

На правах рукописи

СЕКАЕВА ЛИЛИЯ РАИЛЕВНА

УДК 539.3

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЁННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО И ПРЕДЕЛЬНОГО
СОСТОЯНИЙ СУХИХ И ВОДОНАСЫЩЕННЫХ
ГРУНТОВ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С УПРУГИМИ
КОНСТРУКЦИЯМИ**

Специальность 01.02.04 –
механика деформируемого твёрдого тела

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

Казань 2005

Работа выполнена на кафедре теоретической механики
Государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина»

- Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,
заслуженный деятель науки РФ и РТ,
академик РАЕН, МАН ВШ, АНТ
Коноплёв Юрий Геннадьевич
- Научный консультант:** кандидат физико-математических наук,
доцент
Бережной Дмитрий Валерьевич
- Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,
профессор
Каюмов Рашит Абдулхакович
- доктор физико-математических наук,
заслуженный деятель науки и техники РТ,
профессор
Паймушин Виталий Николаевич
- Ведущая организация:** Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «29» декабря 2005 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.081.11 по защите диссертации на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по механике при Казанском государственном университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
им. Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета

Автореферат разослан «25» ноября 2005 г.

**Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук, доцент**



А.А. Саченков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Диссертация посвящена конечно-элементному анализу напряжённо-деформированного и предельного состояний сухих и водонасыщенных грунтов, взаимодействующих с упругими конструкциями.

Прогресс в развитии фундаментостроения и подземного строительства в значительной мере определяется достигнутыми к настоящему времени результатами в области математического моделирования различных процессов или физических явлений, в частности, процессов деформирования и разрушения элементов конструкций и сооружений. Существует определённый разрыв между потребностями практики и существующими СНИПами, регламентирующими деятельность проектировщиков и строительную практику, и возможностями уточнённых расчётов элементов конструкций и сооружений исходя из современных возможностей более точной постановки практических задач и их реализации на ЭВМ на основе использования численных методов.

Основным направлением задач, стоящих перед механикой грунтов, является теоретический прогноз поведения грунтовых толщ (их деформируемости, прочности, устойчивости и пр.) под влиянием внешних и внутренних воздействий: разнообразных нагрузок от сооружений, изменений (под действием природных факторов и деятельности человека) условий равновесия, например, при размывах, колебаниях уровня грунтовых вод, разгрузке глубоких слоёв грунта при копке строительных котлованов и др.

Задача исследования напряжённо-деформированного состояния грунтов под действием внешних сил и собственного веса грунта является главной в механике грунтов, и разрешение её для различных случаев загрузки имеет непосредственное приложение в практике строительства. Для практики строительства весьма важно знать, как распределяются напряжения в грунте при загрузке части его поверхности, как напряжённое состояние меняется с течением времени, при каких условиях наступает предельное напряжённое состояние, после чего возникают недопустимые деформации и нарушения сплошности грунтового массива и т.п. Особо существенное значение имеют вопросы определения деформаций грунтов, а именно: общей величины деформаций и отдельных её видов (упругих, остаточных), протекания деформаций во времени и разности деформаций (осадок) под отдельными частями сооружений. Взаимосвязанные процессы деформирования и фильтрации в насыщенных пористых средах составляют сущность многих явлений в природе и служат основой разнообразных технологических воздействий в химической промышленности, строительстве и добыче полезных ископаемых. Важную роль в её развитии играет математическое моделирование, позволяющее прогнозировать и оптимизировать технологические воздействия, интерпретировать и обрабатывать опытные данные. Развитие этой теории отражено в работах ряда исследователей: И.П. Бойко, М.А. Био, Н.М. Герсегонова, Ю.К.

Зарецкого, А.В. Костерина, Н.Н. Маслова, В.Н. Николаевского, А.Б. Фадеева, В.А. Флорина, Н.А. Цытовича и др.

Цель диссертационной работы. Создать методику расчёта напряжённо-деформированного и предельного состояний сухих и водонасыщенных грунтовых массивов, взаимодействующих с деформируемыми конструкциями, на основе метода конечных элементов. Исследовать статическое взаимодействие подземных промышленных сооружений с грунтом.

Научная новизна результатов:

1. Дальнейшее развитие метода конечных элементов для трёхмерного взаимодействия деформируемых конструкций с сухими и водонасыщенными грунтами;
2. Результаты расчёта трёхмерных конструкций, в том числе железобетонных, взаимодействующих с грунтами с учётом фильтрации.

Практическая значимость работы:

1. Приведённые алгоритмы и разработанные на их основе программы расчёта отличаются универсальностью и позволяют проводить численные исследования напряжённо-деформированного и предельного состояний деформируемых конструкций, взаимодействующих с сухими и водонасыщенными грунтами. Результаты использовались при выполнении научно-исследовательской работы в рамках научного сопровождения проектирования и строительства метрополитена г. Казани;
2. Совершенствование методики статического расчёта обделки тоннеля метрополитена на базе создания трёхмерной конечно-элементной модели и соответствующего программного обеспечения;
3. Исследование влияния химического закрепления грунта в зоне расположения перегонных тоннелей при строительстве метрополитена г. Казани.

Достоверность полученных результатов обеспечивается математическим обоснованием предлагаемых методик расчёта, сравнением полученных решений для тестовых задач с известными из литературы аналитическими результатами, анализом результатов расчёта реальных конструкций на сетках, состоящих из разного числа и типа конечных элементов.

На защиту выносятся:

1. Двумерная и трёхмерная постановка задачи статического деформирования сухих и водонасыщенных грунтов, разработанный и апробированный пакет программ, реализующий предложенную методику определения напряжённо-деформированного состояния на основе метода конечных элементов;
2. Методика определения предельного состояния для сухих грунтов;
3. Решение новых практических задач взаимодействия деформируемых конструкций с грунтовыми массивами.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы по мере их получения докладывались и обсуждались

на итоговой студенческой конференции (Казань, КГУ, 2002 г.);

на международной молодёжной научной школе-конференции «Лобачевские чтения» (Казань, КГУ, 2002-2003 г.г.);

на конференции «Наука и практика. Диалоги нового века» (Набережные Челны, 17-19 марта, 2003 г.);

на городской научно-практической конференции «Студенты Зеленодольску» (Зеленодольск, 12 апреля, 2003 г.);

на XV Всероссийской межвузовской научно-технической конференции (Казань, 20-22 мая, 2003 г.);

на Тринадцатой Межвузовской конференции «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 29-31 мая, 2003 г.);

на Двенадцатой Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Владимир, 30 июня-5 июля, 2003 г.);

на XX Международной конференции «Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов» (Санкт-Петербург, 24-26 сентября, 2003 г.);

на итоговой научной конференции 2003 г. Казанского научного центра РАН (Казань, 2004 г.);

на Пятой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH (Москва, 21-22 апреля, 2005 г.);

на городском научно-методическом семинаре кафедр теоретической механики (Казань, 31 мая, 2005 г.);

на Всероссийской научной конференции «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 1-3 июня, 2005 г.);

на ежегодных итоговых научных конференциях Казанского государственного университета (Казань, КГУ, 2003-2005 г.г.);

на семинаре кафедры теоретической механики КГУ и лаборатории механики оболочек НИИММ им. Н.Г. Чеботарёва (Казань, КГУ, 2005 г.).

В целом диссертация докладывалась и получила одобрение на расширенном семинаре кафедры теоретической механики и лаборатории механики оболочек НИИММ им. Н.Г. Чеботарёва Казанского государственного университета.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 11 работ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованной литературы. Изложена на 175 страницах машинописного текста, содержит 36 таблиц, 54 рисунка. Список литературы насчитывает 205 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обзор работ по теме диссертации, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и положения, выносимые на защиту. Даётся краткий анализ структуры и содержания диссертации.

В первой главе рассматриваются основные уравнения теории консолидации квазидвухфазных грунтов. Система вариационных разрешающих уравнений консолидации квазидвухфазных грунтовых сред

$$\int_V \sigma_{ij}^{tot} \delta \varepsilon_{ij}^{sk} dV + \int_V \delta_{i3} g \rho \delta g_i^{sk} dV - \int_{S_\sigma} \tilde{p}_i^n \delta g_i^{sk} dS = 0, \quad (1)$$

$$\int_V k_\phi^w \left(\delta_{i3} + \frac{\delta_{ij} P_{,j}}{m_w g \rho^w} \right) \delta P_{,i}^w dV - \int_{S_{p_n}} k_\phi^w \tilde{H}_{,n}^w \delta P^w dS = 0. \quad (2)$$

получена на основе Эйлера подхода к описанию движения в предположении справедливости принципа эффективных напряжений Терцаги

$$\sigma_{ij}^{tot} = \sigma_{ij}^{ef} - \delta_{ij} P^w. \quad (3)$$

Закон фильтрации записывается по отношению к разности приведенных скоростей жидкости и скелета грунта в форме Дарси-Герсеванова.

Рассмотрен случай квазистатического движения грунтовой среды, когда ускорениями частиц фильтрующей жидкости и скелета грунта можно пренебречь.

Расчёт проводится на основе изопараметрических квадратичных конечных элементов сплошной среды Сирендипова семейства, в качестве узловых неизвестных которых выбраны декартовы проекции вектора перемещений скелета грунта и поровое давление фильтрующей жидкости.

Аппроксимации вектора перемещений $\bar{\mathcal{Q}}$, записанного в покомпонентном виде $\{\mathcal{Q}\}^T = \{u, v, w\}^T$, и порового давления P^w представим в виде

$$\{\mathcal{Q}\} = [\Psi(\bar{x})] \{\mathcal{Q}^e(t)\} \quad (4)$$

и

$$P^w = \{\psi(\bar{x})\}^T \{p^e(t)\}, \quad (5)$$

причём разделение пространственных и временных переменных заложим уже на уровне поэлементной аппроксимации.

Применяя стандартную конечно-элементную методику, получим систему разрешающих уравнений в виде

$$[K]\{\mathcal{Q}\} - [C]\{p\} = \{f\}, \quad (6)$$

$$[H]\{p\} + [M]\{\dot{p}\} + [C]^T \{\dot{\mathcal{Q}}\} = \{r\}, \quad (7)$$

где $\{ \mathcal{G} \}$ и $\{ p \}$ – вектор узловых перемещений и вектор узловых значений порового давления для всей расчётной области. Главные граничные и начальные условия примут вид

$$\{ \mathcal{G} \} \Big|_{S_p} = \{ \tilde{\mathcal{G}} \}, \{ P^w \} \Big|_{S_p} = \{ \tilde{P}^w \}. \quad (8)$$

$$\{ \mathcal{G} \} \Big|_{t=t_0} = \{ \tilde{\mathcal{G}}_0 \}, \{ P^w \} \Big|_{t=t_0} = \{ \tilde{P}_0^w \}. \quad (9)$$

Вторая глава посвящена основным расчётным алгоритмам. Реализованы расчётные схемы, позволяющие определять напряжённо-деформированное состояние грунта в случае гидростатического распределения порового давления (случай установившегося течения грунтовых вод) и в случае квазистатического движения грунта (случай неустановившегося движения). Для решения задачи консолидации используется конечно-разностная схема по времени типа Кранка-Николсона, что приводит к решению на каждом шаге линейной системы уравнений вида:

$$\begin{bmatrix} [K] & -[C] \\ [C]^T & [M] - [H] \frac{h}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathcal{G}_{n+1} \\ p_{n+1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -[K] \{ \mathcal{G}_n \} + [C] \{ p_n \} - (\{ f_{n+1} \} + \{ f_n \}) \\ [C]^T \{ \mathcal{G}_n \} + \left([M] + [H] \frac{h}{2} \right) \{ p_n \} + \{ r_{n+1} \} \frac{h}{2} \end{Bmatrix}. \quad (10)$$

В двумерном случае основными расчётными элементами являются 4-х и 8-ми узловые конечные элементы. В трёхмерном – 8-ми узловой конечный элемент.

Рассматриваются тестовые задачи, позволяющие судить о точности и эффективности предложенной методики.

В качестве одного из тестов решена задача определения эффективных давлений в скелете глинистого грунта, залегающего на несжимаемой породе подверженного действию сплошной равномерно распределённой нагрузки. На рисунке 1 приведено сравнение распределений давлений в скелете грунта¹.



Рис. 1.

¹ Цытович Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Госстройиздат, 1963. – 636 с.

В рамках модели М.А. Био рассматривается плоская задача о действии сосредоточенной силы на упругое полупространство с порами, заполненными жидкостью. На рисунке 2 приведён график изменения осадки от времени, в точке поверхности удалённой от приложения сосредоточенной силы на расстоянии 1м, построенный на основе аналитического решения². Треугольниками обозначены значения осадок, полученных на основе конечно-элементной методики. Далее решена задача деформирования плоской водонасыщенной среды под кратковременным (время действия нагрузки 500 секунд) действием распределённой нагрузки. На рисунке 3 приведено сравнение распределений порового давления по толщине расчётной области через 5000 секунд после начала процесса³.

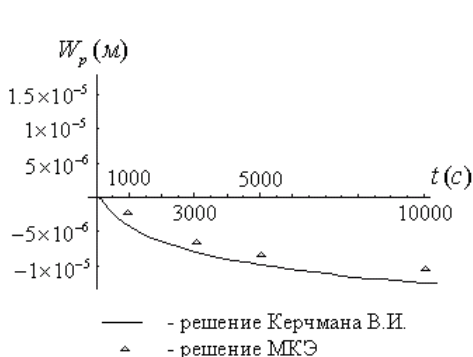


Рис. 2.

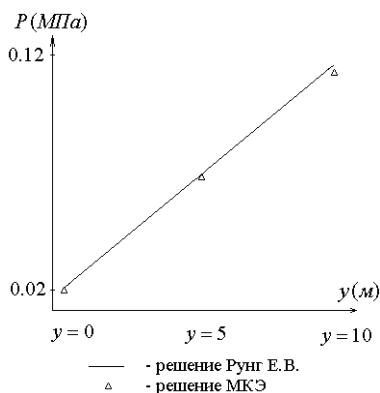


Рис. 3.

Третья глава посвящена предельному состоянию в грунте. Реализована методика определения напряжённого и предельного состояния грунта, учитывающая условия прочности Мизеса-Боткина, как задание предельной поверхности в виде

$$\tau_i = c^* + \sigma_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi^*, \quad (11)$$

где $\tau_i = \sigma_i / \sqrt{3}$ – интенсивность касательных напряжений, σ_0 – среднее напряжение, φ^* – угол трения на октаэдрической площадке, c^* – предельное сопротивление чистому сдвигу.

² Керман В.И. Контактная задача консолидации водонасыщенной среды / В.И. Керман // Изв. АН СССР. МТТ. – 1974. – №3. – С. 102-109.

³ Рунг Е.В. Разностные методы решения задачи насыщенно-ненасыщенной фильтрационной консолидации: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.01.07: защищена 25.11.04 / Е.В. Рунг. – Казань, 2004. – 117 с.

Задача решается на основе метода конечных элементов, причём реализуется итерационная процедура, известная как «метод начальных напряжений». В соответствии с ней на каждом шаге итерации формулируется линейная задача, и найденные напряжения оцениваются по соотношениям предельного состояния. Если грунт не достиг предельного состояния, то считается, что напряжённое состояние найдено. Если грунт вышел в предельное состояние, то определяются «истинные» напряжения и «дополнительные», которые в совокупности равны найденным из решения линейной задачи напряжениям $\{\sigma^{(k+1)}\}$. Их необходимо корректировать по принятой теории предельного состояния и определять истинные напряжения $\{\sigma_u^{(k+1)}\}$. Разность этих напряжений и определяет неуравновешенные «дополнительные» напряжения

$$\{\sigma_o^{(k+1)}\} = \{\sigma^{(k+1)}\} - \{\sigma_u^{(k+1)}\}. \quad (12)$$

Используется формулировка итерационной процедуры в приращениях, в соответствии с которой на шаге итерации определяется приращение перемещений $\{\Delta v^{(k+1)}\}$. В этом случае на первом шаге решается задача

$$\iiint_V \{\sigma^{(1)}\}^T \{\delta \varepsilon\} dV = \iiint_V \{P_v\}^T \{\delta v\} dV + \iint_{S_\sigma} \{P_s\}^T \{\delta v\} dS, \quad (13)$$

из которой находится вектор перемещений $\{v^{(1)}\}$, деформаций $\{\varepsilon^{(1)}\}$ и напряжений $\{\sigma^{(1)}\} = [D]\{\varepsilon^{(1)}\}$. Далее определяются истинные $\{\sigma_u^{(1)}\}$ и дополнительные $\{\sigma_o^{(1)}\}$ напряжения. Все последующие шаги итерации основаны на решении уравнения

$$\iiint_V \{\Delta \sigma^{(k+1)}\}^T \{\delta \varepsilon\} dV = \iiint_V \{\sigma_o^{(k)}\} \{\delta \varepsilon\} dV, \quad (14)$$

из решения, которого находятся

$$\begin{aligned} &\{\Delta v^{(k+1)}\}, \\ &\{\Delta \varepsilon^{(k+1)}\}, \\ &\{\Delta \sigma^{(k+1)}\} = [D]\{\Delta \varepsilon^{(k+1)}\}. \end{aligned} \quad (15)$$

Истинное деформированное состояние определяется как

$$\begin{aligned} \{v^{(k+1)}\} &= \{v^{(k)}\} + \{\Delta v^{(k+1)}\}, \\ \{\varepsilon^{(k+1)}\} &= \{\varepsilon^{(k)}\} + \{\Delta \varepsilon^{(k+1)}\}. \end{aligned} \quad (16)$$

Напряжения для анализа возможного предельного состояния и определения истинных и дополнительных напряжений находятся как

$$\{\sigma^{(k+1)}\} = \{\sigma_u^{(k)}\} + \{\Delta\sigma^{(k+1)}\}. \quad (17)$$

Условие остановки итерационного процесса формулировалось как ограничение на приращение перемещений

$$\frac{\|\Delta v^{(k+1)}\|}{\|v^{(k+1)}\|} \leq \varepsilon. \quad (18)$$

Истинные напряжения:

$$\{\sigma_u^{k+1}\} = \{\sigma_u^{(k)}\} + [D_{ep}^{(k+1)}] \{\Delta\varepsilon^{(k+1)}\}. \quad (19)$$

Закон Гука:

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\varepsilon_0 = D_{ijmn}\varepsilon_{mn}. \quad (20)$$

Окончательно для компонент упругопластической матрицы получается выражение

$$D_{kijmn}^{ep} = D_{kijmn} - \frac{\left(\frac{G}{\tau_i} S_{kj} + \delta_{kj} K \operatorname{tg} \varphi^*\right) \left(\frac{G}{\tau_i} \sum_{mn} S_{mn} \varepsilon_{mn} + \varepsilon_0 3K \operatorname{tg} \varphi^*\right)}{G + K \operatorname{tg}^2 \varphi^*}, \quad (21)$$

где S_{kj} – компоненты девiatorа тензора напряжений, K – модуль всестороннего сжатия.

В рамках модели идеально-пластической среды строится итерационная процедура решения физически нелинейной задачи типа метода начальных напряжений. В результате удаётся определить области (зоны) достижения грунтами предельного состояния и уровень пластических деформаций, приобретённых грунтом. Наибольшее распространение при решении физически нелинейных задач методом конечных элементов получила итерационная процедура, известная как «метод начальных напряжений». В соответствии с ней на каждом шаге итерации формулируется линейная задача и найденные напряжения оцениваются по соотношениям предельного состояния. Если материал не достиг его, то считается, что напряжённое состояние найдено. Если материал вышел в предельное состояние, то определяются «истинные» напряжения и «дополнительные», которые в совокупности равны найденным, из решения линейной задачи. Далее считается, что «дополнительные» напряжения являются неуравновешенными внутренними усилиями, и на следующем шаге итерации они принимаются как внешние силы.

Рассматривается модельная задача – расчёт насыпи под действием собственного веса и нагрузки, равномерно распределённой по верхней грани, нижняя грань не имеет вертикальных смещений, а боковые – горизонтальных. Исследован случай плоского деформирования. Считается,

что грунт – однородная среда со следующими физико-механическими свойствами: модуль деформации $E = 0.160 \text{ МПа}$, коэффициент бокового расширения $\mu = 0.42$, сцепление $C = 40 \text{ КПа}$, угол внутреннего трения $\varphi = 17^\circ$, плотность $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$, нагрузка $q = 0.40 \text{ МПа}$, высота $H_1 = 40 \text{ м}$, высота $H_2 = 45 \text{ м}$, длина $L = 211.29 \text{ м}$, высота $h = 14 \text{ м}$, длина $l = 55 \text{ м}$.

Приведено распределение интенсивности напряжений в расчётной области от собственного веса грунта без учёта и с учётом распределённой по дорожному полотну нагрузки. А также распределение прогибов в расчётной области от действия распределённой по дорожному полотну нагрузки, распределение интенсивности пластических деформаций после приложения всей нагрузки (собственного веса грунта и распределённой по дорожному полотну). На рисунке 4 приведена расчётная область, на рисунке 5 – распределение интенсивности пластических деформаций после приложения нагрузки.

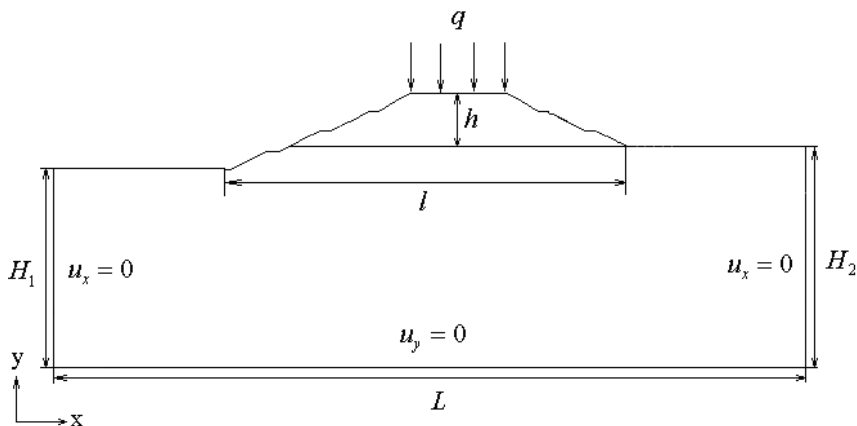


Рис. 4.

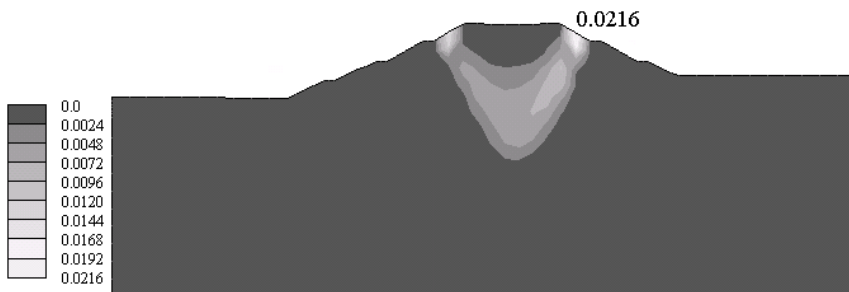


Рис. 5.

Таблица 1.

Варианты расчёта	Решение МКЭ линейные элементы	Решение МКЭ квадратичные элементы	Решение ANSYS	Решение ⁴
$\sigma_i [МПа]$ (собственный вес)	0.505	0.508	0.505	0.504
$\sigma_i [МПа]$ (собственный вес и распределённая нагрузка $\bar{q}$)	0.593	0.617	0.590	0.588
$u_x [м]$ (собственный вес и распределённая нагрузка $\bar{q}$)	0.854	0.897	0.854	0.854
ε_i (собственный вес и распределённая нагрузка $\bar{q}$)	0.022	0.023	0.022	0.023

В таблице 1 приведено сравнение результатов решений данной задачи с решениями, полученными в ППП ANSYS и кандидатской диссертации Л.У. Султанова.

В четвёртой главе решаются новые практические задачи. В первой задаче основной целью расчёта является определение положения и уровня напряжённо-деформированного состояния фекального коллектора, находящегося в непосредственной близости от прокладываемого тоннеля метрополитена, во время проходки и после окончания строительных работ.

Для этого проводится трёхмерный расчёт грунтового массива зоны максимального взаимного сближения коллектора и обделки тоннеля метрополитена с учётом уровня грунтовых вод и расположенного выше подземного перехода. Исходная расчётная область приведена на рисунке 6.

Детальное моделирование подземного перехода невозможно из-за ограничений на размерность задачи, поэтому подземный переход представляется в виде толстостенного прямоугольного параллелепипеда без верхнего перекрытия. Коллектор моделируется сплошной бетонной трубой без внешнего кожуха.

⁴ Султанов Л.У. Исследование больших вязкоупругопластических деформаций в трёхмерной постановке: дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04 / Л.У. Султанов. – Казань, 2005. – 141 с.

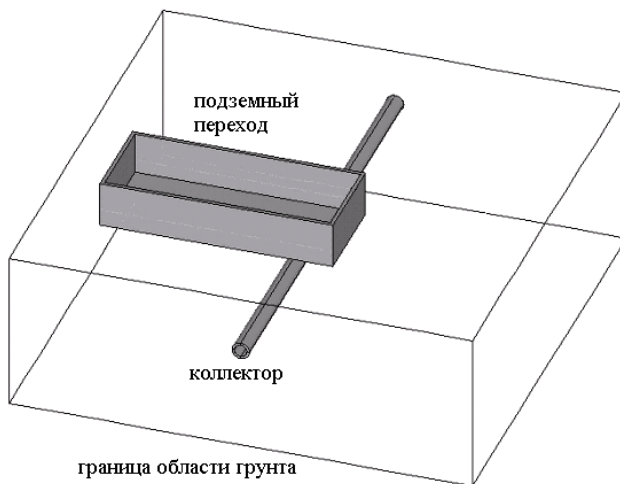


Рис. 6.

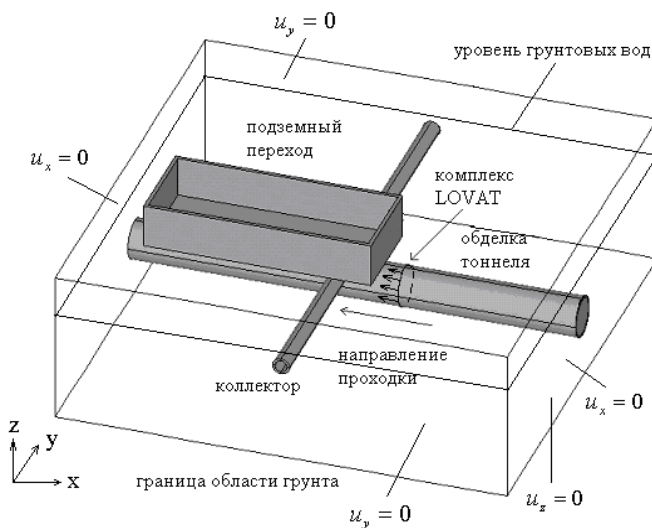


Рис. 7.

Кинематические условия задачи предполагают, что точки всех боковых и нижней грани выделенного объема грунта испытывают перемещения только в своей плоскости. Вся расчётная область находится под действием собственного веса. Определённые таким образом перемещения и напряжения в коллекторе будем называть в дальнейшем базовым расчётом и будем сравнивать с ним все остальные расчёты (те, в которых моделируется и обделка метрополитена).

Проходка линии метрополитена для водонасыщенных грунтов схематично изображена на рисунке 7. Т.е. расчётная область усложняется с появлением участка обделки метрополитена, причём его длина может меняться от нуля до длины расчётной области.

В работе проводилось два типа расчётов. Первый – без учёта влияния грунтовых вод. В том случае весовая нагрузка рассчитывалась, исходя из плотности сухих грунтов или бетона. Второй тип расчётов, с учётом гидростатической нагрузки, предполагает несколько иную схему определения весовой нагрузки. Учёт приведённой весовой нагрузки в этом случае будем проводить следующим образом:

– приведённый удельный вес водонасыщенных грунтов должен определяться по формуле

$$\gamma_{вн} = \frac{\gamma_{мч} - \gamma_{в}}{1 + e}, \quad (22)$$

где $\gamma_{вн}$ – удельный вес водонасыщенного грунта, $\gamma_{мч}$ – удельный вес минеральных частиц грунта, $\gamma_{в}$ – удельный вес воды, e – коэффициент пористости грунта;

– на внешнюю поверхность коллектора, обделки тоннеля метрополитена и на часть поверхности подземного перехода, находящуюся ниже уровня грунтовых вод, должна действовать гидростатическая нагрузка, соответствующая уровню грунтовых вод.

Основная часть расчётов была проведена с учётом уровня грунтовых вод. В таблице 2 – значения первых главных напряжений и прогибов коллектора в зависимости от минимального расстояния между коллектором (с учётом кожуха) и обделкой тоннеля при длине линии тоннеля 60 м без учёта давления. В таблице $\Delta\sigma_1$ – процент отклонения первого главного напряжения от базового расчёта, Δu_y – максимальное абсолютное смещение коллектора в зоне сближения с обделкой, $\Delta u_y^{кон}$ – максимальное смещение коллектора в зоне сближения с обделкой относительно концов коллектора на границах расчётной области.

Таблица 2.

l [м]	σ_1 [Мпа]	$\Delta\sigma_1$ [%]	Δu_y [см]	$\Delta u_y^{кон}$ [см]
Базовый расчёт	2.91	-	-	-
0.5	3.63	+24.7	0.50	0.66
1.0	3.53	+21.3	0.47	0.63
1.5	3.45	+18.6	0.46	0.61
2.0	3.35	+15.1	0.42	0.57

Основной целью второй задачи является определение наилучшей формы области химического закрепления грунта в зоне пересечения тоннелями метрополитена грунтового массива с целью снижения уровня напряжённо-деформированного состояния в обделке тоннеля.

Вторая задача состоит из трёх этапов: первый – деформирование сплошных колец обделки метрополитена в однородном грунте при наличии зоны химического закрепления.

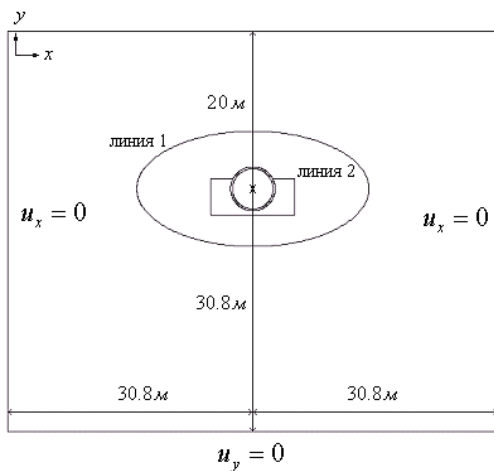


Рис. 8.

Расчётная область исследуемой модельной задачи с одним тоннелем приведена на рисунке 8. Считаем, что грунт, окружающий обделку, а также грунт в области химического закрепления являются водонасыщенными, и уровень грунтовых вод совпадает с верхней границей грунтов. Бетонная обделка является водонепроницаемой.

Далее, для различной формы зон химического закрепления грунта определяются окружные напряжения в кольце обделки. Примеры взаимного расположения зоны химического закрепления грунта и обделки метрополитена приведены на рисунке 8 (один тоннель), на рисунке 10 (два тоннеля).

Второй этап – деформирование сплошных колец обделки метрополитена в реальном грунте при наличии зоны химического закрепления.

Основной целью является определение наилучшей формы зоны закрепления грунта для опасного сечения для двух тоннелей, представленных сплошными бетонными кольцами.

Разрез грунтов расчётной области и расположение тоннелей приведены на рисунке 9. На рисунке 11 – оптимальный вариант расположения зоны химического закрепления при наличии двух тоннелей. В таблицах 3 и 4 приведены максимальные и минимальные окружные напряжения в обделке тоннеля метрополитена в зависимости от угла наклона левой части зоны химического закрепления и от длины зоны химического закрепления соответственно.

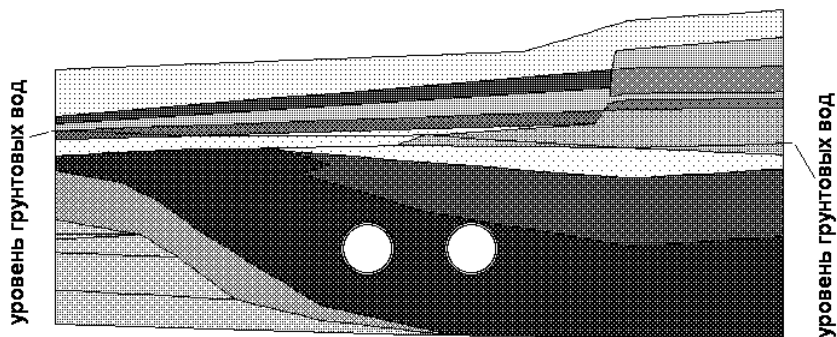


Рис. 9.

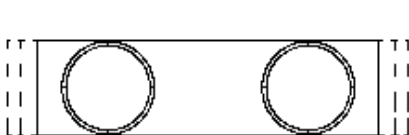


Рис. 10.

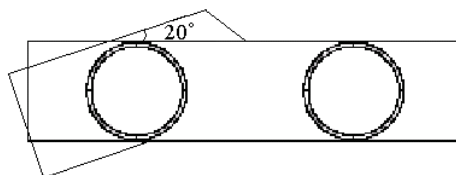


Рис. 11.

Таблица 3.

Угол наклона зоны закрепления вокруг левого тоннеля	$\sigma_{окр}^{min}$ [МПа]	$\Delta\sigma_{окр}^{min}$ [МПа]	$\sigma_{окр}^{max}$ [МПа]	$\Delta\sigma_{окр}^{max}$ [МПа]
базовый расчёт	-20.1		10.8	
0°	-16.3	-3.8	7.14	-3.66
10°	-15.9	-4.2	6.73	-4.07
20°	-15.5	-4.6	6.18	-4.62

Таблица 4.

$r_{дор}^x$ [м] – превышение горизонтальной полустороны зоны закрепления над радиусом обделки	$\sigma_{окр}^{min}$ [МПа]	$\Delta\sigma_{окр}^{min}$ [МПа]	$\sigma_{окр}^{max}$ [МПа]	$\Delta\sigma_{окр}^{max}$ [МПа]
базовый расчёт	-19.4		12.4	
0.5	-13.7	-5.7	6.51	-5.89
1.5	-13.7	-5.7	6.56	-5.84
2.5	-13.7	-5.7	6.60	-5.80

Третий этап – деформирование блочных колец обделки метрополитена в реальном грунте при наличии зоны химического закрепления грунта с учётом контакта между блоками.

Проводим окончательный расчёт (реальные грунты, два тоннеля, найденная оптимальная форма химического закрепления грунта) для колец обделки, составленных из блоков, с учётом контактного взаимодействия между ними. Эта задача (в отличие от предыдущих) является нелинейной и требует подробного описания способа стыковки блоков и механизма контактного взаимодействия.

Решается задача упругого деформирования бетонного кольца обделки метрополитена, расположенного в толще грунтового массива. Предполагается, что кольцо обделки, поперечное сечение которого показано на рисунке 12, состоит из восьми сегментных блоков, соединённых друг с другом посредством резиновых вставок.

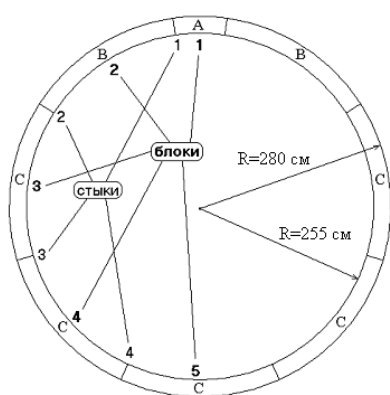


Рис. 12.

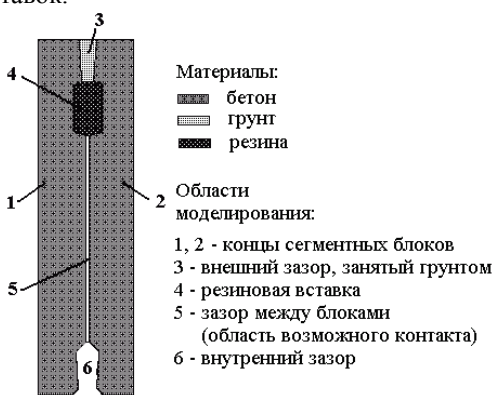


Рис. 13.

Для реализации возможности контактного взаимодействия блоков кольца обделки метрополитена применяется численная схема, использующая специальные контактные элементы. Они включаются в работу, когда линейные деформации обжатия такого элемента становятся отрицательными, а сдвиговая жёсткость такого элемента корректируется в зависимости от напряжений обжатия. Задача решается в шаговой постановке.

Рисунок 13 иллюстрирует взаимное расположение резиновой вставки и концов сегментных блоков при их стыковке.

Считается, что конструкция работает в условиях плоской деформации, происходящей под действием весовой нагрузки, а влияние арматуры не учитывается. Расчётная схема предусматривает возможность смыкания бетонных блоков обделки в процессе деформирования.

Расчёт проводился для зоны химического закрепления, приведённой на рисунке 11, для угла наклона зоны химического закрепления вокруг левого тоннеля 20° от горизонтали.

В таблице 5 приведены максимальные и минимальные окружные напряжения для различных расчётных случаев для левого и правого тоннелей соответственно.

Таблица 5.

Тоннели	Левый		Правый	
Варианты расчёта	$\sigma_{окр}^{min}$ [МПа]	$\sigma_{окр}^{max}$ [МПа]	$\sigma_{окр}^{min}$ [МПа]	$\sigma_{окр}^{max}$ [МПа]
Базовый расчёт (сплошное кольцо)	-20.1	10.8	-19.4	12.4
Учёт зоны химического закрепления (сплошное кольцо)	-15.5	6.18	-13.7	6.60
Базовый расчёт (блочное кольцо)	-13.6	5.24	-11.9	6.75
Учёт зоны химического закрепления (блочное кольцо)	-9.87	3.88	-8.76	4.32

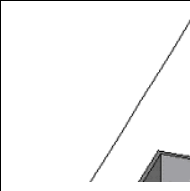
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Дана двумерная и трёхмерная постановка задачи упругого и упругопластического деформирования сухих и водонасыщенных грунтов.
2. Реализована методика расчёта напряжённо-деформированного и предельного состояний сухих и водонасыщенных грунтовых массивов, взаимодействующих с деформируемыми конструкциями, на основе метода конечных элементов.
3. Разработан и апробирован пакет программ, реализующий предложенную методику определения напряжённо-деформированного и предельного состояния на основе метода конечных элементов.
4. Получены новые числовые результаты расчёта подземных транспортных сооружений, взаимодействующих с грунтами, в том числе и с водонасыщенными, в двумерной и трёхмерной постановках.

Работа поддержана грантом Министерства Образования (2004 г.), грантом Академии Наук Республики Татарстан (2005 г.) и грантом для аспирантов КГУ III года обучения (2005 г.).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Секаева Л.Р. Плоская задача деформирования грунтовых массивов с учётом влияния фильтрации грунтовых вод / Л.Р. Секаева // Труды Математического центра им. Н.И. Лобачевского. «Лобачевские чтения-2002»: материалы междунаро. молодежной науч. школы-конференции (Казань, 28 ноября-1 декабря, 2002 г.). – Казань: Изд-во Казан. матем. о-ва, 2002. – Т. 18. – С. 78-79.
2. Секаева Л.Р. Исследование напряжённо-деформированного состояния сухих и водонасыщенных грунтов / Д.В. Бережной, Ю.Г. Коноплёв, Л.Р. Секаева // «Наука и практика. Диалоги нового века»: материалы конф. (Наб. Челны, 17-19 марта, 2003 г.). – Наб. Челны: Изд-во Камского гос. политехн. ин-та, 2003. – Ч. II. – С. 283-285.
3. Секаева Л.Р. Исследование напряжённо-деформированного состояния водонасыщенных грунтов / Л.Р. Секаева // Городская науч.-практ. конф. «Студенты Зеленодольску»: сб. докладов (Зеленодольск, 12 апреля, 2003 г.). – Зеленодольск, 2003.
4. Секаева Л.Р. Исследование напряжённо-деформированного состояния грунтов / Д.В. Бережной, Ю.Г. Коноплёв, Л.Р. Секаева // Сб. материалов XV Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. (Казань, 20-22 мая, 2003 г.). – Казань: КГУ, 2003. – Ч. I. – С. 366-368.
5. Секаева Л.Р. Деформирование грунтовых массивов с учётом влияния фильтрации грунтовых вод / Д.В. Бережной, Ю.Г. Коноплёв, Л.Р. Секаева // «Математическое моделирование и краевые задачи»: тр. Тринадцатой Межвуз. конф. (Самара, 29-31 мая, 2003 г.). – Самара, 2003. – Ч. I. – С. 12-14.
6. Секаева Л.Р. Исследование напряжённо-деформированного состояния водонасыщенных грунтов / Л.Р. Секаева, Д.В. Бережной // Тез. докладов Двенадцатой Международ. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Владимир, 30 июня-5 июля, 2003 г.). – М.: Изд-во МАИ, 2003. – Т. 2. – С. 563-564.
7. Секаева Л.Р. Исследование взаимодействия деформируемых конструкций с сухими и водонасыщенными грунтами / Л.Р. Секаева, Д.В. Бережной, Ю.Г. Коноплёв // «Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов»: тез. докладов XX Международ. конф. (Санкт-Петербург, 24-26 сентября, 2003 г.). – СПб., 2003. – С. 160-162.
8. Секаева Л.Р. Исследование взаимодействия деформируемых конструкций с сухими и водонасыщенными грунтами / Л.Р. Секаева, Д.В. Бережной, Ю.Г. Коноплёв // «Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов»: тр. докладов XX Международ. конф. (Санкт-Петербург, 24-26 сентября, 2003 г.). – СПб., 2003. – Т. III. – С. 156-159.



Секаева Л.Р. Трёхмерная задача взаимодействия сухих и водонасыщенных сред / Л.Р. Секаева // Тр. Матем. центра им. Н.И. Лобачевского. «Лобачевские чтения-2003»: материалы международ. молодёж. науч. школы-конференции. (Казань, 1-4 декабря, 2003 г.). – Казань: Изд-во Казан. матем. о-ва, 2003. – Т. 21. – С. 195-196.

10. Секаева Л.Р. Деформирование железобетонных блоков обделки тоннеля метрополитена с сухими и водонасыщенными грунтами с учётом их контактного взаимодействия / Д.В. Бережной, А.А. Саченков, Л.Р. Секаева, Р.Р. Хакимзянов // Сб. трудов Пятой конф. пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH (Москва, 21-22 апреля, 2005 г.). – М., 2005. – С. 102-107.
11. Секаева Л.Р. Деформирование железобетонных блоков обделки тоннели метрополитена, взаимодействующих с сухими и водонасыщенными грунтами с учётом их химического закрепления / Д.В. Бережной, Ю.Г. Коноплёв, Л.Р. Секаева // «Математическое моделирование и краевые задачи»: тр. Всерос. науч. конф. (Самара, 1-3 июня, 2005 г.). – Самара, 2005. – Ч. 1. – С. 64-66.