

---

# Геотехнические проблемы в инфраструктурных линейных мегапроектах

Яссер Эль Моссаллами<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Факультет геотехники, Университет Аин Шамс, Египет, yasser\_elmossallamy@eng.asu.edu.eg,

**Аннотация.** Геотехника играет важную роль в развитии конкурентоспособной устойчивой инфраструктуры. Общее предельное состояние (ULS) описывает вероятность разрушения и надежность сооружения. Однако больше вопросов вызывает предельное состояние по эксплуатационной пригодности (SLS), в котором критерии работы сооружения определяют будущие меры по техническому обслуживанию (OPEX) и качество обслуживания пассажиров. Сегодня доступны подходящие сложные программные инструменты. Но до сих пор проблемы связаны с выверкой рабочих критериев и требований к эксплуатационной пригодности. Помимо программного обеспечения в геотехнике исключительно важно выбрать правильный структурный закон и надежные грунтовые параметры. На примере трех случаев из практики глобальных мегапроектов представлен комплексный подход для рассмотрения требований к эксплуатационной пригодности. Случаи из практики включают один из крупнейших аэропортов в мире, выполненный с огромным объемом земляных работ и расположенный в неблагоприятных геотехнических условиях, специальные требования к высокоскоростным железным дорогам, проложенных сверху грунтовых конструкций, и проект монорельса в сложных геотехнических условиях.

**Ключевые слова:** *Новый аэропорт в Стамбуле, высокоскоростные железные дороги, монорельс, Египет.*

## 1 Введение

В всех отчетах гражданского строительства при проектировании есть только два основных критерия. Общее предельное состояние определяет безопасность против разрушения с учетом разумной вероятности разрушения. Необходимые коэффициенты для уменьшения сопротивления материала, а также коэффициенты умножения для увеличения прикладываемых воздействий в основном зависят от неопределенностей относительно материалов и воздействий. В области геотехники основной проблемой для инженеров-геотехников, определяющих так называемые «характеризующие грунт прочностные параметры», является неопределенность прочностных параметров грунта. Тем не менее, данный вопрос можно стандартизировать, он представлен через разложенные на множители частные коэффициенты надежности во многих нормах, например, в Еврокодах. Поскольку разложенные на множители частные коэффициенты надежности зависят от местного опыта работ, сами Еврокоды определяют принципы и точные величины разложенных на множители частных коэффициентов надежности в соответствии со специальными приложениями для каждой страны. С другой стороны, не существует повсеместно применяемых точно определенных пределов для требований к эксплуатационной пригодности, поскольку эти требования не зависят только от сооружения, но что более важно, они зависят от функциональности сооружения. Функциональность сооружения зависит от его использования, механических требований к встроенным механизмам и оборудованию, а также комфортности для пользователей сооружения. Поэтому, особенно что касается сложных мегастроительств, требования к эксплуатационной пригодности определяются пользователем или заказчиком как часть проектных критериев.

В данной статье представлены три случая из практики, показывающие процесс определения требований к эксплуатационной пригодности, их влияние на проект сооружения, процесс определения необходимых проектных параметров, относящихся к прочности грунта и его поведению при деформации, а также программы контроля качества для обеспечения работы конструкций в рамках данных пределов. Три примера включают аэропорт, высокоскоростную железную дорогу и монорельс.

## 2 Случай из практики: аэропорт

Новый аэропорт Стамбула расположен в 40 км к северу от Стамбула, непосредственно на берегу Черного моря. Общая площадь проекта составляет примерно 75.94 км<sup>2</sup> (7594 га). С октября 2018 г. до июня 2020 г. осуществлялась первая фаза строительства аэропорта, включавшая устройство 2–3 взлетно-посадочных полос (рис. 1).

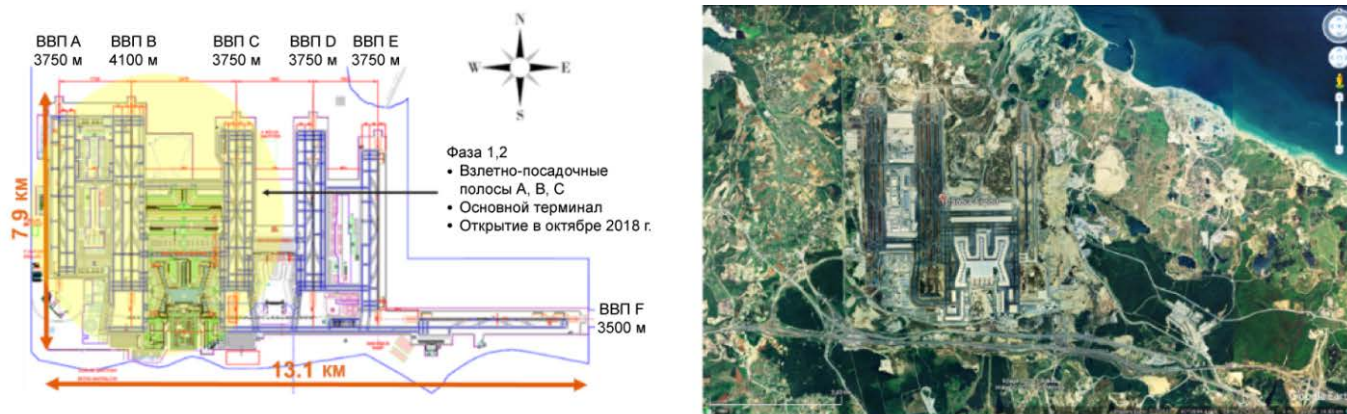


Рис. 1. Слева: схема проекта, справа: текущая ситуация

Данная территория является бывшей угольной шахтой открытого типа. Ввиду топографических особенностей площадка разделена на зоны выемок и насыпей. В зоне насыпей в северной части территории проекта наблюдались огромные насыпи отработанного грунта, возникшие при работе бывшей шахты. Отработанный грунт неоднороден, он насыпался без какого-либо уплотнения. Высота насыпи достигала 70 м, что приводило к очень высоким уровням напряжения. К проблемам земляных работ относились:

- Огромные зоны выемок на юге и насыпей на севере (примерно 350 млн м<sup>3</sup> выемок и 300 млн м<sup>3</sup> насыпей)
- Толстые слои неоднородного отработанного грунта с плохими свойствами, возникшие вследствие предыдущих горных разработок открытым способом.
- Наличие оползней на проектной площадке
- Высокая сейсмичность территории
- Строгие требования к надежности, доступности, эксплуатационной пригодности и безопасности проекта
- Плотный график выполнения строительных работ.

Доступным материалом для строительства насыпи была в основном Данисенская формация, открытая в южной части площадки, состоящая из частично водонасыщенных низкопластичных (примерно 70%) и высокопластичных (30%) глин.

Требования к эксплуатационной пригодности прописаны в ICAO – Международных стандартах и практических рекомендациях – Приложении 14. Основные требования по эксплуатационной пригодности для разных составляющих аэропортов (взлетно-посадочных полос, рулежных дорожек, площадок для стоянки самолетов) относятся к неравномерным осадкам, а также продольным и поперечным склонам. На рис. 2 показаны критерии к неровности взлетно-посадочной полосы, которые гарантируют ровность поверхности, отсутствие луж при длине откачивающих насосов от 0 до 60 м.

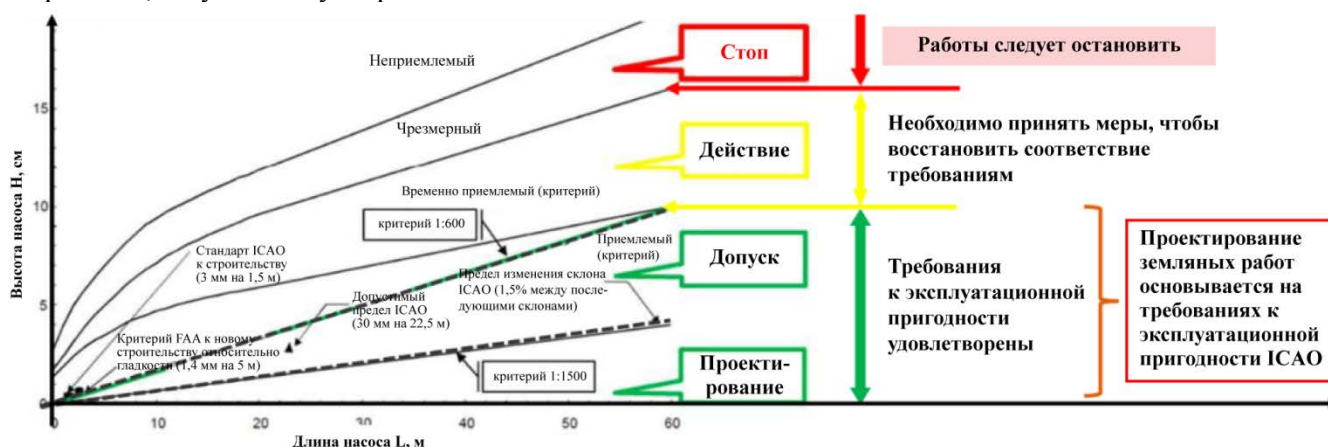
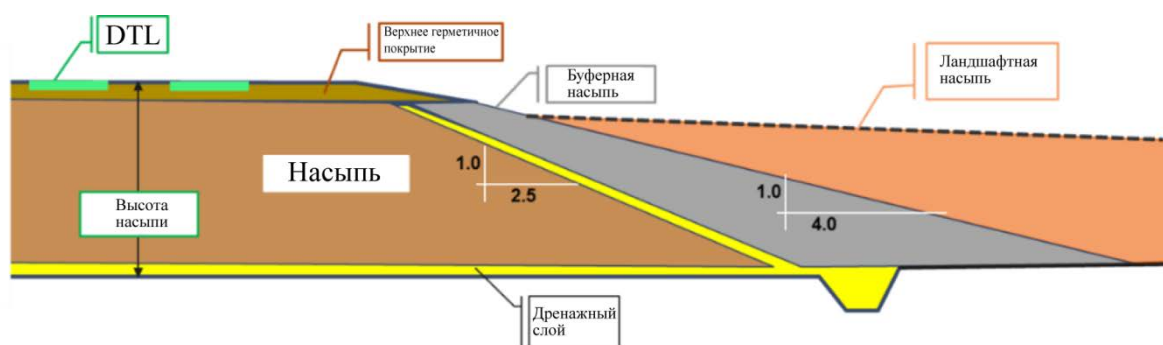


Рис. 2. Критерии к осадкам, приведенные в ICAO

Вследствие строгих требований к эксплуатационной пригодности во время проведения проекта следует насколько возможно ограничивать остаточные осадки в рамках циклов технического обслуживания, которые обычно требуются для восстановления покрытия. С учетом всех этих ограничений в качестве проектного критерия был определен максимальный уровень отклонения 1:1500, а угол отклонения 1: 600 определялся как допустимый предельный критерий. За пределами этой величины ICAO определяют

временно допустимое состояние, это означает, что должны быть запланированы и осуществлены работы по техническому обслуживанию.

Геотехнический проект был разработан с учетом всех геологических, гидрологических и сейсмических условий площадки (рис. 3).



**Отработанный грунт:** полностью откопан и заменен водоотталкивающим материалом под основанием дренажного слоя  
**Слабые аллювиальные грунты:** полностью откопаны или улучшены, или и то, и другое  
**Насыпь строится в основном из глины**

**Рис. 3.** Основная проектная концепция с основной насыпью, буферной насыпью и ландшафтной насыпью

Поскольку основной материал насыпи – высоко-низкопластичные глины, которые чувствительны к воде, насыпь была спроектирована с защитой от поступления воды. Была спроектирована и реализована сложная дренажная система основания, предотвращающая подъем уровня грунтовых вод внутри насыпи. На верхней поверхности насыпь герметизируется верхним герметизирующим слоем. Склоны насыпи также должны быть защищены от проникновения воды. Это достигалось применением герметизирующего или дренажного слоя сверху склонов, который соединялся с дренажом в основании и находился под защитой буферной насыпи. Во многих зонах наверху склонов была спроектирована противовесная ландшафтная насыпь. Подобная комбинация герметизации и дренажа позволила полностью избежать проникновения воды в тело насыпи. Оценка геотехнических параметров работы насыпи выполняется согласно этому принципу проектирования.

Проект основывался на детальном анализе деформаций и устойчивости склонов. Для получения реалистичных результатов следует выбирать соответствующие структурные законы, моделирующие работы напряжение-деформация разных слоев грунта, необходимые грунтовые параметры должны разрабатываться должным образом, чтобы определять реальное поведения уплотненной глины с учетом ее работы во времени. Поэтому была разработана следующая программа испытаний:

1. Испытания на пригодность, в которых оценивается гранулометрическое распределение, пределы Аттенберга, кривые Проктора, влажность, объемный вес и проницаемость.
2. Испытания на уплотнение для определения достижимого уплотнения доступных материалов.
3. Широкомасштабные полевые испытания на сдвиг на уплотненном неводонасыщенном материале с целью исследования прочности на сдвиг при естественной влажности и при затоплении водой.
4. Широкомасштабные полевые одометрические испытания на уплотненном неводонасыщенном материале при естественной влажности с целью определения мгновенных осадок, обнаружения, происходит ли консолидация при высоких уровнях напряжения, оценки свойств ползучести при высоких уровнях напряжения и изучения, насыщается ли материал водой при высоких уровнях напряжения.

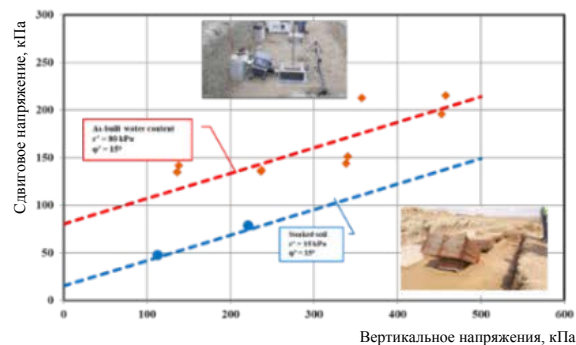
Широкомасштабные испытания на сдвиг *in situ* проводились на образцах 32 см x 32 см высотой 20 см для определения реалистичных параметров прочности на сдвиг материала насыпи, состоящего из уплотненной Данисменской глины. На рис. 4 показано устройство испытания. 7 испытаний проводились при естественной влажности *in situ* 21.1%. 2 испытания были выполнены после 5-дневного намокания, что привело к увеличению влажности примерно на 3%. Величины прикладываемого вертикального напряжения варьировались в пределах примерно 100 - 400 кПа. Для обеспечения дренированных условий скорость сдвига составляла 0.1мм/мин. На рис. 4 показаны результаты измерений, полученных в ходе испытаний, в сравнении с обратным расчетом с применением трехмерного конечно-элементного анализа.

В испытаниях, выполняемых при естественной влажности, угол трения составлял 15°, была получена связность 80 кН/м<sup>2</sup>. У двух намокших образцов был тот же угол трения, но связность значительно уменьшилась до 15 кН/м<sup>2</sup>. Данные результаты соответствуют наблюдениям *in situ*, в которых большинство проблем с устойчивостью склонов в Данисменской глине происходит при взаимодействии с водой.

Результаты подтвердили необходимость предотвращения любого поступления воды в тело насыпи посредством устройства нижнего дренажного слоя, герметизации склонов и создания герметичного слоя наверху насыпи (см. рис. 3).

Хорошее соответствие между измеренными и расчетными величинами сдвигового напряжения против горизонтального смещения подтверждает надежность применения модели упрочнения грунта для представления работы уплотненной глины.

Поскольку высота насыпи достигает 70.0 м, возникают высокие уровни напряжений. Работа уплотненной глины при таких высоких напряжениях является основным проектным параметром для проверки требований к эксплуатационной пригодности взлетно-посадочных полос и других составляющих инфраструктуры аэропорта. Подход состоял в том, чтобы исследовать реалистичные параметры грунта и структурные законы для численного анализа, основанные на реалистичных испытаниях in-situ, которые моделируют как методологию строительства, так и ожидаемый высокий уровень напряжений. Поэтому были разработаны и применены широкомасштабные одометрические испытания in-situ с образцами размерами 80x80x60 см. Целью одометрических испытаний была оценка напряженно-деформированного состояния в Данисенской глине относительно работы осадка-время для стадии строительства и времени эксплуатации насыпей в реальных условиях площадки. Программа испытаний состояла из 3 испытаний на образцах уплотненной низкопластичной Данисенской глины и 3 испытаний на образцах уплотненной высокопластичной Данисенской глины. Для рассмотрения реальных условий площадки образцы уплотнялись тем же способом, что и настоящий материал насыпи (та же высота подъема барабана, количество подходов, вес уплотнителя и форма барабана). Прикладывались реальные нагрузки до примерно 2000 кПа для моделирования насыпей высотой до 70 м и более. До и после одометрических испытаний выполнялись лабораторные испытания, в которых помимо прочего определялась влажность. Область испытаний откапывалась на глубину до 1.4 м ниже уровня дневной поверхности.



Результаты трехмерного конечно-элементного анализа

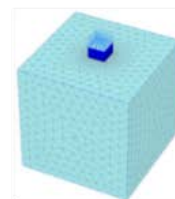
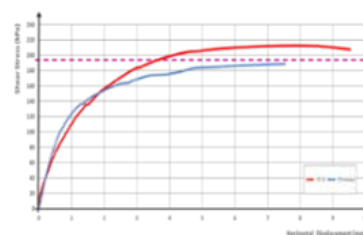


Рис. 4. Широкомасштабные блочные сдвиговые испытания in-situ

Между двумя буронабивными бетонными анкерными сваями устраивалась бетонная плита, на которую распределялась Данисенская глина, которая уплотнялась с помощью 26-тонного кулачкового катка до 95% относительного уплотнения (RC) (модифицированный Проктор). Испытуемый грунт уплотнялся 3 слоями толщиной по 35 см каждый, уплотнение происходило в шесть проходов 26-тонного катка. Для каждого слоя проводились испытания на контроль качества. После завершения уплотнения образец грунта обрезался до величины 80x80x60 см. Вокруг образца грунта устанавливался стальной блок (коробка). На верхнюю поверхность блочного образца грунта насыпался тонкий слой сухого песка для распределения нагрузки, на песок горизонтально прикреплялись стальные нагружающие штампы. Система нагружения состояла из гидравлического домкрата и отгрузочной балки, которая приваривалась к вертикальной арматуре двух буронабивных свай большого диаметра (рис. 5).

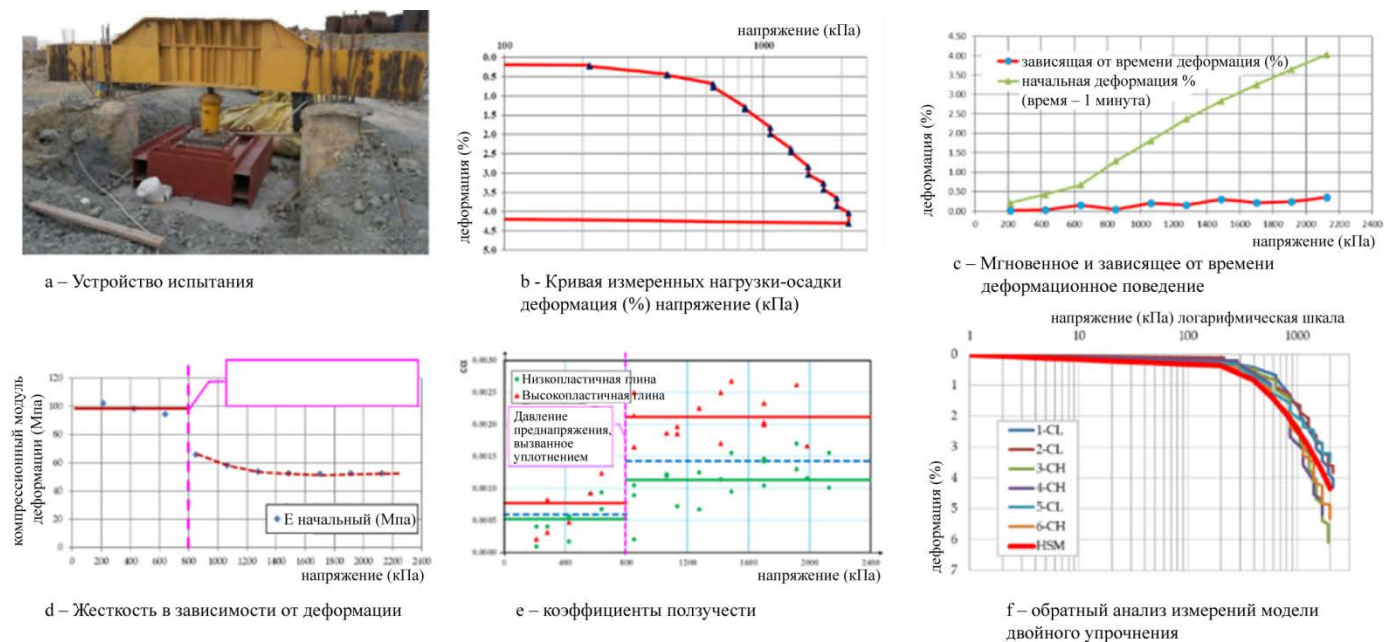


Рис. 5. Широкомасштабные одометрические испытания in-situ

На рис. 5-с показаны типичные измерения напряжения и деформации в течение короткого периода – через одну минуту – и в течение продолжительного периода. Долгосрочные деформации определялись посредством гиперболической экстраполяции измерений. Результаты испытаний образцов низкопластичной и высокопластичной Данисменской глины (CL и CH) показали, что большая часть деформаций насыпи – мгновенные деформации, которые происходят во время сооружения насыпи. Зависящая от времени часть осадки происходит в основном из-за ползучести и относительно мала по сравнению с мгновенной осадкой. Давление предуплотнения определялось согласно процедуре Касагранде. Величина давления предуплотнения составила 800 кПа вследствие огромного воздействия уплотнения 26-тонными кулачковыми катками. Результаты одометрических испытаний показали четкое различие между свойствами грунта выше и ниже данного уровня напряжений (рис. 5-д и 5-е). При анализе осадок безопасным было принято гораздо более низкое давление предуплотнения для учета неопределенностей и релаксации со временем. Работа время-деформация показала, что нет доказательств консолидации при всех шагах нагружения (примерно до 2000 кПа). Это подтвердили пьезометрические измерения, проводимые в двух испытаниях. Те же результаты были получены в ходе трехосных испытаний образцов ненарушенной структуры. То же было доказано в ходе испытаний СРТ на диссипацию. Численный обратный анализ выполнялся с использованием модели двойного упрочнения, а также моделей слабого грунта, разработанных в программе Plaxis, для моделирования измеренной работы напряжение-деформация. Было достигнуто хорошее соответствие между результатами измерений и обратного расчета (рис. 5-ф).

Осадка платформы насыпи состояла из осадок насыпей под действием их собственного веса и осадки основания ниже подошвы насыпи. Уплотненная Данисменская глина подвергается мгновенным осадкам и осадкам, зависящим от времени, вследствие ползучести. По результатам выполненных широкомасштабных одометрических испытаний свидетельств консолидации нет. Осадка природных слоев Данисменской глины под пятой насыпи состоит из мгновенных осадок, консолидации и ползучести. Углы отклонения вследствие остаточных осадок вдоль продольного выравнивания взлетно-посадочных полос оценивались в разные промежутки времени после завершения строительства, чтобы проверить соответствие требованиям по эксплуатационной пригодности согласно ИСАО. Расчет одномерной осадки был выполнен в сетке 50м × 50м. Из-за огромного размера проектной площадки на стадии 1 было сделано примерно 16 000 точек расчета осадки. Для этой цели была разработана специальная программа, учитывающая предконсолидацию вследствие уплотнения глины. Геометрические вводные в расчетах осадок были получены из построенной трехмерной геологической модели. На основе анализа глубина влияния насыпей была в три раза выше высоты насыпи, но не менее 50 м. Предполагалось, что подъем уровня грунтовых вод совпадет с подъемом дренажа основания. Весь отработанный грунт под дренажным слоем основания откапывался и замещался водонепроницаемым материалом. Модель двойного упрочнения применялась для получения модуля деформации насыпи и разных слоев грунта в зависимости от уровня и траектории напряжений. Также учитывался эффект переуплотнения. Теория одноосной консолидации Терцаги использовалась для рассмотрения первичной осадки (консолидации) Данисменской формации. Наконец, ползучесть как насыпи, так и Данисменской глины рассчитывалась согласно работе Бьеррума (Bjerrum (1967)). Для расчета

ползучести в насыпи проводилось различие между нормально уплотненными и переуплотненными условиями.

Остаточные деформации после устройства покрытия насыпей со временем повлияют на поведение этого покрытия. Как показано на рис. 6, предположительное время строительства насыпи – 9 месяцев. В анализе принималась постоянная скорость строительства. Перед устройством покрытия аэродрома предполагалось ожидание (время простоя).

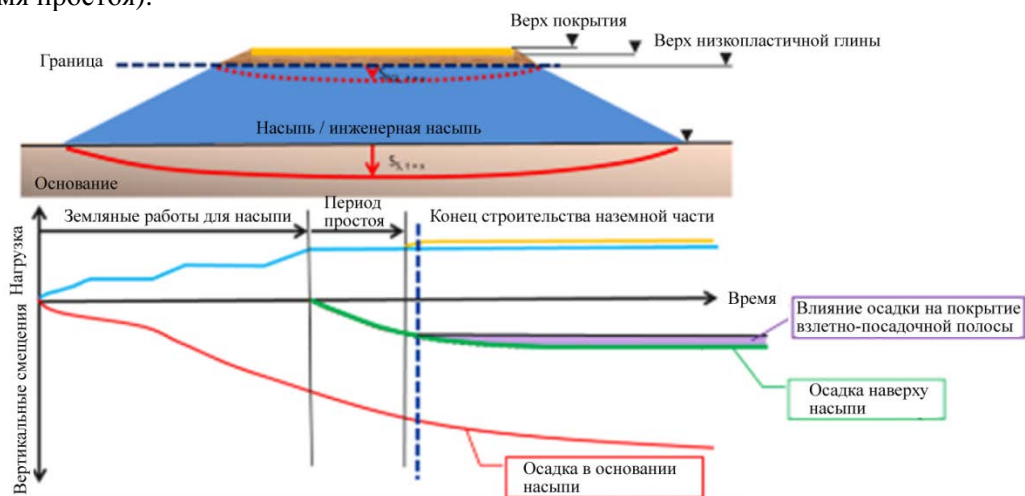


Рис. 6. Стадии строительства и осадки во времени

Для более точной выверки результатов на месте 3-й взлетно-посадочной полосы С была построена тестовая насыпь.

На рис. 7 показаны размеры тестовой насыпи, а также приведено сравнение между измеренным и рассчитанным поведением осадки во времени, расчет выполнялся в разработанной программе с применением выборочных проектных параметров грунта. Было достигнуто хорошее соотношение между измеренными и рассчитанными величинами, что подтвердило надежность разработанной проектной методологии.



Измерения гидропрофильметром - 26.11.2019

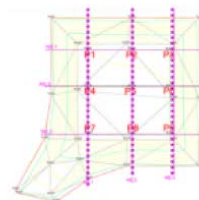
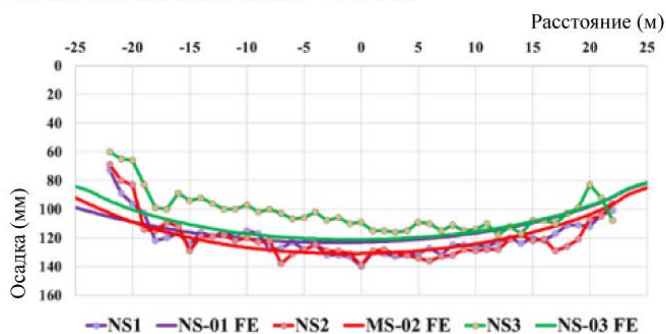


Рис. 7. Тестовая насыпь

Остаточные осадки, влияющие на покрытие, рассчитывались в конце строительства насыпи (ЕОС). Были построены изолинии остаточных осадок после окончания строительства, они указаны как (ЕОС) и через ЕОС + 1, 2, 3, 5, 10, 20 и 100 лет после окончания строительства. На рис. 8 в качестве примера показана муфта осадки вдоль продольной оси взлетно-посадочной полосы С.

Проектные критерии ИСАО соблюдены для взлетно-посадочных полос А и В и зоны стоянки самолетов – до 5-10 после ЕОС (окончания строительства). Поскольку в районе взлетно-посадочной полосы С встречены толстые слабые слои Данисенской формации, для удовлетворения критериев ИСАО были приняты специальные меры, например, более продолжительное время простоя перед устройством покрытия или разработка специального плана технического обслуживания. В определенных зонах со слабым естественным грунтом были приняты дополнительные меры, такие как глубокое динамическое уплотнение и включение жестких слоев, чтобы избежать откопки грунта ниже уровня грунтовых вод.

Также были рассчитаны осадки дренажной системы основания через 100 лет эксплуатации, они представлены на контурной карте для оценки долгосрочной эксплуатационной пригодности. Для этого выверялись изменения градиентов и пропускной способности отводных каналов. Был сделан вывод о том, что осадки не приведут к критическому уменьшению гидравлической способности. График строительства на площадке был скорректирован и модернизирован согласно результатам проведенного анализа. Было решено начать строительство с менее критичных зон, где ожидалось меньшие величины осадок. Тем временем осуществлялся мониторинг осадок посредством многоточечных магнитных осадочных колонн. Полученная информация анализировалась. Вносились корректировки в последовательность и методологию строительства. Полученный опыт использовался в более критичных областях.

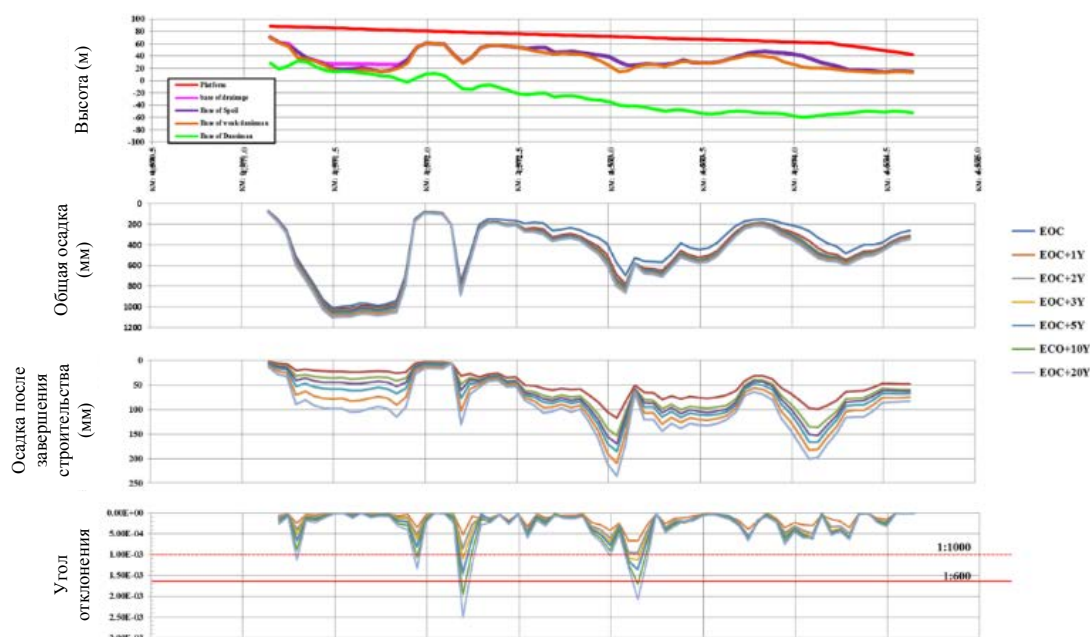
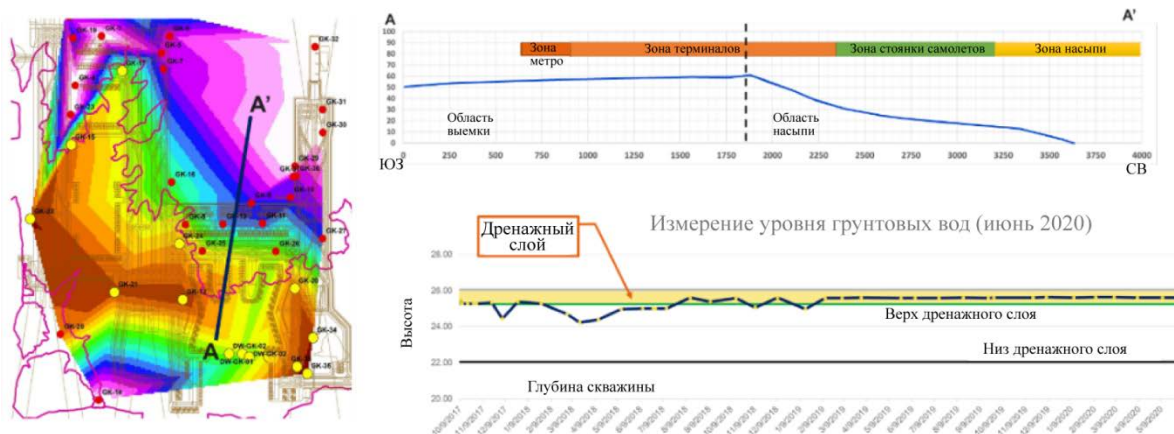


Рис. 8. Мульда осадки вдоль оси взлетно-посадочной полосы С

Для проверки полученных проектных допущений, доказательства устойчивости и допустимого поведения земляных конструкций и получения надежной информации о развивающихся во времени деформациях до и после строительства была предусмотрена и реализована комбинация геотехнического, геодезического и гидрогеологического мониторинга. Его результаты можно использовать для выверки требований ИСАО и разработки планов технического обслуживания. Далее во время дождливого сезона 2015/2016, когда строительство было приостановлено, была реализована специальная программа мониторинга. Эти месяцы использовались для наблюдения за деформациями уже полностью или частично построенных секций насыпи на севере взлетно-посадочных полос А и В и зоне стоянки самолетов. На рис. 9 показаны некоторые результаты мониторинга.



а- Результаты гидравлических измерений в скважинах



б- Результаты измерений поверхностных осадок во времени со сравнением разных методологий.

Рис. 9. Некоторые примеры проведенного на площадке мониторинга

Результаты многоточечных магнитных осадочных колонн экстраполировались посредством логарифмических и гиперболических методов и сравнивались с расчетными осадками. Был сделан вывод, что расчеты и проект хорошо согласуются. Для окончательной оценки была выбрана логарифмическая экстраполяция.

### 3 Случай из практики: высокоскоростная железная дорога

Высокоскоростная железная дорога – очень быстрый и эффективный вид транспорта с точки зрения устойчивого развития, например, выбросов углекислого газа. Однако ввиду высокой скорости передвижения, которая в большинстве случаев больше 250 км/ч, требования к эксплуатационной пригодности включают большие кривые путей, плавные перепады высот и пересечения путей на разных уровнях. Поэтому стоимость строительства высокоскоростной железной дороги гораздо выше, чем обычной. Помимо того, повсеместно применяется другой тип пути; железнодорожные пути можно разделить на два класса: жесткий путь (на плитах) и гибкий путь (на балласте). В последние десятилетия при строительстве высокоскоростных железных дорог чаще всего применяется жесткий путь. Для него необходимы строгие требования к рабочим характеристикам относительно остаточных долгосрочных осадок и неравномерных осадок /отклонений, они применяются к предполагаемому сроку эксплуатации 120 лет после устройства плитного пути. Поэтому на стадии проектирования требуется осуществление наиболее точного прогнозирования долговременных осадок. Поведение осадка-время определяет время устройства плитного пути и, следовательно, периода ожидания и достижения стандартов, а также необходимость принятия мер по снижению воздействия (например, откопка и замещение, улучшение грунта и т.д.) Существует сильное взаимодействие между проведением земляных работ и строительством соседних сооружений (виадуков, водопропускных сооружений и т.д.), что может повлиять на график строительства. Переходы между земляными работами и относительно жесткими конструкциями, такими как виадуки и водопропускные сооружения, являются очень важными границами, поскольку здесь



изменяется жесткость, в принципе, можно минимизировать объем текущего технического обслуживания и ремонта и увеличить удобство путешествия, если устроить однородный путь с наименьшими возможными изменениями жесткости. Поэтому необходимы реалистичные расчеты осадок во времени, для которых в свою очередь нужно выбрать наиболее подходящие структурные законы и соответствующие параметры грунта. Получение реалистичных параметров грунта выполняется согласно следующей методологии:

1. Оцениваются все доступные данные изысканий на площадке, в том числе полученные в ходе лабораторных испытаний, испытаний in-situ, а также испытаний на площадке в реальном масштабе с постоянным мониторингом (испытания осадок насыпей и испытания свай на нагрузку), которые показаны на рис . 10.
2. Выбирается наиболее подходящий структурный закон для моделирования работы напряженно-деформация разных слоев грунта.
3. По результатам тщательного анализа, описанного в пункте 1, определяются необходимые параметры грунта.
4. Посредством обратного расчета проведенных испытаний на площадке в реальном масштабе (испытания насыпей и испытания свай на нагрузку на буронабивных сваях большого диаметра) выверяется и подтверждается обоснованность выбранных структурных моделей и прогнозируемых требуемых грунтовых параметров.



Рис. 10. График, показывающий алгоритм получения проектных параметров.

В рассматриваемом случае из практики определяющим геологическим образованием была чрезмерно переуплотненная глина – аргиллит, жесткость которой увеличивалась с глубиной. На глубинах, подходящих для строительства высокоскоростной железной дороги, данная формация не имеет характеристик скальных пород. Ее можно описать как промежуточный геотехнический материал (IGM) с высоким коэффициентом переуплотнения (OCR) и низкой консолидацией вследствие малого коэффициента фильтрации.

Вследствие снятия напряжения в ходе бурения и неизбежного нарушения структуры при отборе и подготовке образцов лабораторные испытания не были полностью подходящими и репрезентативными, чтобы использовать их как основу для определения реалистичных параметров грунта. Поэтому при определении параметров грунта основное внимание уделялось испытаниям in-situ, таким как дилатометрия при высоком давлении (HPD). Лабораторные испытания главным образом использовались для характеристики грунтов. На рис. 11 показаны некоторые результаты лабораторных испытаний относительно недренажной прочности на сдвиг, демонстрирующие огромный разброс параметров грунта в сравнении с обратным анализом испытаний in-situ.

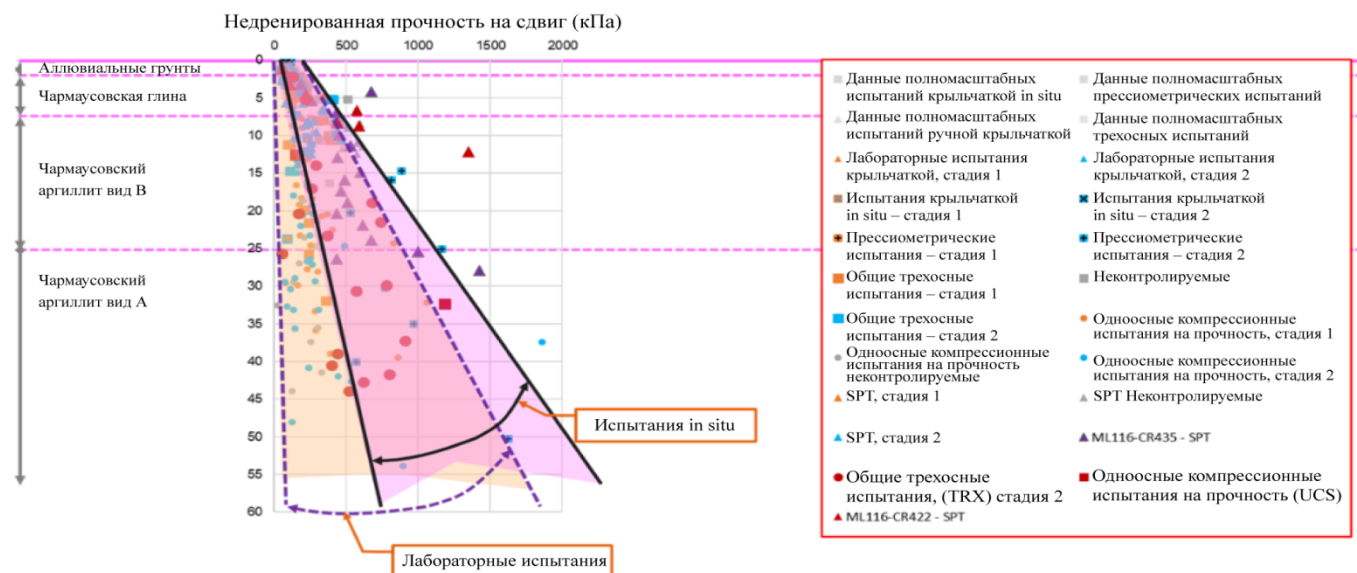


Рис. 11. Сравнение результатов лабораторных и полевых испытаний

Поскольку требования к эксплуатационной пригодности высокоскоростных железных дорог являются основными проектными критериями, и эти требования очень строгие, основной частью проектирования является трехмерное численное моделирование с использованием соответствующих грунтовых моделей (структурных законов). В требованиях к эксплуатационной пригодности определяются допустимые деформации на уровне фундамента непосредственно под рельсами. Структурный закон – численная модель, отражающая работу напряжения-деформация для разных видов грунта. К ним относятся как природные грунты основания, так и насыпные материалы (материал насыпи, который в основном стабилизирован связным материалом). Данный сложный анализ требуется для получения реалистичных максимально точных результатов относительно данных параметров.

Упрощенный структурный закон, такой как линейная упругая идеально пластичная модель Мора-Кулона, в данном случае считается неподходящей, так как в ней отсутствуют важные параметры реального поведения грунта. По сравнению с другими «инженерными материалами», такими как сталь и бетон, грунт является более сложным материалом. Типичные «инженерные свойства» грунта, такие как «прочность» и «жесткость» зависят от многих других свойств и условий, которые применяются в каждой рассматриваемой ситуации. Например, прочность и жесткость грунта зависят от уровня напряжений, направления нагружения, уровня деформации, краткого или продолжительного времени анализа, плотности, переуплотнения и т.д. Зависимость жесткости и прочности от напряжения и деформации – одни из «характеристик поведения грунта».

Другой важной чертой является недренированное-дренированное поведение, включающее одновременное изменение порового давления. Более сложными моделями являются модель упрочнения грунта с и без жесткости при малой деформации (HS / HSsmall, разработанные в программном комплексе Plaxis), которая основывается на более сложных теориях. Учитывая, что основное нагружение – монотонная статическая нагрузка (однонаправленное нагружение главным образом под весом насыпи), а результирующая деформация относительно больше, чем то, что можно определить как малая деформация, обычная модель упрочнения без малых деформаций оказывается подходящей и достаточно точной для прогнозирования осадок.

Помимо самой модели упрочнения грунта (включая теоретическую базу, качественное описание работы грунта), параметры модели для переуплотненных отложений в некоторых областях вдоль высокоскоростной линии были разработаны по результатам тщательного анализа всех доступных данных полевых изысканий, испытаний in-situ, а также лабораторных испытаний. Полученные наиболее вероятные параметры грунта выверялись в ходе детального обратного анализа испытаний тестовой насыпи, а также испытаний свай на нагрузку при детальном мониторинге. На рис. 12 и 13 показаны результаты этих полномасштабных испытаний in-situ.

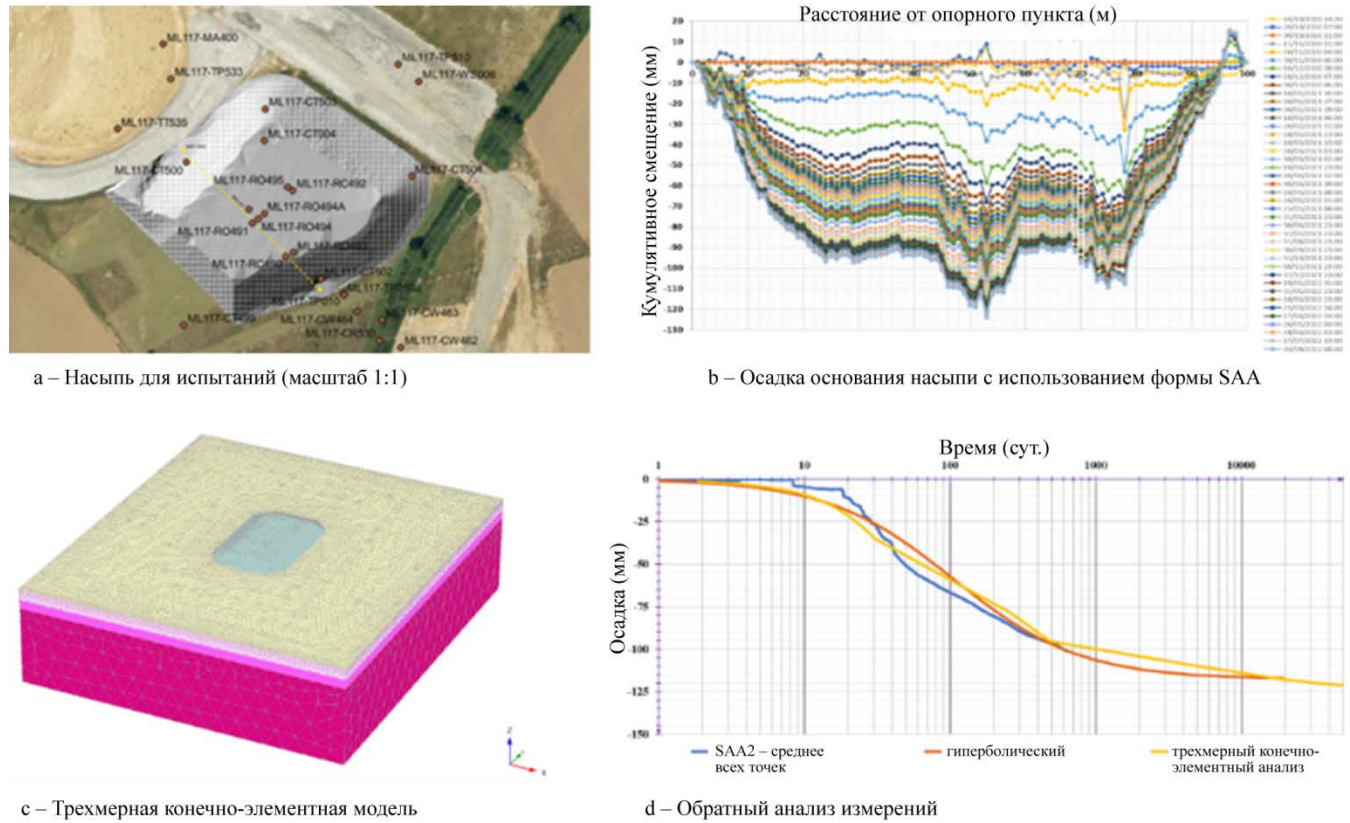


Fig. 12. Испытания насыпи in-situ (масштаб 1:1)

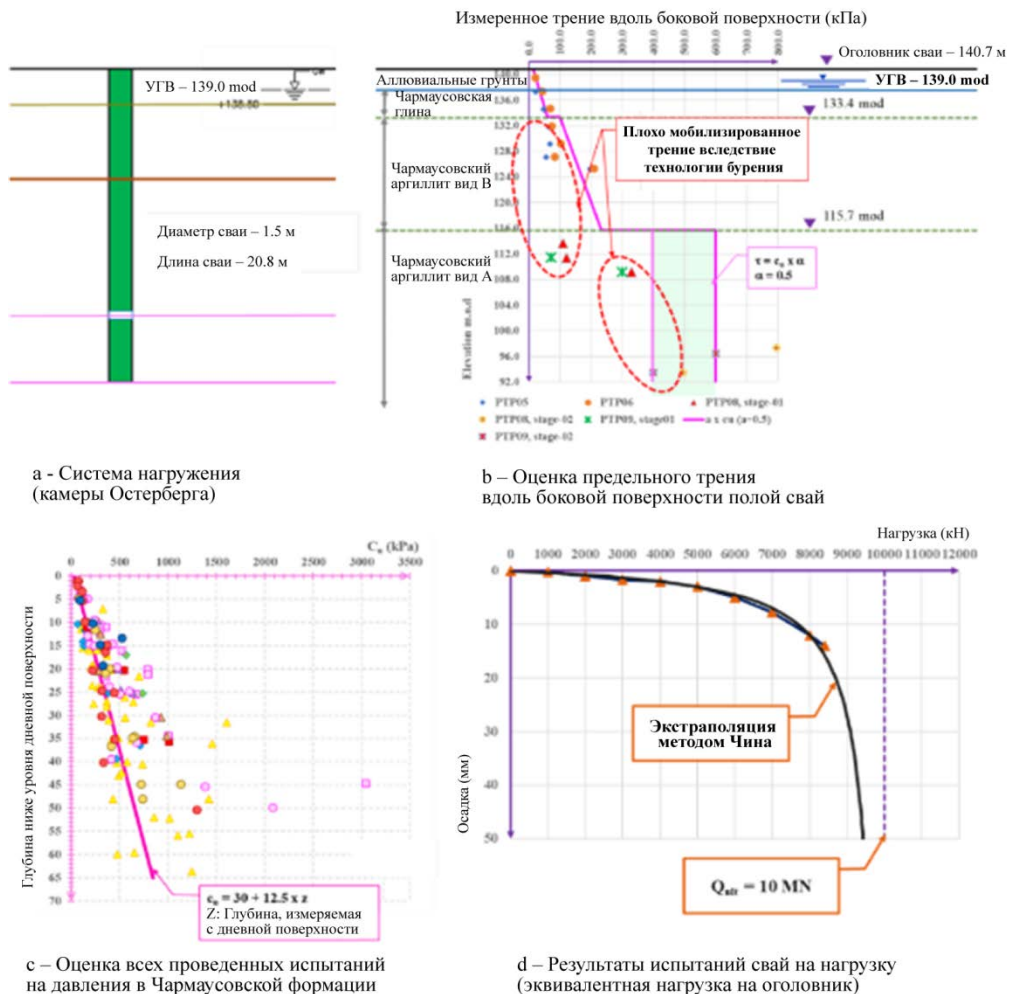


Рис. 13. Анализ результатов проведенных испытаний свай на нагрузку на буронабивных сваях большого диаметра с использованием камер Остерберга

Признаем, что для более сложных моделей грунта (например, модель упрочнения грунта) обычно требуется больше параметров, которые нужно определить на основе данных полевых изысканий, что обычно представляет сложности. Тем не менее, простые модели (такие как модель Мора-Кулона) не учитывают важные черты поведения грунта, что может привести к нереалистичным результатам. В модели Кулона-Мора не проводится различие между первичным нагружением и разгрузением или повторным нагружением. Поэтому она не может учитывать влияние дополнительной или предварительной нагрузки на работу насыпи, что является решающим проектным критерием для определения необходимых периодов ожидания и достижения стандартов. Модель Кулона-Мора дает нереалистичную картину пучения из-за отсутствия в ней дополнительной или предварительной нагрузки в конце периода достижения стандартов.

На рис. 14 приводятся некоторые результаты проведенного трехмерного конечно-элементного анализа в зоне перехода между насыпью и опорой моста, где были спроектированы жесткие вставки, чтобы угол отклонения вдоль оси пути был в пределах требований по эксплуатационной пригодности относительно эффекта ползучести.

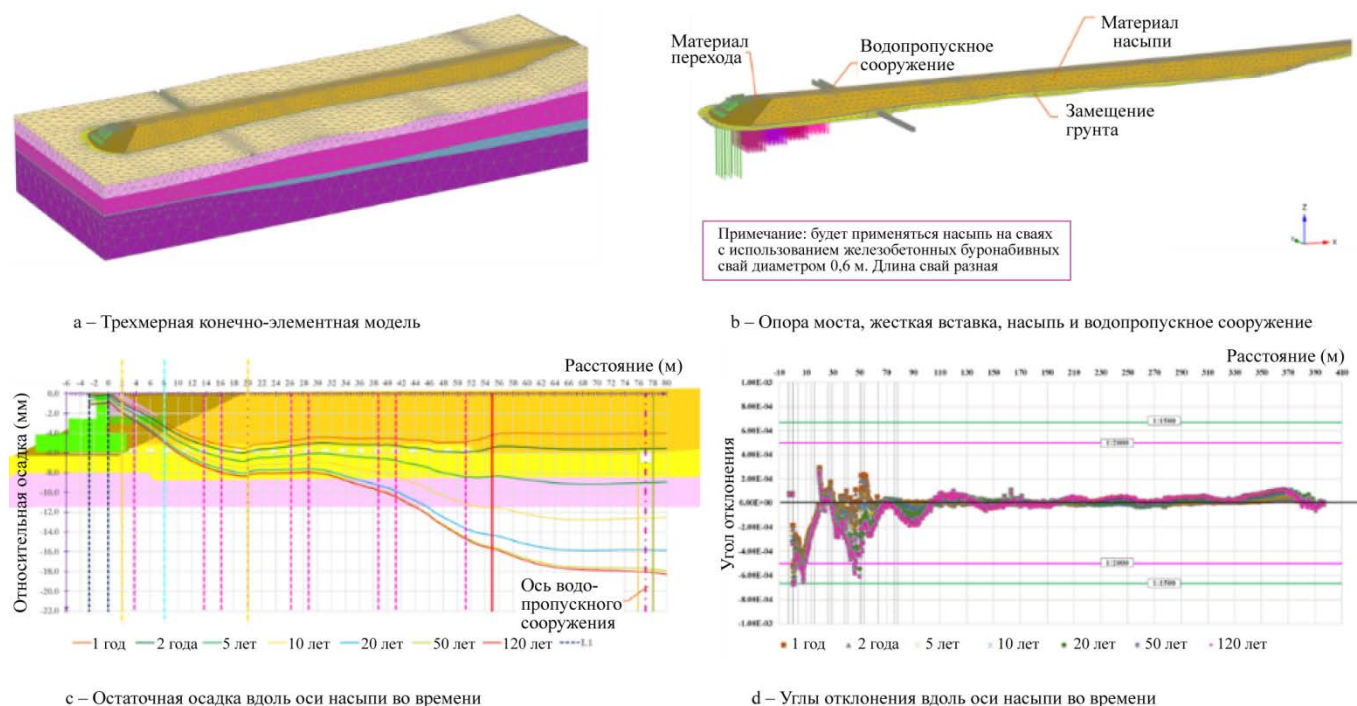


Рис. 14. Результаты анализа деформации в зоне перехода между насыпью и опорой моста

Исходя из опыта, полученного при детальном проектировании высокоскоростной линии, можно сделать следующие выводы: самое важное – рассмотрение чрезмерно переуплотненной формации с точки зрения прогнозирования осадок. Для определения зависящих от времени осадок необходимо учитывать медленную консолидацию вследствие низкого коэффициента фильтрации. Даже если коэффициент ползучести сравнительно мал, но вследствие строгих ограничений долговременных остаточных неравномерных осадок (искажений), вызванных ползучестью, ее нельзя игнорировать, особенно в переходах к относительно жестким сооружениям, таким как виадуки, водопропускные сооружения или насыпи на сваях.

#### 4 Случай из практики: проект монорельса

Технология устройства монорельса достаточно стара. Фуппертальский монорельс в Германии является старейшей монорельсовой системой в мире, работающей с 1901 г. С недавнего времени в огромном мегаполисе Каире (Египет) осуществляется проект строительства самого длинного монорельса общей длиной 100 км, соединяющего восточную и западную части Большого Каира с Новую административную столицу (рис. 15).

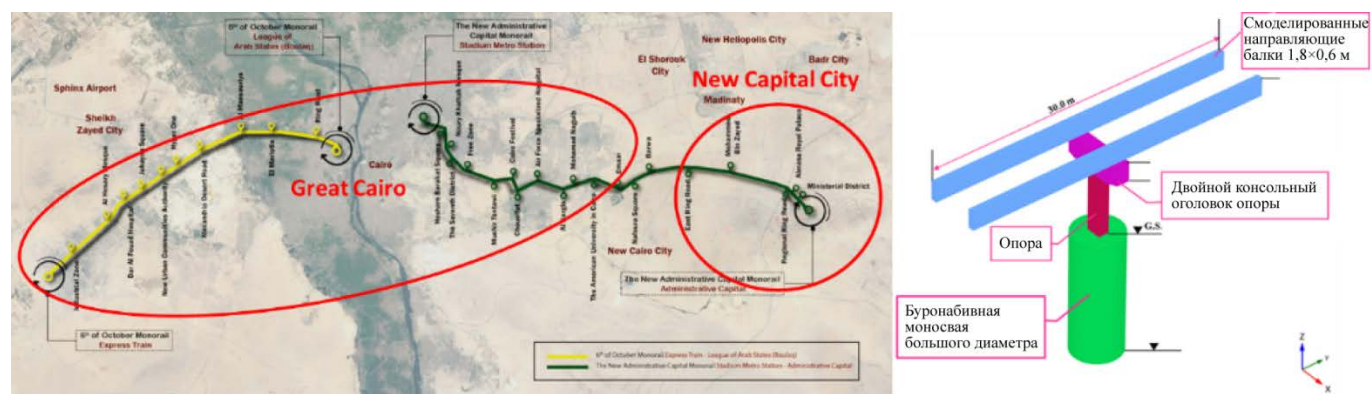


Рис. 15. Маршрут прокладки монорельса в Большом Каире

Монорельс – железная дорога, в которой путь состоит из одного рельса. Этот термин также используется для описания системы балок или поездов, проезжающих по системе таких балок или путей (рис. 15). Система интересна для условий Каира, так как она представляет собой открытый мост (виадук), состоящий из двух основных балок, опирающихся на двойной консольный оголовок опоры при расстоянии между опорами примерно 30.0 м. Оголовник опоры стоит на одной колонне, опирающейся на моносваю. Вследствие этого минимизируются пересечения с существующими или будущими инженерными сетями.

Данный проект включает очень специфическую конструкцию, так называемую интегрированную конструкцию, в которой моносваи, опоры, оголовники опор и пост-напряженные непрерывные сборные балки представляют собой единую систему без гнезд соединений или деформационных швов. Предусматриваются только компенсационные соединения с пролетом примерно 120 м. Данная конструктивная система делает сооружения исключительно восприимчивым к неравномерным осадкам, а также углам вращения оголовников опор. Кроме того, существуют очень строгие требования к эксплуатационной пригодности относительно обеспечения долговечности конструкции, механических требований, а также комфорта для пассажиров, учитывая срок службы постоянных направляющих балок в 100 лет. Соответственно, максимальный угол вертикального отклонения должен быть  $1/2500$  ввиду долгосрочных нагрузок. Была выполнена детальная программа полевых изысканий, выбраны наиболее подходящие структурные законы для моделирования работы грунта напряжение-деформация, необходимые грунтовые параметры были определены в ходе проведенных лабораторных испытаний и испытаний in-situ, таких как прессиометрические испытания. Ниже приводятся некоторые интересные аспекты проектирования.

На рис. 16 показана разработанная численная модель для проверки требований к эксплуатационной пригодности, важным аспектом проектирования являются сдвиговые соединители в компенсационных стыках, они предотвращают относительное горизонтальное смещение в стыке, которое может привести к серьезным напряжениям и, следовательно, нанести ущерб механическим частям монорельсового транспорта.

Проектирование моносвай основывалось на детальном изучении грунтовых условий в каждом месте устройства сваи. Проектные параметры выверялись посредством детальных испытаний свай на нагрузку, в 1,5 раза превышающую рабочие нагрузки. На рис. 17 приведен пример испытания сваи на нагрузку в просадочном грунте. Испытания на нагрузку проводились на разных стадиях: на стадии 1 свая нагружалась вертикально в сухих условиях (начальные условия), на стадии 2 свая нагружалась горизонтально в тех же начальных условиях, на стадии 3: в глубокие скважины на всю их глубину вокруг сваи устанавливались перфорированные трубы, через них в течение примерно 4 суток пропускалась вода, затем свая устанавливалась вертикально для проверки влияния намокания после завершения строительства и во время эксплуатации монорельса.

Работа буронабивных свай большого диаметра представляет очень интересное геотехническое явление, для численного анализа данного явления необходимо использовать более сложные структурные законы, такие как модель Барселона. Тем временем ведется исследовательская работа для разработки подходящего численного анализа для описания работы свай в просадочных грунтах Каира в случае их намокания в течение срока службы.

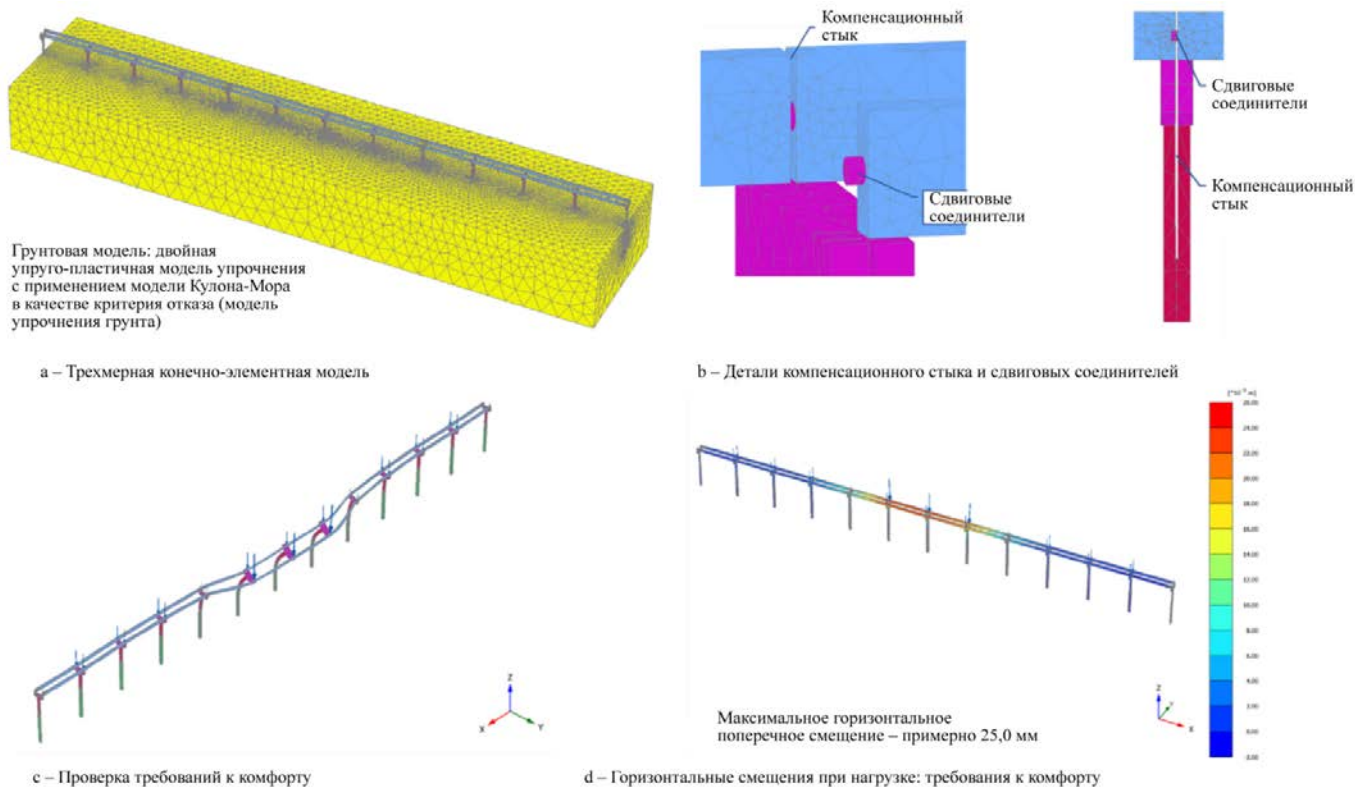


Рис. 16. Анализ деформаций на стадии проектирования

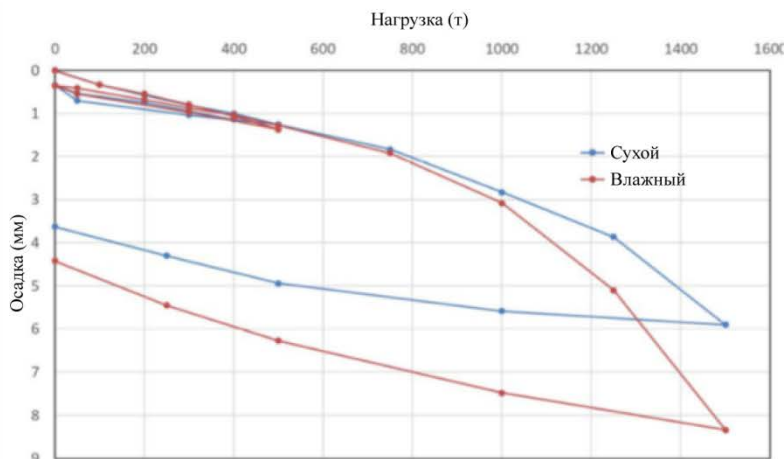


Рис. 17. Работа буронабивных свай большого диаметра в просадочных грунтах

## 5 Заключение

Основной целью данной статьи было показать важность анализа предельного состояния по эксплуатационной пригодности как ведущего проектного критерия для инфраструктурных мегапроектов, таких как аэропорты, высокоскоростные железные дороги и монорельсы. Не существуют обще приемлемых величин допустимых пределов общей и неравномерной осадок, а также соответствующих углов отклонения и /или крена. Предельные величины необходимо определять в каждом конкретном случае в зависимости от структурных требований, механических требований, а также требований к комфорту пользователей. «Умные» полевые изыскания являются основой реалистичного проектирования, более того широкомасштабные испытания in-situ и испытания на нагружение в масштабе 1:1 также очень важны для реалистичного проектирования для обеспечения требований по безопасности и эксплуатационной пригодности, но также и создания экономически выгодного проекта. В таких мегапроектах нельзя игнорировать применение численного анализа со сложными структурными моделями поведения грунта нагрузка-осадка с учетом зависящей от времени осадки и более сложных явлений, таких как работа просадочных сотовых грунтов в сухих и полусухих областях, они очень важны. Можно разрабатывать новые инновационные решения, делясь опытом уже осуществленных проектов и путем взаимодействия

между университетами и исследовательским центрами и практиками (консультантами и строительными компаниями). Это очень важный аспект для будущего развития и обеспечения преемственности поколений.

## Литература

1. Deutsche Bahn AG: Richtlinie Ril 836 Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten, 1. Aktualisierung gültig ab 01.10.2008. Issued by DB Netz AG. (2008);
2. Dürrwang R., Schulz G., Neidhart Th.: Erdbauwerke für Hochleistungsstrecken. Der Eisenbahningenieur, Heft 8/99 (1999).
3. El-Mossallamy, Y. Schulz, G., Heeres, O., Aksoy, S.: Large in-situ tests to investigate the performance of compacted clay. 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Seoul), Theme TC102
4. Kliesch, K.: Zur Setzungsprognose bei Erdbauwerken mit Fester Fahrbahn – Erfahrungen an 43 km Neubaustrecke; Vorträge der Baugrundtagung, 2002 in Mainz
5. Neidhart, Th., Schulz, G. , Dynamic stability of railway tracks – DyStaFiT, an innovation in testing. International Symposium Georail, 335 – 346 (2011)
6. Schulz, G., Fischer, R., Neidhart, Th.: Stabilisierter Erdbau - Erfahrungen auf Neu- und Ausbaustrecken der DB AG, Vorträge der Baugrundtagung (2004)
7. Schulz, G. Advanced geotechnical solutions for modern high speed railway lines. Symposium International GEORAIL 143 – 153 (2011)
8. Schulz, G., Boehm, F.: Qualified soil improvement, a measure to ensure the continuous serviceability of traffic routes. Colloque Ter DOUEST 2013