

На правах рукописи

ШАНИНА Александра Сергеевна

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ  
ЭЛЕМЕНТОВ ФУНДАМЕНТОВ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДЫ

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург– 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор  
Болдырев Юрий Яковлевич

Официальные оппоненты

доктор технических наук  
Финагенов Олег Михайлович

кандидат технических наук  
Шевченко Денис Владимирович

Ведущая организация

Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ  
им. М.В. Ломоносова

Защита состоится 15 декабря 2011 года в 15.30 на заседании диссертационного совета Д 212.229.10 в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, IX учебный корпус, аудитория 121.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 года

Учёный секретарь

диссертационного совета 212.229.10,  
кандидат технических наук, доцент



Кудряшов Э.А.

**Актуальность исследования.** Анализ существующих методик математического моделирования в области проектирования фундаментов и подземных сооружений показывает существование ряда проблем. Недостаточно исследованы вопросы взаимного влияния элементов фундаментов высотных сооружений с учетом нелинейных характеристик грунтовых массивов. Существует острая необходимость в разработке вычислительных методик позволяющих наиболее точно определять влияние процесса строительства сооружений на напряженно-деформированное состояние подземных коммуникаций, а также оценить величины их деформаций в аварийных случаях. Необходима разработка математических моделей для определения несущей способности грунтовых оснований для проектируемых фундаментов.

**Цель диссертационной работы** – разработка комплекса математических моделей, вычислительных технологий для математического моделирования, оптимизации (формы и размеров), повышения качества расчетного обоснования технически сложных подземных строительных объектов и фундаментов.

**Научные и практические задачи,** поставленные и решенные для достижения перечисленных в работе целей:

1) Разработка математической модели буронабивной сваи и методики численного определения её несущей способности в сложных геологических условиях, а также верификация модели.

2) Разработка пространственной математической модели грунтового массива с расположенным в нем спуском в подземный пешеходный переход и канализационный коллектор. Постановка серии соответствующих вычислительных экспериментов, разработка методики анализа напряженно-деформированного состояния сооружений в аварийных ситуациях и на всех этапах строительства. Разработка защитного сооружения для подземных коммуникаций и обоснование его работоспособности.

3) Разработка математической модели насыпного склона и находящихся на нем свайных фундаментов сооружений трамплинов, а также проведение анализа взаимного влияния с учетом нелинейных характеристик грунтов.

**Объект исследования** – математические модели твердотельных объектов (фундаменты, подземные инженерные сооружения), находящихся в сплошной среде

(грунт) на основе современных технологий математического моделирования и проектирования в сфере строительства.

**Предмет исследования** – математические модели, численные методы и комплексы программ для анализа деформирования и взаимного влияния элементов фундаментов с учетом нелинейных характеристик среды.

**Методы исследования** – современные математические методы механики сплошных сред, численное моделирование выполняется на основе универсальных подходов методов конечных элементов.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель буронабивной сваи находящейся в грунте, методика численного определения её несущей способности. В модели учитываются многослойность и нелинейные характеристики грунтового массива, зоны уплотнения грунта вокруг сваи, контактное взаимодействие по границе «свая-грунт».

2. Математическая модель грунтового массива, в котором расположены спуск в подземный пешеходный переход и канализационный коллектор, результаты серии вычислительных экспериментов, методика анализа напряженно-деформированного состояния этих сооружений при аварийной ситуации и на всех этапах строительства, разработанное защитное сооружение для подземных коммуникаций. В модели учитываются многослойность и нелинейные характеристики грунтового массива, взаимное влияние этих объектов.

3. Математическая модель грунтового массива, представляющая собой насыпной склон, на котором расположены свайные фундаменты двух лыжных трамплинов. Результаты численного анализа взаимного влияния этих объектов с учетом нелинейных характеристик грунтов.

4. Результаты качественного анализа и оценки вычислительной эффективности применения ряда программных комплексов для комплексных задач проектирования оснований и фундаментов; рекомендации по оптимальному использованию различных программных комплексов и возможности по их совместного применения.

**Научная новизна** заключается в следующем:

1. Предложена математическая модель осадки сваи в сложных геологических условиях с учетом комплексных воздействий - нелинейных характеристик грунтов, контактного взаимодействия сваи с грунтом и водонасыщения грунтов. На основе

модели разработана и верифицирована методика определения несущей способности сваи, позволяющая получить зависимость осадки сваи от приложенной нагрузки, картину распределения напряжений в каждом слое грунта и зоны распределения пластических деформаций в зависимости от приложенной нагрузки. Результаты, полученные с применением этой методики могут быть использованы при проектировании свайных фундаментов при недостатке или отсутствии данных испытаний.

2. Математическая модель грунтового массива, включающего в себя подземный переход и тоннельный канализационный коллектор, позволяющая учитывать взаимное влияние указанных объектов. На основе модели проведен комплекс вычислительных исследований и разработана методика анализа напряженно-деформированного состояния сооружений при аварийной ситуации, а также на всех этапах строительства. Разработан проект защитного сооружения для подземных коммуникаций и обоснована его работоспособность. Разработанная методика применима при проектировании защитных мероприятий для подземных коммуникаций и расположенных над ними инженерных сооружений.

3. Разработана математическая модель грунтового массива в виде насыпного склона, на котором расположены свайные фундаменты высотных сооружений (лыжных трамплинов). Методика определения напряженно-деформированного состояния и анализа взаимного влияния всех объектов расчетной области с учетом нелинейных характеристик грунтов применима для фундаментов сооружений, находящихся на насыпных склонах.

**Практическая ценность работы.** Разработанные математические модели и методики позволяют учитывать нелинейные характеристики грунтовых массивов, взаимное влияние всех объектов, находящихся в расчетной области, прогнозировать аварийные ситуации, разрабатывать защитные мероприятия.

Разработанная методика определения несущей способности сваи по грунту позволяет получить недостающие данные по испытаниям свай при проектировании свайных фундаментов, оценить границы применимости и надежности проектных решений. Основным достижением является существенное повышение точности оценки осадки здания в случаях недостатка исходных данных.

Основные результаты работы использованы при проектировании уникальных олимпийских спортивных трамплинов HS 140 и HS 106 в г. Санкт-Петербург, при проектировании подземного пешеходного перехода у станции метро Академическая в г. Санкт-Петербург.

Разработан комплекс математических моделей подземного пешеходного перехода, расположенного над подземным канализационным коллектором на всех этапах строительства и последующей эксплуатации, позволила на основе уравнений метода конечных элементов численно оценить величину выдавливания коллектора на различных стадиях возведения перехода. По результатам, выполненным в работе расчетов, разработана экранирующая конструкция между подземным пешеходным переходом и расположенным под ним канализационным коллектором, находящимся в аварийном состоянии. В рамках данного исследования получен патент на полезную модель «экранирующая конструкцию между инженерным сооружением и находящимся под ним трубопроводом» №60166.

**Апробация работы.** Результаты работы представлены автором в «Научно-технических ведомостях СПбГПУ» №3, №4 и №5 за 2010 г; на конференции «Научный сервис в сети Интернет: суперкомпьютерные центры и задачи», 2010 г.; на конференции "Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ)" в МГУ имени М.В. Ломоносова, 2011 г.; на семинаре в Научно-исследовательском вычислительном центре МГУ им. М.В. Ломоносова; на семинарах кафедр «Математические и программное обеспечение высокопроизводительных вычислений» и «Прикладная математика» Физико-Механического факультета; на семинаре кафедры «ПГС» Инженерно-Строительного факультета СПб ГПУ; на конференции «Научный сервис в сети интернет», 2011 г.

**Личный вклад автора.** Основные научные положения, математические модели и методики, содержащиеся в диссертационной работе, получены автором самостоятельно.

**Публикации.** Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 6 научных работах, среди которых 3 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в перечне ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 140 наименований. Работа изложена на 150 страницах, содержит 40 рисунков, 3 таблиц.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность темы исследования, описано современное состояние проблем математического моделирования для анализа деформирования и взаимного влияния элементов фундаментов с учетом нелинейных характеристик среды.

**В первой главе** приведены теоретические предпосылки, лежащие в основе построения математических моделей и численных процедур используемых программных комплексов для математического моделирования грунтовых массивов, фундаментов зданий и сооружений. Поскольку на данный момент отсутствуют методики, позволяющие эффективно использовать существующие программные средства и вычислительные технологии для проектирования фундаментов проведен сравнительный анализ комплексов программ для решения дальнейших задач.

Для определения напряженно-деформированного состояния грунтового массива в условиях пространственной задачи необходимо решить систему определяющих уравнений (1) – (8).

Уравнения равновесия для каждого слоя грунта имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho X &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho Y &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \rho Z &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\tau_{ij}$  – касательные напряжения;  $\sigma_{ii}$  – нормальные напряжения;  $\rho$  – плотность грунта;  $X, Y, Z$  – проекции объемных сил, отнесенные к единице массы.

Согласно принципу Терцаги, напряжения в грунте можно разделить на эффективные напряжения  $\underline{\sigma}'$  и поровые давления  $\underline{\sigma}_w$ , создаваемые водой, присутствующей в порах.

Уравнение совместности деформаций для каждого слоя грунта имеют вид:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}; \quad \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y}; \quad (2)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z}; & \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z}; \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial z \partial x}; & \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z \partial x},\end{aligned}$$

где  $\gamma_{ij}$  – относительные сдвиги,  $\varepsilon_i$  – относительные нормальные деформации

Независимые от времени, упругие и пластические приращения деформаций действуют независимо друг от друга.

Полное приращение деформации складывается из упругих и пластических приращений:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p, \quad d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (3)$$

$\lambda$  – пластический множитель,  $g$  – пластический потенциал.

Действует закон ассоциированного пластического течения. Функция текучести  $f$  для скелета грунта, описываемого материалом Друкера-Прагера записывается в следующем виде:

$$f = 3\beta\sigma_m + \frac{\sigma_{eqv}}{\sqrt{3}} - \sigma_y = 0, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}); & \sigma_{eqv} &= \sqrt{\frac{3}{2} \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{\sigma}}}; \\ \sigma_y &= \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}; & \beta &= \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)},\end{aligned}$$

$\underline{\underline{\sigma}}$  – тензор эффективных напряжений,  $\varphi$  – угол трения грунта,  $c$  – сцепление.

Функция текучести  $f$  для скелета грунта, описываемого материалом Мора-Кулона записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned}f_{1a} &= \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \sin \varphi - c \cos \varphi = 0; \\ f_{1b} &= \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_3 + \sigma_2) \sin \varphi - c \cos \varphi = 0; \\ f_{2a} &= \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1) + \frac{1}{2}(\sigma_3 + \sigma_1) \sin \varphi - c \cos \varphi = 0; \\ f_{2b} &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi - c \cos \varphi = 0; \\ f_{3a} &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \sin \varphi - c \cos \varphi = 0;\end{aligned} \quad (5)$$



$$f_{3b} = \frac{1}{2} (\sigma_2 - \sigma_1) + \frac{1}{2} (\sigma_2 + \sigma_1) \sin \varphi - c \cos \varphi = 0,$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные эффективные напряжения,  $\varphi$  – угол трения грунта,  $c$  – сцепление.

На границах модели задаются следующие виды граничных условий:

1. Кинематические :  $\underline{u}|_s = \underline{u}_s$  ;  $[\underline{u}_s] = 0$
2. Статические:  $\underline{n} \cdot \underline{\sigma} = \underline{f}_s$ ; (6)
3. Смешанные:  $\underline{u}|_s = \underline{u}_s$  ;  $\underline{n} \cdot \underline{\sigma} = \underline{f}_s$  ,

где  $\underline{u}_s$  – вектор перемещений,  $\underline{f}_s$  – вектор сил,  $\underline{n}$  – вектор нормали к границе,  $\underline{\sigma}$  – тензор напряжений.

На поверхностях сопряжения различных слоев грунта и приняты условия:

- кинематической совместности – непрерывность вектора перемещения при переходе через поверхность сопряжения (квадратные скобки обозначают скачок функции):

$$[\underline{u}] = 0; \quad (7)$$

- статической совместности – непрерывность вектора напряжения при переходе через поверхность сопряжения:

$$[\underline{\sigma}_n] = 0. \quad (8)$$

**Во второй главе** разработаны математические модели буронабивной сваи «fundex», позволяющие учитывать нелинейные характеристики грунтовой среды, контактное взаимодействие сваи с грунтом. На основании этих моделей разработана методика определения несущей способности сваи. При отсутствии или недостаточности данных испытаний, результаты могут быть использованы при проектировании свайных фундаментов.

#### Постановка задачи:

Работа отдельной сваи под вертикальной нагрузкой может рассматриваться как осесимметричная задача, в которой ось симметрии расчетной области совпадает с вертикальной осью симметрии сваи. Сечение сваи представляется круглым, эквивалентным по площади сечению реальной сваи. В расчетной области присутствуют 15 слоев грунта, различных по своей структуре и физическим

характеристикам. Исследуется зависимость осадки сваи от величины приложенной нагрузки.

Задача решается в осесимметричной постановке. Выбранная система координат является цилиндрической.  $Z$  – ось симметрии. Условие осевой симметрии для данной задачи:

$$\tau_{z\theta} = 0; \tau_{r\theta} = 0, \text{ где } \tau_{z\theta}, \tau_{r\theta} \text{ – касательные напряжения.}$$

Для определения напряженно-деформированного состояния модели решается система уравнений (1-4). На границах сопряжения различных слоев грунта приняты условия статической и кинематической совместности (7-8). Действует ассоциированный закон течения.

Численное моделирование задачи проводится методом конечных элементов. Расчетная область (рис. 1) слева ограничена линией, проходящей через ось симметрии сваи. Крайняя правая граница взята так, чтобы она не оказывала значительного влияния на результаты решения в интересующей области. Ниже отметки -48 метров относительно уровня земли, принято, что ниже залегает мощный твердый слой грунта, поэтому по нижней границе отсутствуют вертикальные перемещения.

Природное напряженное состояние моделируется нагружением расчетной области на первом шаге решения собственным весом грунта. Полученное напряженное состояние скелета грунта сохраняется и используется в качестве начальных напряжений, а полученным перемещениям задаются нулевые значения. На следующих шагах конечным элементам, занимающим объем сваи, задаются свойства бетона. К верхнему обрезу сваи прикладывается вертикальная сила  $N$ .

В качестве поверхности текучести взяты поверхность текучести Мора-Кулона (5) и Друкера-Прагера (4). В процессе пластического деформирования поверхность текучести не изменяется.

На границах модели (рис. 1) приняты условия:

$$\begin{array}{ll}
 1. \begin{cases} 0 \leq r \leq a \\ z = h \end{cases} : \begin{cases} \sigma_z = -P/(\pi \cdot a^2); \\ \tau_{rz} = 0; \end{cases} & 3. \begin{cases} r = H \\ 0 \leq z \leq h \end{cases} : \begin{cases} \sigma_r = 0; \\ \tau_{rz} = 0; \end{cases} \\
 2. \begin{cases} a < r \leq H \\ z = h \end{cases} : \begin{cases} \sigma_z = 0; \\ \tau_{rz} = 0; \end{cases} & 4. \begin{cases} 0 \leq r \leq H \\ z = 0 \end{cases} : \begin{cases} U_r = 0; \\ U_z = 0; \end{cases}
 \end{array}$$

При уплотнении грунта вокруг сваи меняется напряженное состояние. Для его моделирования, прикладывается радиальное давление по контуру сваи и давление, действующее под конусом сваи. Для задания радиального давления использовалась эмпирическое соотношение, выведенное Chow и Jardine:

$$\sigma_r = 0.029 \cdot q_c \cdot \left(\frac{\sigma_z}{p_a}\right)^{0.13} \cdot \left(\frac{h}{R}\right)^{-0.38}, \quad (9)$$

где  $h$  – расстояние от острия конуса сваи до рассматриваемой точки,  $R$  – радиус сваи,  $\sigma_z$  – вертикальное напряжение на глубине  $z$  от вышележащего веса грунта,  $q_c$  – удельное сопротивление грунта под нижним концом сваи.

Предполагается, что в уплотненной зоне  $\rho$  изменяется незначительно. А модуль деформации  $E$  определяется соотношением:

$$E_{\text{новое}} = 3tg \frac{\alpha}{2} \left[ ctg \frac{\alpha}{2} + tg \left( \frac{\alpha}{2} + \varphi \right) \right] \eta \cdot E_{\text{старое}}, \quad (10)$$

где  $\alpha$  – угол острия сваи,  $\eta = \begin{cases} 1 & \text{– для суглинков и глин;} \\ 1,5 & \text{– для супесей;} \\ 2 & \text{– для песков;} \end{cases}$

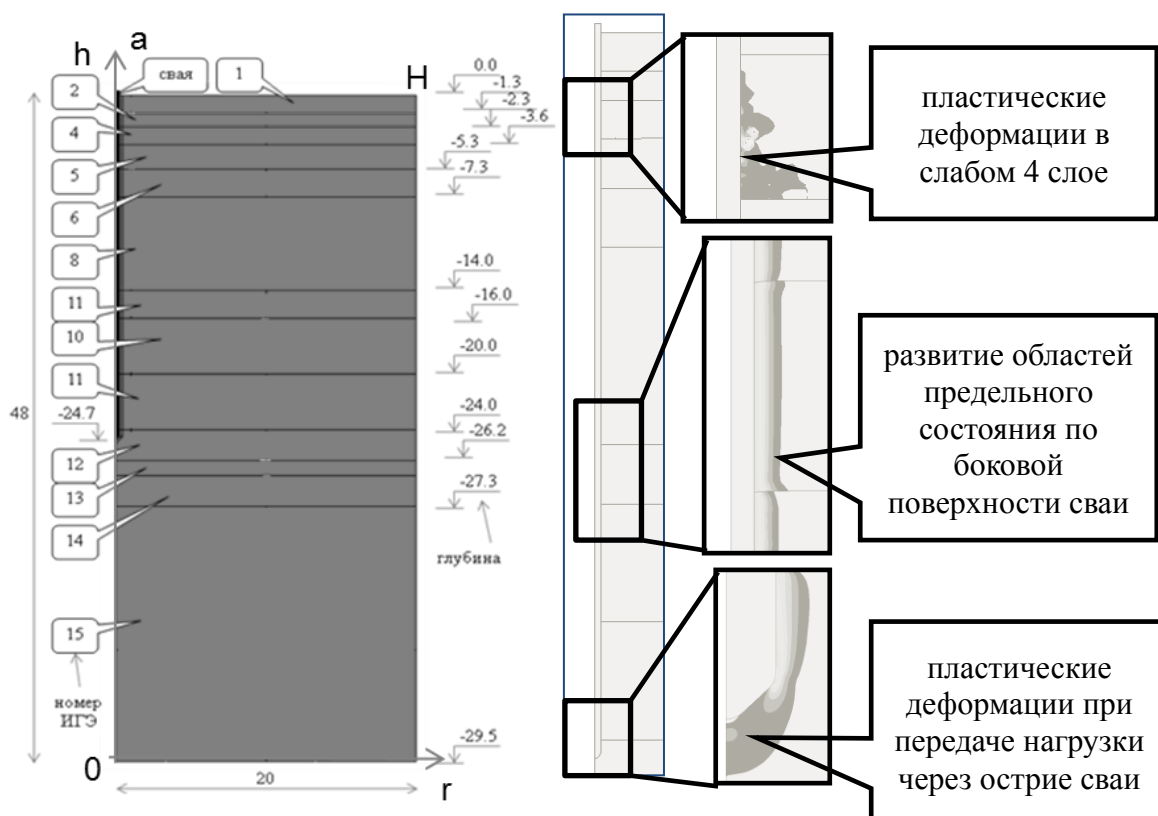


Рис. 1. Математическое моделирование сваи «fundex»

Разработанная методика позволяет учитывать:

- контактное взаимодействие сваи с грунтом при различных коэффициентах трения;
- давление в грунте, возрастающее с глубиной (существенно упрочняющее грунт);
- боковое уплотнение грунта вблизи сваи, возникающее от бурения;
- влияние грунтовых вод;
- реальное распределение слоев грунта;
- нелинейные характеристики грунтов, переход в пластичное состояние.

Кроме того одним из результатов данной главы является анализ возможности применения использованного программного комплекса Ansys обеспечения в задачах такого класса.

**В третьей главе** разработана математическая модель свайных фундаментов сооружений трамплинов, а также проведен анализ взаимного влияния с учетом нелинейных характеристик грунтов. Решения проводилось с учетом и без учета нелинейных свойств материалов. Во всех постановках были учтены взаимное влияние фундаментов всех сооружений друг на друга, форма рельефа местности. Показано, что результаты осадок, полученных с учетом нелинейных свойств материалов, превышают нормативные значения, что уже оказывает определяющее влияние на надежность сооружения.

Задача была разделена на 2 этапа:

1. Анализ устойчивости насыпного склона. Поскольку нагрузки от высотных сооружений (лыжные трамплины) в первую очередь могут привести к потере устойчивости склона.

2. Анализ напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов под сооружениями лыжных трамплинов с учетом взаимного влияния фундаментов. Определение осадки фундаментов.

Этап 1. Проведен сравнительный анализ различных численных методик определения коэффициента устойчивости склона в различных комплексах программ. Наиболее оптимальным методом оценки признан Метод понижения параметров прочности  $\phi$ -с, как дающий оценку снизу. В проектной практике используется большое количество расчетных методов оценки устойчивости склонов. Строго аналитического решения данной задачи автору не известно. Для определения

коэффициента устойчивости используется приближенный метод круглоцилиндрических поверхностей, основанный на обобщении опытных фактов. Основным недостатком оценочных методов является то что они относятся только к однородным грунтам и во многих случаях не удается учесть сложные схемы нагружения. Поэтому на практике применяются инженерные методы расчета устойчивости, содержащие упрощающие предположения. Для проверки массива грунта по несущей способности применялись системы численного моделирования ANSYS и PLAXIS. Были применены различные критерии определения устойчивости склона (метод Феллениуса, метод Бишопа, метод Янбу, модифицированный метод Янбу, метод понижения параметров  $\phi$ - $c$ ), проведено их сравнение. Так же было изучено влияние грунтовых вод на устойчивость склона.

Этап 2. Проведен расчет грунтовых массивов под сооружениями лыжных трамплинов с учетом взаимного влияния фундаментов. Для этого разработана конечно-элементная модель грунтового массива, находящегося под трамплинами спортивного комплекса (Рис. 2). Проведены сравнительные расчеты в программных комплексах ANSYS и PLAXIS.

Постановка задачи выглядит следующим образом:

- рассматривается объем грунта в пространственной постановке (Рис. 2);
- в объеме грунта присутствуют фундаменты спортивных трамплинов, представленные в виде прямоугольных объемов, связанные по границе с объёмом грунта без учета трения. Проводится анализ напряженно-деформированного состояния грунтового массива.

Для определения напряженно-деформированного состояния модели решается система уравнений (1-5). На границах сопряжения различных слоев грунта приняты условия статической и кинематической совместности (7-8). Действует ассоциированный закон течения. В качестве поверхности текучести взяты поверхность текучести Друкера-Прагера.

Численное моделирование задачи (рис.2):

- модель материала грунтового массива – Друкера-Прагера;
- материал свайных фундаментов принят линейным с осредненными характеристиками;

- на поверхности контакта фундамента с грунтом приняты условия полного «слипания»;

- на боковых поверхностях:  $u_n=0$ ; касательные напряжения равны нулю;

- на нижней поверхности грунтового массива принято  $u_x=u_y=u_z=0$ .

Размеры модели взяты так, чтобы искусственно введенные границы не оказывали значительного влияния на результаты решения в интересующей области.

Расчет деформаций оснований произведен на основное сочетание нагрузок, взятых с коэффициентом надежности по нагрузкам, равным 1,1.

Осадки трамплина Hs140 и примыкающего к нему здания, полученные при учете нелинейных свойств, не удовлетворяют нормативным требованиям.

Было предложено усиление насыпи и усиление подстилающего слоя, либо замена свайного фундамента на кессонный.

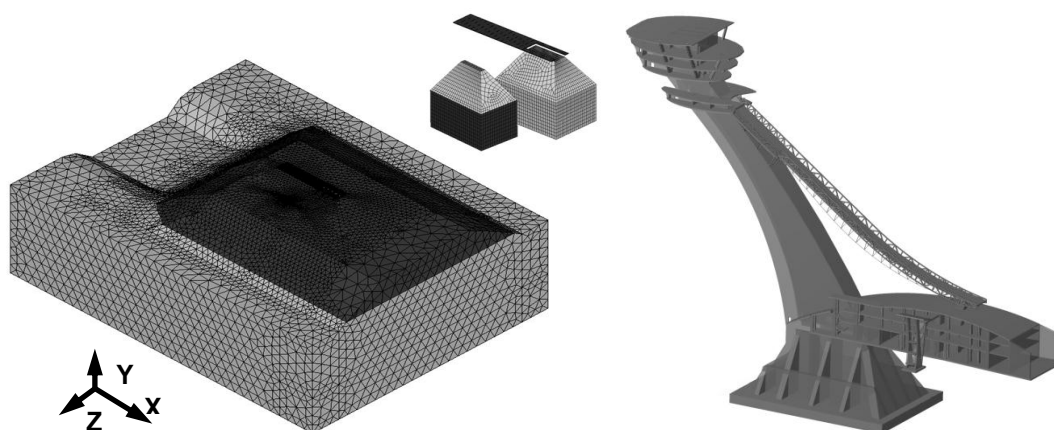


Рис. 2. Конструкция трамплина и насыпной грунтовой массив

4. В четвертой главе разработана математическая модель грунтового массива, включающего в себя подземный переход и тоннельный канализационный коллектор, позволяющая учитывать взаимное влияние данных объектов. На основе модели проведен комплекс вычислительных исследований и разработана методика анализа напряженно-деформированного состояния сооружений при аварийной ситуации, а также на всех этапах строительства. Разработано защитное сооружение для подземных коммуникаций и обосновано его работоспособность.

Постановка задачи: Для определения напряженно-деформированного состояния модели решается система уравнений (1-4).

На границах сопряжения различных слоев грунта приняты условия статической и кинематической совместности (7-8).

Численное решение задачи (рис.3). На боковых поверхностях:  $u_n=0$ : касательные напряжения равны нулю;

- на нижней поверхности грунтового массива принято  $u_x=u_y=u_z=0$ .

Нагрузки, приложенные в расчетах, брались в соответствии со СНиПом 2.05.03-84\* «Мосты и трубы»:

- нагрузка от собственного веса грунтов и конструкций;
- временная вертикальная нагрузка в пешеходной зоне – 400 кгс/м<sup>2</sup>;
- временная вертикальная нагрузка на проезжую часть – в виде полос А11 с давлением 1160 кгс/м<sup>2</sup>.

Основные анализируемые результаты:

- осадка дневной поверхности (уровня асфальта) – позволяет определять неравномерность осадок дорожного покрытия и проектируемого ППП. Перекосы и неравномерность осадок в черте города регламентируется «ТСН 50-303-2004 Санкт-Петербург»;
- осадка ТКК – позволяет определить деформированную форму коллектора при различных режимах эксплуатации;
- осадка ППП – позволяет судить о деформациях в переходе, а также прилегающих конструкциях (расхождение сухого стыка);
- окружные напряжения в ТКК – позволяет судить о окружном трещинообразовании в обделке коллектора;
- осевые напряжения в ТКК – позволяет судить о продольном трещинообразовании в обделке коллектора;

Рассмотрены последовательно следующие этапы: до начала строительства ППП, разработка строительного котлована, нормальная эксплуатация ППП и ТКК и аварийная ситуация при частичном обрушении коллектора. Предложено конструктивное решение защитного моста между ТКК и ППП. На рисунках 4,5 показана КЭ модель нормальной эксплуатации ППП, конструктивное решение подземного защитного моста.

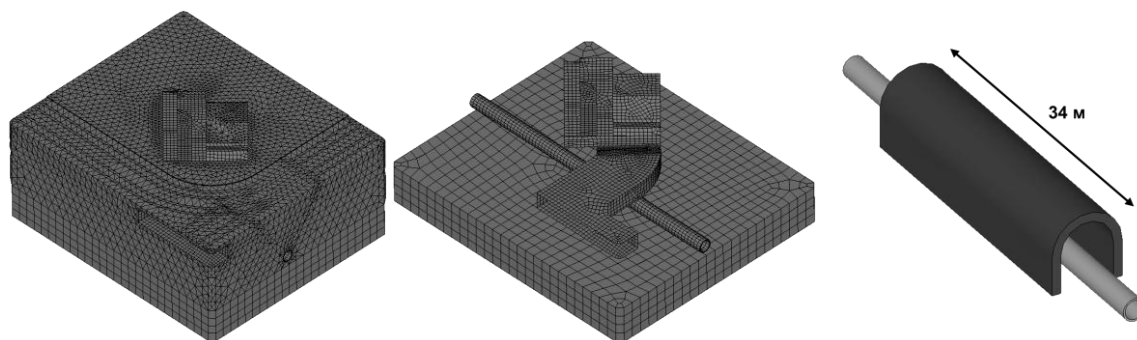


Рис. 3 КЭ модель нормальной эксплуатации ППП

Конструктивное решение подземного защитного моста

### **Основные выводы и результаты.**

К основным результатам работы относятся следующие:

1. Математическая модель буронабивной сваи находящейся в грунте, методика численного определения её несущей способности. В модели учитываются многослойность и нелинейные характеристики грунтового массива, зоны уплотнения грунта вокруг сваи, контактное взаимодействие по границе «свая-грунт».

2. Математическая модель грунтового массива, включающего в себя подземный переход и тоннельный канализационный коллектор, позволяющая учитывать взаимное влияние данных объектов. На основе модели проведен комплекс вычислительных исследований и разработана методика анализа напряженно-деформированного состояния сооружений при аварийной ситуации, а также на всех этапах строительства. Разработано защитное сооружение для подземных коммуникаций.

3. Математическая модель свайных фундаментов высотных сооружений (лыжных трамплинов), результаты анализа взаимного влияния с учетом нелинейных характеристик грунтов.

4. Результаты качественного анализа и оценки вычислительной эффективности применения ряда программных комплексов применительно к решению комплексных задач проектирования оснований и фундаментов; рекомендации по оптимальному использованию различных программных комплексов и возможности по их комплексному применению.



### **Публикации:**

1. Шанина А.С. Современные технологии математического моделирования для инженерного анализа и проектирования в строительстве. / Болдырев Ю.Я., Климшин Д.В., Романов С.В., Шанина А.С. // Научно-технические ведомости СПбГПУ – СПб: Изд-во СПбГПУ – 2010. – №4. – С. 106-111.
2. Шанина А.С. Опыт применения математического моделирования грунтовых оснований зданий и сооружений/ Белов В.В., Болдырев Ю.Я., Романов С.В., Шанина А.С. // Научно-технические ведомости СПбГПУ – СПб: Изд-во СПбГПУ – 2010.–№5. – С. 103 - 108.
3. Шанина А.С. Современные технологии математического моделирования большепролетных металлических сооружений / Белов В.В., Болдырев Ю.Я., Климшин Д.В., Шанина А.С. // Научно-технические ведомости СПбГПУ – СПб: Изд-во СПбГПУ – 2010. – №5. – С. 151 - 156.
4. Шанина А.С. Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии при решении задач механики грунтов на примере проектирования спортивных объектов / Болдырев Ю.Я., Шанина А.С. // Научный сервис в сети Интернет: суперкомпьютерные центры и задачи: труды Международной суперкомпьютерной конференции. Новороссийск – М.: Изд-во МГУ. – 2010. – С.148
5. Шанина А.С. Математическое моделирование сложных строительных конструкций и сооружений с использованием суперкомпьютеров/ Болдырев Ю.Я., Климшин Д.В., Шанина А.С.// Параллельные вычислительные технологии: труды международной научной конференции. Москва [Электронный ресурс] – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2011. – С. 433 – 439.
6. Шанина А.С. Численное моделирование поведения сложных строительных конструкций и сооружений с использованием суперкомпьютеров / Болдырев Ю.Я., Климшин Д.В., Шанина А.С. // CAD/CAM/CAE Observer, 2011, №6, с. 85-90.
7. Патент № 60166 на полезную модель “Экранирующая конструкция между инженерным сооружением и находящимся под ним трубопроводом“ (патентообладатель – Научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт «Севзапінжтехнологія»).