

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВИБРАЦИЙ ЗАГЛУБЛЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «ДИНАМИКА-3»

*В. Г. Баженов, Н. С. Дюкина, А. И. Кибец*

НИИ механики Нижегородского государственного университета  
им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

## Введение

Распространенный в расчетной практике метод оценки сейсмостойкости сооружений [1–3] предполагает учет жесткости грунтового основания в виде совокупности упруго-вязких связей, присоединенных к фундаментной плите. Данный метод не позволяет учитывать многие факторы, влияющие на динамическую жесткость основания (размеры и форма основания, величина нагрузки, тип грунта и т. д.) и применим только для малозаглубленных сооружений.

К некоторым сооружениям повышенной социальной опасности, таким как промышленные предприятия и энергетические объекты, предъявляются более высокие требования по обеспечению сейсмостойкости. При проектировании таких объектов необходимо обеспечить сейсмостойкость не только всех сооружений, но и примыкающих к сооружению коммуникаций и оборудования (т. е. прочность, а для некоторых систем – работоспособность в условиях землетрясения), что требует решения ряда специфических задач. Исследование сейсмостойкости массивных заглубленных сооружений АЭС и примыкающих к ним подземных трубопроводов подразумевает включение в рассмотрение массива, прилегающего к сооружению грунта, большие размеры которого позволяют минимизировать отраженные от границ грунтового массива волны вблизи сооружения. Для точного описания сооружения и высокочастотных сейсмических осцилляций необходим выбор мелкой разностной сетки, что делает численное моделирование крупногабаритных задач сейсмологии крайне трудоемким даже на суперкомпьютерах. Предлагаемый авторами метод анализа сейсмостойкости заглубленных сооружений [4] существенно сокращает вычислительные затраты и учитывает эффекты контактного взаимодействия стенок сооружения с грунтовым основанием.

## 1. Математическая модель и численная методика

Для описания движения сплошных сред в лагранжевых переменных в неподвижной декартовой системе координат применяются уравнения, следующие из вариационного принципа баланса мощностей работ, решение которых при заданных начальных и граничных условиях основывается на вариационно-разностном методе дискретизации по пространственным координатам и явной схеме интегрирования по времени [5].

Массив грунта представляется прямоугольным параллелепипедом, размеры которого в 20 раз превосходят характерные размеры основания сооружения в плане (рис. 1) – в совокупности с неотражающими волны граничными условиями этого достаточно [4] для исключения влияния краевых эффектов на результаты расчета вблизи сооружения. Жесткие грунты моделируются однородной или многослойной идеально упругой средой, для мягких грунтовых оснований применяется трансверсально-изотропная модель, учитывающая изменение характеристик грунта с глубиной [6]. Расчетная область находится в поле сил тяжести, поля перемещений и напряжений от действия сил тяжести определяются с применением процедуры стационарирования. В зависимости от расположения гипоцентра землетрясения, к нижней или боковой границе грунта прикладывается сейсмическое воздействие в виде компонент вектора скорости  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ , вычисленных так [4], чтобы вблизи сооружения воспроизводилась заданная акселерограмма землетрясения. Между сооружением и грун-

том моделируется контактное взаимодействие с трением. Компоненты контактных усилий определяются в местном координатном базисе, связанном с поверхностью контакта: нормальные компоненты усилий находятся из условия непроникания, а касательные усилия – в соответствии с законом Амонтона – Кулона. Связь контактирующих подобластей полагается односторонней, т. е. допускается их отрыв друг от друга и повторное вступление в контакт.

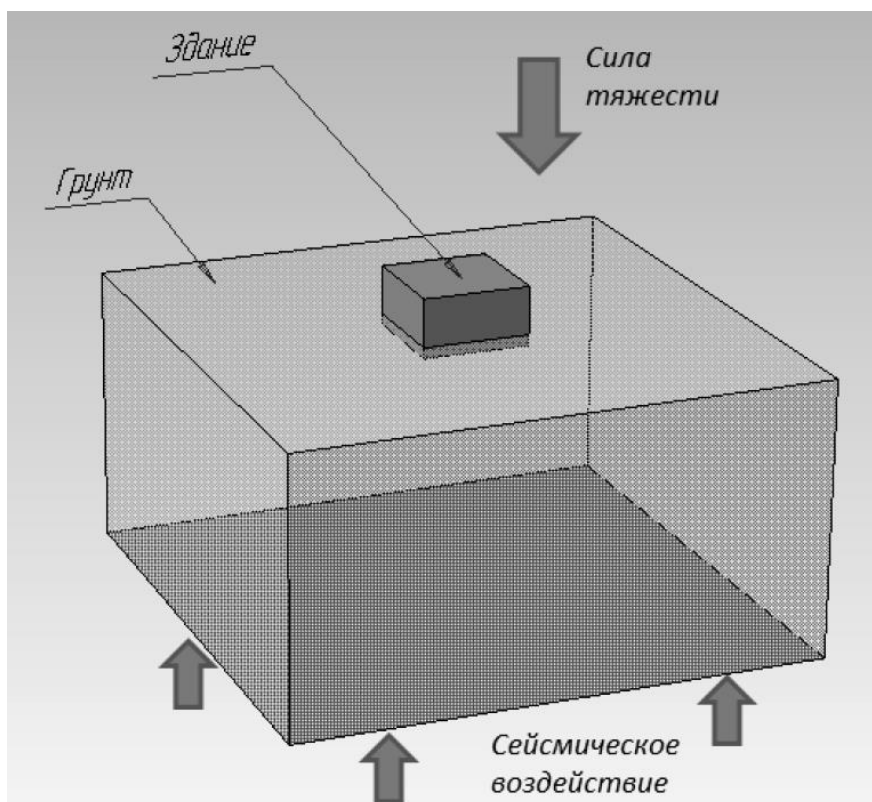


Рис. 1. Расчетная схема

## 2. Неотражающие волны граничные условия

Для реализации неотражающих граничных условий предлагается метод, в соответствии с которым на боковых границах расчетной области осуществляется перенос скоростей перемещений из приграничных узлов сетки в граничные. Данный метод позволяет моделировать распространение одномерных волн сдвига и сжатия по массиву грунта вдоль граничной поверхности без искажений. Верификация предлагаемых неотражающих волны граничных условий проведена на численном решении трехмерной задачи о пробеге плоской поперечной волны в упругом прямоугольном стержне ( $0 \leq x_i \leq l_i$ ,  $l_1 = 40$  см,  $l_2 = l_3 = 6$  см, модуль упругости  $E = 2430$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,41$ , плотность  $\rho = 2030$  кг/м<sup>3</sup>). На поверхности  $x_1 = 0$  задавалась вертикальная компонента скорости смещения  $i_2(0, x_2, x_3, t) = \text{const}$ , 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) неотражающие граничные условия. Результаты решения выбранных вариантов начально-краевых задач представлены на рис. 2,а,б соответственно. На этих рисунках изображено распределение

поля скоростей перемещений  $i_2(x_1, x_2, x_3, t)$  в расчетной области в момент времени  $\tilde{t} = t \frac{C_S}{l_1} \approx 0,48$ , где  $C_S$  – скорость распространения поперечных волн в материале.

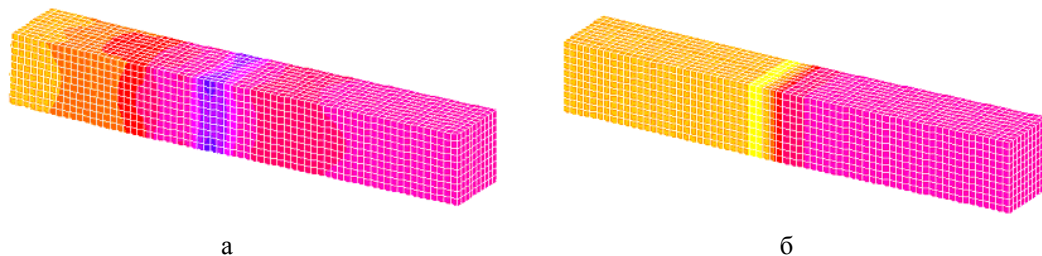


Рис. 2. Распространение сдвиговой волны в упругом прямоугольном стержне

Проведено сопоставление предложенных граничных условий с методом квазиравномерных сеток. Рассматривались варианты квазиравномерных сеток, разрежающихся по линейному и гиперболическому законам. Установлено, что при применении неотражающих граничных условий решение со временем не искажается, применение квазиравномерных сеток приводит к постепенному искажению решения за счет отражений от боковых границ.

### 3. Учет поля силы тяжести

Включение поля силы тяжести в процесс численного решения крупногабаритных задач сейсмологии приводит к интенсивным колебаниям расчетной области. Продолжительность данных колебаний может быть значительно уменьшена введением процедуры стационарирования, которая заключается в периодическом обнулении скоростей перемещений в расчетной области. Эффективность предлагаемой методики подтверждена решением задачи об осадке здания под действием силы тяжести. Расчеты проведены в трехмерной постановке с применением и без применения стационарирования с использованием программного комплекса «Динамика-3». Сооружение представляется параллелепипедом с основанием  $66 \times 66$  м, высотой 22 м, заглубленным на 4 м. Грунтовая среда считается двухслойной, составленной из более мягкого верхнего и более твердого подстилающего слоев грунта. Область, заполненная грунтом, представляется параллелепипедом с основанием  $1200 \times 1200$  м и высотой 300 м, при этом толщина слоя мягкого грунта составляет 50 м, жесткого – 250 м. Механические характеристики материалов принимались: для здания модуль упругости  $E = 21000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,25$ , плотность  $\rho = 1120$  кг/м<sup>3</sup>, для верхнего слоя грунта модуль упругости  $E = 27$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,4$ , плотность  $\rho = 2030$  кг/м<sup>3</sup>, для нижнего слоя – модуль упругости  $E = 2700$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,41$ , плотность  $\rho = 2030$  кг/м<sup>3</sup>. Вертикальная компонента ускорения линейно нарастала в течение 1 с от 0 до постоянного значения  $9,81$  м/с<sup>2</sup>, период обнуления скоростей при стационарировании выбран 0,2 с. Стабилизация проведена в течение первых 5 с. Сопоставление результатов решения задач осадки здания под действием силы тяжести с применением и без применения стационарирования представлены на рис. 3, 4. На рис. 3 представлены временные зависимости внутренней (кривые 1, 3) и кинетической (кривые 2, 4) энергии, отнесенные к значению внутренней энергии системы, полученному из решения квазистатической задачи: кривые 1, 2 соответствуют задаче со стационарированием, 3, 4 – задаче без стационарирования. На рис. 4 представлены временные зависимости отнесенных к весу здания перемещений здания: кривая 1 получена для задачи со стационарированием, кривая 2 – для задачи без стационарирования.

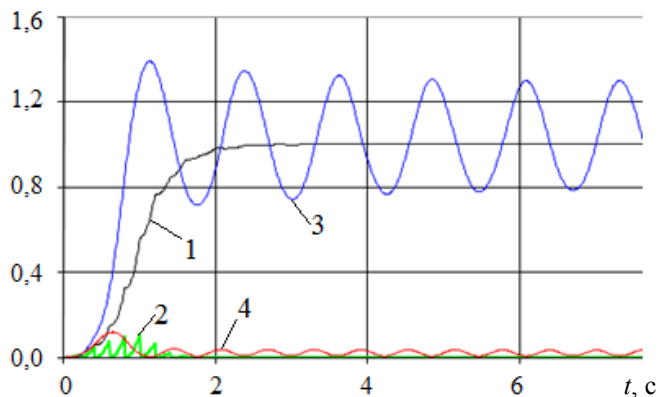


Рис.3. Внутренняя и кинетическая энергия, отнесенные к полной энергии системы

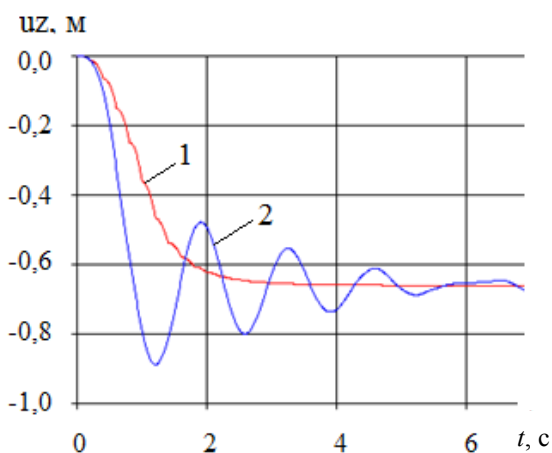


Рис. 4. Перемещения здания

#### 4. Программный комплекс «Динамика-3»

Описанные методы решения, алгоритмы моделирования контактного взаимодействия и учета поля сил тяжести реализованы в сертифицированном программном комплексе «Динамика-3» (сертификат соответствия № РОСС RU.МЕ20.Н00338 Госстандарта России, Регистрационный паспорт аттестации ПС № 325 от 18.04.2013, выданный Научно-техническим центром по ядерной и радиационной безопасности).

Для распараллеливания данной методики решения трехмерных нелинейных задач динамики конструкций используется метод пространственной декомпозиции расчетной области [7], в соответствии с которым вычисления в разных точках расчетной области распределяются в разные узлы кластера. Поскольку в дискретном аналоге уравнений движения матрица масс является диагональной и не возникает необходимости в ее обращении, расчетная схема обладает большим параллелизмом по данным и вычислениям. Алгоритм решения задачи на каждом временном слое распадается на две части: последовательную и параллельную. Основной объем вычислений (определение компонент деформаций, напряжений, узловых сил, интегрирование уравнений движения и т. д.) осу-

ществляется параллельно. В последовательной части происходит согласование рассчитанных величин, полученных на разных узлах кластера.

Отладка и тестирование модернизированной версии ВС «Динамика 3» производились на кластере, включающем в себя два узла – персональные ЭВМ на базе процессоров IntelPentium IV с тактовой частотой 2,0 ГГц. Объем оперативной памяти каждого узла составляет 512 Мб. Коммуникационной средой является сеть Ethernet, обеспечивающая обмен данными со скоростью до 80 Мбит/с. Операционная система кластера – Linux ASP 7.3. Для организации параллельных вычислений использовалась библиотека *mpich-1.2.5*. Решение ряда тестовых [8] задач подтвердило эффективность работы распараллеленного варианта программного комплекса «Динамика-3».

## 5. Результаты расчетов

Ниже представлен один из типовых расчетов для сооружения размерами в плане 51,0×121,0 м, высотой 43,17 м, заглубленным в грунт на 8,1 м (рис. 5). Механические характеристики сооружения: модуль упругости  $E = 21$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,25$ , плотность  $\rho = 115,615$  кг/м<sup>3</sup>. Механические характеристики грунта: модуль упругости  $E = 40$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,35$ , плотность  $\rho = 2250,0$  кг/м<sup>3</sup>. Между зданием и грунтом допускается контактное взаимодействие с учетом сухого трения (коэффициент трения 0,554).

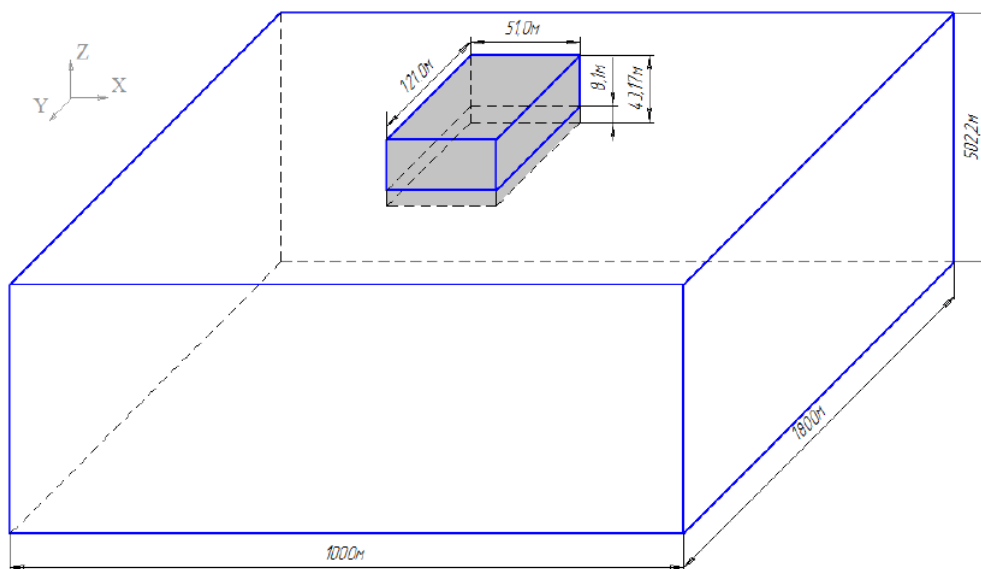


Рис. 5. Вид расчетной области

По окончании процесса стационарирования расчетной области в поле сил тяжести к нижней границе грунтового массива прикладывается нагрузка в виде компонент скорости  $\dot{u}_x$ ,  $\dot{u}_y$ ,  $\dot{u}_z$ , восстановленная в соответствии с описанной в [4] численной методикой по заданной на дневной поверхности грунта экспериментальной сейсмограмме (рис. 6).

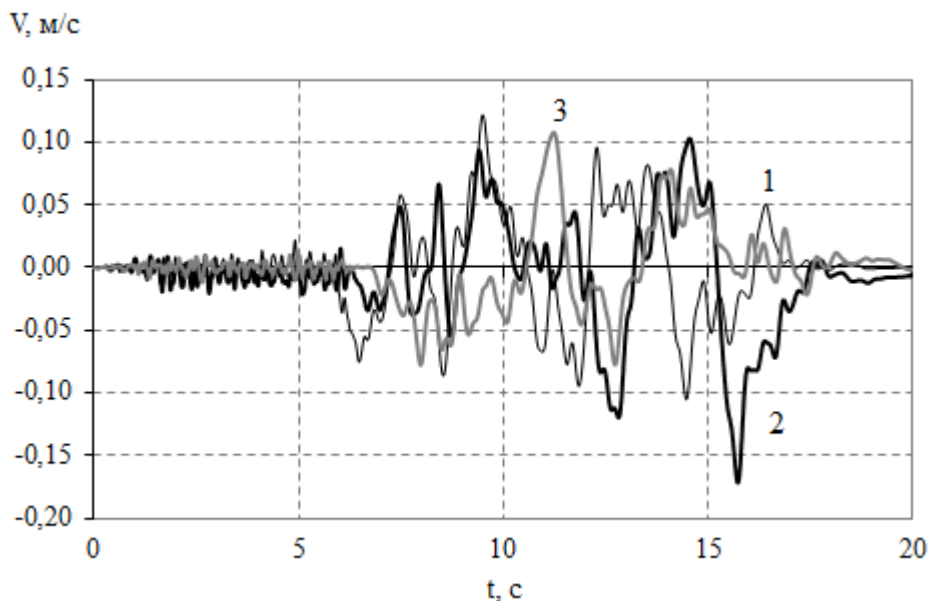


Рис. 6. Экспериментальная сейсмограмма на поверхности: 1 – компонента скорости  $\dot{u}_x$ ,  
2 – компонента скорости  $\dot{u}_y$ , 3 – компонента скорости  $\dot{u}_z$

Ниже представлены временные зависимости взаимных смещений грунта и боковых стенок сооружения, на основании которых сделаны оценки максимальных взаимных смещений вдоль осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . На графиках кривые 1, 2, 3, 4 (5, 6, 7, 8) соответствуют смещениям на левой (правой) стенке сооружения на глубине 1,62; 3,24; 4,86; 6,48 м.

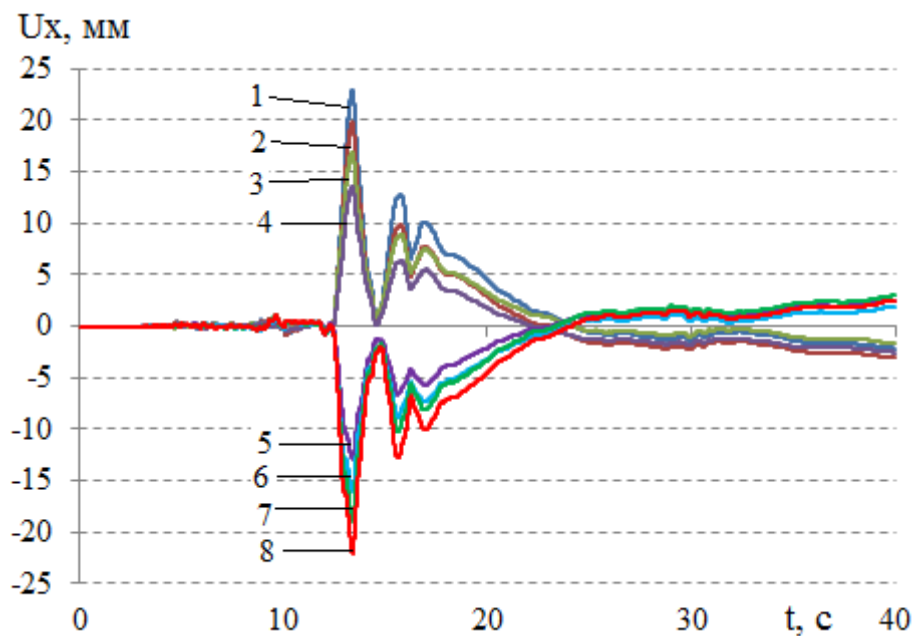


Рис. 7. Взаимные горизонтальные смещения стенок сооружения  
и грунта в сечении  $y = 0$

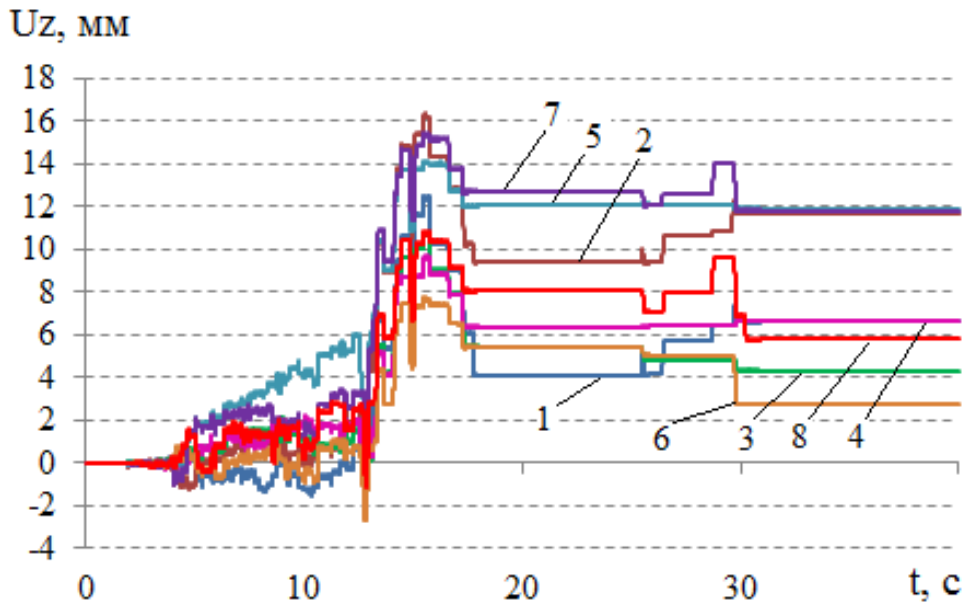


Рис. 8. Взаимные вертикальные смещения стенок сооружения и грунта в сечении  $y = 0$

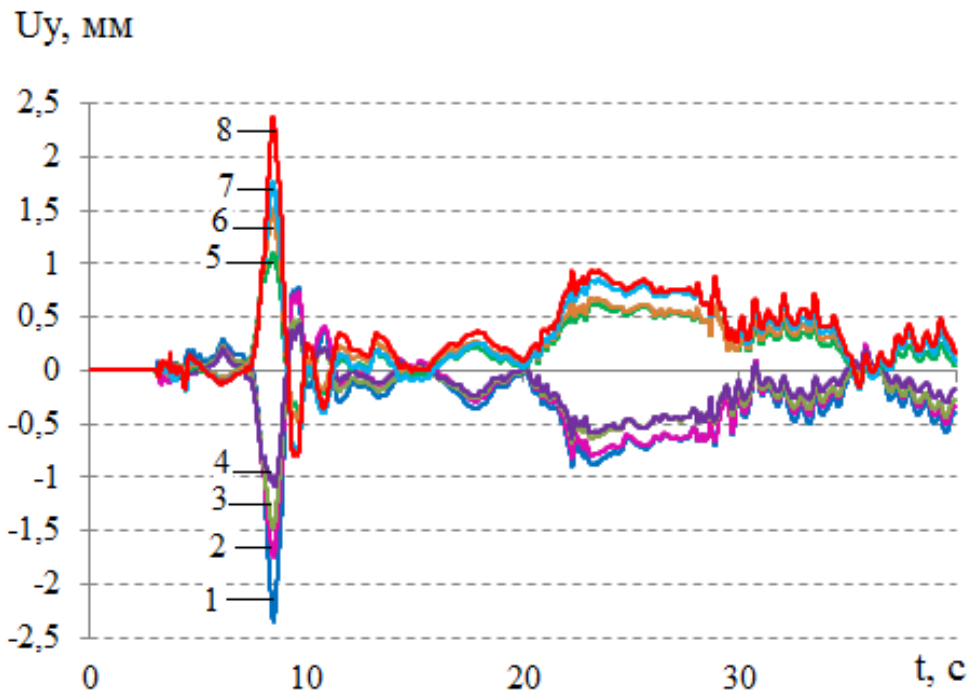


Рис. 9. Взаимные горизонтальные смещения стенок сооружения и грунта в сечении  $x = 0$

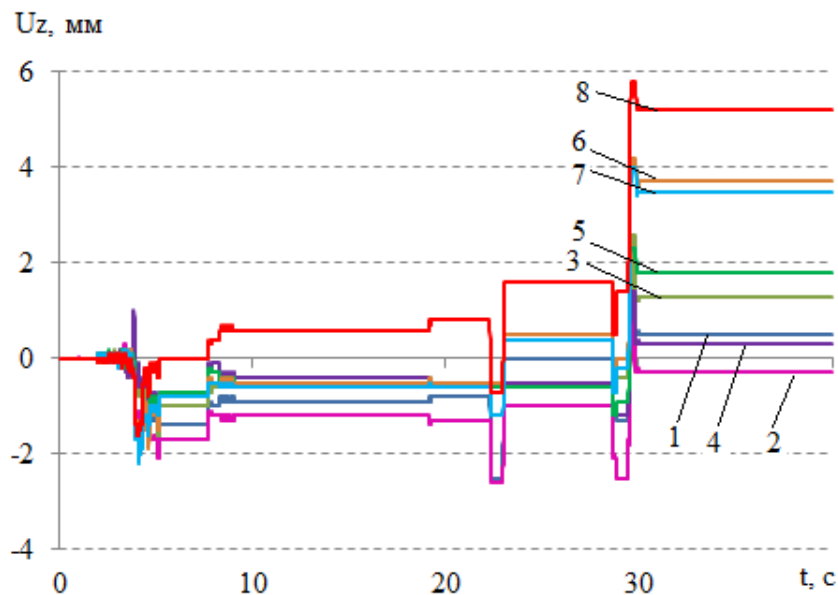


Рис. 10. Взаимные вертикальные смещения стенок сооружения и грунта в сечении  $x = 0$

Полученные временные зависимости относительных горизонтальных и вертикальных смещений боковых стенок сооружений и грунта, наглядно иллюстрируют сложный характер взаимодействия заглубленного сооружения с грунтом и могут быть использованы для анализа сейсмостойкости примыкающих к сооружению подземных трубопроводов.

### Заключение

Разработаны математическая модель, численная методика и программные алгоритмы решения задач сейсмостойкости заглубленных сооружений. Предложенные средства решения задач сейсмологии учитывают поле силы тяжести, эффекты контактного взаимодействия сооружения с грунтом, а также существенно сокращают вычислительные затраты. Трансверсально-изотропная модель грунта, учитывающая изменение пористости с глубиной, позволяет решать задачи сейсмологии для оснований малой плотности. Внедрение трансверсально-изотропной модели грунта в комплекс методик и алгоритмов анализа сейсмостойкости сооружений позволяет расширить спектр решаемых задач и повысить эффективность численных исследований.

Распараллеливание алгоритма позволило сократить вычислительные затраты и повысить эффективность численных исследований. Благодаря этому стал технически возможным многократный пересчет задачи с различными вариантами воздействия, сформированного вероятностными методами из экспериментальной сейсмограммы. Результаты таких расчетов позволяют отражать опыт многих землетрясений, что повышает их достоверность проводимых исследований.

Проведены численные исследования взаимодействия сооружений с грунтом при сейсмических колебаниях с различными значениями геометрических и физических параметров [4, 9]: механических характеристик грунта и здания, величины заглубления фундамента, коэффициента трения на контакте сооружения и грунта, интенсивности сейсмического воздействия, неоднородности грунтовой среды, эксцентриситета центра масс сооружения. На основании проведенных численных исследований сделаны рекомендации по выбору расчетных моделей. В частности, получены оценки необходимой для адекватных расчетов глубине геологических изысканий на площадке строительства, предложена новая трансверсально-изотропная модель грунта, позволяющая решать крупногабаритные задачи сейсмологии для оснований, сложенных из мягких грунтов.



Разработанная вычислительная модель динамического взаимодействия сооружения с грунтом применена для оценки сейсмостойкости подземных трубопроводов, примыкающих к ответственным сооружениям АЭС Бушер (Иран), Нововоронежской АЭС-2, Калининской, Ростовской АЭС (Россия), Белорусской АЭС (Белоруссия) по заказу ОАО «НИАЭП» (Н. Новгород).

Исследование выполнено в НИИМ ННГУ при поддержке гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ НШ-593.2014.8, гранта Министерства образования и науки (соглашение от 27.08.2013 № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ) и Российского фонда фундаментальных исследований (№ 14-01-31113, № 14-08-01129).

## Литература

1. Бирбраер А. Н., Шульман С. Г. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Jarernprasert S., Bazan-Zurita E., Bielak J. Seismic soil-structure interaction response of inelastic structures // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2013. 47. P. 132–143.
3. Nakhaei M., Ghannad M. A. The effect of soil-structure interaction on damage index of buildings // Engineering Structures. 2008. 30. P. 1491–1499.
4. Дюкина Н. С., Баженов В. Г. Методы численного исследования сейсмостойкости заглубленных сооружений. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012.
5. Баженов В. Г., Чекмарев Д. Т. Решение задач нестационарной динамики пластин и оболочек вариационно-разностным методом. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2000.
6. Дюкина Н. С., Кибец А. И., Жестков М. Н. Анализ сейсмических колебаний заглубленных сооружений с учетом трансверсально-изотропного основания // Проблемы прочности и пластичности. 2013. Вып. 75. Ч. 1. С. 40–46.
7. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. С.-Пб.: БХВ-Петербург, 2002.
8. Баженов В. Г., Гордиенко А. В., Кибец А. И. и др. Адаптация последовательной методики решения нелинейных задач динамики конструкций для многопроцессорных ЭВМ // Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах: мат. докл. Самара, 30 сентября – 2 октября 2004. С. 20–25.
9. Баженов В. Г., Дюкина Н. С. Численное исследование взаимодействия сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5, № 1. С. 19–24.

## ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС.

### МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ И СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ SOLID-SHELL ТЕХНОЛОГИИ

*Р. А. Барабанов, Д. Ю. Дьянов, И. И. Каныгин, Е. А. Филимонкин, К. В. Циберева*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

## Введение

В настоящее время во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разрабатывается пакет программ ЛОГОС для решения широкого круга задач, в том числе механики деформируемого твердого тела на много-