

На правах рукописи



Осман Ахмад

**Напряженно-деформированное состояние не полностью водонасыщенных оснований при статическом и динамическом воздействиях**

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва-2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ).

Научный руководитель: доктор технических наук  
**Тер-Мартirosян Армен Завернович**

Официальные оппоненты: **Пшеничкина Валерия Александровна**  
доктор технических наук, профессор  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», кафедра «Строительные конструкции, основания и надёжность сооружений», заведующий кафедрой

**Королева Ирина Владимировна**  
кандидат технических наук,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра «Основания, фундаменты, динамика сооружений и инженерная геология», доцент

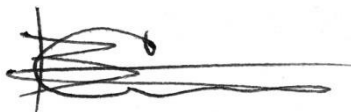
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» (ФГБОУ ВО «ТИУ»)

Защита состоится «27» сентября 2023 г. в 14:30 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.05 (Д 212.138.14), созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ) по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, зал Ученого Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИУ МГСУ и на сайте <http://www.mgsu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Сидоров  
Виталий Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Для решения задач в области проектирования, строительства и эксплуатации гражданских, промышленных и других объектов на слабых водонасыщенных глинистых грунтах более десяти метров толщиной, с модулем деформации до 10 МПа, и со степенью водонасыщения  $0,8 < S_r \leq 0,99$ , следует производить учет статических, динамических и сейсмических воздействий на параметры массивов грунтов основания.

Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтов основания при указанных выше воздействиях является основой для количественной оценки влияния взаимодействия сооружений с их основаниями и, таким образом, определения дополнительных осадок и кренов, касательных напряжений и избыточного порового давления и других последствий, возникающих в результате этих воздействий.

Таким образом, последствия данных воздействий влияют на несущие конструкции подземных и наземных частей зданий и сооружений. В некоторых случаях эти конструкции теряют свою эксплуатационную пригодность. В связи с этим, количественная оценка НДС слабых водонасыщенных ( $0,8 < S_r \leq 0,99$ ) оснований при статическом, динамическом и сейсмическом воздействиях является актуальной задачей строительства в настоящее время.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами прогноза статических и дополнительных исследований оснований зданий и сооружений на основе экспериментальных и теоретических исследований физических и механических свойств слабых водонасыщенных глинистых грунтов, а также проблемами в области сейсмического строительства занимались М.Ю. Абелев, З.Г. Тер-Мартirosян, Р.Э. Татевосян, В.А. Пшеничкина, Л.Р. Ставницер, А.З. Тер-Мартirosян, Л.С. Амарян, В.А. Флорин, К. Терцаги, Н.А. Цытович, И.Т. Мирсаяпов, И.В. Королева и др. Количественная оценка НДС водонасыщенных оснований при изменении их механических свойств при статическом, динамическом и сейсмическом воздействиях была изучена в работах Ю.К. Зарецкого, М.Ю. Абелева, К. Терцаги, А.Л. Гольдина, З.Г. Тер-Мартirosяна, Л.Р. Ставницера, А.З. Тер-Мартirosяна и др. В данной работе рассматриваются расчетно-теоретические и численные решения различных задач по количественной оценке НДС водонасыщенных оснований зданий и сооружений в упругопластической и упруго-вязкой постановке.

При этом необходимо отметить, что на количественную оценку НДС оснований существенное влияние оказывают физико-механические характеристики грунтов (плотность, влажность, степень водонасыщения и др.). К сожалению, этому вопросу уделено слишком мало внимания. Между тем результаты расчетов, без учета этого фактора, могут отличаться в несколько раз.

**Цель работы заключается** в изучении и совершенствовании методов количественной оценки НДС водонасыщенного основания при статическом, динамическом и сейсмическом воздействиях, в том числе, аналитическим и численным методами при прогнозировании остаточных деформаций и перемещений грунтов оснований и фундаментов при учете степени водонасыщения  $0,8 < S_r \leq 0,99$ .

### **Задачи исследования**

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ существующих современных методов исследования и математического описания механических свойств водонасыщенных ( $0,8 < S_r \leq 0,99$ ) грунтов для совершенствования методов решения прикладных задач механики грунтов при статическом, динамическом и сейсмическом воздействиях.

2. Изучить и проанализировать современные методы количественной оценки НДС оснований сооружений при ( $0,8 < S_r \leq 0,99$ ), включая расчеты дополнительных деформаций при динамических и сейсмических нагрузках.

3. Определить параметры динамических свойств грунтов, необходимых для расчетного обоснования задач, при динамических и сейсмических воздействиях с применением специализированных математических моделей.

4. Решить задачи по оценке дополнительных деформаций водонасыщенных ( $0,8 < S_r \leq 0,99$ ) грунтов, в том числе в основании сооружений, аналитическим методом при статических нагрузках с учётом новых моделей грунтов.

5. Решить задачи по оценке дополнительных деформаций в основании ( $0,8 < S_r \leq 0,99$ ) сооружений при статических, динамических и сейсмических нагрузках в упругопластической и упруго-вязкой постановке с использованием Plaxis и различных расчётных методов, в том числе LE, MC, HS и UBC3D-PLM и дать их анализ.

6. Дать сравнительную оценку полученных в диссертации результатов решения задач с использованием линейных, нелинейных и реологических свойств водонасыщенных ( $0,8 < S_r \leq 0,99$ ) грунтов при статическом, динамическом и сейсмическом воздействиях.

**Объект исследования** – массив слабого водонасыщенного ( $0,8 < S_r \leq 0,99$ ) глинистого грунта, взаимодействующего с фундаментами зданий и сооружений.

**Предмет исследования** – механические свойства водонасыщенной грунтовой среды ( $0,8 < S_r \leq 0,99$ ), и их использование при количественной оценке НДС слабого водонасыщенного ( $0,8 < S_r \leq 0,99$ ) массива глинистого грунта, взаимодействующего с подземными конструкциями.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Поставлены и решены задачи по количественной оценке НДС водонасыщенного ( $0,8 < S_r \leq 0,99$ ) массива грунта, в том числе определена осадка и несущая способность с использованием математических моделей LE, MC, HS и UBC3D-PLM.

2. Показано, что на результаты расчетов МКЭ существенно влияет использование специализированной математической модели UBC3d-PLM, учитывающей возникновение избыточного порового давления, особенно при  $S_r = 0,999$ , в том числе, при оценке возможности разжижения грунтов оснований при сейсмическом воздействии.

3. Дана сравнительная оценка НДС водонасыщенных ( $0,8 < S_r \leq 0,99$ ) оснований различных зданий и сооружений при статическом и динамическом воздействиях при использовании различных математических моделей.

4. Получено математически точное решение количественной оценки НДС основания конечной ширины с использованием системы уравнений Генки при различной степени водонасыщения ( $S_r = 0,8 \dots 0,99$ ).

**Теоретическая и практическая значимость работы заключается в:**

1. Дан анализ и сравнение различных методов математического описания механических свойств водонасыщенных грунтов при статическом, динамическом и сейсмическом воздействиях с учетом  $0,8 < S_r \leq 0,99$ .

2. Дано научное обоснование процесса накопления дополнительных деформаций и напряжений, в том числе остаточных деформаций в водонасыщенном грунте при статическом, динамическом и сейсмическом воздействиях в зависимости от  $S_r$ .

3. Решены актуальные задачи по количественной оценке НДС водонасыщенных ( $0,8 < S_r \leq 0,99$ ) оснований зданий и сооружений аналитическим и численными методами, с учетом линейных, нелинейных и реологических свойств грунтов.

4. Получили развитие новые методы количественной оценки остаточных деформаций и напряжений в основаниях сооружений численными методами при статическом, динамическом и сейсмическом воздействиях.

**Методология и методы исследований.** Выполненные в данной работе исследования НДС грунтов основаны на экспериментальных и теоретических исследованиях физических и механических свойств водонасыщенных грунтов. Их анализ для определения параметров различных моделей грунтов по результатам динамического зондирования, трехосных испытаний и испытаний прямого сдвига используются при решении задач по оценке НДС водонасыщенного массива грунта, взаимодействующего с подземными конструкциями аналитическим методом и МКЭ (с использованием математических моделей LE, MC, NS и UBC3D-PLM).

**Личный вклад автора.** В рамках теоретической части диссертации автор лично решил аналитическим и численным методами задачи и выполнил их анализ с помощью ПК Plaxis, Mathcad и ПК surfer. На основании решения задач представлен анализ о НДС водонасыщенных оснований зданий и сооружений, в том числе, прогноз осадки и несущей способности оснований.

**Положения, выносимые на защиту.** Результаты аналитических и численных решений по количественной оценке НДС водонасыщенных оснований зданий при различных воздействиях, в том числе статическом, динамическом и сейсмическом с учетом нелинейных и реологических свойств грунтов и различной степени водонасыщения  $0,8 < S_r \leq 0,99$ , полученные на основе решения МКЭ и физических уравнений Генки, в состав которых входят расчетные модели грунтовой среды, определенные по результатам полutoчных испытаний, в том числе модель объемной деформации С.С. Григоряна, модель сдвиговых деформаций С.П. Тимошенко и модель водонасыщенной грунтовой среды З. Г. Тер-Мартirosяна.

**Степень достоверности результатов исследования.** Достоверность полученных результатов расчетно-теоретических исследований в данной работе обеспечена применением известных положений и теоретических основ механики деформируемых сплошных сред и механики пористых водонасыщенных сред, а

также использованием при решении задач МКЭ сертифицированного и многократно опробованного программного комплекса Plaxis.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были изложены и обсуждены на двух международных научных конференциях:

- доклад на тему: «Simulation of soil liquefaction due to earthquake loading» на XXII International Scientific Conference «Construction. The formation of living environment», 2019 г., г. Ташкент, Узбекистан;

- доклад на тему: «Simulation of effects the degree of water-saturation on stress-strain state » на XXIV International Scientific Conference " Construction. The formation of living environment», 2021 г., г. Москва, Россия.

**Публикации.** Материалы диссертации достаточно полно изложены в 4 научных публикациях, из которых 2 работы опубликованы в журналах, включенных в перечень ВАК РФ, и 2 работы опубликованы в журналах, индексируемых в международной базе Scopus.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Общий объем диссертации составляет 139 страниц, включая 83 рисунка, 18 таблиц. Список литературы включает 158 наименований, в том числе 40 иностранных источников.

Диссертационная работа выполнена на кафедре механики грунтов и геотехники (МГГ) НИУ МГСУ под руководством д.т.н. Тер-Мартirosяна А.З.

Автор выражает искреннюю благодарность Почетному члену РААСН, Заслуженному деятелю науки РФ, доктору технических наук Тер-Мартirosяну З.Г., а также своему научному руководителю, доктору технических наук Тер-Мартirosяну А.З. и сотрудникам научно-образовательного центра «Геотехника» (НОЦ «Геотехника») за ценные рекомендации и советы, постоянную поддержку и помощь во время работы над диссертацией.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Первая глава** посвящена обзору современных методов прогноза НДС водонасыщенных ( $0,8 < S_r < 0,99$ ) оснований зданий и сооружений при статическом и динамическом воздействиях. Методами расчета НДС и устойчивости грунтов оснований сооружений занимались Ю.К. Зарецкий, В.Н. Ломбардо, М.В. Малышев, З.Г. Тер-Мартirosян, Р.Э. Татевосян, Л.Н. Рассказов и многие другие.

**Вторая глава** посвящена теоретическим основам численного моделирования НДС водонасыщенных оснований зданий и сооружений при статическом и динамическом воздействиях. Представлено описание упругопластической модели UBC3D-PLM, позволяющей моделировать разжижение песчаных и глинистых грунтов под воздействием сейсмической нагрузкой.

**Третья глава** посвящена решению аналитической задачи по количественной оценке НДС водонасыщенных ( $0,8 < S_r < 0,99$ ) оснований зданий и сооружений при статическом воздействии.

Отличительная особенность водонасыщенной грунтовой среды заключается в том, что в ней под воздействием кратковременной статической, пульсирующей, динамической и сейсмической нагрузок неизбежно возникает избыточное по отношению к гидростатическому давлению в поровой воде в естественных условиях

( $\gamma_w z$ ). Оно может составлять значительную часть приложенного общего ( $\sigma^{tot}$ ) напряжения которое, как известно, распределяется между скелетом и поровой водой ( $\sigma^{tot} = \sigma_s + u_w$ ) пропорционально соотношению их объемной сжимаемости ( $K_s/K_w$ ), а также и их объема в единице объема ( $V_s/V_w$ ) или ( $n_s/n_w$ ) причем, как известно  $n_s + n_w = n$ , где  $n$  – пористость грунта ( $n \leq 1$ ). Это обусловлено тем, что при кратковременном воздействии из водонасыщенного грунта не происходит отток воды, и, следовательно, водонасыщенный грунт в этом промежутке находится в условиях закрытой системы, т.е. без дренажа (undrained). Физические и механические свойства водонасыщенного грунта  $0,8 < S_r$  отличаются от свойств грунта в воздушно-сухом состоянии или при степени водонасыщения  $S_r = w/w_{II} < 0,8$ , так как тотальное напряжение полностью воспринимается скелетом. Под величиной степени водонасыщения понимают также отношение удельного веса минеральных частиц  $\gamma_s$  и поровой воды, т.е.:

$$S_r = w(\rho_s/\rho_w), \quad (1)$$

Поэтому, механические свойства грунтов при  $S_r < 0,8$  и  $S_r \geq 0,8$  отличаются существенно, модули объемных деформаций скелета и поровой воды не равны, а модуль объемной деформации в целом:

$$\varepsilon_w = n\varepsilon = n\varepsilon_s \text{ и } \sigma_{tot} = \sigma_s + \sigma_m, \quad (2)$$

Определяется, исходя из соотношений (2) учитывая, что зависимости  $K_s = \sigma_s/\varepsilon_s$  и  $K_w = u_w/\varepsilon_w$ , т.е. получим:

$$K_u = K_s + K_w/n, \quad (3)$$

Коэффициент Пуассона грунта в целом определяется по формуле:

$$\nu_u = (K_u - 2G_s)/2(K_u + G_s), \quad (3)$$

Модуль объемной деформации поровой газосодержащей воды определяется по Скемptonу в зависимости от  $S_r$ ,  $K_u$  и  $K_{wg}$  в виде:

$$K_w = K_{wg} \cdot K_u / (S_r K_u + (1 - S_r) K_{wg}), \quad (4)$$

Коэффициент начального порового давления  $\beta_0 = \Delta u_w / \Delta \sigma_{tot}$  определяется по формуле:

$$\beta_0 = K_w / (n \cdot K_s + K_w), \quad (6)$$

При действии нагрузки на водонасыщенный массив местной нагрузки возникает неоднородное НДС и тогда:

$$u_w(x, y, z) = \beta_0 \sigma_m(x, y, z), \quad (5)$$

Прогноз осадки линейно-деформируемого основания на основе уравнений Генки при  $\varepsilon_x \neq 0$ ,  $\varepsilon_y \neq 0$

В простейшем случае линейной зависимости между напряжениями и деформациями с параметрами среды  $G$  и  $K$  осадку можно определить аналитическим решением для оси  $z(x = 0)$ . Тогда можем записать:

$$S = \int_0^{h_a} \frac{\sigma_m}{K} dz + \int_0^{h_a} \frac{\sigma_z - \sigma_m}{2G} dz, \quad (8)$$

где  $h_a$  – мощность сжимаемой толщи.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{p}{\pi} \left[ \operatorname{arctg} \frac{a-x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{a+x}{z} \right] + \frac{2apz(x^2-z^2-a^2)}{\pi[(x^2+z^2-a^2)^2+4a^2z^2]}; \\ \sigma_z &= \frac{p}{\pi} \left[ \operatorname{arctg} \frac{a-x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{a+x}{z} \right] - \frac{2apz(x^2-z^2-a^2)}{\pi[(x^2+z^2-a^2)^2+4a^2z^2]}; \\ \sigma_m &= \frac{2p \cdot (1+\nu)}{3\pi} \left[ \operatorname{arctg} \frac{a-x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{a+x}{z} \right]; \\ \sigma_z - \sigma_m &= \frac{2p}{\pi} \left( \frac{a \cdot z}{a^2+z^2} + \frac{1-2\nu}{3} \operatorname{arctg} \frac{z}{a} \right) + \gamma_{xy}\end{aligned}\quad (9)$$

Подставляя  $\sigma_m$  в первый интеграл (8), получаем осадку основания в пределах  $h_a$  от объемной составляющей линейной деформации  $\varepsilon_{z,\nu}$ :

$$S_\nu = \frac{4p(1+\nu)}{3\pi K_w} \left[ h_a \operatorname{arctg} \frac{h_a}{a} + \frac{a}{2} \ln \frac{a^2+h_a^2}{a^2} \right], \quad (10)$$

Осадка основания от сдвиговой составляющей линейной деформаций  $\varepsilon_{z,\nu}$  в пределах  $h_a$  получим после подстановки во второй интеграл (8)  $\sigma_z - \sigma_m$  тогда получаем:

$$S_\gamma = \frac{p}{3\pi G} \left[ (1-2\nu)h_a \cdot \operatorname{arctg} \frac{h_a}{a} + (2-\nu)a \cdot \ln \frac{a^2+h_a^2}{a^2} \right], \quad (11)$$

Избыточное поровое давление в водонасыщенном основании в любой точке  $m(x, z)$  можно определить по формуле:

$$u_w(x, z) = \beta_0 \cdot \sigma_m(x, z), \quad (12)$$

На рисунке 1 построены графики  $S_\gamma - p$ ,  $S_\nu - p$  и  $u_w(p)$  для точки на глубине  $z = b$ , полагая что,  $K_w = f(s_r)$ ,  $K_w(1) > K_w(2) > K_w(3)$ .

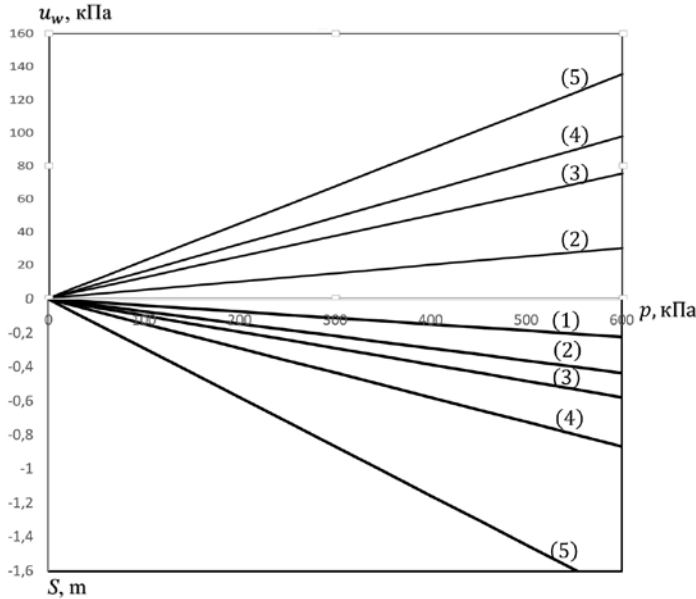


Рисунок 1 - Графики  $(S_\gamma - p)$  – (1),  $(S_\nu - p)$  – (2 – 5), при разных  $K_w$ - $K_w(2) > K_w(3) > K_w(4) > K_w(5)$ , и зависимости  $u_w(p, S_r)$ , верхняя часть графика при  $S_r(2) < S_r(3) < S_r(4) < S_r(5)$  рассчитанные по формулам (8), (10), (11) и (12)

Осадка и несущая способность водонасыщенного основания фундамента конечной ширины при  $S_r = 0,8$

Из формулы  $\varepsilon_z = \frac{\sigma_z - \sigma_m}{2G_0(1-\tau_i/\tau_i^*)} + \varepsilon_m^*(1 - e^{-\alpha\sigma'_m})$ , следует, что осадку  $j$  – того слоя конечной высоты  $h_j$ , в составе сжимаемой толщи основания, можно определить по формуле:

$$S_j = \left\{ \frac{\sigma_{z,j} - \sigma_{m,j}}{2G_{0,j}(1-\tau_{i,j}/\tau_{i,j}^*)} + \varepsilon_{m,j}^* \left( 1 - e^{-\alpha\sigma'_{m,j}} \right) \right\} h_j, \quad (13)$$

где  $\tau_{i,j}^* = \sigma'_{m,j} \cdot \operatorname{tg} \varphi + c$ ,  $\sigma'_{m,j} = \sigma_{m,j}(1 - \beta_{0,j})$ ;  $\sigma'_{m,j}$  – эффективное среднее давление.



$$S_j = S_j(\gamma) + S_j(\varepsilon), \quad (14)$$

$$S = \sum_{j=1}^{j=n} S_j, \quad (15)$$

На рисунке 2 представлена схема осадки основания фундамента конечной ширины методом суммирования осадок элементарных слоев  $S'_j(h_j)$ , а на рисунке 3 представлены зависимости  $S_j(\gamma) - \sigma_{z,j}$  и  $S_j(\varepsilon) - \sigma_{z,j}$ , а также  $S_j$ .

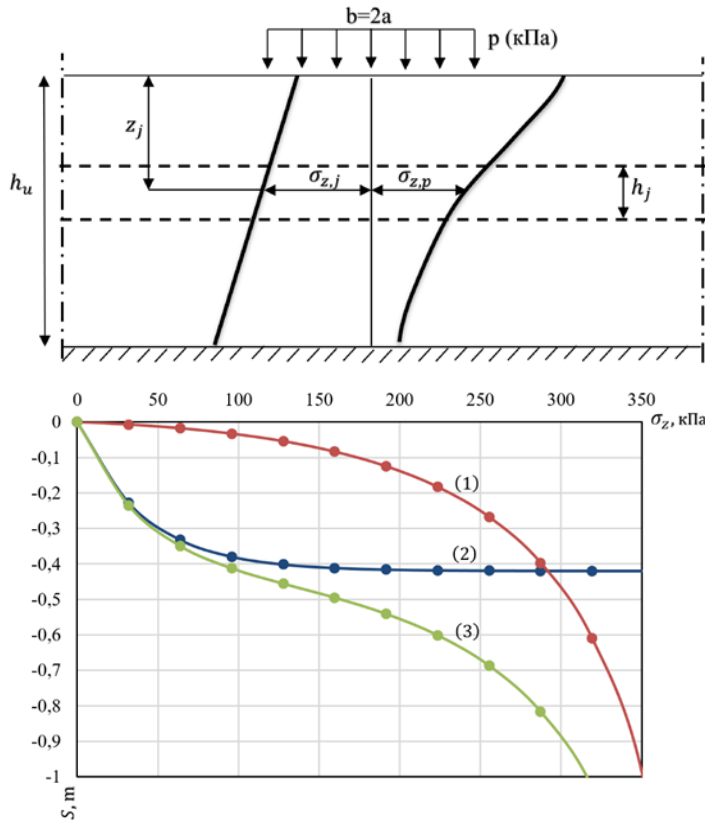


Рисунок 2 - Расчетная схема осадки основания фундамента конечной ширины методом суммирования осадок элементарных слоев  $S'_j(h_j)$  на основе модели Генки; НГСТ – нижняя граница сжимаемой толщи определяется по условиям СП -  $\sigma_{zy} = 2\sigma_{zp}$

Рисунок 3 - Графики зависимости  $S_j(\gamma) - 1$ ,  $S_j(\varepsilon) - 2$  и  $S_j = S_j(\gamma) + S_j(\varepsilon) - 3$  рассчитанные по формулам (13) при  $S_r = 0,8$  по Генки

На рисунке 4 приводятся результаты расчёта осадки водонасыщенного основания при одной степени водонасыщения  $S_r = 0,8$ , но при различных значениях параметров деформируемости скелета грунта ( $G^e, \nu^e, c, \varphi, \alpha$  и  $\varepsilon_m^*$ ).

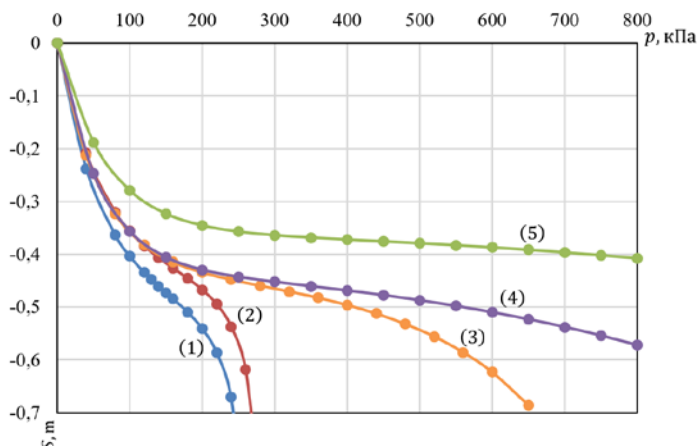


Рисунок 4 - Графики зависимости  $S - p$  полученные по формуле (13) и (14) при различных значениях параметров деформируемости скелета грунта ( $G^e, \nu^e, c, \varphi, \alpha$  и  $\varepsilon_m^*$ ) при  $S_r = 0,8$  по Генки

На рисунке 5 приводятся результаты расчета осадки водонасыщенного фундамента (при  $S_r=0,8$ ) при различных параметрах деформируемости слоев грунтового скелета ( $G^e, \nu^e, c, \varphi, \alpha$  и  $\varepsilon_m^*$ ), рассчитанные по формулам (13) и (14), а в таблице 1 приведены свойства грунтов этих слоев.

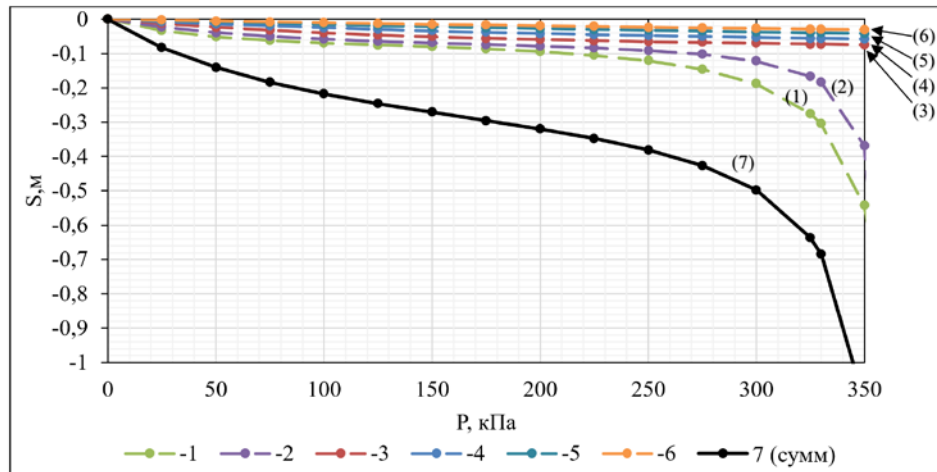


Рисунок 5 - Графики зависимости  $S_j$  для слоев 1-6, рассчитанные по формулам (13) и (14) и  $S-7$  суммарная осадка, рассчитанная по (15) при  $Sr = 0,8$

Таблица 1 - Свойства грунтов при  $Sr = 0,8$

№ слоя	$h$ , [м]	Модуль сдвига на начальном участке кривой, $G^e$ , [кПа]	Коэффициент Пуассона $\nu$	Удельное сцепление $c$ , [кПа]	Угол внутреннего трения $\varphi$ [град]	Предельно возможная деформация $\varepsilon^*$	Параметр $\alpha$
1	0 - 2	25000	0,33	3	30	0,035	0,05
2	2 - 4	20000	0,33	6	26	0,035	0,05
3	4 - 6	25000	0,33	4	32	0,035	0,05
4	6 - 8	30000	0,35	8	36	0,035	0,05
5	8 - 10	40000	0,35	12	38	0,035	0,05
6	10 - 12	45000	0,35	16	40	0,035	0,05

На рисунке 6 приводятся результаты расчета осадки водонасыщенного основания при различных значениях степени водонасыщенности, рассчитанные по формулам (13).

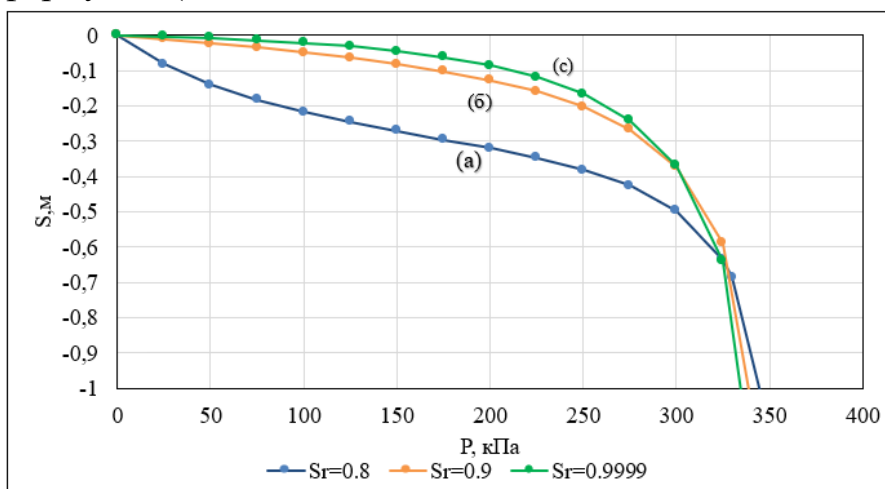


Рисунок 6 - Графики зависимости  $S$  (суммарная) для слоя, рассчитанные по формулам (14) при различных значениях  $Sr$ ;  $Sr = 0,8 - a$ ,  $Sr = 0,9 - б$  и  $Sr = 0,9999$

На рисунке 7 представлены зависимости  $S - p$  полученные различными методами (LE-Linear elastic, MC-Mohr-Coloumb, HS-hardening soil и UBC3D-PLM).

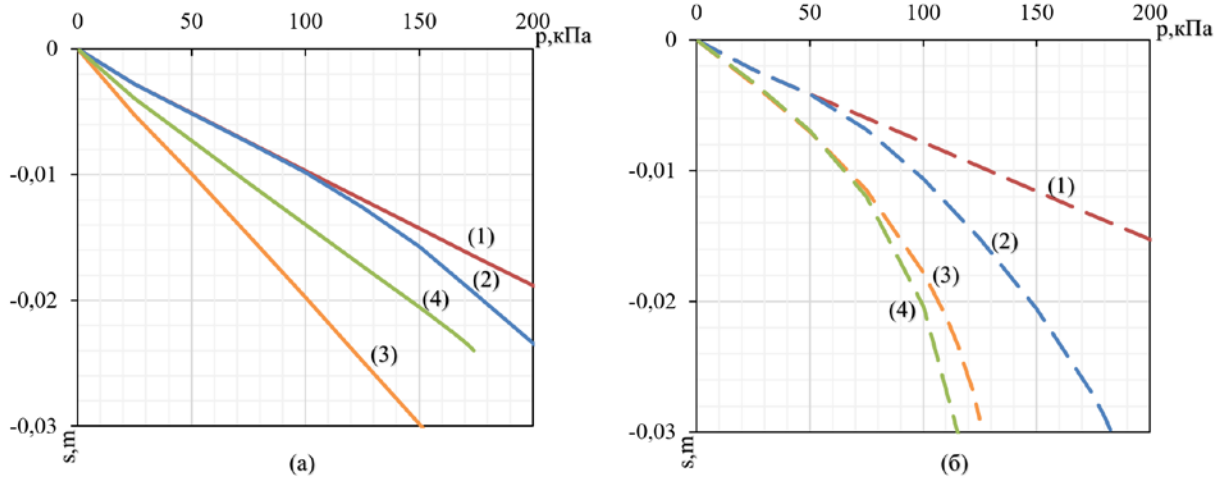


Рисунок 7 - Графики зависимости  $S - p$ , полученные при  $S_r = 0,8$  – (а) и  $S_r = 0,9999$  – (б) по методам  $LE - 1$ ,  $MC - 2$ ,  $HS - 3$ ,  $UBC3D - 4$

**Четвертая глава** посвящена НДС водонасыщенного основания фундамента конечной ширины при статических и динамических нагрузках.

Рассмотрены результаты прогноза НДС водонасыщенного основания фундамента конечной ширины (рисунок 8), при динамической периодической нагрузке  $q_{dy} = 0.2 \times q_{st} \times \sin(2\pi w.t)$  (рисунок 9), где  $w = 50$  Грц,  $T = 1/w = 0,02$  sec, причем  $q_{st} = 100$  кПа. В таблице 2 представлены параметры грунтов, используемые в модели.

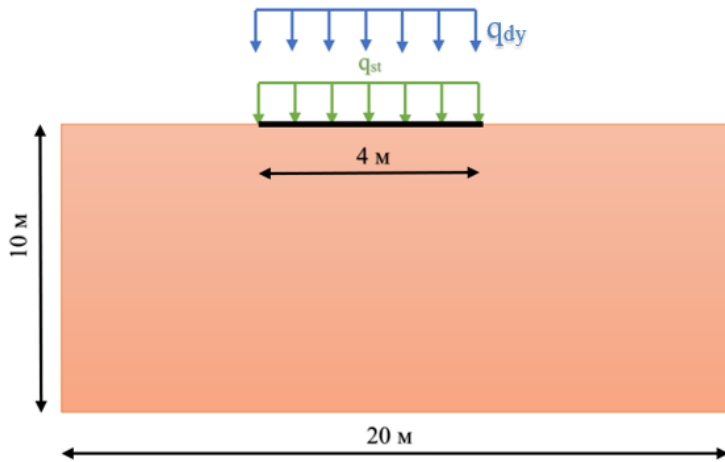


Рисунок 8 - Расчетная схема модели основания под воздействием статической  $p_{st} = const$  и динамической  $q_{dy} = 0.2 \times q_{st} \times \sin(2\pi w.t)$  нагрузок, действующих по полосе шириной  $b = 4m$  (плоская задача)

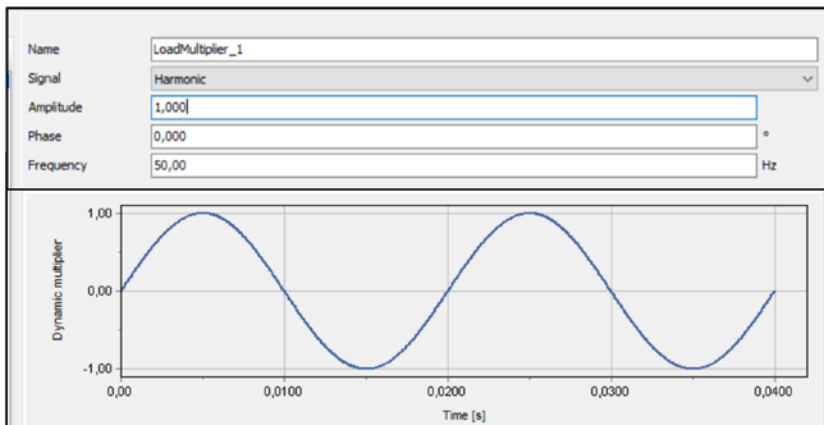
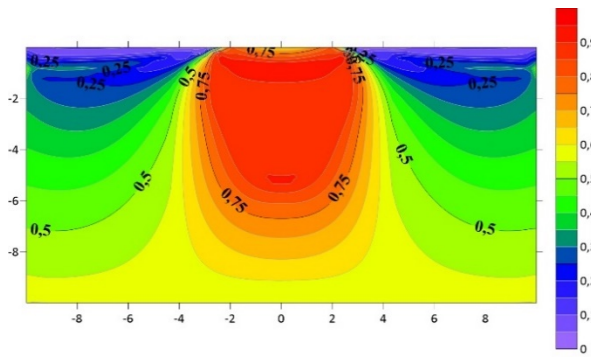


Рисунок 9 - Динамическая нагрузка: запись динамического воздействия

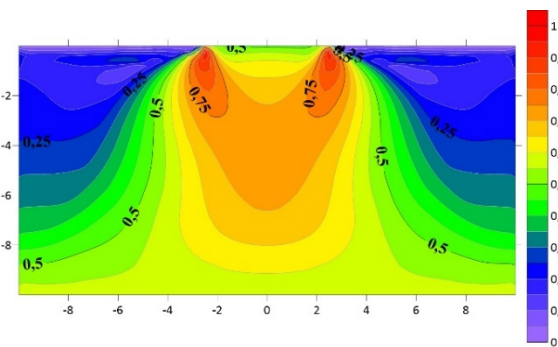
Таблица 2 - Параметры грунтов, используемые в модели

Parameters	Unit	Linear Elastic	Mohr-coloumb	HS	UBC3D-PLM
Drainage type	-	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)
$\gamma_{unsat}$	кН/м <sup>3</sup>	19,70	19,70	19,70	19,70
$\gamma_{sat}$	кН/м <sup>3</sup>	21,80	21,80	21,80	21,80
$e_{init}$	-	0.74	0.74	0.74	0.74
$\varphi$	°	-	30	30	30
$\psi$	°	-	0	0	0
$c$	кН/м <sup>2</sup>	-	10	10	10
$\nu_{un}$	-	0.3	0.3	0.3	-
$E/E_{50ref}$	кН/м <sup>2</sup>	$46,77 \times 10^3$	$46,77 \times 10^3$	$46,77 \times 10^3$	-
$E_{oedref}$	кН/м <sup>2</sup>	-	-	$37.34 \times 10^3$	-
$E_{urref}$	кН/м <sup>2</sup>	-	-	$140 \times 10^3$	-
$k_x$	м/сут	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
$k_y$	м/сут	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
Rayleigh $\alpha$	-	0,2094	0,2094	0,2094	0,2094
Rayleigh $\beta$	-	0,01061	0,01061	0,01061	0,01061
$P_{ref}$	кН/м <sup>2</sup>	-	-	100	100
$M$	-	-	-	0.5	-
$K_{nc0}$	-	-	-	0,5	-
$R_f$	-	-	-	0,9	0,9
$K_B^e$	-	-	-	-	854.6
$K_G^e$	-	-	-	-	598.2
$K_G^p$	-	-	-	-	250
$m_e$	-	-	-	-	0.5
$n_e$	-	-	-	-	0.5
$n_p$	-	-	-	-	0.5
$\varphi_p$	-	-	-	-	30.77
$(N1)_{60}$	-	-	-	-	7.65
$f_{dens}$	-	-	-	-	0.2
$f_{Epost}$	-	-	-	-	0.2

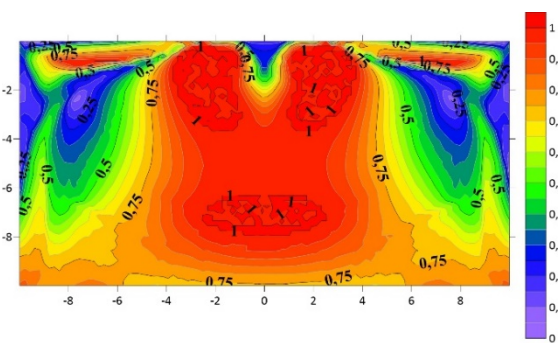
На рисунке 10 представлены результаты численного моделирования.

Метод Mohr-Coulomb  $S_r=0,8$ 

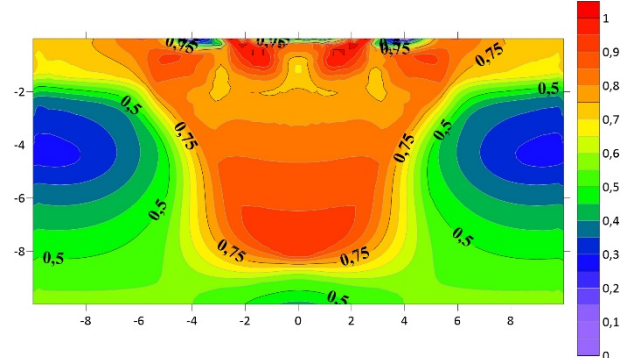
$$\tau_{ref}(max) = 1,00$$

Метод Hardening soil  $S_r=0,8$ 

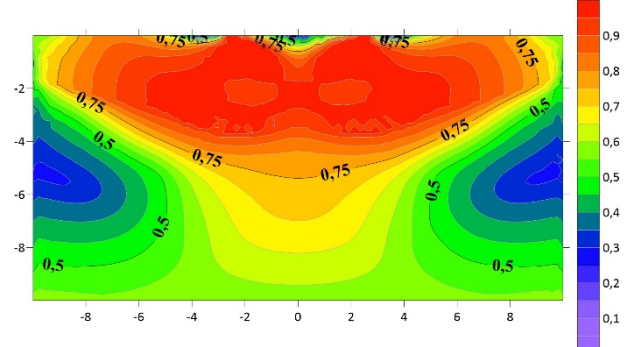
$$\tau_{ref}(max) = 1,00$$

Метод UBC3D-PLM  $S_r=0,8$ 

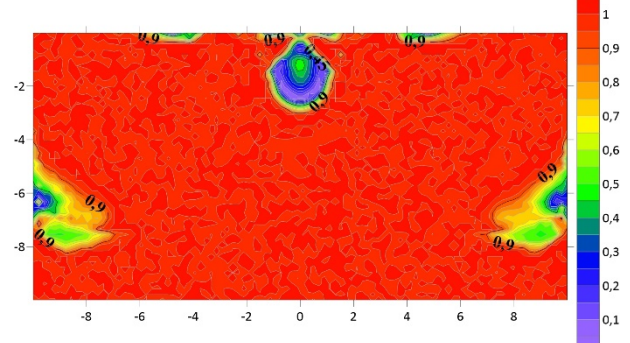
$$\tau_{ref}(max) = 1,00$$

Метод Mohr-Coulomb  $S_r=0,9999$ 

$$\tau_{ref}(max) = 1,00$$

Метод Hardening soil  $S_r=0,9999$ 

$$\tau_{ref}(max) = 1,00$$

Метод UBC3D-PLM  $S_r=0,9999$ 

$$\tau_{ref}(max) = 1,00$$

Рисунок 10 - Изополя касательных напряжений Mohr-Coulomb, Hardening soil и UBC3D-PLM методами при степени водонасыщенности  $S_r=0,8$  и  $S_r=0,9999$

В этом случае максимальная площадь при  $\tau_{ref} = 1$  возникает при использовании модели UBC3D-PLM. Это есть следствие особенности модели, в которой взаимодействие поровой воды, и собственной нагрузка для чувствительных и динамических воздействий. Следует отметить, что полимодационный процесс ( $S - t_{dyn}$ ) при модели UBC3D-PLM развивается с большей скоростью, при  $S_r = 0,9999$ , чем при  $S_r = 0,8$ , при этом накопленная осадка в 2 раза больше. Данные величины осадки основания представлены на рисунке 11, где представлены изменения осадки с динамическим временем.

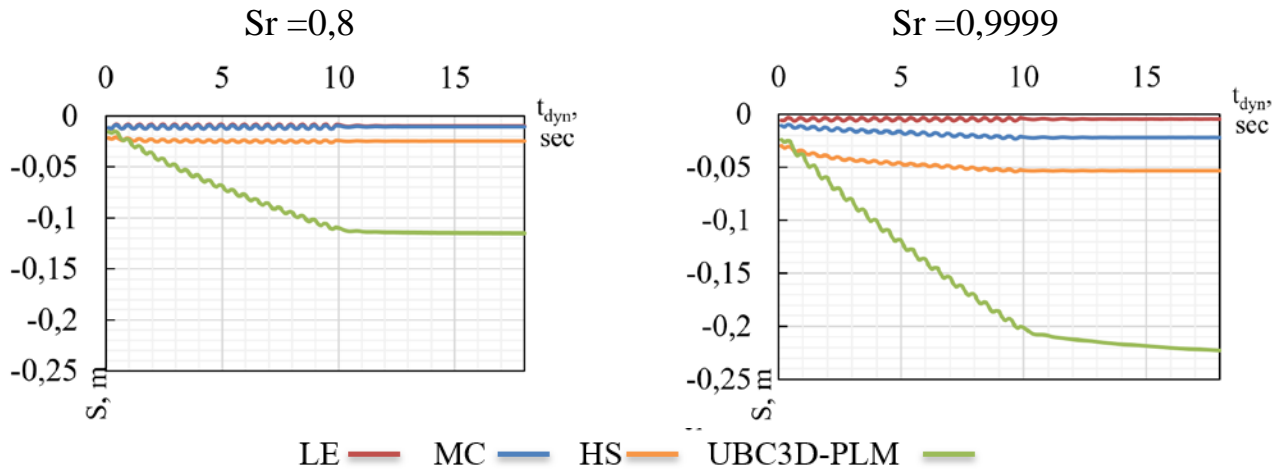


Рисунок 11 - Сравнение изменения вертикального перемещения на поверхности под фундаментом от времени динамического воздействия с разной степенью водонасыщенности;  $p_{st} = 100$  кПа,  $p_{dy} = 25\sin(2\pi \times 50t)$

Наблюдаются остаточные поровые давления, с ростом  $S_r$  растёт  $u_w$  до  $130$  кН/м<sup>2</sup> при UBC3D-PLM. На рисунке 12 показана схема избыточного порового давления  $u_w$  со временем динамического воздействия при ( $S_r = 0,8$  и  $S_r = 0,9999$ ) для четырех моделей, где избыточное поровое давление увеличивается с увеличением степени водоносности  $S_r$ .

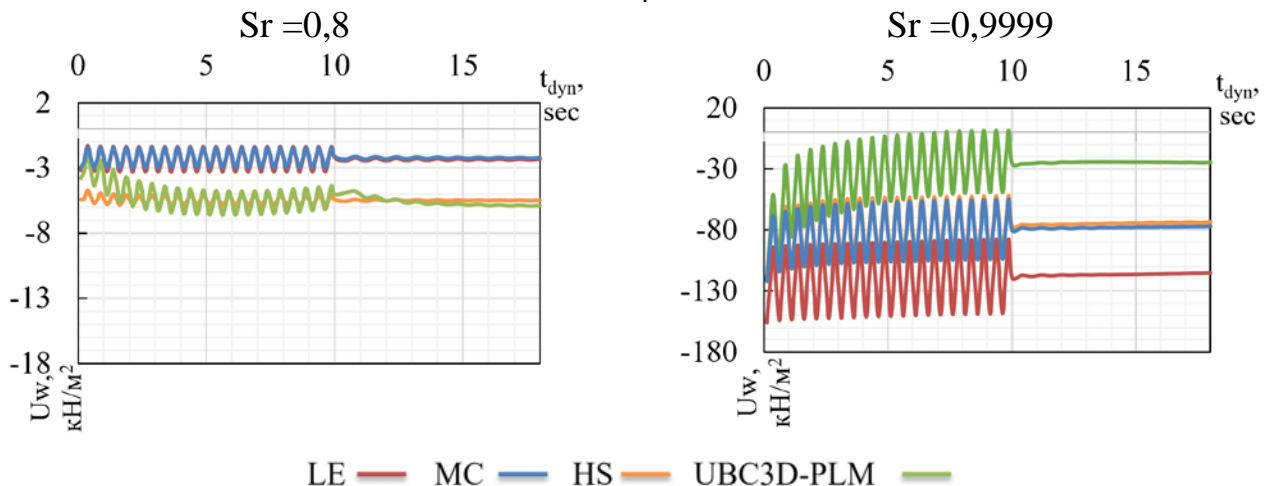


Рисунок 12 - Сравнение избыточного порового давления на поверхности ( $h=0$  м) от времени динамического воздействия

В полученных результатах видно, что наибольшее влияние на НДС водонасыщенного основания возникает с использованием модели UBC3D-PLM.

Результаты расчетов с использованием модели UBC3D-PLM, по сравнению с другими моделями, показали, что перемещение увеличивается в зависимости от количества циклов, что приводит к обрушению в результате развивающегося разжижения, и это обрушение будет происходить быстрее при степени насыщения ( $S_r=0,9999$ ) по сравнению с результатами степени насыщения ( $S_r=0,8$ ).

Результаты показали влияние степени водонасыщенности на поровое давление, где поровое давление при ( $S_r=0,9999$ ) минимум в 7 раз больше порового давления при ( $S_r=0,8$ ).

**Пятая глава** посвящена НДС водонасыщенных оснований высотных зданий при сейсмических воздействиях.

Отличительная особенность оснований высотных зданий, заключается в том, что они опираются на фундаменты, с большой площадью опирания и возводятся в глубоких котлованах.

Во взаимодействии с надземной и подземной частями высотного здания вовлекаются огромные массы грунта как под плитным фундаментом, так и за ограждением котлована. При сейсмическом воздействии в этих массивах возникает неоднородное НДС, которое трансформируется во времени и в пространстве, в том числе с переходом в разжиженное состояние при сейсмических нагрузках.

В настоящей главе приводится количественная оценка НДС в массивах грунтов, под воздействием сейсмических нагрузок, взаимодействующих с подземной и надземной частями высотного здания с учётом линейной (LE) и нелинейной модели грунта (MC, HS, UBC3D-PLM) (при степени водонасыщения  $S_r = 0,8$  и  $S_r = 0,9999$ ). Расчетная схема взаимодействия здания и основания представлена на рисунке 13.

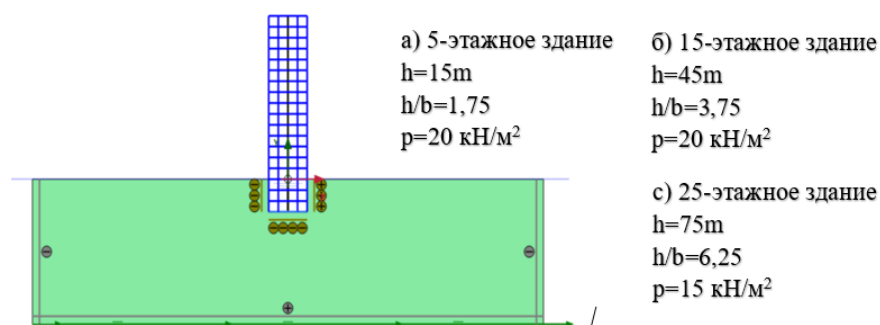


Рисунок 13 - Расчетная схема модели. Многоэтажное здание с тремя этажами в подвале: высота  $h$  – (15, 45 и 75) метров, соотношение сторон  $h/b$  – (1,75, 3,75 и 6,25), нагрузка на каждый этаж  $p = 20$  кН/м<sup>2</sup>

На рисунке 14 представлена запись сейсмического воздействия на основание.

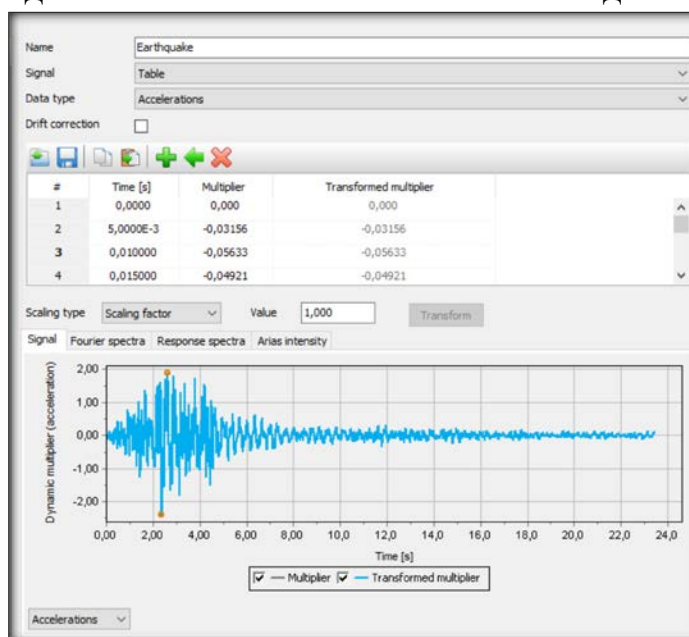


Рисунок 14 - Динамическая нагрузка: запись сейсмического воздействия (22,5 сек)

Для наблюдения изменений с динамическим временем, были выбраны две точки: в верхней части здания (точка А) и в нижней части здания (точка В). На

рисунке 15 показано расположение этих точек в здании, которые используются для данного исследования.

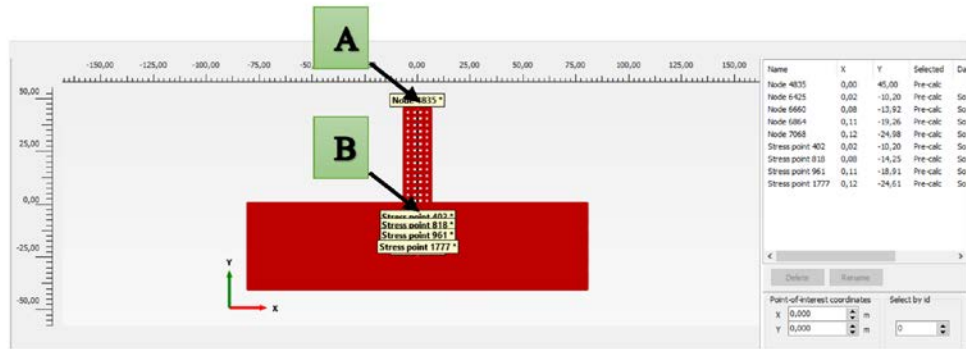


Рисунок 15 - Расположение точек (А и В) в здании, используемые для изучения сравнения

На рисунке 16 приводится сравнительная оценка кривых осадки-время ( $S - t$ ) для здания 5, 15 и 25 этажей методами LE, MC, HS и UBC3D-PLM при  $S_r = 0,8$  и  $S_r = 0,9999$ . Наиболее сильная сейсмическая нагрузка следствие на основе здания 25 этажей.

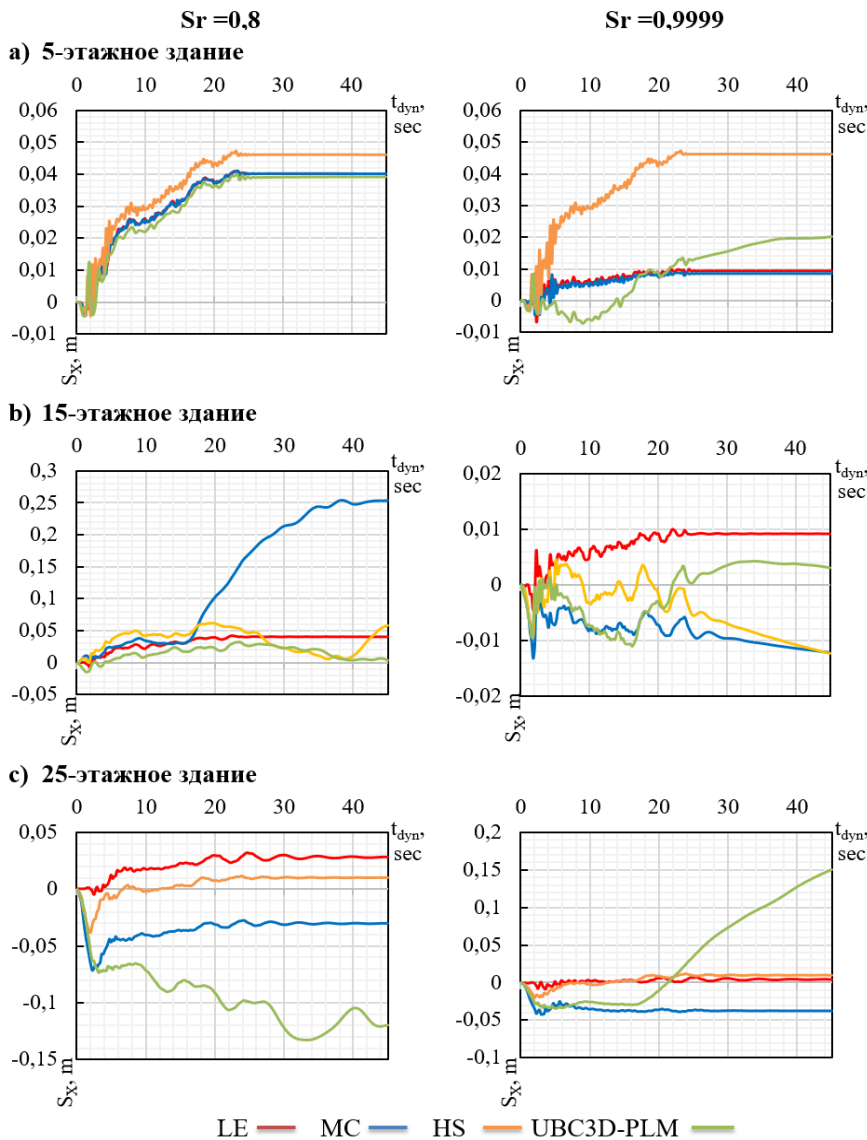


Рисунок 16 - Сравнение горизонтального перемещения в точке (А) от времени сейсмического воздействия, при степени водонасыщенности  $S_r=0,8$  и  $S_r=0,9999$



На рисунке 17 представлены изополя при  $\tau_{ref} = const$ , и в этом случае наблюдается доминирующая роль метода UBC3D-PLM, хотя во всех методах области  $\tau_{ref} = 1$  занимают центральное положение под фундаментом, однако площади с  $\tau_{ref} = 1$  в методе UBC3D-PLM на много больше.

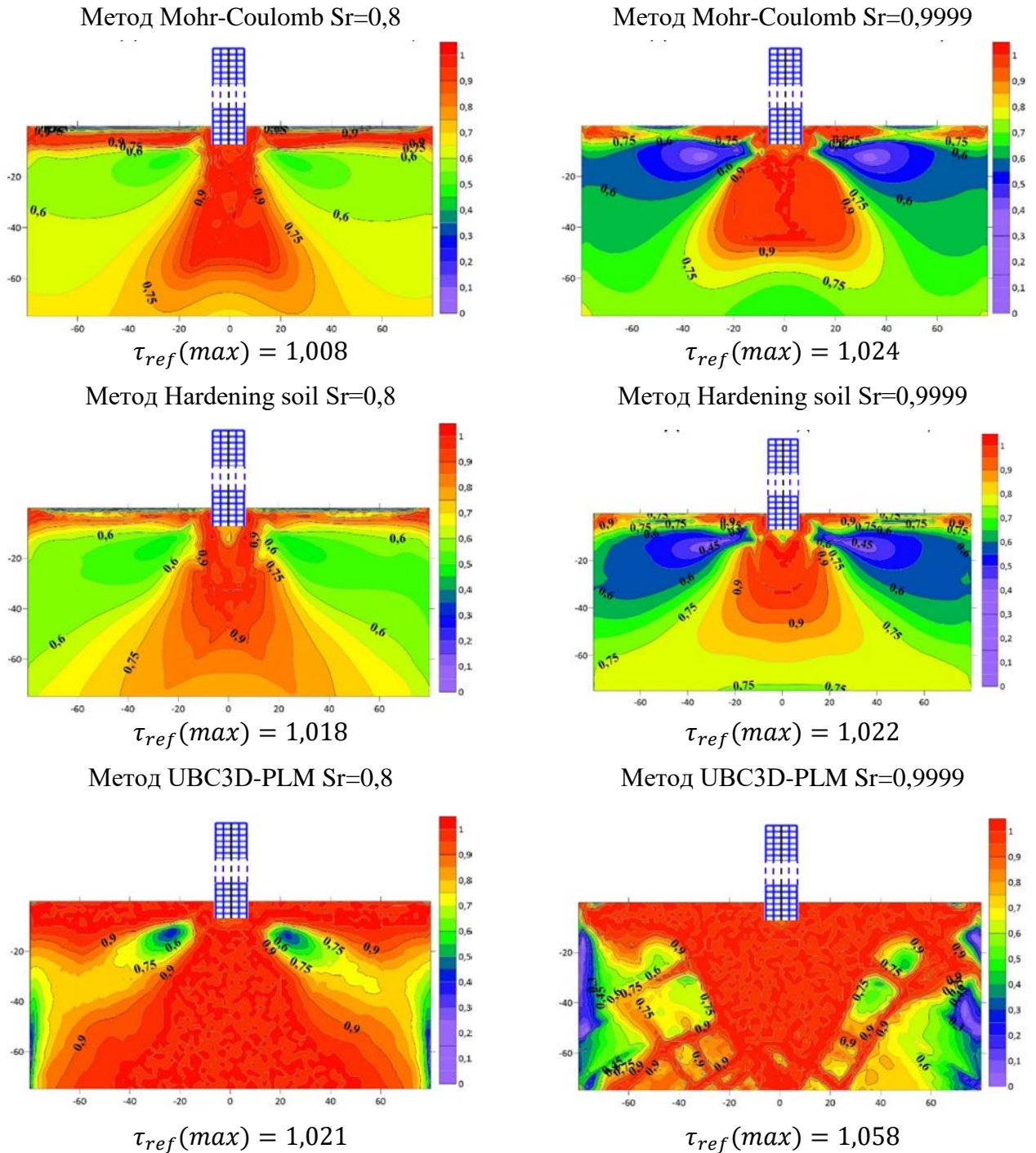


Рисунок 17 - Изополя касательных напряжений  $\tau_{ref}$  для 25-этажного здания, время = 22,5 сек

Результаты расчетов с использованием модели UBC3D-PLM, по сравнению с другими моделями, показали, что перемещения увеличиваются в зависимости от времени воздействия землетрясения, что приводит к обрушению в результате развивающегося разжижения, и это обрушение будет происходить быстрее при сте-

пени водонасыщения ( $S_r=0,9999$ ), по сравнению с результатами степени водонасыщения ( $S_r=0,8$ ).

Результаты показали влияние степени водонасыщения на поровое давление, где поровое давление при ( $S_r=0,9999$ ) в 10 раз больше порового давления при ( $S_r=0,8$ ).

Наибольшая площадь изополя по  $\tau_{ref}$  возникает в основном как при  $S_r = 0,99$ , так и при  $S_r = 0,8$  по модели UBC3D-PLM.

**Шестая глава** посвящена НДС водонасыщенного основания дамбы при статическом и сейсмическом воздействиях.

Дамбы и насыпи играют важную роль в строительстве и освоении экономически перспективных территорий, где распространены слабые водонасыщенные грунты, особенно в сейсмических активных регионах, в том числе САР.

В настоящей главе рассматриваются задачи по количественной оценке МКЭ основания и дамбы с учетом их взаимодействия под воздействием их собственного веса, внешней нагрузки на верхней части дамбы и также сейсмической нагрузки, на основание и на дамбу, с учётом линейной (LE) и нелинейных моделей грунта (МС, NS, UBC3D-PLM). На рисунке 18 представлена расчетная схема дамбы.

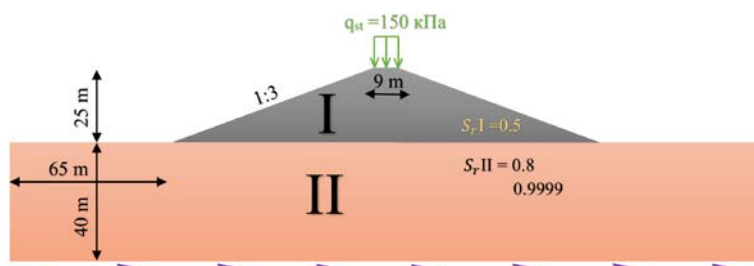


Рисунок 18 - Расчётная схема НДС дамбы на водонасыщенном основании  
На рисунке 19 показано расположение 4 точек, которые используются для данного исследования.

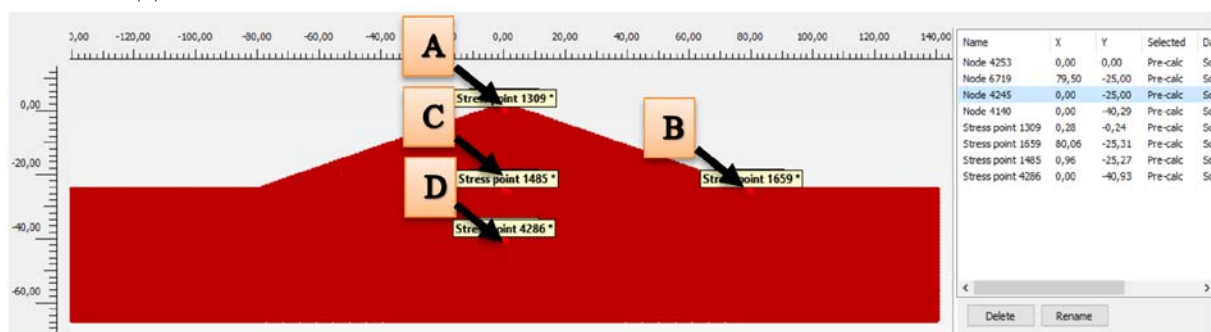


Рисунок 19 - Расположение точек А, В, С и D в дамбе, используемые для изучения сравнения

По результатам анализа этих расчётов можно отметить следующее.

Согласно четырем методам: линейному (LE) и нелинейному (МС, NS и UBC3D-PLM) (таблица 3) величины максимального горизонтального перемещения при степени водонасыщенности  $S_r = 0,8$ , и при степени водонасыщенности  $S_r = 0,9999$ , и коэффициент разницы между ними  $S_{x(0,8)}^{max}/S_{x(0,9999)}^{max}$ . Значение этого коэффициента в методе UBC3D-PLM больше 6 и находится в точке В, а это озна-

чает, что с увеличением степени водонасыщения произошло обрушение бортов дамбы в точке В. Эти результаты представлены в таблице 3 и на рисунке 20.

Таблица 3 - Горизонтальное перемещение (мм), при  $S_r = 0,8$  и  $S_r = 0,9999$

Метод		$S_{x(0,8)}^{max}$	$S_{x(0,9999)}^{max}$	$S_{x(0,8)}^{max}/S_{x(0,9999)}^{max}$
линейно-упругий метод		73,3	61,2	0,83
Нелинейные методы	МС	151,1	85,8	0,57
	HS	78,7	65	0,83
	UBC3D-PLM	93	583,6	6,28

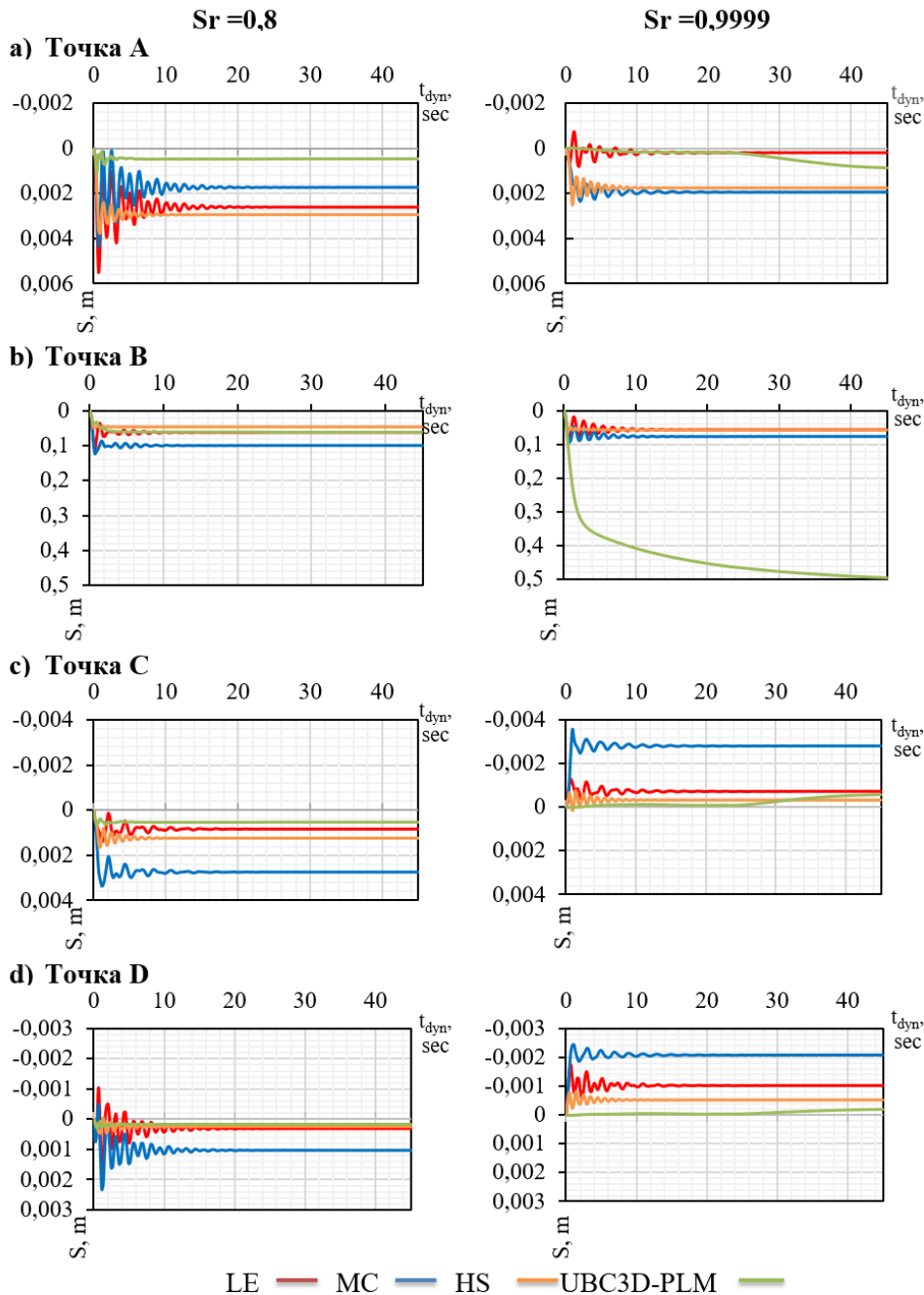


Рисунок 20 - Горизонтальное перемещение в разных местах от времени сейсмического воздействия

И соответствует разным значениям с порового давления, при  $S_r = 0,8$ , так и при  $S_r = 0,9999$ , приписываются в методе UBC3D-PLM, соответственно: -16,54

кН/м<sup>2</sup> и -506,83. Эти результаты показаны в таблице 4, где видно, что коэффициент  $u_{w(0,8)}^{max}/u_{w(0,9999)}^{max}$ , в различных методах.

Таблица 4 - Избыточное поровое давление воды при  $S_r = 0,8$  и  $S_r = 0,9999$

Метод		$u_{w(0,8)}^{max}$ (кН/м <sup>2</sup> )	$u_{w(0,9999)}^{max}$ (кН/м <sup>2</sup> )	$u_{w(0,8)}^{max}/u_{w(0,9999)}^{max}$
линейно-упругий метод		2,81	113,39	40,35
Нелинейные методы	MC	4,094	129,5	31,63
	HS	3,64	166,16	45,65
	UBC3D-PLM	16,54	506,83	30,64

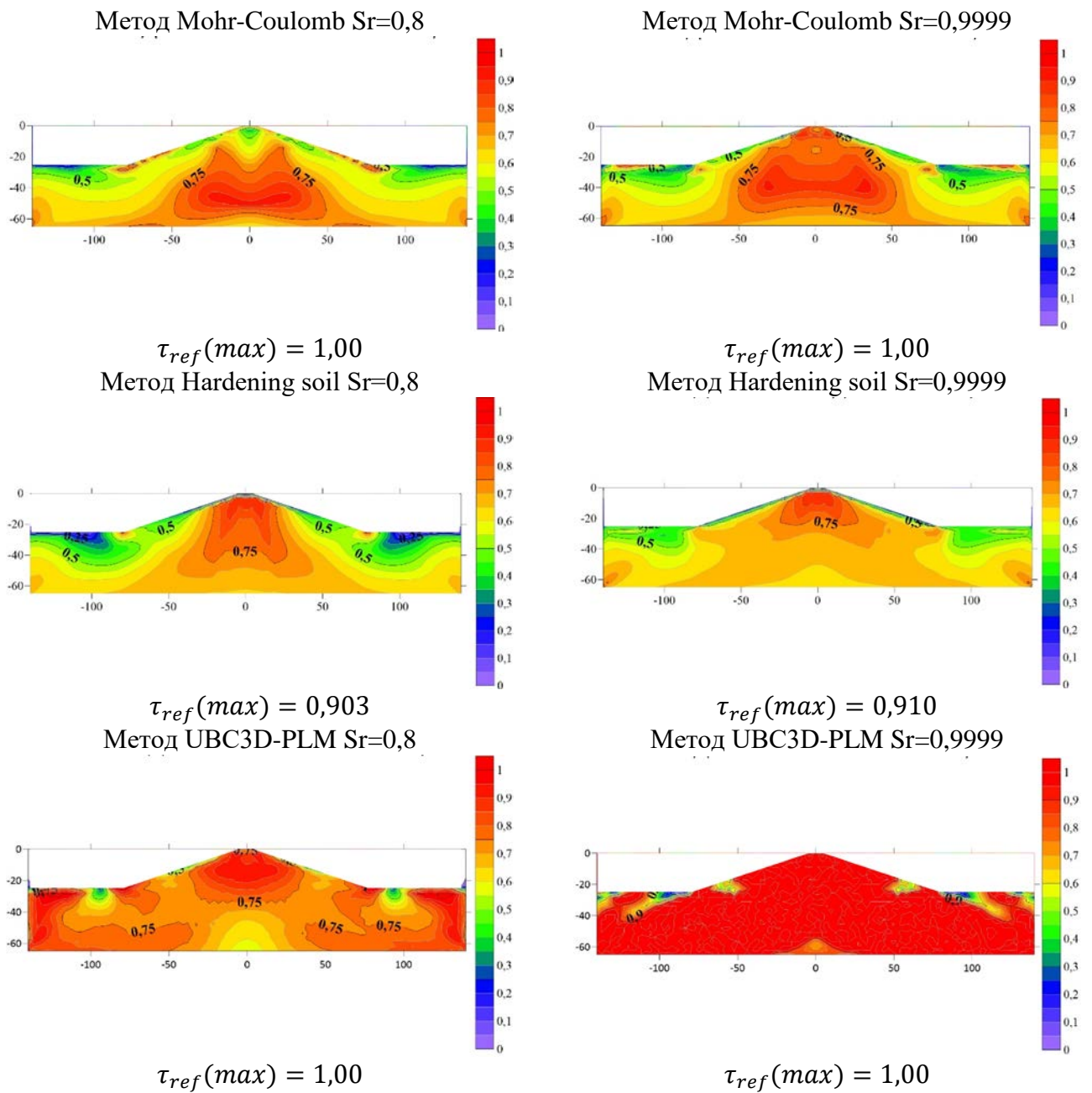


Рисунок 21 - Изополя касательных напряжений Mohr-Coulomb, Hardening soil и UBC3D-PLM методами при степени водонасыщенности  $S_r=0,8$  и  $S_r=0,9999$  под действием сейсмических нагрузок, время =22,5 сек

Как и следовало ожидать, наибольшая площадь изополя по  $\tau_{ref}$  возникает в дамбе в основном как при  $S_r = 0,9999$ , так и при  $S_r = 0,8$  по модели UBC3D-PLM (рисунок 21).

Результаты моделирования показали разницу в поведении разрушения дамбы под действием собственного веса и внешней нагрузки в модели UBC3D-PLM в водонасыщенных грунтах с различной степенью водонасыщенности. По сравнению с упругим поведением (модель Linear elastic) и с неупругим поведением в моделях (Mohr-Coloumb и Hardening soil), был предложен лучший способ решения этой проблемы при статических нагрузках.

Результаты моделирования показали разницу в поведении разрушения дамбы при сейсмической нагрузке в модели UBC3D-PLM в водонасыщенных грунтах с различной степенью водонасыщения. И по сравнению с упругим поведением (модель Linear elastic), и с неупругим поведением в моделях (Mohr-Coloumb и Hardening soil), был предложен лучший способ решения этой проблемы при сейсмической нагрузке.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении диссертационной работы приводятся итоги выполненных исследований, которые позволяют сделать следующие выводы:

1. Выполнен анализ современных методов изучения и описания механических свойств водонасыщенных грунтов и на их основе сделан выбор современных моделей грунтовой среды при степени водонасыщения  $0,8 < S_r < 0,99$  при решении задач.

2. Освоена и внедрена новая модель (UBC 3D), позволяющая численно моделировать водонасыщенные массивы грунтов МКЭ. Выполнен сравнительный анализ с другими современными моделями грунтов (LE, MC, HS) при статическом, динамическом и сейсмических воздействиях, в том числе НДС при возникновении разжижения.

3. Дано аналитическое решение задачи по прогнозу осадки и несущей способности водонасыщенного основания ( $0,8 < S_r < 0,99$ ) с учетом нелинейных свойств скелета грунта. Показана возможность нелинейного развития зависимости осадка-нагрузка ( $s - p$ ), в том числе с двойной кривизной с переходом от затухающей к незатухающей и прогрессирующей стадии.

4. Проведены комплексные исследования НДС водонасыщенных оснований высотных зданий и ответственных сооружений с учетом различных моделей грунтов, в том числе LE, MC, HS и UBC 3D-PLM. Показана их существенная разница по НДС и по предельному состоянию.

5. Изучены, проанализированы и даны решения задач по определению дополнительных осадок и кренов фундаментов с использованием современных методов количественной оценки НДС водонасыщенных  $0,8 < S_r < 0,99$  оснований зданий и сооружений.

6. Дана сравнительная оценка НДС водонасыщенных оснований при  $0,8 < S < 0,99$ . Отмечена существенная их разница, особенно, в развитии областей предельного равновесия ( $\tau_{rel} \leq 1$ ) и областей формирования с избыточным по отно-

шению к гидростатическому давлению в поровом пространстве массива ( $U_w \approx \sigma$ ).

7. Отмечается, что при выполнении в настоящей работе исследования физико-механических свойств грунтов и количественный прогноз НДС оснований высотных зданий и сооружений использованы современные методы теоретической и прикладной механики грунтов, в том числе методы, разработанные в НОЦ «Геотехника» НИУ МГСУ за последние 30 лет.

#### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:**

Выполненные исследования по теме диссертации позволяют:

Развить методы количественной оценки НДС водонасыщенных массивов с учетом разной степени водонасыщения и разных параметров механических свойств грунта, а также при разных  $S_r$  и разной интенсивности воздействия.

Развить методы количественной оценки дополнительных осадок и кренов фундаментов конечной ширины при различных параметрах расчетных моделей оснований и при разных степенях водонасыщения для условий Сирийской Арабской Республики (САР).

Результаты выполненных исследований в настоящей работе предлагается использовать в научно-исследовательской работе в НИУ МГСУ и в университете САР в г. Дамаске.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:**

1. Тер-Мартirosян А. З., Осман А. Моделирование разжижения грунтов основания при сейсмическом воздействии с использованием модели UBC3D-PLM // Строительство и архитектура. 2019. Т. 7. № 3. С. 39-44. DOI: 10.29039/2308-0191-2019-7-3-39-44.

2. Тер-Мартirosян З. Г., Тер-Мартirosян А. З., Осман А. Осадка и несущая способность водонасыщенного основания фундамента конечной ширины при статическом воздействии // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 4. С. 463-472. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.463-472.

#### **В журналах, индексируемых в базах Scopus, Web of Science и др.:**

1. Ter-Martirosyan A., Othman A. Simulation of soil liquefaction due to earthquake loading // E3S Web of Conferences. 2019. Т. 97. С. 03025. DOI: 10.1051/e3sconf/20199703025.

2. Ter-Martirosyan A., Othman A. Simulation of Effects the Degree of Water-Saturation on Stress–Strain State //Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Т. 170. С. 163-174. DOI: 10.1007/978-3-030-79983-0\_15.