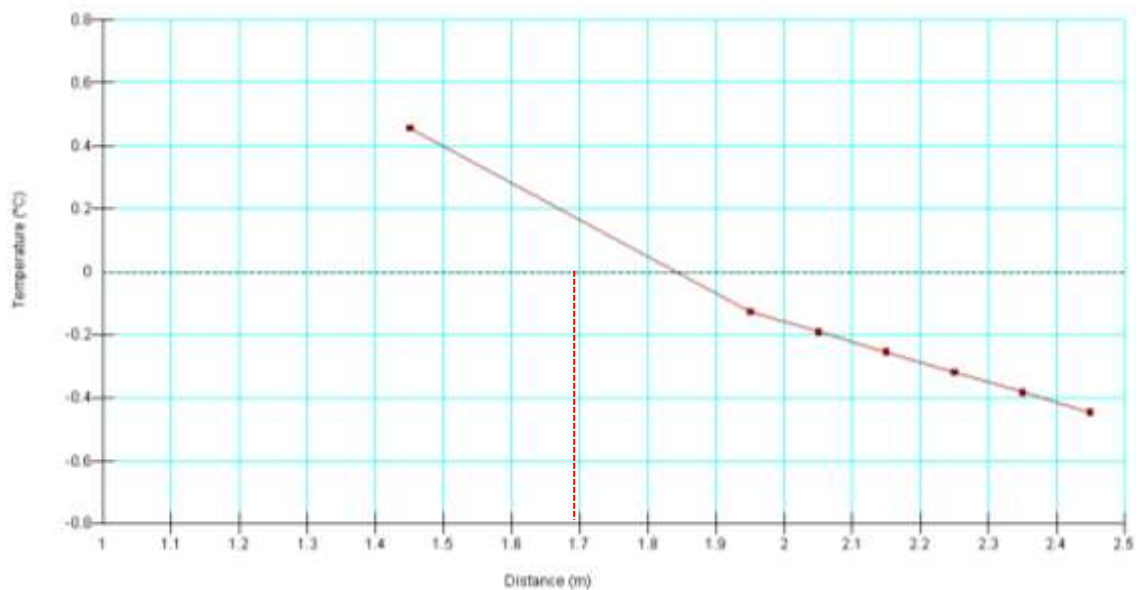


Рисунок 4 – Максимальная глубина сезонного оттаивания до потепления – 1,85 м.

После ввода фазы расчета с верхними граничными условиями с учетом повышения среднегодовой температуры на $1,5^{\circ}\text{C}$ продолжительностью в 1 год получены следующие результаты: при том, что до искусственного потепления основание находилось в мерзлом состоянии, после него температура грунта в основании повысилась, а максимальная глубина сезонного оттаивания составила 1,97 м (рис.5), т.е. естественное основание оттаяло на 7 см, а общая величина оттаивания – на 12 см.

Максимальное оттаивание приходится на сентябрь.

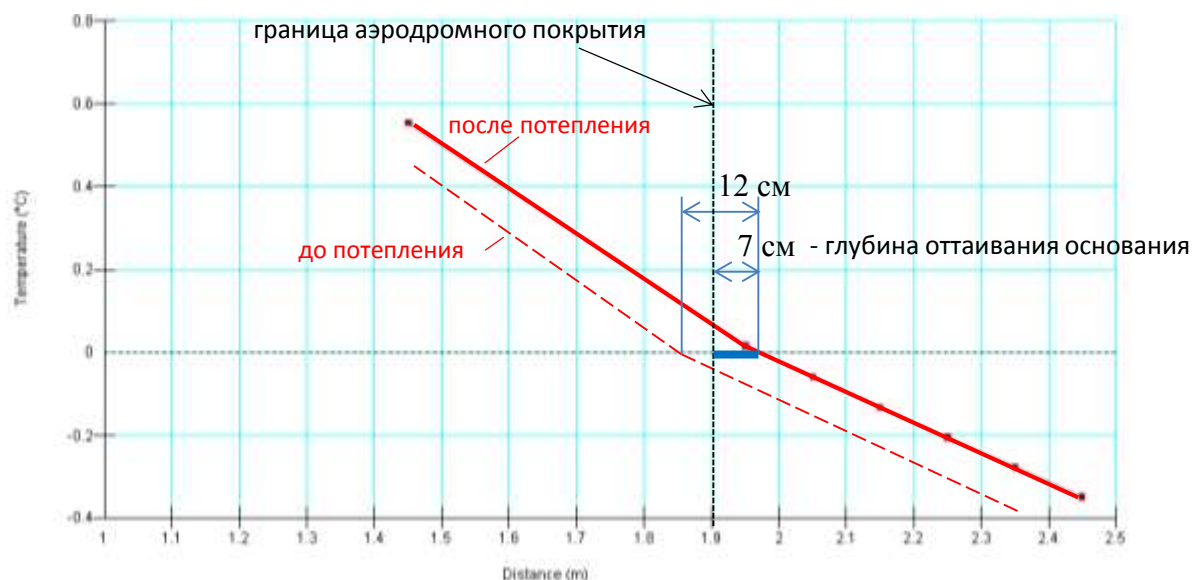


Рисунок 5 – Распределение температур по глубине в период максимального оттаивания: сплошная линия – после потепления через 1 год, пунктиром - до потепления

Расчет с учетом потепления в течение 10 лет (рис.6) показал, что повышение температуры основания аэродромного покрытия (ΔT) = +0.16 град. Максимальная глубина сезонного оттаивания ($H_{от}^{макс}$) при этом составит 2,03 м (рис. 7), т.е. опустилась на 13 см ниже основания и на 18 см ниже начального положения.

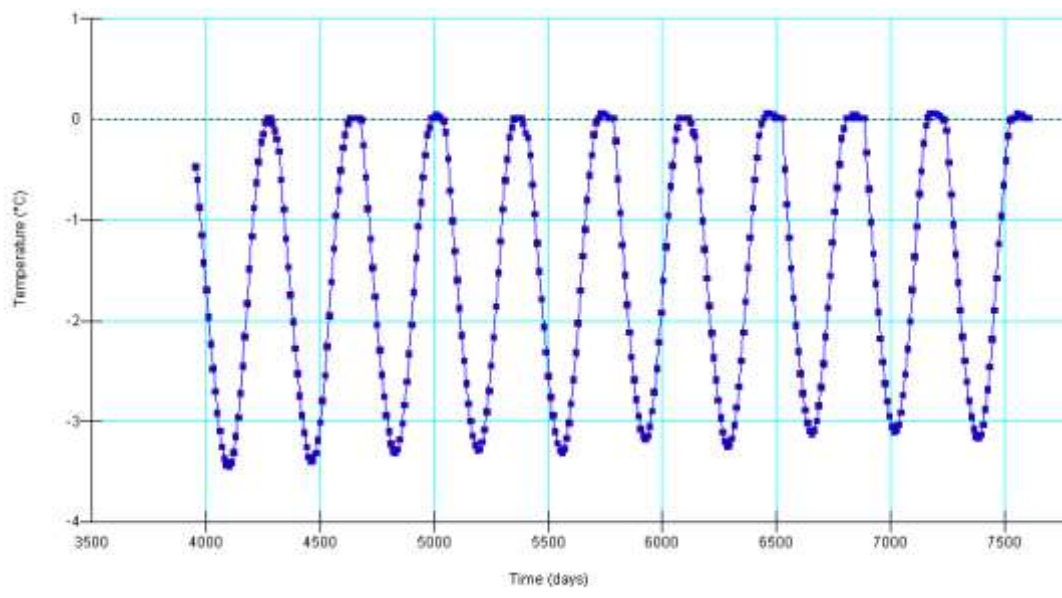


Рисунок 6 – Ход температур с учетом потепления

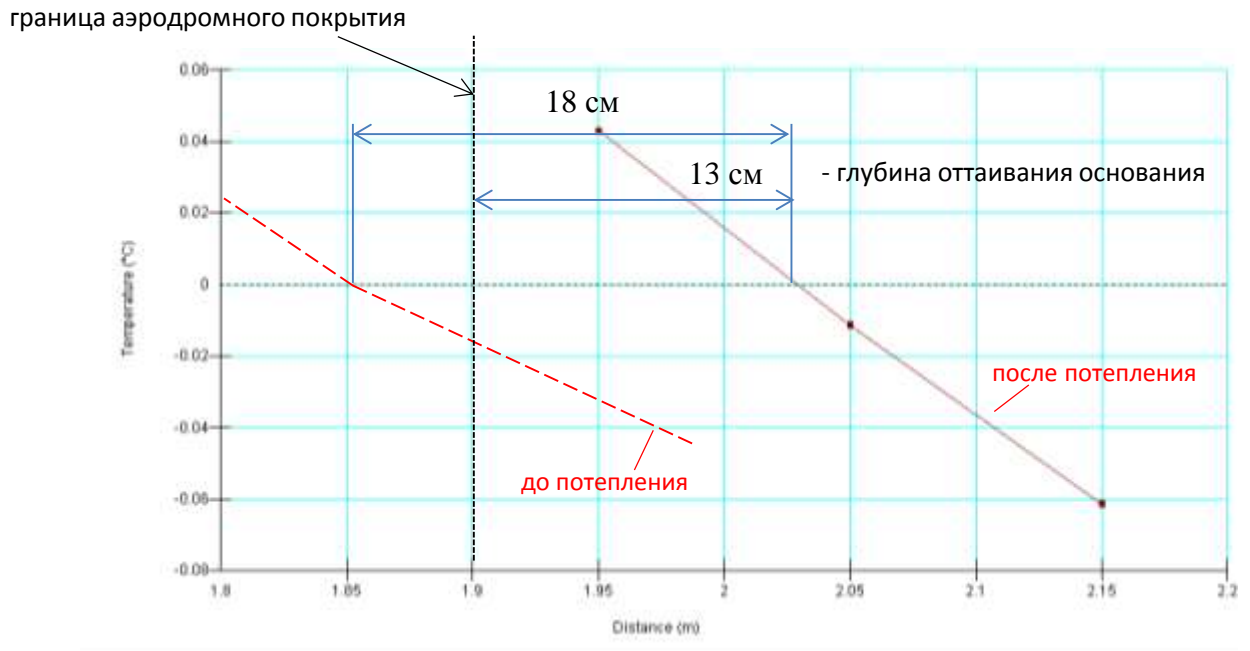


Рисунок 7 - Распределение температур по глубине в период максимального оттаивания: сплошная линия – после потепления через 10 лет, пунктиром - до потепления

Можно прогнозировать, что протаивание льдистого мерзлого грунта основания, в данном случае суглинка текучепластичного, приведет к обводнению основания, разуплотнению грунта и, как следствие, потере его несущей способности. Динамическая нагрузка также будет оказывать влияние на накопление остаточных деформаций. Таким образом, для учета возможного потепления климата и предупреждения деформаций, связанных с протаиванием льдистых слоев основания сооружения, при проектировании необходимо увеличивать толщину отсыпаемых слоев одежды и/или теплоизоляции.

В качестве альтернативного решения для повышения несущей способности основания в случае возможного растепления грунта может рассматриваться укладка геосинтетического материала, обладающего необходимой прочностью и жесткостью, с той точки зрения, что геосинтетическая прослойка может ограничить накопление остаточных деформаций, снижая деформации сдвига. Для изучения того, как может геосинтетическая прослойка влиять на несущую способность основания, были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния с использованием МКЭ в программном комплексе PLAXIS. Толщина слабой оттаявшей прослойки грунта основания в задаче был принят толщиной 15 см.

Результаты моделирования показали, что происходит накопление точек пластических деформаций (в которых условие прочности грунта нарушено) в слабом оттаявшем слое основания. В этих же условиях при применении геосинтетической прослойки, уложенной под аэродромным покрытием, этих точек не наблюдается (рисунок 8). Одновременно можно наблюдать существенное снижение сдвиговых деформаций и приращения общих деформаций с применением армирования (рисунок 9-10).

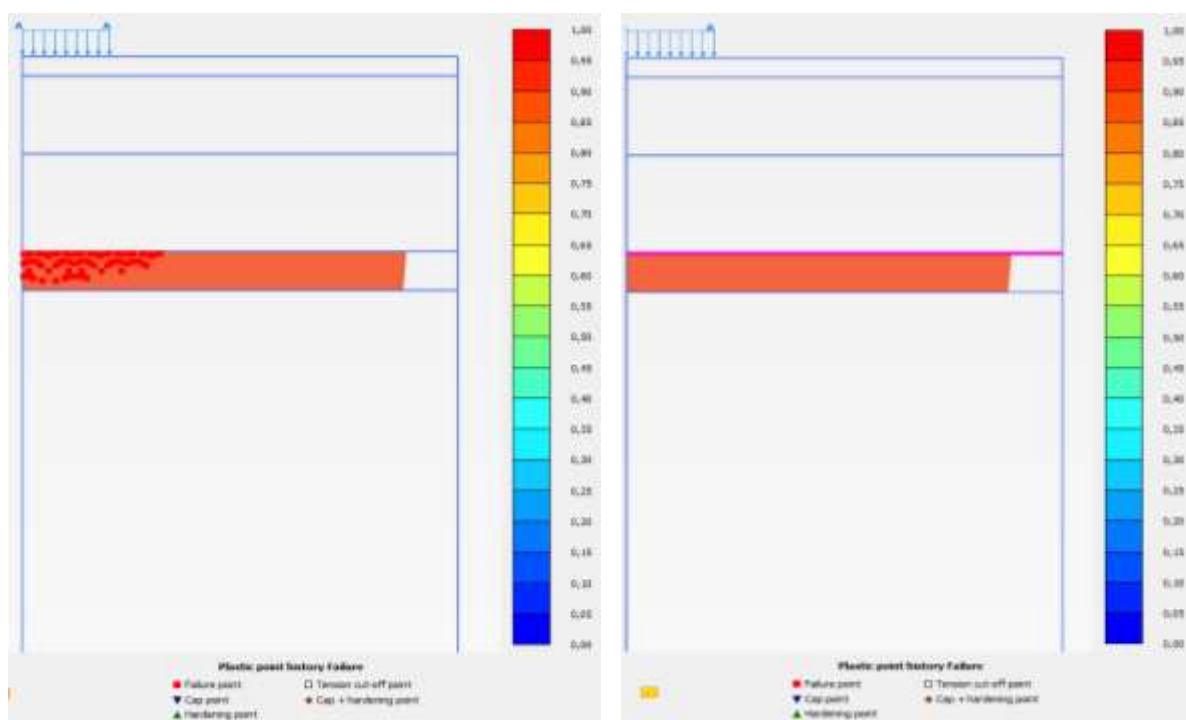


Рисунок 8 – Точки пластических деформаций: слева – без геосинтетической прослойки, справа – с геосинтетической прослойкой (все слои, кроме оттаявшего отключены)

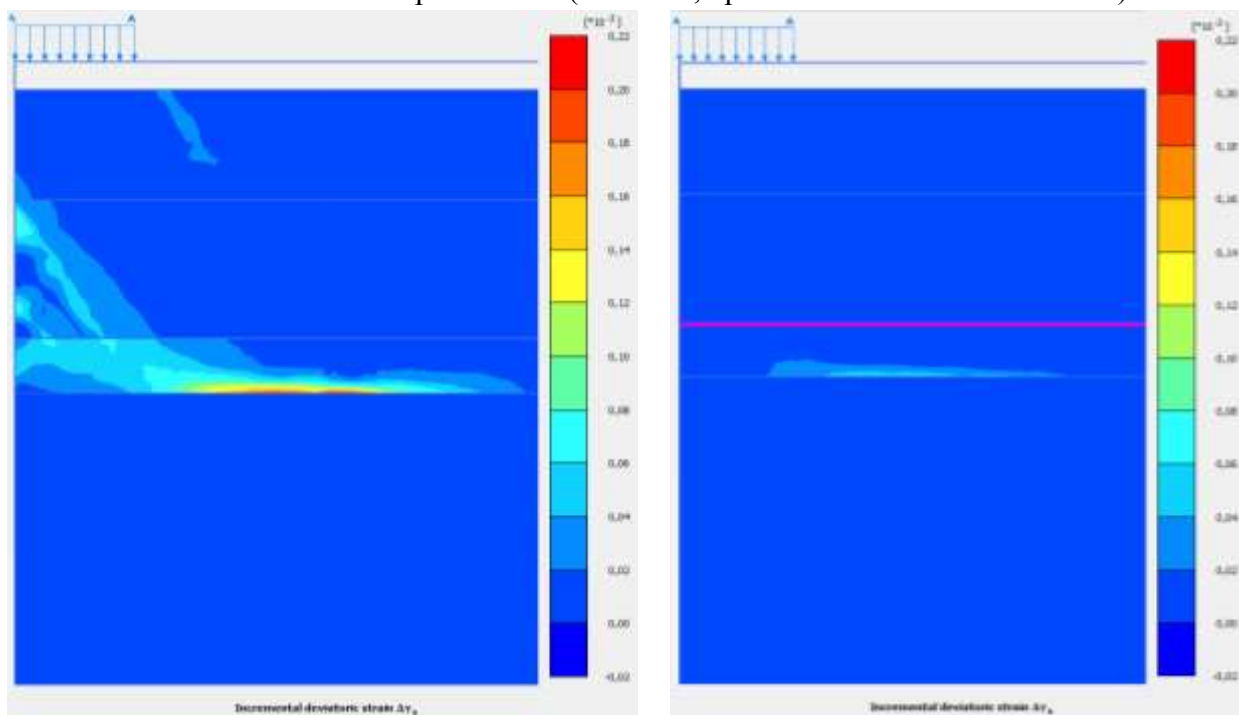


Рисунок 9 – Приращения сдвиговых деформаций (в одинаковой масштабной шкале): слева – без геосинтетической прослойки, справа – с геосинтетической прослойкой (верхний слой отключен)

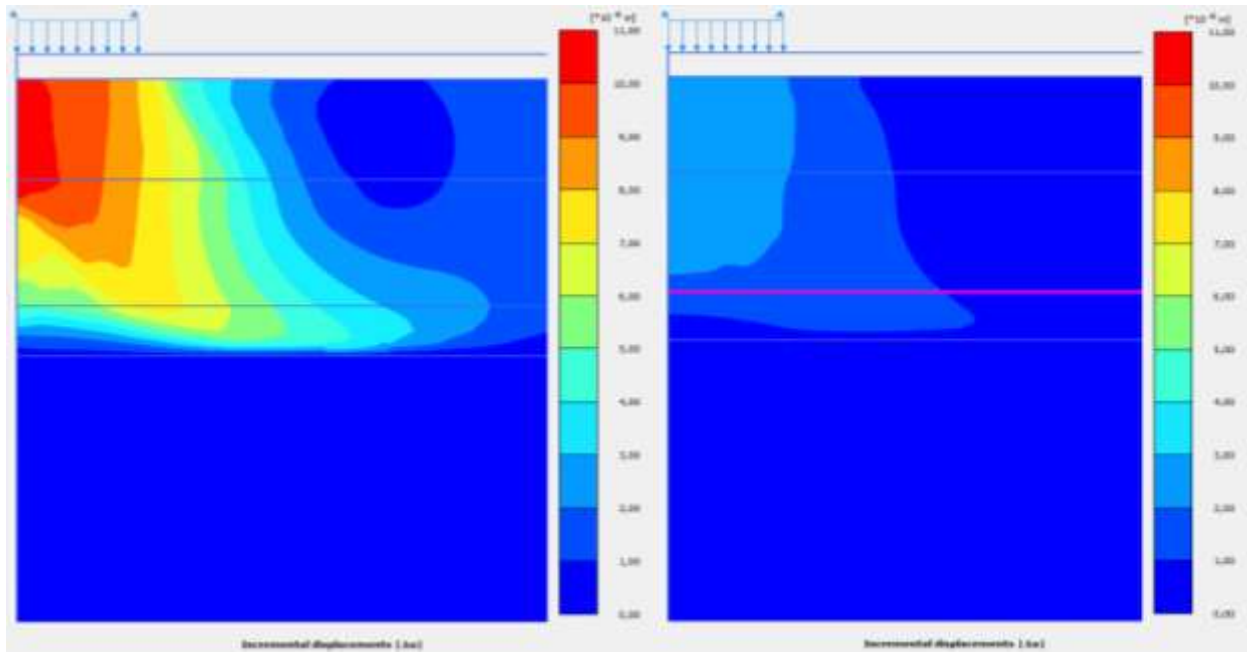


Рисунок 10 – Приращения перемещений (в одинаковой масштабной шкале): слева – без геосинтетической прослойки, справа – с геосинтетической прослойкой (верхний слой отключен)

На рисунке 11 показана огибающая поверхности разрушения грунта основания, описывающая уравнение Кулона-Мора, и траектория нагружения (точка А в грунте основания в сечении под нагрузкой) в грунтовом основании в p - q координатах. Как видно из построений, при $p=53$ кПа рассматриваемая точка переходит в пластическое состояние. Совокупность этих точек и показана на рисунке 8. Вторая линия соответствует траектории напряжений в армированной конструкции.

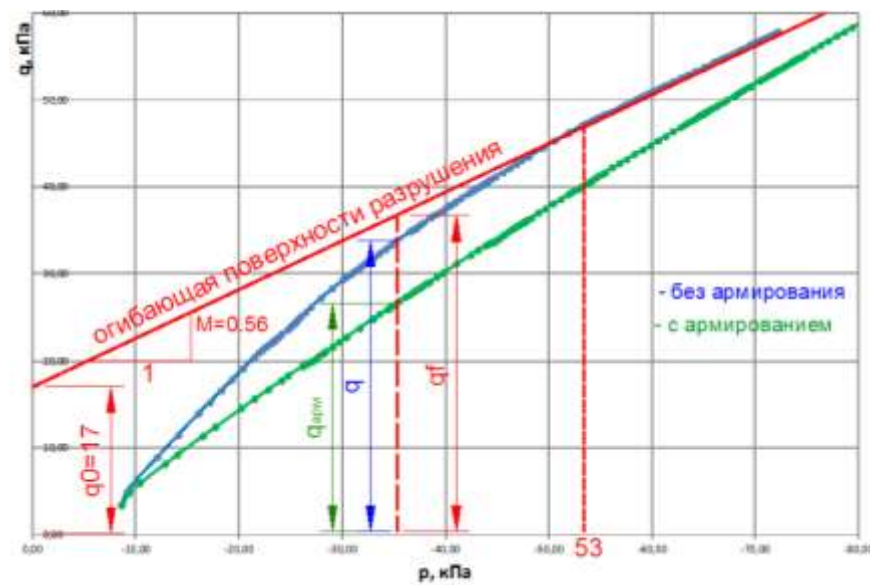


Рисунок 11 - Огибающая поверхности разрушения грунта основания и траектория нагружения т.А в грунтовом основании в p - q координатах

Наличие геосинтетической прослойки, приводит к изменению напряженно-деформированного состояния (в данной статье этот момент детально не рассматривается в виду большого объема первой части) снижая касательные напряжения, что обеспечивает уменьшение зоны пластических деформаций. Таким образом, установлено, что ограничение сдвиговых деформаций (отсутствие зон пластических деформаций), являющееся главным мероприятием по снижению колебности, может быть осуществлено с помощью геосинтетических материалов, которые благодаря своей жесткости (малое удлинение при растяжении) могут компенсировать (воспринимать) касательные напряжения. Оценка влияния на сдвиговые деформации осуществляется на основе взаимосвязи между остаточными деформациями и прочностью грунта, которая определяется величиной **интенсивности отказов R** , представляющей собой отношение между текущим девиаторным напряжением и девиаторным напряжением при разрушении (q/q_f).

Геотехнические программные комплексы позволяют оценивать прочность грунтов более простым способом. Отношение мобилизованного или текущего максимального значения сопротивления сдвигу τ_{mob} (т.е. радиус круга напряжений Мора или полуразность максимальных главных напряжений) к максимальному значению напряжения сдвига τ_{max} в случае, когда круг Мора расширен до момента касания огибающей кривой разрушения Кулона, в иностранной терминологии называется относительным напряжением сдвига τ_{rel} . По сути эта величина является величиной, обратной коэффициенту стабильности K_{stab} , используемой в отечественной механике грунтов.

Учитывая результаты многочисленных зарубежных исследований, согласно которым остаточные деформации зависят от количества проездов [8], снижение интенсивности отказов R (или увеличение обратной величины - коэффициента стабильности K_{stab}) позволяет повысить сдвигоустойчивость и, следовательно, уменьшить вероятность возникновения остаточных деформаций, что обеспечит длительную надежную эксплуатацию сооружения.

Заключение

В условиях очевидной нестабильности климата проектирование конструкций, в том числе аэродромных одежд, в районах со сложными природно-климатическими особенностями требует принятия предупреждающих мер по обеспечению надежной эксплуатации. На этапе проектирования и строительства проблема снижения прочности основания в результате процессов потепления может быть решена, наряду с другими способами, путем армирования основания аэродромных одежд. Однако обоснование этого мероприятия требует выполнения прогнозных теплофизических расчетов и численного моделирования напряженно-деформированного состояния.

Результаты выполненных расчетов качественно показали существенное влияние геосинтетической прослойки на НДС основания при задании слабой оттаявшей прослойки грунта с низкими прочностными характеристиками.

Список использованной литературы:

1. В.Н. Вторушин. Новый подход к проектированию и строительству аэродромов арктической зоны в условиях изменяющегося климата.
2. А.А. Васильев, Д.С. Дроздов, Н.Г. Москаленко. Динамика температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в связи с изменениями климата. Институт криосферы Земли СО РАН, Тюмень...
3. А.В. Павлов. Тренды современных изменений температуры почвы на Севере России. Институт криосферы Земли СО РАН, Тюмень...
4. Н.Г. Москаленко. Изменения криогенных ландшафтов Северной тайги Западной Сибири в условиях меняющегося климата и техногенеза. Институт криосферы Земли СО РАН, Тюмень...
5. Д.А. Стрелецкий и соавт. «Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на Севере Западной Сибири»...
6. СП 121.13330.2012 Аэродромы. Актуализированная версия СНиП 32-03-96
7. СНиП 23-01-99. Строительная климатология
8. Leena Korkiala-Tanttu. Calculation method for permanent deformation of unbound pavement materials. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki University of Technology (Espoo, Finland) on the 30th of January, 2009.
9. Вавринюк Т.С. Оценка устойчивости и деформативности земляного полотна железных дорог в условиях распространения мерзлоты. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. Канд. тех. наук Москва - 2013