

В. Г. Баженов, Н. С. Дюкина

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗАГЛУБЛЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ

НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского

Аннотация. В работе предложена эффективная численная методика решения трехмерных задач сейсмостойкости заглубленных крупногабаритных сооружений, которая позволяет учесть эффекты контактного взаимодействия стенок сооружения с прилегающим грунтом, влияние поля силы тяжести, неоднородное строение грунтовой среды, а также различные варианты расположения гипоцентра землетрясения. В рамках данной конечно-элементной вариационно-разностной методики проведено обоснование выбора размеров расчетной области примыкающего к сооружению грунта и моделей сплошной среды для описания твердых и мягких грунтовых оснований. Разработана численная методика определения кинематических граничных условий на нижней границе расчетной области грунта по заданной на поверхности грунта экспериментальной акселерограмме. Для исключения влияния краевых эффектов на результаты решения задачи предложены специальные мало отражающие волны граничные условия. Описанные методы и алгоритмы решения задач сейсмостойкости сооружений реализованы в сертифицированном программном комплексе «Динамика-3», проведено распараллеливание разработанного конечно-элементного алгоритма по принципу пространственной декомпозиции расчетной области. Разработанная численная методика позволила корректно поставить задачу о сейсмических вибрациях заглубленного сооружения, сократить вычислительные затраты и повысить эффективность численных исследований сейсмостойкости сооружений. Благодаря этому стал технически возможным многократный пересчет задачи с различными вариантами воздействия – такие расчеты отражают опыт многих землетрясений, что повышает достоверность получаемых оценок. В статье приведены результаты типовых расчетов сейсмостойкости заглубленного сооружения АЭС – взаимные вертикальные и горизонтальные смещения стенок здания и грунта, – которые в дальнейшем могут быть использованы для оценки прочности примыкающих к сооружению подземных трубопроводов.

Ключевые слова: численное моделирование, сейсмостойкость, контактное взаимодействие, грунтовая среда.

УДК: 539.3

Поступила 10.10.2014

Работа выполнена при частичном финансировании гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ НШ-593.2014.8, гранта Министерства образования и науки (соглашение № 02.В.49.21.0003 между МОиН РФ и ННГУ от 27.08.2013) и Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-01-31113, 14-08-01129).

Введение. Строительные нормы и правила [1] предусматривают расчет сейсмостойкости малозаглубленных сооружений и основываются на упрощенной модели грунтового основания. В [2] предложен приближенный метод, в котором жесткость основания учитывается путем введения совокупности упругих связей, присоединенных к фундаментной плите. Однако динамическая жесткость основания зависит от его размеров, величины нагрузки, типа грунта и так далее, поэтому определение используемых в [2] параметров до сих пор остается недостаточно изученной проблемой. Исследования сейсмостойкости заглубленных сооружений и примыкающих к ним подземных трубопроводов должны включать в рассмотрение достаточно большой массив прилегающего к сооружению грунта, размеры которого обеспечивают минимизацию отраженных от границ грунтового массива волн вблизи сооружения. Необходимость точного описания сооружения и высокочастотных сейсмических осцилляций делает численное моделирование крупногабаритных задач сеймики разностными методами крайне трудоемкой задачей. Изложенный в [3] метод моделирования длительного динамического взаимодействия заглубленных сооружений с грунтом существенно сокращает вычислительные затраты и учитывает эффекты контактного взаимодействия стенок сооружения с грунтовым основанием.

Численная методика. В рамках предлагаемой методики массив грунта представляется прямоугольным параллелепипедом, размеры которого в 20 раз превосходят характерные размеры основания сооружения в плане — этого достаточно [3] для исключения влияния краевых эффектов на результаты расчета вблизи сооружения. Достаточно жесткие грунты моделируются однородной или многослойной идеально упругой средой, для мягких грунтовых оснований применяется трансверсально-изотропная модель грунта [4], учитывающая изменение механических характеристик грунта с глубиной. Расчетная область находится в поле сил тяжести. 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 ; на остальных границах моделируются специальные мало отражающие волны граничные условия. Между сооружением и грунтом моделируется контактное взаимодействие с учетом сухого трения.

Для описания деформирования тел в рамках гипотез механики сплошной среды используется вариационно-разностный подход. Движение сплошных сред в лагранжевых переменных в неподвижной декартовой системе координат описывается уравнениями, следующими из вариационного принципа баланса мощностей:

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

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 ($i = x, y, z$). Компоненты контактных усилий q_i в (1) определяются в местном координатном базисе s, ξ , связанном с поверхностью контакта: нормальные компоненты усилий q_s находятся из условия непроникания (2), а касательные усилия q_ξ — в соответствии с законом Амонтона-Кулона (3). Связь контактирующих подобластей полагается односторонней, то есть допускается их отрыв друг от друга и повторное вступление в контакт.

$$q_\xi = \begin{cases} 0 & q_\xi \geq 0 \\ q_\xi & q_\xi < 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$q_s = \begin{cases} q_s & |q_s| \leq k_\xi |q_\xi| \\ k_\xi |q_\xi| \operatorname{sign}(q_s) & |q_s| > k_\xi |q_\xi|. \end{cases} \quad (3)$$

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 [5]. 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:

$$\begin{aligned} (\dot{u}_i)_j^{k+1/2} &= (\dot{u}_i)_j^{k-1/2} + (F_i)_j^k \Delta t^{k+1/2} / (M)_j^k \\ (u_i)_j^{k+1} &= (u_i)_j^k + (\dot{u}_i)_j^{k+1/2} \Delta t^{k+1} \\ \Delta t^{k+1/2} &= \frac{\Delta t^{k+1} + \Delta t^k}{2}, (i = x, y, z). \end{aligned} \quad (4)$$

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 (4) позволяет подавить нефизические осцилляции численного решения.

Для численного исследования сейсмостойкости необходимо иметь кинематические или силовые граничные условия, при задании которых на границе расчетной области массива грунта вблизи сооружения воспроизводилась бы известная акселерограмма. В [3] авторами предложена численная методика определения кинематических граничных условий, основанная на допущении, что приходящие от источника землетрясения к сооружению волны можно считать плоскими и распространяющимися по нормали к дневной поверхности грунта. Поскольку эпицентр землетрясения может быть расположен на существенном удалении от сооружения, в расчетах сейсмостойкости необходимо исследовать несколько вариантов направления распространения сейсмических волн. Вычислительные эксперименты показали, что расположение источника сейсмического воздействия не влияет на раскачивание заглубленного сооружения. Различия в результатах решения для предельных вариантов расположения источника сейсмических волн – существенное удаление по горизонтали и по вертикали – объясняются давлением грунта на стенки здания со стороны подхода горизонтально распространяющихся волн.

Описанные методы решения, алгоритмы моделирования контактного взаимодействия, мало отражающие волны граничных условий и учета поля сил тяжести реализованы в сертифицированном программном комплексе «Динамика-3» [6] (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 распараллеливание алгоритма конечно-элементной методики решения трехмерных нелинейных задач динамики конструкций по принципу пространственной декомпозиции расчетной области [7], в соответствии с которым 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 [8].

Результаты расчетов. 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 [3,9]. Ниже приведены результаты типового расчета.

Задача решалась в трехмерной постановке с использованием программного комплекса «Динамика-3». Сооружение моделировалось упругим параллелепипедом с размерами в плане 51,0 x 121,0м, высотой 43,17м, заглубленным в грунт на 8,1м (рис. 1).

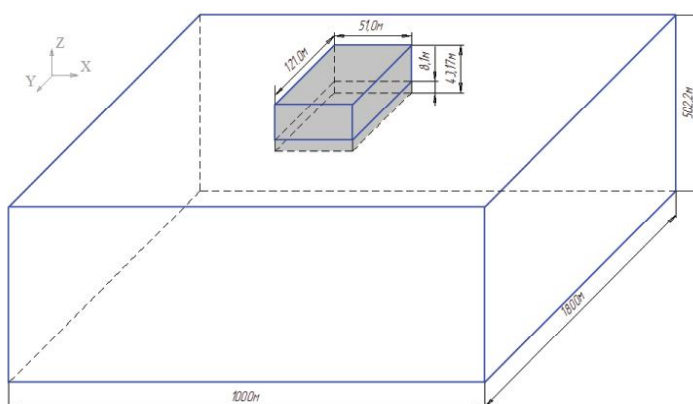


Рис. 1. Вид расчетной области

Механические характеристики сооружения: модуль упругости $E=21$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,25$, плотность $\rho=115,615$ кг/м³, для грунта модуль упругости $E=40$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,35$, плотность $\rho=2250,0$ кг/м³. Между зданием и грунтом допускается контактное взаимодействие с учетом сухого трения (коэффициент трения 0,554). В начальный момент времени система грунт-здание находилась в поле силы тяжести. Задача об определении начального поля перемещений решена методом стационарирования с введением линейной вязкости. По окончании процесса стационарирования расчетной области в поле сил тяжести к нижней границе грунтового массива прикладывается кинематическая нагрузка, восстановленная из экспериментальной акселерограммы 6-балльного землетрясения длительностью 20 секунд (рис. 2, где кривые 1,2,3 соответствуют компонентам вектора скорости v_x, v_y, v_z). Расчетная область здания и грунта покрывается равномерной разностной сеткой с шагом 1,65м по горизонтали, высота ячеек грунта берется в соответствии с численным решением одномерной задачи – 1,62м, высота ячеек здания – 1,66м.

В результате расчета получены временные зависимости относительных горизонтальных и вертикальных смещений боковых стенок сооружения и грунта, которые могут быть использованы для анализа сейсмостойкости примыкающих к сооружению подземных трубопроводов (рис. 3, 4). На рисунках представлены относительные смещения стенок сооружения и грунта по горизонтали (а) и вертикали (б) для точек, расположенных на линиях сечения сооружения плоскостями симметрии $y = 0$ (рис. 3), $x = 0$ (рис. 4), на глубине 1,62м, 3,24м, 4,86м и 6,48м.

Таким образом, на боковой стенке меньшей площади наблюдаются большие взаимные смещения сооружения и грунта. Это объясняется меньшей площадью контакта взаимодействующих поверхностей и большими деформациями конструкции вдоль более протяженной стенки, вызванными попаданием различных поперечных сечений конструкции в разные фазы сейсмической волны.

Заключение. Разработана вычислительная модель динамического контактного взаимодействия заглубленных сооружений с грунтом, учитывающая поле силы тяжести и сокращающая вычислительные затраты за счет специальных мало отражающих волны граничных условий. 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.

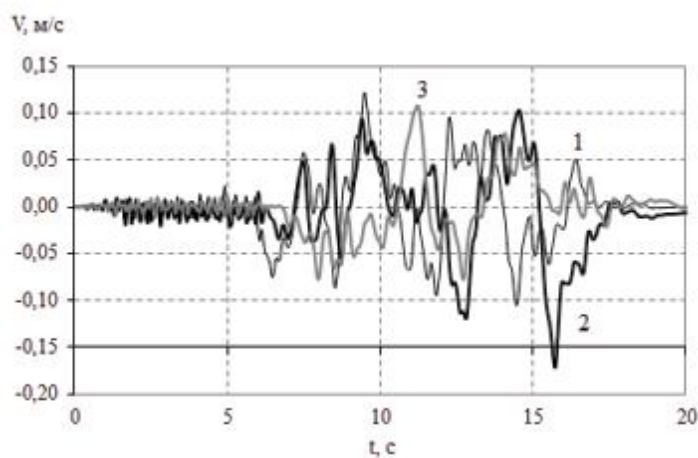


Рис. 2. Экспериментальная сейсмограмма

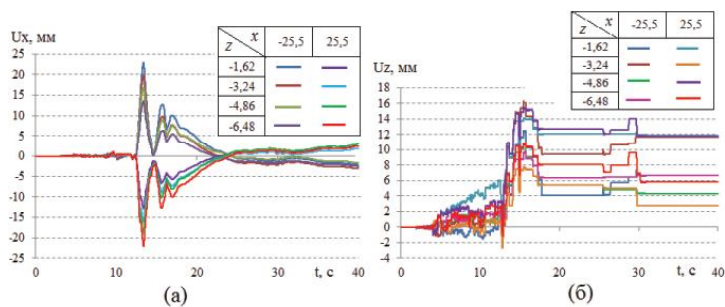


Рис. 3. Взаимные смещения стенок сооружения и грунта в сечении $y = 0$

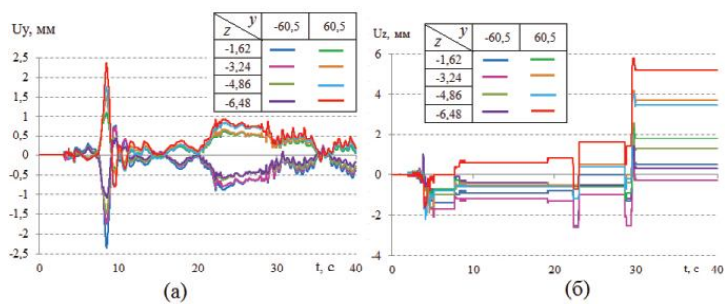


Рис. 4. Взаимные смещения стенок сооружения и грунта в сечении $x = 0$

Исследование поведения сооружений и примыкающих подземных трубопроводов в зависимости от параметров сейсмического воздействия и различных геометрических и физических

параметров сооружения и грунта позволяет сформулировать рекомендации по выбору расчетных моделей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *НП-031-01* Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций // Вестник Госатомнадзора России. – 2001. – № 6. – С. 7–31.
- [2] *Бирбраер, А. Н.* Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях / А. Н. Бирбраер, С. Г. Шульман. – М. : Энергоатомиздат. – 1989. – 304 с.
- [3] *Дюкина, Н. С.* Методы численного исследования сейсмостойкости заглубленных сооружений / Н. С. Дюкина, В. Г. Баженов. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. – 2012. – 141 с.
- [4] *Дюкина, Н. С.* Анализ сейсмических колебаний заглубленных сооружений с учетом трансверсально-изотропного основания / Н. С. Дюкина, А. И. Кибец, М. Н. Жестков // Проблемы прочности и пластичности – 2013. – Вып. 75. – Ч. 1. – С. 40–46.
- [5] *Баженов, В. Г.* Решение задач нестационарной динамики пластин и оболочек вариационно-разностным методом / В. Г. Баженов, Д. Т. Чекмарев. – Н. Новгород : Изд-во ННГУ. – 2000. – 118 с.
- [6] *Баженов, В. Г.* Численное моделирование трехмерных задач нестационарного деформирования упругопластических конструкций методом конечных элементов / В. Г. Баженов, А. И. Кибец // Известия РАН. МТТ. – 1994. – № 1. – С. 52–57.
- [7] *Воеводин, В. В.* Параллельные вычисления / В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. – СПб : БХВ-Петербург. – 2002. – 609 с.
- [8] *Баженов, В. Г.* Адаптация последовательной методики решения нелинейных задач динамики конструкций для многопроцессорных ЭВМ: материалы IV Междунар. науч.-практ. семинара «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах» / В. Г. Баженов, А. В. Гордиенко, А. И. Кибец, П. В. Лаптев. – Самара. – 2004. – С. 20–25.
- [9] *Баженов, В. Г.* Численное исследование взаимодействия сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях / В. Г. Баженов, Н. С. Дюкина // Выч. мех. сплошных сред. – 2012. – Т. 5. – № 1. – С. 19–24.

Баженов Валентин Георгиевич,

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, г. Н. Новгород

e-mail: bazhenov@mech.unn.ru

Дюкина Надежда Сергеевна,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, г. Н. Новгород

e-mail: ndyukina@inbox.ru

V. G. Baghenov, N. S. Dyukina

NUMERICAL SOLUTION OF THREE-DIMENSIONAL PROBLEMS OF SEISMIC STABILITY OF LARGE STRUCTURES

Research Institute of Mechanics of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

Abstract. The paper presents an efficient numerical technique for seismic stability 3D-modeling of large buried structures. This technique allows to consider the subsoil-structure contact interaction, gravity field effects, the inhomogeneous structure of soil and the variative location of the earthquake hypocenter. As part of this technique is substantiated sizing of the soil-structure computational domain and continuum model for hard and soft soil foundations describing. The numerical technique for determining the kinematic conditions at the lower boundary of the computational domain from the experimental accelerograms at the soil surface is given, offered special non-reflecting waves boundary conditions. The described above methods and algorithms for seismic resistance solving have been implemented in certified software package «Dynamics-3», parallelization of the algorithm have been held according to the spatial domain decomposition principle. The developed numerical technique allows to correctly pose the problem of seismic vibrations of buried structure, reduce computing costs and increase the efficiency of numerical studies of Earthquake Engineering. Through this the multiple conversion tasks with different action scenarios generated by probabilistic methods of experimental seismograms became technically possible. The results of these calculations allow reflecting the experience of many earthquakes, which increases reliability of the estimates. The paper presents the model calculations results of seismic stability of buried NPP structure – mutual vertical and horizontal displacement of soil and building walls – which can then be used to assess strength of adjacent underground pipelines.

Keywords: numerical modeling, seismic resistance, contact interaction, soil ground.

REFERENCES

- [1] *NP-031-01* Design standards for earthquake resistance of nuclear power plants (in Russian) // *Vestnik Gosatomnadzora Rossii*. – 2001. – № 6. – P. 7–31.(in Russian)
- [2] *Birbraer, A. N.* Durability and reliability of NPP designs in special dynamic effects / A. N. Birbraer, S. G. Shulman. – M. : Energoatomizdat, 1989. – 304 p.
- [3] *Dyukina, N. S.* Numerical methods for the study of seismic stability of buried structures / N. S. Dyukina, V. G. Bazhenov // Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. – 2012. – 141 p.(in Russian)
- [4] *Dyukina, N. S.* Analysis of seismic oscillations of submerged structures, accounting for a transversally-isotropic foundation / N. S. Dyukina, A. I. Kibetz, M. N. Zhestkov // *Probl. of strength and plasticity, N.Novgorod University Press*. – 2013. – Is. 75. Part. 1. – P. 40–46.(in Russian)
- [5] *Bazhenov, V. G.* Problem solving of unsteady dynamics of plates and shells using variational-difference method / V. G. Bazhenov, D. T. Chekmarev. – N. Novgorod : NNSU, 2000. – 118 p.(in Russian)
- [6] *Bazhenov, V. G.* Numerical simulation of three-dimensional problem of unsteady deformation of elastoplastic structures using finite element / V. G. Bazhenov, A. I. Kibetz // *Mechanics of Solids*. – 1994. – No. 1. – P. 52–57.(in Russian)
- [7] *Voevodin, V. V.* Parallelnie vychisleniya / V. V. Voevodin, Vl. V. Voevodin // SPb: BHV-Peterburg. – 2002. – 609 p. (in Russian).
- [8] *Bazhenov, V. G.* Adaptaciya posledovatel'noy metodiki resheniya nelineynih zadach dinamiki konstrukciy dlya mnogoproцessornih EVM: Mat. IV Int. sci.-pract. seminar «Visokoproizvoditel'nie

parallel'nie vichisleniya na klasternih sistemah» / V. G. Bazhenov, A. V. Gordienko, A. I. Kibetz, P. V. Laptev. – Samara, 2004. – P. 20–25 (in Russian).

[9] *Bazhenov, V. G.* Numerical study of structure-subsoil interactions under seismic effects / V. G. Bazhenov, N. S. Dyukina // *Comp. continuum mechanics.* – 2012. – Vol. 5. – No. 1. – P. 19–24.

Bazgenov, Valentin Georgievich

Dr. Sci. Phys. & Math., Professor, Head of the Laboratory of Research Institute of Mechanics, Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, N. Novgorod

Dyukina, Nadezhda Sergeevna

Ph.D. Sci. Phys. & Math., Senior Researcher of Research Institute of Mechanics, Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, N. Novgorod