

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАГЛУБЛЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ С ГРУНТОМ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ¹⁾

В.Г. БАЖЕНОВ, Н.С. ДЮКИНА

*НИИМ Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского
E-mail ndyukina@inbox.ru*

NUMERICAL SIMULATION OF SOIL-BURIED STRUCTURE INTERACTION UNDER SEISMIC INFLUENCE

V.G. BAGHENOV, N.S. DYUKINA

Research Institute of Mechanics of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

Аннотация

В работе кратко описывается разработанная авторами численная методика моделирования сейсмических вибраций заглубленных сооружений, учитывающая поле сил тяжести и эффекты контактного взаимодействия стенок здания с грунтом, которая существенно сокращает вычислительные затраты.

Ключевые слова : Численное моделирование, контактное взаимодействие, сейсмическое воздействие

Summary

The paper briefly describes the authors developed a numerical simulation method of seismic vibrations of buried structures, taking into account the gravity field and the effects of contact interaction of the walls of the building with soil, which significantly reduces the computational cost.

Key words: Numerical simulation, contact interaction, seismic influence.

Введение

Предлагаемые строительными нормами методы оценки сейсмостойкости сооружений используют упрощенную модель грунтового основания и применимы только для малозаглубленных сооружений. Исследование сейсмостойкости заглубленных сооружений 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. Выбор мелкой разностной сетки, необходимой для точного описания сооружения и высокочастотных сейсмических осцилляций, делает численное моделирование крупногабаритных задач сейсмике крайне трудоемким даже на суперкомпьютерах.

Предлагаемый авторами метод анализа сейсмостойкости заглубленных сооружений [1] существенно сокращает вычислительные затраты и учитывает эффекты контактного взаимодействия сооружения с грунтовым основанием.

¹⁾Исследование частично профинансировано грантом Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ НШ-593.2014.8, грантом Министерства образования и науки (соглашение № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ от 27.08.2013) и Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № 14-01-31113, № 14-08-01129)

1. Численная методика

Для описания движения сплошных сред в лагранжевых переменных в неподвижной декартовой системе координат применяются уравнения, следующие из вариационного принципа баланса мощностей:

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

Здесь σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, u_i – скорости перемещений, p_i, q_i – компоненты поверхностной нагрузки и контактного давления, f_i – компоненты массовых сил, отнесенные к единице массы ($i = x, y, z$). Нормальные к поверхности контакта компоненты усилий q_i находятся из условия непроникания, а касательные усилия – в соответствии с законом Амонтона-Кулона. Связь контактирующих подобластей полагается односторонней, то есть допускается их отрыв друг от друга и повторное вступление в контакт.

Решение определяющей системы уравнений (1) при заданных начальных и граничных условиях основывается на вариационно-разностном методе дискретизации по пространственным координатам и явной схеме интегрирования по времени [2]. 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 вычисления скоростей и перемещений по времени представляется в виде

$$\begin{aligned} (\dot{u}_i)_j^{k+1/2} &= (\dot{u}_i)_j^{k-1/2} + (F_i)_j^k \Delta t^{k+1/2} / (M)_j^k, \\ (u_i)_j^{k+1} &= (u_i)_j^k + (\dot{u}_i)_j^{k+1/2} \Delta t^{k+1}, \\ \Delta t^{k+1/2} &= \frac{\Delta t^{k+1} + \Delta t^k}{2}, \quad i = x, y, z. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь F_i – обобщенные силы, действующие на расчетный узел j , M – масса в j -м узле. Выбор шага интегрирования Δt^{k+1} осуществляется из условия устойчивости Куранта. Применение процедуры консервативного сглаживания к разностной схеме второго порядка точности (2) позволяет подавить нефизические осцилляции численного решения.

Массив грунта представляется прямоугольным параллелепипедом, к нижней границе которого прикладывается сейсмическое воздействие в виде компонент вектора скорости v_x, v_y, v_z , вычисленных так, чтобы вблизи сооружения воспроизводилась заданная акселерограмма. На боковых границах грунтового массива задаются специально разработанные мало отражающие волны граничные условия, суть которых заключается в высылке скоростей перемещений из приграничных узлов сетки в граничные на каждом на временном шаге. Из численных экспериментов установлен размер грунтового массива, достаточный для исключения влияния краевых эффектов на результаты расчета вблизи сооружения, – 20 характерных размеров основания сооружения в плане. Жесткие грунты моделируются однородной или многослойной идеально упругой средой, для мягких грунтовых оснований применяется трансверсально-изотропная модель, учитывающая изменение характеристик грунта с глубиной [3]. Расчетная область находится в поле сил тяжести. Расчет полей перемещений и напряжений от действия сил тяжести осуществляется с применением процедуры гашения кинетической энергии в момент достижения максимума до ее установления с заданной точностью. Между сооружением и грунтом моделируется контактное взаимодействие с трением. Схематичное изображение расчетной области представлено на рис. 1.

Методика определения кинематических граничных условий на нижней границе грунтового массива по известной на дневной поверхности экспериментальной акселерограмме [1] основана на допущении, что приходящие от источника землетрясения к сооружению волны можно считать плоскими и распространяющимися по нормали к дневной поверхности грунта. В соответствии с предлагаемой численной методикой сейсмограмма на нижней поверхности грунта представляется в виде кусочно-линейной функции

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

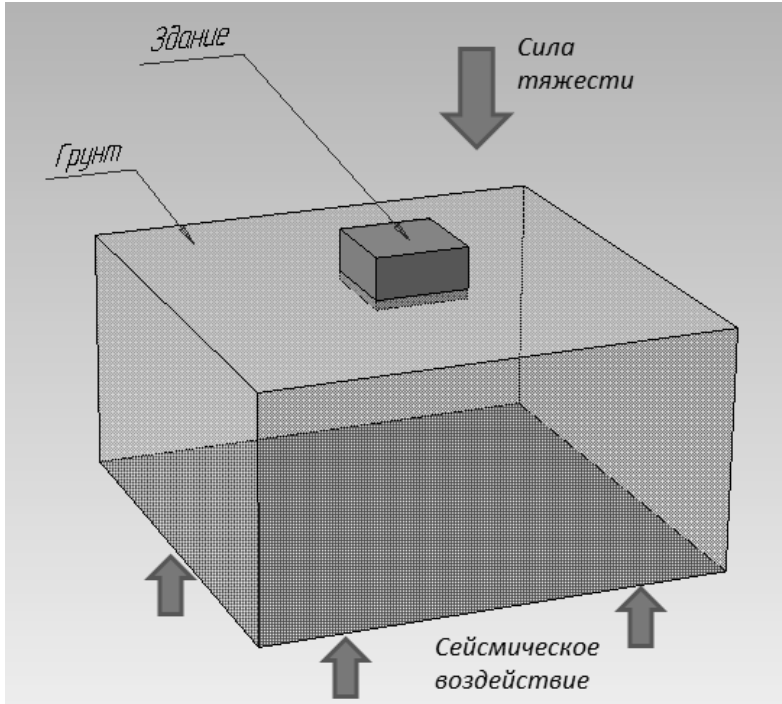


Рис. 1: Расчетная схема

где a_i – приращение к амплитуде сейсмограммы в данной характерной точке; $H(t_h - t_i)$ – функция Хевисайда; t_h – дискретные значения времени, отвечающие характерным точкам сейсмограммы на поверхности; t_i – сдвиг по времени характерной точки сейсмограммы. Далее сеточно-характеристическим методом решается одномерная задача распространения в грунтовой среде волны, заданной на границе в виде функции Хевисайда. Зная, как изменилась тарировочная функция при пробеге через грунтовый массив, по экспериментальной сейсмограмме C_1 в каждой опорной точке можно восстановить искомую сейсмограмму на нижней границе области грунта C_0 :

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

где H_0 – тарировочная функция; H_1 – сейсмограмма на поверхности, полученная из решения задачи; t^* – время пробега волны от нижней границы грунтового массива до его поверхности. Линейная интерполяция по полученным опорным точкам позволяет найти сейсмограмму на подошве грунтового массива отдельно для сдвиговых и продольных волн. Шаг разностной сетки обуславливается точностью описания высокочастотных осцилляций, присутствующих в сейсмограмме. Чтобы дисперсионные эффекты численного решения по явной схеме «крест» не искажали заданную кусочно-линейной функцией волну, необходимо брать число Куранта равным единице. Тогда схема «крест» даст те же результаты, что и сеточно-характеристический метод на фиксированной сетке, и дисперсия численного решения не возникнет.

2. Результаты расчетов

Описанные методы решения, алгоритмы моделирования контактного взаимодействия и учета поля сил тяжести реализованы в сертифицированном программном комплексе «Динамика-3» (сертификат № РОСС RU.МЕ20.НОО338 Госстандарта России, Регистрационный паспорт аттестации ПС № 325 от 18.04.2013, выданный Научно-техническим центром по ядерной и радиационной безопасности). С целью повышения эффективности численных исследований сейсмостойкости сооружений проведено распе-

раллеливание алгоритма конечно-элементной методики решения трехмерных нелинейных задач динамики конструкций по принципу пространственной декомпозиции расчетной области [4], в соответствии с которыми вычисления в подобластях расчетной области распределяются по узлам кластера. 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.) осуществляется параллельно, в последовательной части происходит согласование рассчитанных величин, полученных на разных узлах кластера [5]. 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.

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). Проведены исследования поведения сооружений и примыкающих подземных трубопроводов в зависимости от параметров сейсмического воздействия и различных геометрических и физических параметров сооружения и грунта [6]. Ниже приведены результаты одного из типовых расчетов. Задача решалась в трехмерной постановке с использованием программного комплекса «Динамика-3». Здание представлялось прямоугольным параллелепипедом с плоскостями симметрии xOz , yOz (рис. 2). Характеристики сред: для сооружения модуль упругости $E=21000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,25$, плотность $\rho=1020$ кг/м³; для верхнего слоя грунта (слой 1): $E=15$ МПа, $\nu=0,22$, $\rho=1500$ кг/м³; для второго слоя грунта $E=18$ МПа, $\nu=0,24$, $\rho=1581$ кг/м³; для третьего слоя грунта $E=21$ МПа, $\nu=0,26$, $\rho=1671$ кг/м³; для четвертого слоя – $E=24$ МПа, $\nu=0,28$, $\rho=1773$ кг/м³; для пятого нижнего слоя грунта – $E=28$ МПа, $\nu=0,3$, $\rho=1887$ кг/м³.

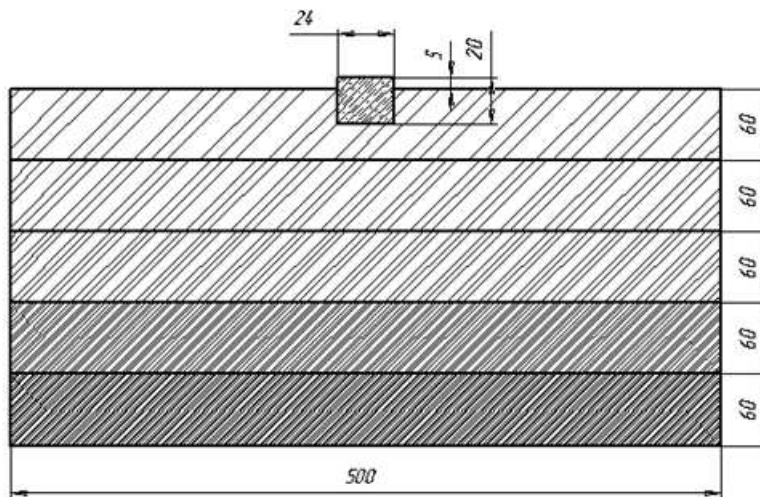


Рис. 2: Вид расчетной области

Расчетная область здания и многослойного грунта покрывалась равномерной разностной сеткой с шагом 2 м по горизонтали, высота ячеек слоев грунта берется в соответствии с численным решением одномерной задачи (от 2.5 до 3.307 м), высота ячеек здания – 2 м. Коэффициент трения между грунтом и зданием берется 0.2. По окончании процесса стационарирования расчетной области в поле сил тяжести к нижней границе грунтового массива прикладывается кинематическая нагрузка, восстановленная из экспериментальной акселерограммы 7-бального землетрясения длительностью 7 сек. На рис. 3

представлены полученные в результате расчета временные зависимости относительных горизонтальных и вертикальных смещений боковых стенок сооружений и грунта, которые могут быть использованы для анализа сейсмостойкости примыкающих к сооружению подземных трубопроводов. На графиках кривые 1–3 соответствуют относительным смещениям точек на левой стенке здания на глубине 2.5 м, 5 м, 7.5 м соответственно, кривые 4–6 описывают относительные смещения для правой стенки здания на глубине 2.5 м, 5 м, 7.5 м соответственно.

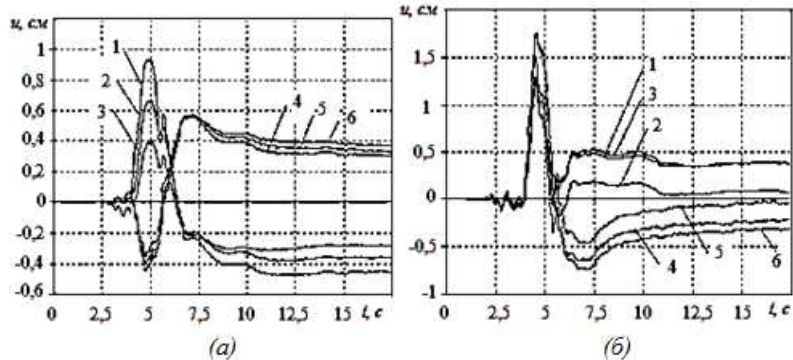


Рис. 3: Взаимные смещения стенок сооружения и грунта

ЛИТЕРАТУРА

1. **Баженов В.Г., Дюкина Н.С.** Методы численного исследования сейсмостойкости заглубленных сооружений. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 141 с.
2. **Баженов В.Г., Чекарев Д.Т.** Решение задач нестационарной динамики пластин и оболочек вариационно-разностным методом. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2000. – 118 с.
3. **Дюкина Н.С., Кибец А.И., Жестков М.Н.** Анализ сейсмических колебаний заглубленных сооружений с учетом трансверсально-изотропного основания // Пробл. прочн. и пластичн. – 2013. – № 75(1). – С. 40–46.
4. **Воеводин В.В., Воеводин Вл., В.** Параллельные вычисления. – СПб: БХВ-Петербург, 2002. – 609 с.
5. **Баженов В.Г., Гордиенко А.В., Кибец А.И., Лаптев П.В.** Адаптация последовательной методики решения нелинейных задач динамики конструкций для многопроцессорных ЭВМ // Мат. IV Междунар. науч.-практ. семинара «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах». – Самара, 2004. – С. 20–25.
6. **Баженов В.Г., Дюкина Н.С.** Численное исследование взаимодействия сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях // Выч. мех. сплошных сред. – 2012. – Т. 5, № 1. – С. 19–24.

REFERENCES

1. **Bazhenov V.G., Dyukina N.S.** Methods for the numerical study of seismic stability of buried constructions [Metodi chislennoogo issledovaniya seismostoykosti zaglublennih soorujeniy]. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 141 p. (in Russian)

2. **Bazhenov V.G., Chakmarev D.T.** Solution of problems of the transient dynamics of plates and shells by variational-difference method [Reshenie zadach nestacionarnoy dinamiki plastin i obolochek variacionno-raznostnim metodom]. – N. Novgorod: NNGU, 2000. – 118 p.(in Russian)
3. **Dyukina N.S., Kibetz A.I., Zhestkov M.N.** Analysis of seismic oscillations of submerged structures, accounting for a transversally-isotropic foundation [Analiz seismicheskikh kolebaniy zaglublennih sooruzheniy s uchetom transversalno-izotropnogo osnovaniya] // Problems of strength and Plasticity. – 2013. – № 75(1). – P. 40–46. (in Russian)
4. **Voevodin V.V., Voevodin V.I.** Parallel computing [Parallelnie vichisleniya]. – St.-Pb: BHV-Peterburg, 2002. – 609 p. (in Russian)
5. **Bazhenov V.G., Gordienko A.V., Kibetz A.I., Laptev G.D.** Adaptaciya posledovatel'noy metodiki resheniya nelineynih zadach dinamiki konstrukciy dlya mnogoprocessornih EVM // Mat. IV Int. sci.-pract. seminar «Vysokoproizvoditel'nye parallel'nie vichisleniya na klasternih sistemakh». – Samara, 2004. – P. 20–25. (in Russian)
6. **Bazhenov V.G., Dyukina N.S.** Numerical study of structure-subsoil interactions under seismic effects [Chislennoe issledovanie vzaimodeystviya sooruzheniy s gruntovim osnovaniem pri seismicheskikh vozdeystviyah] // Computational continuum mechanics. – 2012. – V. 5, № 1. – P. 19–24. (in Russian)