

На правах рукописи

ДЮКИНА НАДЕЖДА СЕРГЕЕВНА

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ЗАГЛУБЛЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ
ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Специальность 01.02.04 –
Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2009

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук,
профессор

Баженов В.Г.

Доктор физико-математических наук,
с.н.с.

Кибец А.И.

Научный консультант:

Кандидат технических наук, с.н.с.

Зефиров С.В.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор

Саргсян А.Е.

Доктор физико-математических наук,
профессор

Ерофеев В.И.

Ведущая организация ОАО «Нижегородская инжиниринговая компания
«АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ» (ОАО «НИАЭП»)

Защита состоится "29" декабря 2009 года в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Н.Новгород, проспект Гагарина, 23, корпус 6.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Автореферат разослан "28" ноября 2009г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.166.09
доктор физико-математических наук

Игумнов Л.А.

Актуальность темы

Проектирование и строительство зданий, сооружений и их инфраструктуры ведется с учетом степени угрозы сейсмического воздействия в данном регионе. Проектирование осложнено тем, что в зависимости от спектра толчка, угла подхода сейсмических волн к поверхности, типа и жесткости сооружения, формы и глубины заложения фундамента, характеристик грунтового основания и других факторов, возможно возбуждение различных пространственных форм колебаний как конструкции в целом, так и ее отдельных элементов. Дополнительными трудностями при решении этой задачи являются плохо прогнозируемые эффекты резонансного усиления сейсмических колебаний поверхностных грунтов, связанных с возбуждением собственных колебаний пласта грунта вблизи поверхности. Кроме того, приведение в движение массивных конструкций приводит к включению поля тяготения Земли в качестве нового мощного источника разрушения, которое также требует своего учета.

Применение аналитических методов для описания подобных процессов ограничено рамками грубой идеализации, которая не позволяет в должной мере учесть особенности контактного взаимодействия сооружений с основанием и различных пластов грунта между собой. При решении подобных задач численными методами, большая длительность сейсмического воздействия, малые размеры сооружения, высокочастотный характер осцилляций в сейсмограмме приводят к необходимости выбора большой расчетной области и мелкой конечно-элементной сетки, вследствие чего вычислительные затраты становятся неприемлемо большими. Поэтому необходимым является создание и развитие численной методики решения задач взаимодействия сооружений и трубопроводов с грунтовым основанием, которая позволит не только адекватно описывать процессы сейсмического воздействия, но и существенно сократить вычислительные затраты.

Ввиду вышесказанного, проблема численного моделирования распространения сейсмических волн в грунтовом массиве и их воздействия на заглубленные в грунт строительные конструкции представляется весьма актуальной.

Цели диссертационной работы

1. Анализ основных закономерностей процессов распространения сейсмических волн в грунтовом массиве и взаимодействия строительных конструкций с прилегающим грунтом при сейсмических импульсных нагружениях. Развитие математических моделей, корректно описывающих данные процессы. Определение параметров сейсмических волн сжатия и сдвига по заданной на поверхности акселерограмме.

2. Разработка на основе предложенных моделей алгоритмов и численных методик расчета поведения сооружений при сейсмических колебаниях с учетом нелинейных эффектов контактного взаимодействия с грунтовым основанием. Программная реализация разработанной методики в рамках существующих в НИИ механики вычислительных комплексов «Динамика – 2», «Динамика – 3», проведение вычислительных экспериментов, верификация методики и программного обеспечения на основе имеющихся экспериментальных данных;
3. Численные исследования влияния на поведение сооружений при землетрясении основных параметров, таких как массивность, величина его заглубления в грунт, интенсивность сейсмического воздействия, трение контактного взаимодействия с грунтом, неоднородности грунтовой среды;

Научная новизна

1. Развита модель, описывающая основные закономерности поведения массивных сооружений при сейсмических воздействиях с учетом силы тяжести, нелинейных эффектов контактного взаимодействия с многослойным грунтовым основанием. Предложенная модель позволяет корректно поставить задачу о распространении в грунте сейсмической импульсной нагрузки, вид которой определяется по заданной на поверхности акселерограмме в предположении, что сейсмические волны распространяются по нормали к поверхности. Разработана методика решения обратной задачи определения импульсной нагрузки, прикладываемой к нижней граничной поверхности расчетной области, в соответствии с заданными на поверхности полупространства экспериментальными акселерограммами.
2. Разработана конечно-элементная методика, позволяющая проводить численное исследование сейсмических вибраций сооружений с учетом эффектов контактного взаимодействия с многослойным грунтовым основанием, которая существенно сокращает вычислительные затраты за счет применения специально разработанных мало отражающих волны граничных условий.
3. Решен ряд задач о взаимодействии сооружения и грунта, в том числе многослойного, при сейсмических воздействиях с учетом нелинейных эффектов на поверхности контакта с грунтовым основанием. Использование предлагаемой методики позволило провести вычисления со значительно меньшими (в сотни и тысячи раз) вычислительными затратами, позволяя при этом более подробно описать процессы взаимодействия сооружения с грунтом.
4. Проведены численные исследования взаимодействия сооружений с грунтом при сейсмических колебаниях в зависимости от геометрических и физических

параметров: механических свойств грунта и здания, величины заглубления фундамента, коэффициента трения на контакте сооружения и грунта, интенсивности сейсмического воздействия, неоднородности грунтовой среды. На основании проведенных численных исследований сделаны рекомендации по выбору расчетных моделей.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается решением большого числа тестовых задач и хорошим согласованием результатов с расчетами по другим методикам.

Практическая ценность

Созданы методики, алгоритмы, разработаны программные средства, реализующие разработанные модели поведения зданий и сооружений при сейсмических колебаниях и учитывающие нелинейные эффекты контактного одностороннего взаимодействия с многослойным грунтовым основанием. Разработанные методики реализованы на базе функционирующих в НИИ механики вычислительных комплексов «Динамика-2», «Динамика-3».

На основе модифицированных программных комплексов «Динамика-2», «Динамика-3» выполнен анализ поведения сооружений реакторных отделений, насосных станций, резервных дизельных электростанций, камер переключений АЭС «Бушер», Нововоронежской АЭС – 2, Калининской и Ростовской АЭС при сейсмических вибрациях (х/д 2402/4356, х/д 9409, х/д 8406/114-гп, х/д 8412/5220 по заказу ФГУП НИАЭП). Результаты расчетов использовались на этапе проектирования для анализа сейсмостойкости примыкающих к сооружениям трубопроводов.

Диссертационная работа выполнена при поддержке

Грантов РФФИ (05-01-00837, 05-01-08055, 05-08-33618-а, 07-08-13637-офи), гранта Президента РФ для поддержки научных исследований, проводимых ведущими научными школами РФ Ведущие научные школы России НШ 6391.2006.8, проект №4657 программы «Развитие научного потенциала высшей школы», Государственного контракта №02.445.11.7044 от 05.09.2005г. ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники», Государственного контракта №02516.11.6053 от 25.06.2007г. ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России» на 2007-2012 годы.

Защищаемые положения работы

1. Математическая модель, описывающая поведение зданий и сооружений при сейсмических колебаниях, учитывающая поле силы тяжести и эффекты контактного одностороннего взаимодействия сооружений с грунтовым основанием, позволяющая корректно поставить задачу о распространении в многослойном грунте сейсмической импульсной нагрузки, вид которой задан на поверхности;

2. Методики и алгоритмы численного исследования поведения сооружений при сейсмических воздействиях, созданные на основе разработанных моделей, сокращающие вычислительные затраты до приемлемого уровня за счет применения нового вида граничных условий, мало искажающих набегающие сейсмические волны;

3. Результаты численного исследования динамического взаимодействия сооружений с многослойным грунтовым основанием при сейсмических нагружениях в зависимости от физических и геометрических параметров.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» (11-15 февраля 2005г., Ярополец), XI Нижегородская сессия молодых учёных «Математические науки» (22-25 мая 2006г., Красный Плес), IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (22-28 августа 2006г., Нижний Новгород), Всероссийская научная конференция «Краевые задачи и математическое моделирование» (1-3 декабря 2006г., Новокузнецк), XII Нижегородская сессия молодых учёных «Математические науки» (23-26 мая 2007г., Красный Плес), Международная конференция «IX Харитоновские тематические научные чтения» (12-16 марта 2007г, Саров), V молодежная школа-конференция «Лобачевские чтения-2006» (28 ноября – 1 декабря 2006г, Казань), XII Нижегородская сессия молодых учёных «Технические науки» (26 февраля – 2 марта 2007г., Нижний Новгород), Всероссийская сессия Научного совета РАН «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики деформируемого твердого тела» (3-8 июля 2007г., Самара), VI молодежная школа-конференция «Лобачевские чтения – 2007» (16-19 декабря 2007г., Казань), XIII Нижегородская сессия молодых учёных «Технические науки» (2008г., Нижний Новгород).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1 – 12].

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертационная работа изложена на 131 страницах, содержит 75 рисунков и 9 таблиц. Список литературы состоит из 217 наименований.

Во введении обосновывается актуальность численного моделирования процессов контактного взаимодействия сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях и формулируются основные направления исследований.

В первой главе представлен обзор математических моделей сооружения и грунтового основания, методов моделирования процесса сейсмического нагружения, способов учета контактного взаимодействия сооружения с грунтом. Обосновывается актуальность и формулируются основные цели и задачи диссертационной работы.

Теоретическим исследованиям в области сейсмостойкого строительства и анализу различных расчетных моделей посвящены работы Ильичева В.А., Саргсяна А.Е., Бирбраера А.Н., Шульмана С.Г., Болотина В.В., Трифонова О.В., Айзенберга Я.М., Чухлатого М.С., Луговой Е.В., Абу-Лейла М.А., Титова Е.Ю., Солодовника Н.В.,

Колесникова А.О., Глазкова Д.А., Вильярреала К.Х.А., и других авторов. Бирбраером А.Н. и Шульманом С.Г. сделан обзор методов расчета строительных конструкций на динамические воздействия, отмечается что подобные расчеты связаны с необходимостью учета податливости основания. В работах Бирбраера А.Н., Шульмана С.Г., Чухлатого М.С. представлен обзор моделей грунтового основания, суть которых заключается в представлении основания в виде некоторой системы эквивалентных пружин и демпферов. В ряде задач, таких как расчет сейсмостойкости примыкающих к сооружению подземных коммуникаций, требуется анализировать взаимные смещения стенок сооружения и прилегающего грунта, что приводит к необходимости моделирования грунтового основания сплошной средой. При исследованиях контактного взаимодействия сооружения с грунтом, проведенных в работах Lewis R.W., Tran D.V., Takemiya H., Чухлатого М.С., Абу-Лейла М.А., сделан вывод, что сооружение и основание необходимо рассматривать как единую систему, способную перераспределять напряжения, вызванные усилиями от деформации основания и надфундаментных конструкций.

Задача о взаимодействии сооружения с основанием при сейсмических нагрузениях должна включать моделирование распространения сейсмических импульсов в грунтовой среде. Особенности реакции геологической среды на динамические воздействия посвящены работы Бабешко В.А., Воровича И.И., Бабича В.М., Немировича-Данченко М.М., Айзенберга А.М., Aki K., Bardet J.P., Lysmer J., Михайленко Б.Г., Петрашени Г.И., Ратниковой Л.И., Гогелия Т.И., Данилова А.Г., Никифорова С.П. и многих других авторов. Влияние неоднородностей грунтовой среды на перераспределение энергии сейсмических волн рассмотрено в работах Бабешко В.А., Воровича И.И., Данилова А.Г. и Никифорова С.П.. В работах Ляхова Г.М., Немировича-Данченко М.М., Киселева Ф.Б., Вознесенского Е.А., рассмотрены вопросы выбора адекватной модели грунта, отмечается что во многих случаях возможно использование линейно-упругой модели.

Достижение необходимой точности при численном моделировании сейсмических процессов в грунте и процессов взаимодействия сооружения с грунтом связано с правильным выбором конечно-элементной сетки. Вопросы соотношения длины волны с размерами ячеек разностной сетки обсуждаются в работах Слепяна Л.И., Nielsen P., Berg P., Skonggaard O., Dablain M., Miyatake T., Trefethen L.N. Абу-Лейлом М.А., Даниловым А.Г., Никифоровым С.П. отмечается, что малые размеры сооружения, длительность и высокочастотность сейсмического воздействия при численном моделировании приводят к необходимости выбора большой расчетной области и мелкой конечно-элементной сетки, вследствие чего вычислительные затраты становятся неприемлемо большими.

Среди существующих численных методик решения задач взаимодействия сооружений с грунтом, позволяющих адекватно описывать динамические процессы и уменьшить вычислительные затраты, можно выделить предложенную Liso J.E. схему расчета. Данная схема предусматривает отдельное вычисление сил, действующих со стороны грунта на фундамент в варианте с ужесточенной контактной поверхностью, а затем вычисление во временном диапазоне, с использованием упрощенных механических моделей грунта, перемещений и реакций в варианте без искусственного ужесточения контактной поверхности.

Одним из способов сокращения вычислительных затрат при численном моделировании задач взаимодействия сооружения с грунтом является сведение к минимуму погрешностей, связанных с краевыми эффектами. В работах Калиткина Н.Н., Кузнецова Н.О., Панченко С.Л., Альшина А.Б., Альшиной Е.А. предложен и развит способ минимизации отражений волн от боковых границ грунтового массива путем введения дополнительных подобластей, покрытых квазиравномерной сеткой. Подход применим только когда источник возмущения находится внутри расчетной области.

Для приведения континуальной задачи к дискретной используются следующие основные подходы: метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ), вариационно-разностный метод (ВРМ). Являясь, по существу, простейшим вариантом реализации МКЭ, ВРМ сочетают в себе простоту МКР и алгоритмичность МКЭ, что делает их очень удобным для программной реализации. Развитие и примеры применения ВРМ и МКЭ можно найти в работах Баженова В.Г., Дресвянникова В.И., Попова Ю.П., Самарского А.А., Zienkiewicz O.C., Уилкинса М.Л., Герасимова А.В., Фомина В.М., Гулидова А.И., Беличко Т., Бураго Н.Г., Кукуджанова В.Н., Постнова В.А. и других авторов. При решении геометрически и физически нелинейных задач в динамической постановке обычно используют явные схемы интегрирования по времени второго порядка точности.

Из проведенного анализа литературы следует, что для расчета зданий, сооружений и строительных конструкций на сейсмические воздействия целесообразным является применение численных методов расчета на ЭВМ. Для повышения эффективности таких расчетов необходимо создание и развитие математических моделей и численных методик, позволяющих адекватно описывать сейсмические процессы в геологической среде при контактном взаимодействии конструкций с грунтом с приемлемыми вычислительными затратами.

Во второй главе формулируется определяющая система уравнений для описания процессов деформирования упругих элементов конструкций в двумерной и трехмерной постановке, вариационно-разностный метод решения, алгоритм численного расчета с

учетом контактного взаимодействия. Рассматривается построение математических моделей для описания сейсмических процессов в грунтовой среде. Представлена методика определения импульсной нагрузки на нижней граничной поверхности расчетной области в соответствии с экспериментальными акселерограммами, заданными на поверхности полупространства. Приведен метод моделирования специальных граничных условий, не искажающих падающие сейсмические волны.

Численное моделирование задач осуществлялось в двумерной и в трехмерной постановке. Для описания деформирования тел в рамках гипотез механики сплошной среды использовался вариационно-разностный подход, развитый Баженовым В.Г. и его учениками.

Движение среды описывается в переменных Лагранжа в декартовой системе координат $Oxyz$. Кинематические соотношения формулируются в скоростях и строятся в метрике текущего состояния, что позволяет учитывать большие перемещения и формоизменения свободных и контактных поверхностей. Связь между компонентами тензоров скоростей напряжений и скоростей деформаций осуществляется на основе обобщенного закона Гука. Из вариационного принципа Даламбера-Лагранжа в форме Журдена следует вариационное уравнение:

$$\iint_{\Omega} \left(\frac{1}{2} \sigma_{ij} (\delta \dot{u}_{i,j} + \delta \dot{u}_{j,i}) + \rho \ddot{u}_i \delta \dot{u}_i + \rho g_i \delta \dot{u}_i \right) d\Omega - \int_G p_i \delta \dot{u}_i dS - \int_G q_i \delta \dot{u}_i dS = 0 \quad (1)$$

Здесь σ_{ij} – компоненты тензора напряжений Коши, \dot{u}_α – скорости перемещений; ρ – плотность среды; g_i – компоненты поля силы тяжести; p_α, q_α – компоненты поверхностной нагрузки и контактного давления ($\alpha = x, y, z$). Для определения в (1) компонент контактных усилий q_α ($\alpha = x, y, z$) использовались алгоритмы контакта с трением или без трения, обеспечивающие непроникание по нормали и проскальзывание вдоль касательной или проскальзывание с учетом трения.

Решение определяющей системы уравнений при заданных начальных и граничных условиях осуществляется методом конечного элемента. В двумерной постановке используются 4-узловые, а в трехмерной – 8-узловые конечные элементы. Пространственные производные аппроксимируются исходя из дивергентной схемы их вычислений в предположении линейного изменения скоростей перемещений вдоль каждой из сторон конечного элемента. В узлах сетки определяются компоненты векторов перемещений, скоростей и ускорений, компоненты тензоров напряжений и скоростей деформаций – в центрах элементов. Заменяя интегрирование по области Ω

суммированием по конечным элементам, получаем дискретный аналог уравнений движения для каждого узла сетки:

$$(M\ddot{u}_i)_j = (F_i)_j \quad (2)$$

Здесь F_i – обобщенные силы, действующие на расчетный узел j , M – масса в j -том узле.

Процесс деформирования сплошной среды во времени разбивается на временные слои $t^0, t^1, \dots, t^k, \dots$ с шагами $\Delta t^{k+1} = t^{k+1} - t^k$. Схема интегрирования уравнений (2) по времени представляется в виде:

$$\begin{aligned} (\dot{u}_\alpha)_j^{k+1/2} &= (\dot{u}_\alpha)_j^{k-1/2} + (F_\alpha)_j^k \frac{\Delta t^{k+1/2}}{(M)_j^k}, \\ (u_\alpha)_j^{k+1} &= (u_\alpha)_j^k + (\dot{u}_\alpha)_j^{k+1/2} \Delta t^{k+1}, \\ \Delta t^{k+1/2} &= \frac{1}{2}(\Delta t^{k+1} + \Delta t^k); \quad \alpha = x, y, z; \end{aligned} \quad (3)$$

Выбор шага интегрирования (3) во времени Δt^{k+1} осуществляется исходя из условия устойчивости Куранта.

Разностная схема (3) является схемой второго порядка точности, и на разрывах напряжений и скоростей перемещений приводит к значительным осцилляциям численного решения в среде. Для подавления нефизических осцилляций численного решения применяется процедура консервативного сглаживания.

Из анализа дискретного аналога системы динамических уравнений теории упругости для изотропной среды установлена связь минимального размера ячеек с локальными характеристиками (минимумами и максимумами) изменения сейсмического импульса в грунтовой среде. Для тестирования полученного соотношения была численно решена одномерная задача о пробеге плоской волны в двухслойном упругом полупространстве. Результаты решения хорошо согласуются с аналитическим решением.

Экспериментальные и синтезированные акселерограммы определяют кинематические характеристики точек поверхности, а для численного решения задачи необходимо иметь импульсную нагрузку, при приложении которой к нижней границе расчетной области на поверхности воспроизводилась бы известная акселерограмма. В работе решена вспомогательная обратная задача определения импульсной нагрузки, прикладываемой к нижней граничной поверхности расчетной области, по заданным на поверхности полупространства экспериментальным акселерограммам. Данная задача является некорректной из-за неопределенности расположения источника землетрясения и, как следствие, неопределенности волнового вектора скорости сейсмических волн

относительно поверхности. Поскольку здание расположено вблизи поверхности и его размеры по сравнению с длинами сейсмических волн невелики, расположение источника сейсмического воздействия не будет влиять на поведение здания при землетрясении, если при численном расчете приходящие к поверхности сейсмические волны воспроизводят искомую экспериментальную акселерограмму с заданной точностью. Ввиду большой удаленности источника сейсмических воздействий от объекта, приходящие из источника землетрясения к сооружению волны можно считать плоскими. В связи с вышеизложенным будем полагать, что волны сжатия растяжения и сдвига являются плоскими и распространяются по нормали к дневной поверхности грунта. В соответствии с предлагаемой численной методикой сейсмограмма на поверхности грунта представляется в виде дискретного разложения:

$$C_1(t_h) = \sum_i a_i H(t_h - t_i),$$

где a_i – амплитуда сейсмограммы в данной характерной точке, $H(t-t_i)$ – функция Хевисайда, t_i – сдвиг по времени характеристической точки сейсмограммы от момента начала отсчета сейсмограммы на поверхности. Сеточно-характеристическим методом решаем одномерную задачу о распространении в грунтовой среде волны, заданной на границе в виде функции Хевисайда. Зная, как изменилась тарировочная функция при пробеге грунтового массива, можем по экспериментальной сейсмограмме C_1 восстановить искомую импульсную нагрузку на нижней границе области грунта C_0 :

$$\frac{H_1(t)}{H_0(t-t^*)} = \frac{C_1(t)}{C_0(t-t^*)},$$

где H_0 – тарировочная функция; H_1 – сейсмограмма на поверхности, полученная из решения задачи; t^* – время пробега волны от нижней границы грунтового массива к его поверхности. Тестирование данной методики было проведено на задаче о распространении пакетов сдвиговых и продольных волн в двухслойной грунтовой среде, при этом ошибка не превысила 1%. Разработанный алгоритм решения программно реализован.

Предложен альтернативный метод корректировки скоростей перемещений, при использовании которого одномерные волны сдвига и сжатия не искажаются, проходя по массиву грунта вдоль граничной поверхности. В соответствии с данным алгоритмом, при выделении из полупространства конечной расчетной области, примыкающей к сооружению, на ее боковых границах на каждом временном шаге осуществляется перенос скоростей перемещений из приграничных узлов сетки в граничные. Данный алгоритм моделирования граничных условий был внедрен в программные комплексы «Динамика–

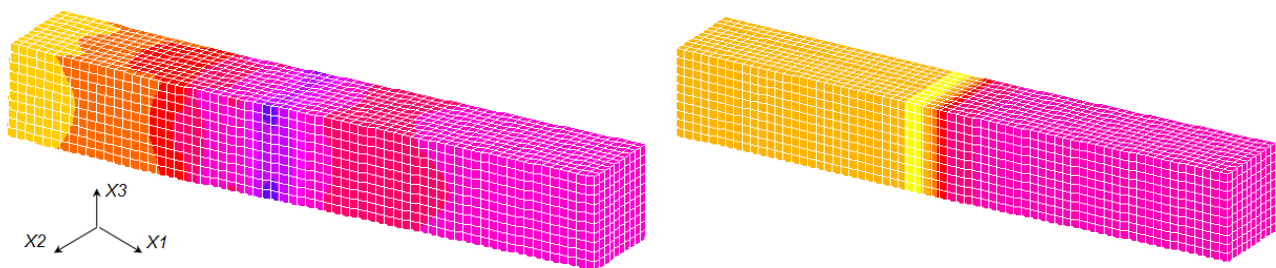
2», «Динамика-3» и использован при решении задач о взаимодействии строительных конструкций с грунтом при сейсмическом воздействии.

При решении задачи о сейсмических колебаниях сооружения в двумерной или трехмерной постановке требуется безграничное полупространство заменить ограниченной областью. Для обоснования выбора размеров расчетной области необходимо оценить влияние краевых эффектов на решение вблизи здания. С этой целью был проведен ряд вычислительных экспериментов, анализирующих сейсмические вибрации сооружения с учетом контактного взаимодействия с грунтом. Установлено, что вклад волн, отраженных от сооружения, становится несущественным, если расстояние от сооружения до границ расчетной области превышает 10-15 габаритных размеров основания здания.

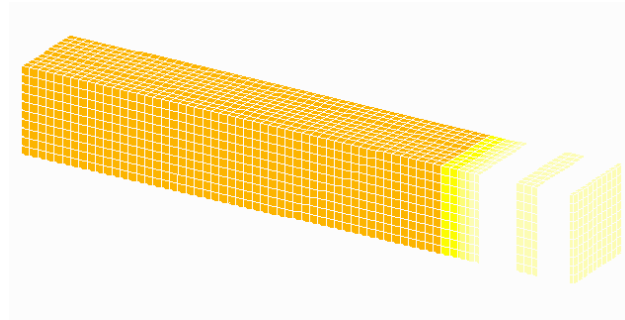
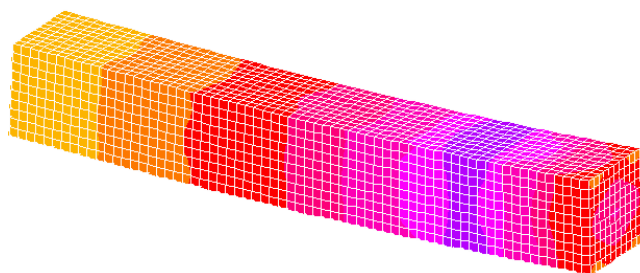
Изложенные выше методика и алгоритм численного решения реализованы в составе программных комплексов «Динамика-2», «Динамика-3» созданных в НИИМ ННГУ.

В третьей главе представлены результаты верификации разработанных моделей, алгоритмов и программных средств на тестовых задачах.

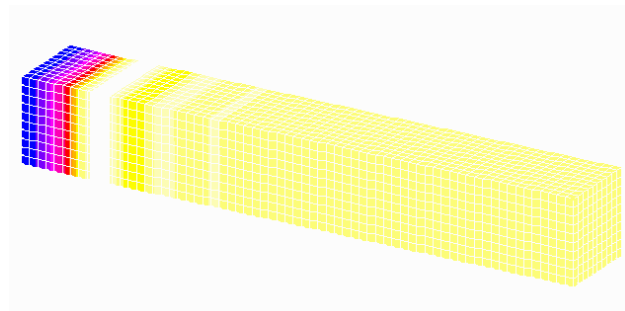
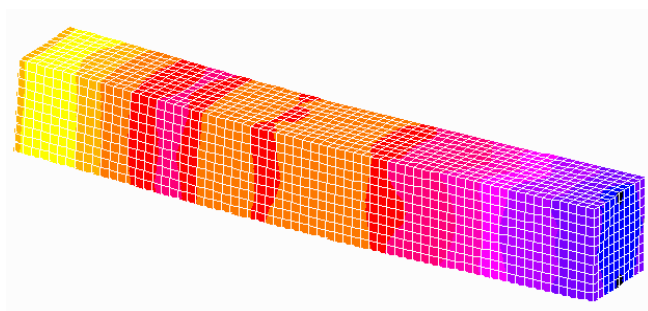
Проведено численное решение трехмерной задачи о пробеге плоской поперечной волны в упругом прямоугольном стержне. На торцевой поверхности $x_1 = 0$ задавалась компонента скорости смещения $\dot{u}_2(0, x_2, x_3, t) = const$, инициирующая волну сдвига. На боковых границах $x_i = 0, x_i = l_i$ ($i = 2, 3$) рассматривались два варианта граничных условий: а) условия свободной поверхности и б) условия переноса скоростей из приграничных узлов сетки в граничные. Результаты решения выбранных вариантов начально-краевых задач представлены на рис.1. На этом рисунке изображено распределение поля скоростей перемещений $\dot{u}_2(x_1, x_2, x_3, t)$ в расчетной области в моменты времени $\tilde{t} = t \times C_s / l_1 \approx 0,48$, $\tilde{t} \approx 1,2$, $\tilde{t} \approx 2,2$ (C_s – скорость распространения волн сдвига в материале). При использовании мало отражающих волны граничных условий задаваемая на граничной поверхности плоская волна сдвига не меняет своей формы по мере распространения вдоль стержня.



$$\tilde{t} = t \times C_s / l_1 \approx 0,48$$



$$\tilde{t} = t \times C_s / l_1 \approx 1,2$$



$$\tilde{t} = t \times C_s / l_1 \approx 2,2$$

Условия свободной поверхности

Условия переноса скоростей

Рис.1.

Для оценки эффективности предложенного способа моделирования граничных условий и сопоставления его с методом квазиравномерных сеток проведено численное решение ряда двумерных задач о пробеге плоской поперечной волны в упругой прямоугольной области. Рассматривались варианты квазиравномерных сеток, разрежающихся по линейному и гиперболическому закону, и установлено, что при переносе скоростей на боковых поверхностях из приграничных узлов в граничные решение со временем не искажается, применение же квазиравномерных сеток приводит к постепенному искажению решения.

Адекватность разработанной методики исследования эффектов динамического контактного взаимодействия сооружения с основанием подтверждается сравнением результатов расчета, с результатами, полученными с помощью вычислительного комплекса ANSYS. В примере производится моделирование контактного взаимодействия сооружения с грунтом в осесимметричной постановке. Можно отметить хорошее соответствие полученных результатов. С помощью программных комплексов «Динамика-2» и «Динамика-3» проведено моделирование контактного взаимодействия сооружения с грунтом в плоской и трехмерной постановках. Хорошее соответствие полученных результатов подтверждает допустимость решения подобных задач в плоской постановке.

Разработанная вычислительная модель динамического взаимодействия здания с грунтом была применена для анализа поведения частично заглубленных сооружений АЭС «Бушер», Калининской и Ростовской АЭС при сейсмических вибрациях. Для оценки прочности примыкающих к зданиям подземных трубопроводов необходимо определить пиковые амплитуды смещения стенок здания относительно грунтовой среды. Вид расчетной области представлен на рис.2.

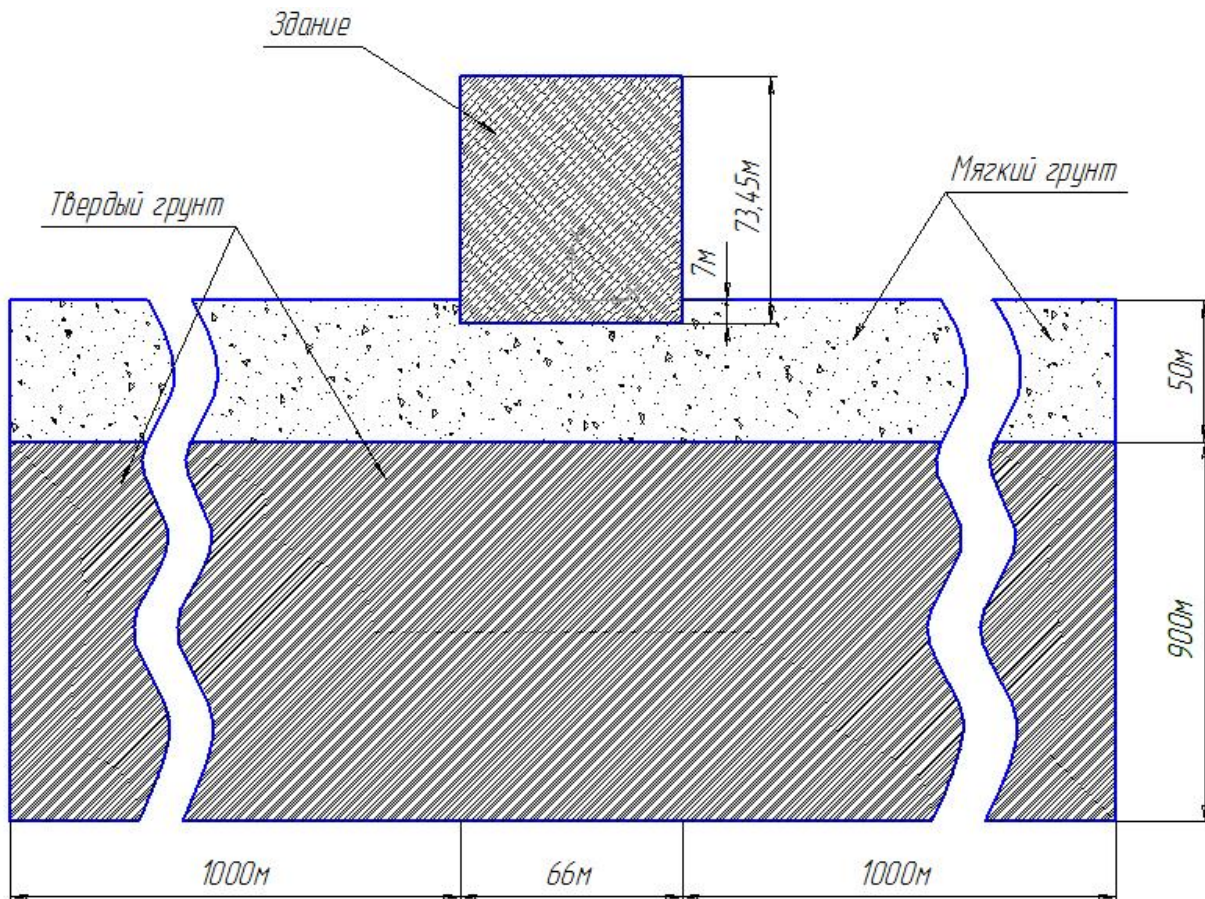


Рис.2.

В каждой точке на нижней границе грунта задается импульсная нагрузка в виде компонент скорости \dot{u}_x, \dot{u}_z , найденных по изложенной выше численной методике на основе экспериментальной сейсмограммы, зарегистрированной на поверхности полупространства (рис. 3). На рис.3 кривая 1 соответствует \dot{u}_x , кривая 2 соответствует \dot{u}_z .

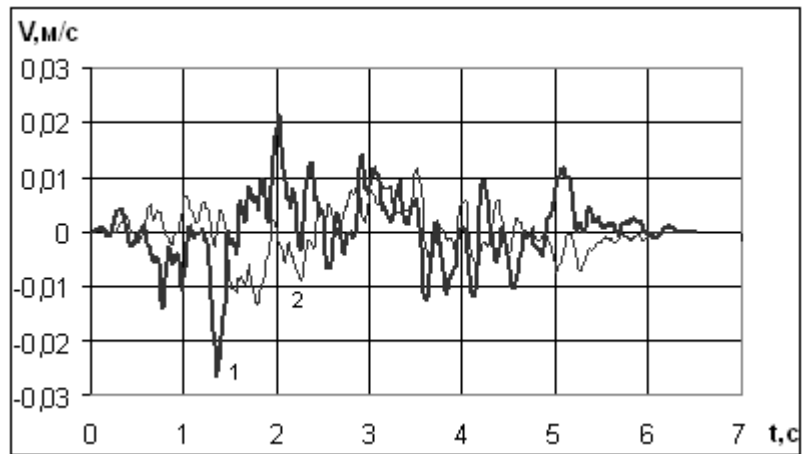


Рис.3.

Контактное взаимодействие грунтового массива и здания моделируется условиями непроникания с учетом сухого трения, при этом допускается отрыв стенок здания от грунтового массива. Коэффициент трения между грунтом и зданием берется 0,2. Начальное поле перемещений системы грунт-здание от силы тяжести определяется методом стационарирования с введением линейной вязкости. Механические характеристики материалов приведены в таблице:

<i>Материал</i>	Модуль упругости <i>E, МПа</i>	Коэффициент Пуассона ν	$\rho, \text{кг} / \text{м}^3$
Мягкий грунт	27	0,4	2030
Твердый грунт	2700	0,4	2030
Сооружение	21000	0,25	802,7

В результате расчета были определены временные зависимости относительных горизонтальных и вертикальных смещений боковых стенок сооружений и грунта. Рассматривались взаимные смещения для граничных точек, находящихся на глубине 2 м. Поскольку разностные сетки для здания и прилегающего грунта не совпадают, сравнивались смещения ближайших узлов на линии их контакта. Пиковые амплитуды смещения стенок сооружения и грунта составили 2,124 мм в вертикальном направлении и 0,053 мм в горизонтальном направлении. Относительные горизонтальные и вертикальные смещения боковых стенок здания и грунта представлены соответственно на рисунках 4, 5, где кривая 1 соответствует смещениям левой стороны здания, а кривая 2 – смещениям правой стороны.

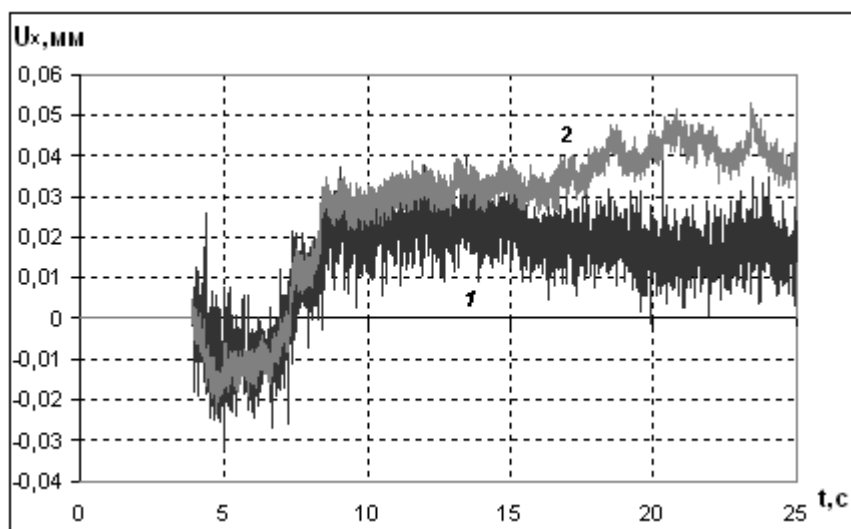


Рис.4.

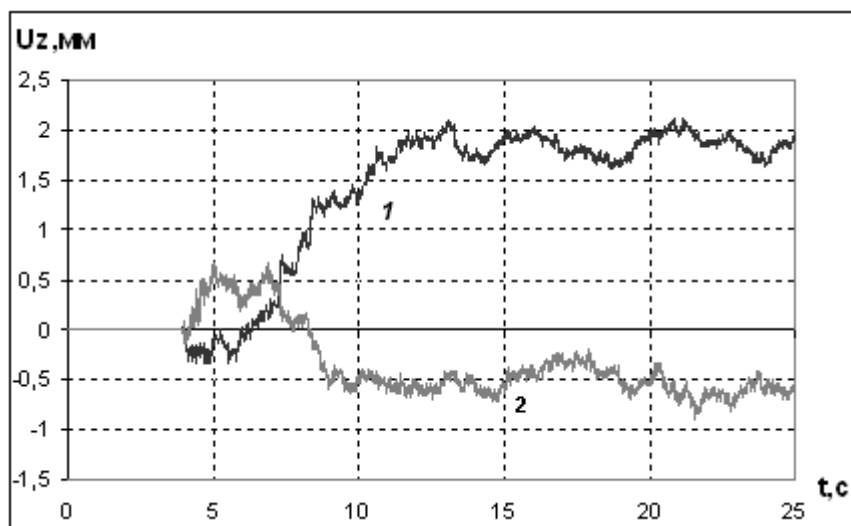


Рис.5

Численное решение ряда задач о сейсмических вибрациях сооружений показало, что процесс динамического контактного взаимодействия сооружения с основанием зависит от многих параметров. Вследствие чего встает вопрос о необходимости анализа факторов, влияющих на поведение сооружения при сейсмических воздействиях.

В четвертой главе Проанализированы основные факторы, влияющие на поведение сооружений при сейсмических вибрациях. Проведены исследования сейсмических вибраций сооружений с учетом контактного взаимодействия с грунтом при различных значениях геометрических и физических параметров: массивности сооружения, величины заглубления фундамента, коэффициента трения на контакте сооружения и грунта, интенсивности сейсмического воздействия.

Зависимость вертикальных и горизонтальных смещений от массы сооружения представлена на рис.6. Массивность сооружения оказывает влияние лишь на вертикальные взаимные смещения стенок сооружения и грунта.

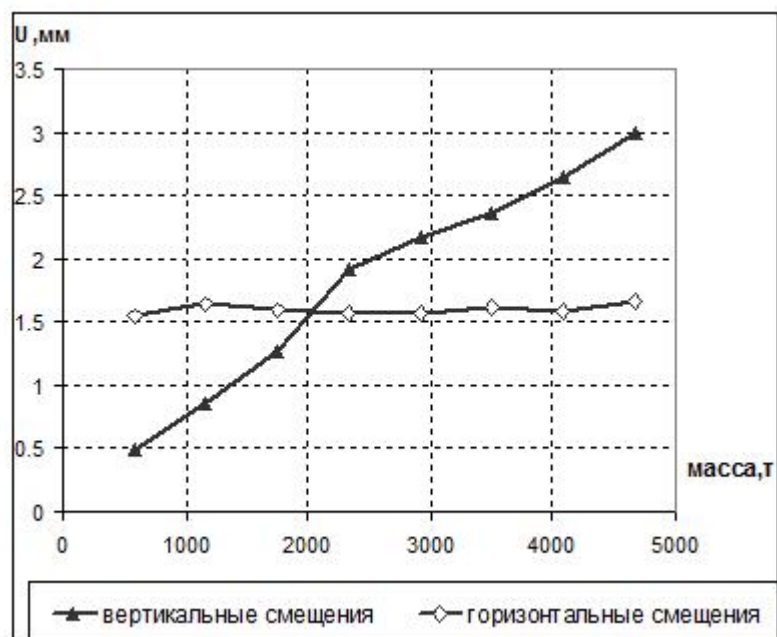


Рис.6.

Зависимость вертикальных и горизонтальных взаимных смещений здания и грунта от величины заглубления фундамента представлена на рис.7. Из рисунка видно, что с увеличением заглубления от 25% до 100% высоты здания вертикальные и горизонтальные смещения уменьшаются в 3 и в 6 раз соответственно.

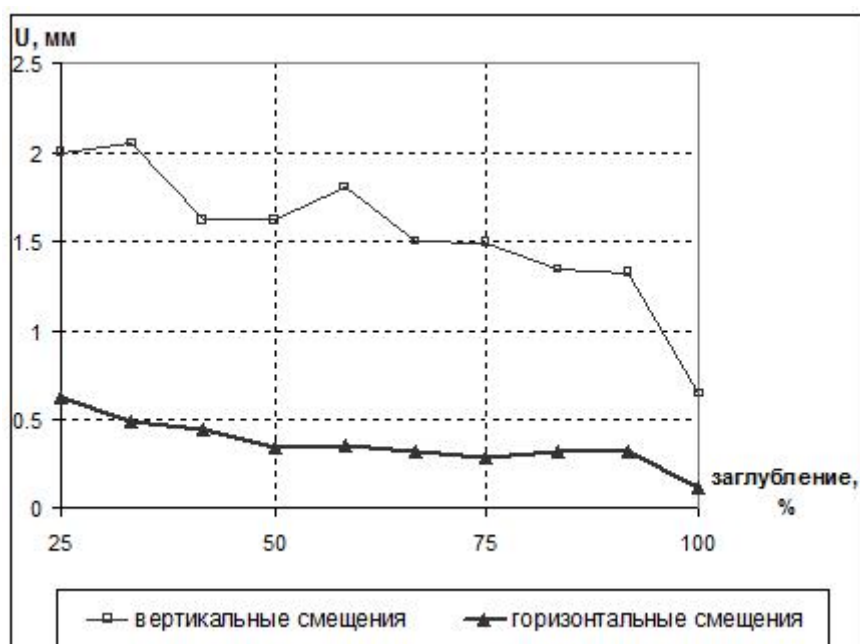


Рис.7.

Исследование зависимости взаимодействия сооружения с грунтом от коэффициента трения на контактных поверхностях приведено на рис.8 для сооружения, заглубленного на треть высоты, и на рис.9 – для полностью заглубленного сооружения. Из анализа графиков вертикальных и горизонтальных взаимных смещений здания и грунта

следует, что коэффициент трения оказывает существенное влияние лишь на вертикальные смещения для полностью заглубленных зданий.

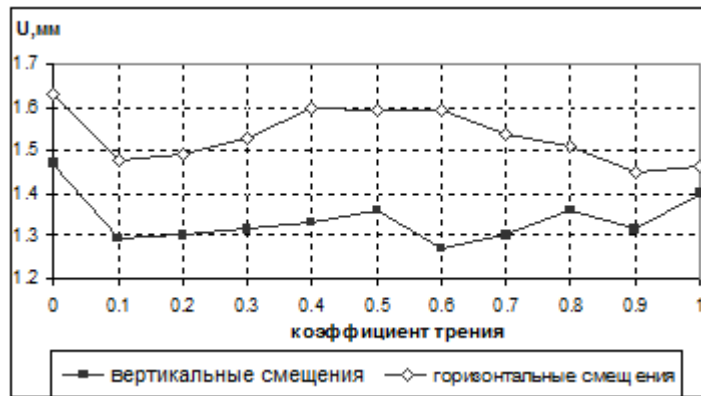


Рис.8.



Рис.9.

Зависимость взаимных смещений стенок сооружения и грунта от величины горизонтальных (вертикальных) ускорений на поверхности грунта представлены на рис. 10 (рис. 11). Сплошной линией обозначены горизонтальные смещения, пунктирной – вертикальные смещения. Можно сделать вывод, что между ускорениями на поверхности грунта и взаимными смещениями грунта и здания имеется зависимость близкая к линейной.

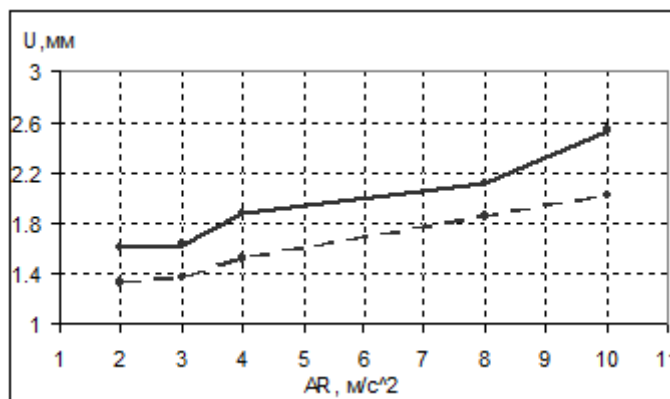


Рис.10.

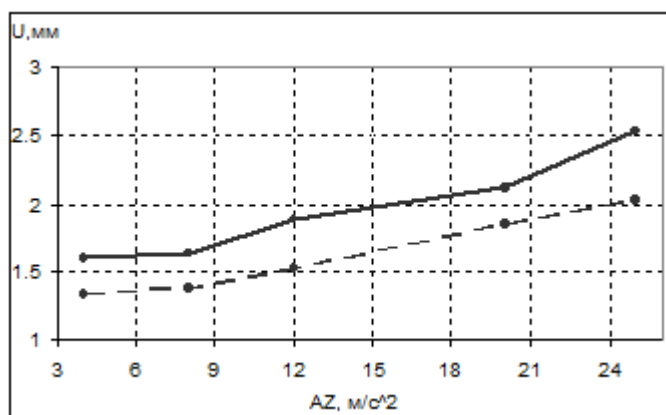


Рис. 11.

На основании серии численных экспериментов с многослойными грунтами установлено, что существенным для проведения расчетов на сейсмостойкость является геологическое строение среды на глубине до 8 величин заглубления сооружения в грунт. Численные исследования позволяют оценить необходимую для геологических изысканий глубину разреза, в котором должны быть изучены механические характеристики слоев грунта.

В заключении приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Развита модель, описывающая основные закономерности поведения сооружений, зданий и трубопроводов при сейсмических воздействиях с учетом силы тяжести и нелинейных эффектов контактного взаимодействия с многослойным грунтовым основанием.

2. Разработаны методики, алгоритмы и программные средства, реализующие разработанные модели, которые позволяют проводить численное исследование сейсмических вибраций сооружений с учетом силы тяжести и эффектов контактного взаимодействия с грунтовым основанием, и сокращают вычислительные затраты до приемлемого уровня за счет применения нового вида граничных условий, мало искажающих набегающие сейсмические волны.

- Установлен шаг пространственной дискретизации, необходимый для адекватного описания распространения сейсмического импульса в грунтовой среде, проведено обоснование выбора размеров расчетной области.
- Решена вспомогательная обратная задача определения импульсной нагрузки, прикладываемой к нижней граничной поверхности расчетной области, в соответствии с экспериментальными акселерограммами, заданными на поверхности полупространства.

- Разработана численная методика моделирования неотражающих граничных условий, в соответствии с которой на границах расчетной области осуществляется перенос скоростей перемещений из приграничных узлов сетки в граничные.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается решением большого числа тестовых примеров и хорошим согласованием результатов с аналитическим решением тестовых задач и расчетами по другим методикам.

3. На основе разработанных методик, алгоритмов и программных средств решены следующие задачи:

- Решен ряд задач о взаимодействии сооружения и грунта, в том числе многослойного, при сейсмических воздействиях с учетом нелинейных эффектов на поверхности контакта с грунтовым основанием. Данная методика позволила более подробно описать процессы взаимодействия сооружения с грунтом.
- Проведены численные исследования взаимодействия сооружений с грунтом при сейсмических колебаниях при различных значениях геометрических и физических параметров: механических свойств грунта и здания, величины заглубления фундамента, коэффициента трения на контакте сооружения и грунта, интенсивности сейсмического воздействия, неоднородности грунтовой среды. На основании проведенных численных исследований сделаны рекомендации по выбору расчетных моделей.

Автор выражает благодарность Баженову В.Г. за научное руководство и всестороннюю поддержку в написании работы, Зефинову С.В. и Кибцу А.И. за помощь в освоении программных комплексов «Динамика-2» и «Динамика-3», Пантелееву В.Ю. за проведение сравнительных расчетов в комплексе ANSYS.

Основные результаты и защищаемые положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в рецензируемых изданиях из списка ВАК

1. Баженов В.Г., Дюкина Н.С., Зефинов С.В., Лаптев П.В., Численное моделирование задач взаимодействия сооружений с двухслойным грунтовым основанием при сейсмических воздействиях// Проблемы прочности и пластичности: Межвузовский сборник / Н. Новгород – 2005. – Вып. 67. – С. 162-167.

2. Баженов В.Г., Дюкина Н.С., Зефирова С.В., Численное моделирование динамического взаимодействия сооружения с грунтом при сейсмических нагрузениях // Вестник Самарского государственного университета, серия «Механика» / Самара – 2007. – №4 – С. 49-55.
3. Баженов В.Г., Дюкина Н.С., Кибец А.И., Численное решение трехмерных задач взаимодействия сооружений с грунтовым основанием при сейсмических нагрузениях // Проблемы прочности и пластичности: Межвузовский сборник / Н. Новгород – 2007. – Вып. 69. – С. 137-142.

Остальные публикации

4. Баженов В.Г., Дюкина Н.С., Численное решение двумерных и трехмерных задач взаимодействия сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях // Вестник ЦНИИСК, 2009. – С. 172-178.
5. Дюкина Н.С., Лаптев П.В., Расчет сейсмических колебаний сооружений при одностороннем взаимодействии с грунтовым основанием // Аннотации докладов IX Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике, Нижний Новгород, 22 – 28 августа 2006. – Т. 3. – С.87.
6. Баженов В.Г., Дюкина, Н.С. Численное исследование сейсмических колебаний зданий с учетом контактного взаимодействия с грунтовым основанием // Краевые задачи и математическое моделирование: сборник трудов Всероссийской научной конференции. 1-3 декабря 2006г., Новокузнецк, Т. 2./ НФИ КемГУ; под общ. Ред. В.О. Каледина. – Новокузнецк, 2006. с. 7-11.
7. Баженов В.Г., Дюкина Н.С., Методика расчета сейсмических колебаний сооружений с учетом контактного взаимодействия с грунтом// Материалы международной молодежной научной школы-конференции. «Лобачевские чтения – 2006», г. Казань, 28 ноября – 1 декабря, 2006г. // «Труды Математического центра имени Н.И. Лобачевского», с. 24-26.
8. Баженов В.Г., Дюкина Н.С., Применение прямого динамического метода для расчета сооружений на сейсмические воздействия// Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Труды международной конференции «IX Харитоновские тематические научные чтения» – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007. – С. 733-737.
9. Дюкина Н.С., Расчет конструкций на сейсмические воздействия с учетом податливости основания сооружения// Двенадцатая Нижегородская сессия молодых учёных (Технические науки): Тезисы докладов, 26 февраля – 2

марта 2007 года. /Н. Новгород: Нижегородский гуманитарный центр, 2007. – с.48-49.

10. Дюкина Н.С., Моделирование неотражающих граничных условий в задачах расчета сооружений на сейсмические воздействия// Двенадцатая Нижегородская сессия молодых учёных (Математические науки): Материалы докладов. – Н.Новгород. (23-26 мая 2007 года) – С.42-43.
11. Дюкина Н.С., Анализ факторов, влияющих на поведение сооружения при сейсмических воздействиях // Материалы международной молодежной научной школы-конференции. «Лобачевские чтения – 2007», г. Казань, 16 – 19 декабря, 2007г. // «Труды Математического центра имени Н.И. Лобачевского», с. 68-70.
12. Дюкина Н.С., Численное исследование поведения системы «здание-фундамент-грунт» при сейсмических воздействиях// Тринадцатая Нижегородская сессия молодых ученых (Технические науки): Тезисы докладов, 2008г. / Н. Новгород: Нижегородский гуманитарный центр, 2008. – С. 45-46.