

УДК 539.3

**ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СООРУЖЕНИЙ С ГРУНТОВЫМ
ОСНОВАНИЕМ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ*)**

В.Г. Баженов, Н.С. Дюкина, А.И. Кибец

Нижний Новгород

Разработана конечно-элементная методика решения трехмерных задач динамики сооружения при сейсмических колебаниях с учетом его контактного взаимодействия с грунтовым основанием. При замене полупространства конечной прямоугольной расчетной областью вводятся специальные граничные условия, не искажающие падающие сейсмические волны. На нижней и боковых граничных поверхностях расчетной области импульсная нагрузка определяется в соответствии с экспериментальными акселерограммами, заданными на поверхности полупространства.

Строительство зданий и сооружений в сейсмически активных районах требует решения весьма сложной и ответственной задачи обеспечения их сейсмостойкости. Важным элементом таких исследований является изучение динамического взаимодействия сооружения с грунтовым основанием, поскольку податливость основания существенно влияет на поведение самой конструкции. В [1] предложен приближенный метод, в котором жесткость основания учитывается путем введения совокупности упругих связей, присоединенных к фундаментной плите. Однако динамическая жесткость основания зависит от размеров основания, величины нагрузки, типа грунта и т.д. Проблема определения параметров, используемых в методе [1], до сих пор недостаточно изучена и для обоснования этого метода требуется дополнительная экспериментальная проверка. Наиболее полно особенности контактного взаимодействия сооружения с основанием позволяет учесть непосредственный динамический расчет конструкции при воздействии, заданном акселерограммой землетрясения, зарегистрированного в сейсмогеологических и грунтовых условиях, близких к условиям площадки строительства проектируемого сооружения. Однако подобные исследования, сопряженные с численным решением трехмерных задач динамики, чрезвычайно трудоемки (вследствие большой размерности расчетной области) даже для современных высокопроизводительных вычислительных систем. В [2] изложен метод решения двумерных задач сейсмостойкости сооружений, который существенно сокращает вычислительные затраты, учитывает эффекты контактного взаимодействия с грунтовым основанием и дает результаты, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными данными. В настоящей работе этот

*) Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (гранты 05-08-33618а, 07-08-13637 офи-ц) и Министерством образования и науки РФ (грант Президента РФ на поддержку ведущих научных школ НШ-6391.2006.8).

подход адаптирован для конечно-элементного моделирования поведения сооружений при сейсмических воздействиях в трехмерной постановке.

Поскольку расстояние от эпицентра землетрясения до сооружения существенно больше размеров самого сооружения, волны, приходящие из источника землетрясения к сооружению, предполагаются плоскими. При этом сейсмическое воздействие можно представить как совокупность волн сжатия, растяжения и сдвига, приходящих к сооружению под прямым углом к поверхности грунта. Поведение материала грунта при прохождении сейсмических волн можно принять, вследствие малости давлений, идеально упругим. Контактное взаимодействие между грунтовым основанием и зданием моделируется с учетом сухого трения [3, 4]. Примем также, что расчетная область находится в поле силы тяжести. На боковых границах этой области реализуются специальные граничные условия, позволяющие сохранить форму сейсмических волн при распространении по массиву грунта. На нижней границе расчетной области задается импульсная нагрузка, восстановленная по заданным на поверхности полупространства акселерограммам.

Для случая, когда число слоев грунта не превосходит двух, а время пробега в нижнем слое существенно больше времени сейсмического воздействия, обратную задачу о восстановлении импульсной нагрузки можно решить аналитически: сейсмограмма точки поверхности есть сумма импульса, пришедшего от нижней границы области грунта, и отражений импульса от границы раздела сред. Зависимость сейсмограммы точки поверхности C_1 от сейсмограммы нижней границы области грунта C_0 представим в виде конечной суммы:

$$C_1(t) = k_1 k_2 \sum_{n=0}^{\infty} (k_3)^n C_0(t - nT), \quad (1)$$

где k_1 – коэффициент передачи при прохождении границы сред, k_2 – коэффициент отражения от свободной поверхности для верхнего грунта, k_3 – коэффициент отражения от границы раздела сред для верхнего грунта, T – удвоенный период пробега продольной или поперечной волной верхнего слоя грунта по толщине, n – количество отражений импульса от границы сред. Коэффициенты k_1, k_2, k_3 могут быть найдены аналитически либо определены из численного решения одномерной задачи о пробеге волны в двухслойной грунтовой среде. С учетом формулы (1), имеем:

$$C_0(t) = \frac{1}{k_1 k_2} C_1(t) - \sum_{n>0} (k_3)^n C_0(t - nT), \quad nT < t < (n+1)T. \quad (2)$$

Для определения сейсмического импульса нагружения на большем временном интервале необходимо рассматривать множественные взаимодействия прошедших и отраженных волн, то есть с увеличением числа слоев задача еще более усложняется. Поэтому целесообразно решать задачу численным методом с использованием тарировочных функций. Для представления сейсмической нагрузки в виде кусочно-линейной функции в сейсмограмме выделяются характерные точки локальных минимумов и максимумов. При этом она может быть представлена 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. В уменьшенной расчетной области решаем сеточно-характеристическим методом одномерную задачу о пробеге волны в грунтовой среде, исходную нагрузку задаем в виде функции Хевисайда. Зная, как изменилась тарировочная функция при пробеге грунтового массива, по экспериментальной сейсмограмме восстанавливаем импульсную нагрузку:

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

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.

Таким образом, импульсная нагрузка на нижней границе грунтового массива определяется отдельно для сдвиговых и продольных волн. Предложенная методика может быть применена и для n -слоистого грунта. Чтобы дисперсионные эффекты не влияли на точность результатов при численном решении по явной схеме "крест" одномерной задачи о пробеге волны, заданной кусочно-линейной функцией, можно брать число Куранта равным единице. В этом случае схема "крест" дает те же результаты, что и сеточно-характеристический метод на равномерной сетке и дисперсия численного решения не возникает. Анализ результатов тестирования данной методики показал, что ошибка в восстановлении сейсмической нагрузки не превышает 1%.

Поскольку при решении трехмерной задачи о сейсмических колебаниях сооружения размеры расчетной области грунта существенно ограничиваются возможностями вычислительной техники, необходимо свести к минимуму погрешности, связанные с краевыми эффектами. Минимизация влияния волн, отраженных от боковых границ грунтового массива, возможна при использовании квазиравномерных сеток [5, 6]. Однако при этом неравномерность сетки порождает нефизические осцилляции и требует сглаживания численного решения. Это снижает эффективность применения подходов [5, 6], в частности, в том случае, когда источник волн находится на границе, имитирующей бесконечность. С учетом сказанного был предложен алгоритм [7], в соответствии с которым при выделении из полупространства конечной расчетной области, примыкающей к сооружению, на ее боковых границах осуществляется перенос скоростей перемещений из приграничных узлов сетки. Численные эксперименты подтвердили эффективность этого подхода. При корректировке скоростей перемещений согласно [7] одномерные волны сдвига и сжатия не искажаются, проходя по массиву грунта вдоль граничной поверхности. Влияние же отраженных от здания волн становится несущественным, если размеры расчетной области превышают 5 габаритных размеров основания здания. В настоящей работе подход [7] был обобщен для исследования сейсмостойкости сооружений в трехмерной постановке. Решение трехмерной задачи динамики основано на методе конечных элементов и явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени типа "крест" [3], реализованных в рамках программного комплекса "Динамика-3" [8]. Для расчета напряженно-деформированного состояния применяется 8-узловой изопараметрический конечный элемент с полилинейными функциями формы. Численная схема определения контактного давления изложена в [3].

Для верификации модифицированной вычислительной модели был рассмотрен ряд тестовых примеров. В частности, было проведено численное решение трехмерной задачи о пробеге плоской поперечной волны в упругом прямоугольном стержне ($0 \leq x_i \leq l_i, i = 1, 2, 3; l_1 = 40 \text{ см}, l_2 = l_3 = 6 \text{ см}$, модуль упругости $E = 2430 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,41$, плотность $\rho = 2030 \text{ кг/м}^3$). На поверхности $x_1 = 0$ задавалась вертикальная компонента скорости смещения $\dot{u}_2(0, x_2, x_3, t) = \text{const}$, инициирующая волну сдвига. На боковых границах $x_i = 0, x_i = l_i$ рассматривались два варианта граничных условий: а) условия свободной поверхности; б) граничные условия [7]. Результаты решения выбранных вариантов начально-краевых задач представлены на рис. 1, а, б. На этих рисунках изображено распределение поля скоростей перемещений $\dot{u}_2(x_1, x_2, x_3, t)$ в расчетной области в момент времени $\tilde{t} = t \times C_s / l_1 \approx 0,48$ (C_s – скорость распространения поперечных волн в материале).

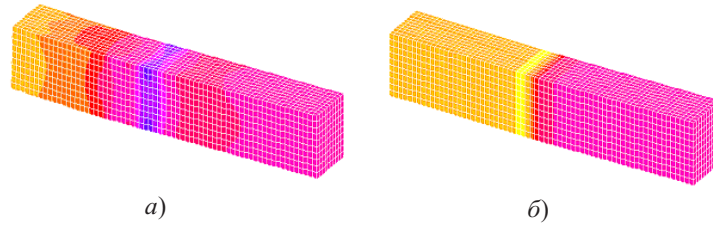


Рис. 1

Отметим, что при решении задачи с использованием первого варианта граничных условий (при задании боковых поверхностей свободных от нагрузки) напряженно-деформированное состояние в расчетной области уже на расстоянии $0,5l_2$ от зоны инициирования поперечной волны становится существенно неравномерным за счет отраженных от боковых поверхностей волн. Граничные условия [7] позволяют и в трехмерных задачах уменьшить влияние краевых эффектов на численное решение. При их использовании задаваемая на граничной поверхности плоская волна сдвига не меняет своей формы по мере распространения вдоль стержня.

Разработанная вычислительная модель динамического взаимодействия здания с грунтом была применена для анализа поведения сооружений насосной станции (рис. 2) и резервной дизель электростанции (РДЭС) АЭС "Бушер" (рис. 3) при сейсмических вибрациях.

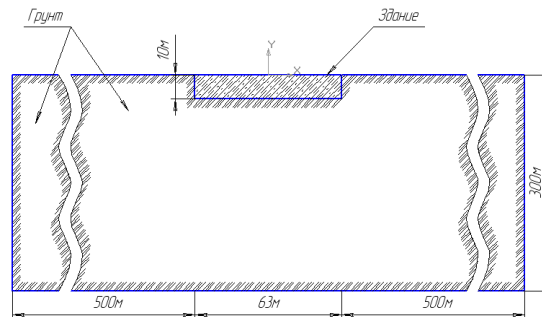


Рис. 2

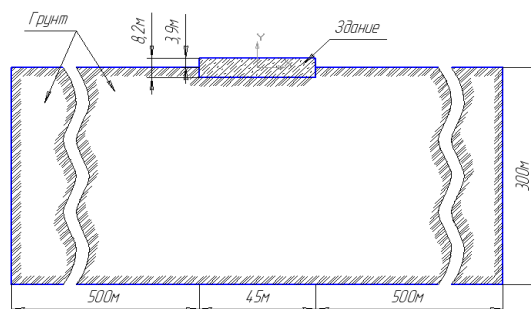


Рис. 3

В соответствии с проектом в грунте заложена система трубопроводов, входящих в исследуемые здания. Для оценки прочности трубопроводов важно определить пиковые амплитуды смещения стенок здания относительно грунта. Размеры расчетных областей грунта выбраны в соответствии с рекомендациями [2]. Шаг конечно-элементной сетки определяется точностью описания высокочастотных осцилляций, присутствующих в сейсмограмме продольной и сдвиговых волн. Контроль достаточности числа узлов конечно-элементной сетки осуществляется путем сравнения экспериментальной сейсмограммы поверхности грунта с сейсмограммой, полученной при численном решении одномерной задачи. В каждой точке на нижней границе грунта задается нагрузка в виде компонент скорости $\dot{u}_1, \dot{u}_2, \dot{u}_3$, восстановленных по изложенной выше численной методике из экспериментальной сейсмограммы, зарегистрированной на поверхности полупространства [2]. Контактное взаимодействие грунтового массива и здания моделируется условиями непроникания с учетом сухого трения (коэффициент трения равен 0,3). Начальное поле перемещений системы грунт-здание от силы тяжести определяется методом стационарирования с введением линейной вязкости.

Механические характеристики материалов приведены в таблице.

Материал	E , МПа	ν	ρ , кг/м ³
Грунт	2430	0,41	2030
Насосная станция	20000	0,15	1350,9
РДЭС	20000	0,15	2037

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 3,5 м. Пиковые амплитуды смещения стенок насосной станции и грунта составили 0,3 мм в вертикальном направлении и 0,4 мм в горизонтальном направлении. Аналогичная оценка для РДЭС: 0,6 мм – по вертикали и 0,4 мм – по горизонтали.

Литература

1. Бирбраер, А.Н. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях / А.Н. Бирбраер, С.Г. Шульман – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 304 с.
2. Численное моделирование задач взаимодействия сооружений с двухслойным грунто-

вым основанием при сейсмических воздействиях / Н.С. Дюкина [и др.] // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. – 2005. – Вып. 67. – С. 162–167.

3. *Баженов, В.Г.* Численное моделирование нестационарных процессов ударного взаимодействия деформируемых элементов конструкций / В.Г. Баженов, А.И. Кибец, И.Н. Цветкова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1995. – № 2. – С. 20–26.

4. Численное решение трехмерной задачи деформирования и разрушения кирпичной кладки при взрывном нагружении / В.Г. Баженов [и др.] // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. – 2003. – Вып.65. – С. 92–96.

5. *Альшин, А.Б.* Численное решение гиперболических задач в неограниченной области / А.Б. Альшин, Е.А. Альшина, Н.Н. Калиткин // Математическое моделирование. – 2004. – Т. 16, № 4. – С. 114–126.

6. *Кочетков, А.В.* Применение метода квазиравномерных сеток при решении динамических задач теории упругости в неограниченных областях / А.В. Кочетков, Е.Ю. Повереннов // Математическое моделирование. – 2007. – Т.19, №5. – С. 81–92.

7. *Баженов, В.Г.* Численное моделирование динамического взаимодействия сооружения с грунтом при сейсмических нагружениях / В.Г. Баженов, Н.С. Дюкина, С.В. Зефилов // Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия. – 2007. – №4. – С. 49–55.

8. Сертификат соответствия Госстандарта России № РОСС RU.МЕ.20.Н00338.

[16.10.2007]

NUMERICAL SOLUTION OF 3-DIMENSIONAL PROBLEMS OF CONSTRUCTION INTERACTING WITH SOIL FOUNDATION UNDER SEISMIC LOADING

V.G. Bazhenov, N.S. Dyukina, A.I. Kibets

A finite-element procedure of solving 3-dimensional construction dynamics problems under seismic vibrations is developed providing for its contact interaction with soil foundation. Special boundary conditions which do not distort propagating seismic waves are introduced on the lateral surfaces when replacing a half-space with a finite rectangular calculation domain. A pulse loading is determined on the lower surface of the calculation domain in accordance with the experimental accelerograms, given on the half-space surface.