

УДК 539.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СООРУЖЕНИЙ ПРИ МЕЛКОФОКУСНОМ И ГЛУБОКОФОКУСНОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ\*

© 2014 г. **Дюкина Н.С., Баженов В.Г., Артемьева А.А.**

*НИИ механики Нижегородского государственного университета  
им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

bazhenov@mech.unn.ru

*Поступила в редакцию 05.11.2014*

Исследования сейсмостойкости заглубленных сооружений и примыкающих к ним подземных трубопроводов требуют рассмотрения достаточно большого массива прилегающего к сооружению грунта, размеры которого обеспечивают минимизацию отраженных от границ грунтового массива волн вблизи сооружения. Точное описание поведения сооружения и высокочастотных сейсмических осцилляций для крупногабаритных задач сейсмологии является крайне трудоемкой задачей. В статье предложена численная методика моделирования сейсмостойкости заглубленных крупногабаритных сооружений, учитывающая контактное взаимодействие с грунтом, поле сил тяжести, неоднородность грунтовой среды и расположение гипоцентра землетрясения. Предложены способы моделирования мелкофокусных и глубокофокусных землетрясений. Показано, что расположение источника сейсмического воздействия оказывает различное влияние на поведение различных типов сооружений при землетрясении.

*Ключевые слова:* сейсмическое воздействие, математическая модель, численное моделирование, контактное взаимодействие, поверхностные волны, гипоцентр землетрясения.

### **Введение**

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. Строительные нормы [1] и распространенные современные методики [2, 3] предусматривают расчет сейсмостойкости малоуглубленных сооружений с использованием упрощенной модели грунтового основания. В настоящей статье для моделирования поведения сооружения при мелкофокусном и глубокофокусном землетрясениях используется изложенный в [4] метод моделирования длительного динамического взаимодействия заглубленных сооружений с грунтом, который существен-

---

\* Выполнено при поддержке РНФ (проект 14-19-1096).

но сокращает вычислительные затраты и учитывает эффекты контактного взаимодействия стенок сооружения с грунтовым основанием.

## 1. Постановка задачи

Для описания деформирования тел в рамках гипотез механики сплошной среды используется вариационно-разностный подход. Движение среды описывается в переменных Лагранжа уравнениями, следующими из вариационного принципа Даламбера – Лагранжа в форме Журдена, в неподвижной декартовой системе координат  $Oxyz$ :

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

Здесь  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $\dot{u}_i$  – скорости перемещений;  $p_i, q_i$  – компоненты поверхностной нагрузки и контактного давления;  $f_i$  – компоненты массовых сил, отнесенные к единице массы ( $i = x, y, z$ );  $\rho$  – плотность.

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  $\Delta t^{k+1} = t^{k+1} - t^k$ , определяемыми из условия устойчивости Куранта. Схема интегрирования дискретного аналога уравнений движения по времени представляется в виде:

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

Здесь  $F_i$  – обобщенная сила, действующая на  $j$ -й узел,  $M$  – масса в  $j$ -м узле.

Массив грунта представляется прямоугольным параллелепипедом, размеры которого в 20 раз превосходят характерные размеры основания сооружения в плане. В совокупности со специально разработанными не отражающими волны граничными условиями [6] этого достаточно для исключения влияния краевых эффектов на результаты расчета вблизи сооружения [4, 6]. Достаточно жесткие грунты моделируются однородной или многослойной идеально упругой средой. Для мягких грунтовых оснований применяется трансверсально-изотропная модель грунта [7], 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: нормальные к поверхности контакта компоненты усилий  $q_i$  находятся из условия непроникания, а касательные усилия – в соответствии с законом Амонтона – Кулона. Описанные методы решения, алгоритмы моделирования

контактного взаимодействия, не отражающих волны граничных условий и учета поля сил тяжести реализованы в сертифицированном программном комплексе «Динамика-3» [8] (сертификат соответствия №РОСС RU.МЕ20.Н00338 Госстандарта России, Регистрационный паспорт аттестации ПС №325 от 18.04.2013).

## 2. Моделирование сейсмического воздействия

При математической постановке задачи о сейсмических вибрациях строительных конструкций встает вопрос о способах моделирования сейсмических колебаний. Решение этого вопроса осложнено неопределенностью направления распространения и амплитудных характеристик сейсмических волн. Имеющиеся в распоряжении экспериментальные и синтезированные акселерограммы определяют кинематические характеристики точек поверхности, а 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. Задача нахождения импульсной нагрузки по акселерограмме в одной точке поверхности является некорректной из-за неопределенности расположения источника землетрясения и, следовательно, неопределенности волнового вектора скорости сейсмических волн. Определение положения источника сейсмических колебаний позволит корректно поставить задачу об отыскании прикладываемой к границам грунтового массива импульсной нагрузки в соответствии с известной на поверхности полупространства акселерограммой.

В литературе предлагаются различные варианты моделирования сейсмического воздействия: порождающий поверхностные волны источник воздействия типа «падающий груз» [9]; кинематические граничные условия на нижней границе грунта, реализующие перпендикулярное к дневной поверхности грунта направление распространения плоских сейсмических волн [10]; соответствующая геологическому разлому и генерирующая цилиндрические волны сдвиговая модель возмущения в гипоцентре [11]. В [12] 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, что соответствует расположению гипоцентра землетрясения непосредственно под зданием. В соответствии с методикой на первом этапе 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 грунтовой массив, можно по дискретизированной экспериментальной сейсмограмме в каждой опорной точке восстановить искомую сейсмограмму на нижней границе области грунта. 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.

При определении положения источника сейсмических колебаний в задачах численного моделирования сейсмического воздействия целесообразно опираться на статистику землетрясений. По данным Национального информационного центра землетрясений (NEIC) при Геологической службе США [13] за последние 15 лет 8% от общего числа землетрясений – глубоководные (гипоцентр на глубине более 300 км), 12% – среднефокусные, 80% – мелкофокусные с гипоцентром на глубине менее 70 км (рис. 1). Данные оценки получены из анализа информации о 2279 землетрясениях магнитудой более 6, произошедших в период с 1 января 2000 года по 1 октября 2014 года.

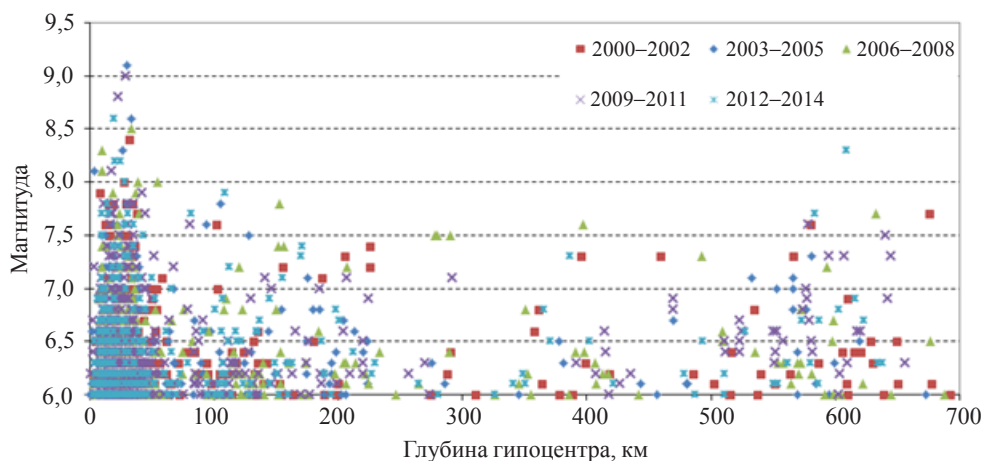


Рис. 1. Систематизированные данные Национального информационного центра землетрясений при Геологической службе США (NEIC)

С учетом понижения магнитуды регистрируемых сейсмических вибраций ввиду частичного затухания в грунте можно обосновать применимость различных моделей сейсмического воздействия. Предложенная в [12] модель довольно хорошо описывает глубоководные землетрясения и позволяет оценивать сейсмостойкость при максимальных для выбранной строительной площадки расчетных землетрясениях – случай, когда здание расположено в эпицентре. Для мелкофокусных землетрясений модель [12] охватывает не более 1% возможной площади землетрясения и не учитывает вклад в сейсмическое воздействие поверхностных волн Рэлея. Ввиду высокой вероятности возникновения мелкофокусного землетрясения встает вопрос о развитии нового способа моделирования сейсмического воздействия.

Волны Рэлея являются основным типом регистрируемых при мелкофокусном землетрясении волн. Их амплитуда убывает с расстоянием  $R$  пропорционально  $R^{-1/2}$ , у объемных волн аналогичная зависимость описывается законом  $R^{-1}$ , что определяет необходимость их учета в моделировании сейсмических вибраций сооружений от землетрясений с небольшой глубиной гипоцентра. Для моделирования сейсмического воздействия от совокупности продольных, сдвиговых и поверхностных волн используется следующий метод: на вертикальной боковой поверхности упругой среды задаются компоненты скоростей  $v_x$ ,  $v_z$ , впоследствии дополнительно порождающие поверхностные волны на одной из горизонтальных поверхностей расчетного массива. По ряду характерных особенностей – частицы среды в волне совершают эллиптическое движение в плоскости вектора скорости и нормали к по-

верхности, амплитуды колебаний экспоненциально затухают с глубиной – установлено, что генерирующаяся таким образом поверхностная волна является волной Рэлея.

### 3. Моделирование динамического поведения сооружения и его взаимодействия с грунтом при сейсмических воздействиях

В серии вычислительных экспериментов проведено моделирование динамического поведения сооружения и его взаимодействия с грунтом для двух предельных случаев расположения источника сейсмических волн – существенное удаление по горизонтали и по вертикали. Рассматривались заглубленное (основание  $40 \times 40$  м, высота 20 м, заглубление на 8 м), малозаглубленное (основание  $40 \times 40$  м, высота 26 м, заглубление на 2 м) и протяженное малозаглубленное (основание  $100 \times 20$  м, высота 10 м, заглубление на 2 м) сооружения, моделируемые упругими телами в форме параллелепипедов. Расчетная область грунта также представлялась параллелепипедом  $1000 \times 1000 \times 500$  м. На рис. 2 представлено сечение расчетной области плоскостью симметрии  $xOz$  для заглубленного сооружения.

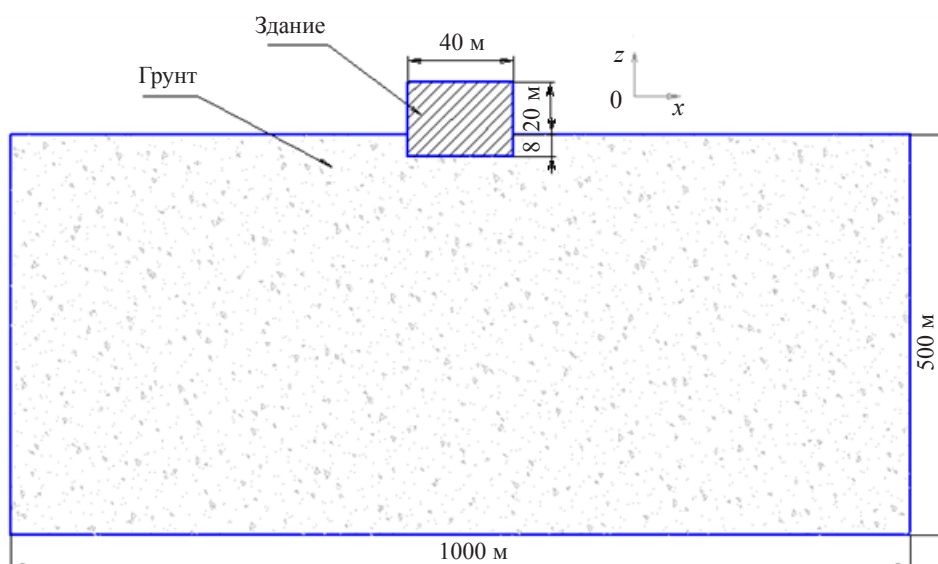


Рис. 2. Расчетная область в сечении  $xOz$

Механические характеристики материалов: для здания модуль упругости  $E = 21$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,25$ , плотность  $\rho = 900$  кг/м<sup>3</sup>, для грунта – модуль упругости  $E = 28$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ , плотность  $\rho = 1887$  кг/м<sup>3</sup>. Между сооружением и грунтом моделируется контактное взаимодействие с трением, коэффициент трения 0,3. Граничные условия для случая вертикального распространения сейсмических волн: дневная поверхность перемещалась свободно, боковые границы свободно проскальзывали вдоль оси  $Oz$ , на нижней граничной поверхности грунта задавались компоненты скоростей  $v_x, v_z$ . Граничные условия для случая горизонтального распространения сейсмических волн: дневная поверхность перемещалась свободно, нижняя граница жестко заделана, на одной из боковых поверхностей задавались компоненты скоростей  $v_x, v_z$ , впоследствии

дополнительно порождавшие поверхностные волны на дневной поверхности грунта. Кинематические условия на границах расчетной области для двух вариантов задания сейсмического воздействия определялись по методике [12] таким образом, чтобы возле сооружения на поверхности грунта воспроизводились одинаковые акселерограммы (рис. 3).

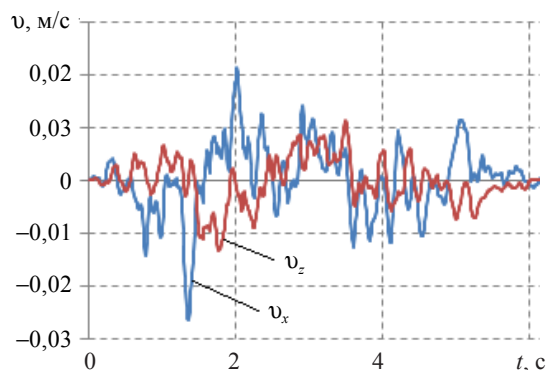


Рис. 3. Сейсмограмма на поверхности грунта возле сооружения

Расчеты позволили оценить поведение сооружения при взаимодействии с грунтом для различных по заглубленности и протяженности сооружений в зависимости от расположения источника сейсмических воздействий. Оценки взаимных смещений стенок сооружения и грунта представлены в таблице.

Таблица

**Максимальные взаимные смещения стенок сооружения и грунта**

Вариант расчета	Положение источника сейсмического воздействия	Максимальные горизонтальные смещения, мм		Максимальные вертикальные смещения, мм	
		Левая стенка	Правая стенка	Левая стенка	Правая стенка
Заглубленное сооружение	снизу	0,41	0,92	7,19	7,59
	слева	0,44	0,97	5,35	10,46
Малозаглубленное сооружение	снизу	1,83	3,36	11,20	4,80
	слева	2,39	7,53	11,90	10,00
Протяженное малозаглубленное сооружение	снизу	0,55	1,90	1,73	6,27
	слева	0,68	2,09	1,96	6,78

Анализ показал, что расположение источника землетрясения по-разному влияет на поведение сооружения и его взаимодействие с грунтом в зависимости от размеров сооружения в плане и степени его заглубления. Так, воздействие снизу приводит к большим раскачиванием заглубленного сооружения, воздействие сбоку – к большим раскачиванием малозаглубленного сооружения. Наибольшие взаимные смещения стенок сооружения и грунта для двух рассмотренных вариантов расположения источника сейсмических воздействий получены для высокого малозаглубленного сооружения. Для всех типов сооружений поверхностный источник землетрясения приводит к росту взаимных смещений стенок сооружения и грунта, по крайней мере на одной из стенок.

## Заключение

В статье предложена численная методика анализа сейсмостойкости заглубленных сооружений и примыкающих к ним подземных трубопроводов с учетом контактного взаимодействия с грунтом и поля силы тяжести. Анализ сейсмических вибраций сооружения и его взаимодействия с грунтом для случаев расположения эпицентра под сооружением и на существенном удалении от сооружения позволяет реализовать наиболее опасные направления действия сейсмических нагрузок, что соответствует требованиям строительных норм [14]. Результаты расчета сооружений для двух описанных предельных случаев позволяют оценить поведение сооружения и характер его взаимодействия с прилегающим грунтом для произвольно расположенного источника землетрясения. При расчетах сооружений на горизонтально распространяющиеся сейсмические воздействия следует учитывать характерные для данного региона глубины гипоцентров и степень затухания сейсмических волн с расстоянием и умножать экспериментальные акселерограммы, соответствующие максимальному расчетному землетрясению в районе строительной площадки, на соответствующий понижающий коэффициент.

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 [15].

### Список литературы

1. СП 14.13330.2011 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*. М.: ОАО «ЦПП», 2011. 84 с.
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. *Баженов В.Г., Дюкина Н.С.* Методы численного исследования сейсмостойкости заглубленных сооружений. Saarbrucken, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. 141 с.
5. *Баженов В.Г., Чекмарев Д.Т.* Решение задач нестационарной динамики пластин и оболочек вариационно-разностным методом: Учеб. пособие. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2000. 107 с.
6. *Баженов В.Г., Дюкина Н.С., Кибец А.И.* Численное решение трехмерных задач взаимодействия сооружений с грунтовым основанием при сейсмических нагрузках // *Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т*, 2007. Вып. 69. С. 137–142.
7. *Дюкина Н.С., Кибец А.И., Жестков М.Н.* Анализ сейсмических колебаний заглубленных сооружений с учетом трансверсально-изотропного основания // *Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т*, 2013. Вып. 75. Ч. 1. С. 40–46.
8. *Баженов В.Г., Кибец А.И.* Численное моделирование трехмерных задач нестационарного деформирования упругопластических конструкций методом конечных элементов // *Изв. РАН. МТТ*. 1994. № 1. С. 52–57.
9. *Абу Лейл М.* Расчет характеристик динамического взаимодействия фундамента с грунтом при сейсмическом или техногенном воздействии: Дисс. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2004. 177 с.

10. Данилов А.Г., Никифоров С.П. Использование программы Nastran при оценке сейсмических воздействий // Геофизика на пороге третьего тысячелетия: Сб. науч. тр. / Иркутск: ИрГТУ, 2001. С. 157–166.

11. Петров И.Б., Хохлов Н.И. Моделирование задач 3D сейсмике на высокопроизводительных вычислительных системах // Мат. моделирование. 2014. Т. 26, №1. С. 83–95.

12. Баженов В.Г., Дюкина Н.С., Зефирова С.В., Лантев П.В. Численное моделирование задач взаимодействия сооружений с двухслойным грунтовым основанием при сейсмических воздействиях // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т, 2005. Вып. 67. С. 162–167.

13. <http://earthquake.usgs.gov/>

14. НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций // Вестник Госатомнадзора России: НТЦ по ядерной и радиационной безопасности Госатомнадзора России. 2001. № 6. С. 7–31.

15. Баженов В.Г., Дюкина Н.С. Численное исследование взаимодействия сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях // Вычислит. механика сплошных сред. 2012. Т. 5, №1. С. 19–24.

#### References

1. SP 14.13330.2011 Stroitel'stvo v seysmicheskikh rayonakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIiP II-7-81\*. М.: ОАО «TsPP», 2011. 84 s.

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. Bazhenov V.G., Dyukina N.S. Metody chislenogo issledovaniya seysmостойкости zaglublennykh sooruzheniy. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. 141 s.

5. Bazhenov V.G., Chekmarev D.T. Reshenie zadach nestatsionarnoy dinamiki plastin i obolochek variatsionno-raznostnym metodom: Ucheb. posobie. N. Novgorod: Izd-vo Nizhegorod. un-ta, 2000. 107 s.

6. Bazhenov V.G., Dyukina N.S., Kibets A.I. Chislennoe reshenie trekhmernykh zadach vzaimodeystviya sooruzheniy s gruntovym osnovaniem pri seysmicheskikh nagruzheniyakh // Problemy prochnosti i plastichnosti: Mezhd. sb. / Nizhegorod. un-t, 2007. Vyp. 69. S. 137–142.

7. Dyukina N.S., Kibets A.I., Zhestkov M.N. Analiz seysmicheskikh kolebaniy zaglublennykh sooruzheniy s uchetoм transversal'no-izotropnogo osnovaniya // Problemy prochnosti i plastichnosti: Mezhd. sb. / Nizhegorod. un-t, 2013. Vyp. 75. Ch. 1. S. 40–46.

8. Bazhenov V.G., Kibets A.I. Chislennoe modelirovanie trekhmernykh zadach nestatsionarnogo deformirovaniya uprugoplasticheskikh konstruktsiy metodom konechnykh elementov // Izv. RAN. MTT. 1994. № 1. S. 52–57.

9. Abu Leyl M.A. Raschet kharakteristik dinamicheskogo vzaimodeystviya fundamenta s gruntom pri seysmicheskom ili tekhnogennom vozdeystvii: Diss. ... k.t.n., Rostov-na-Donu, 2004. 177 s.

10. Danilov A.G., Nikiforov S.P. Ispol'zovanie programmy Nastran pri otsenke seysmicheskikh vozdeystviy // Геофизика на пороге трет'его тьсячелетия: Сб. науч. тр. Иркутск: ИрГТУ, 2001. С. 157–166.

11. Petrov I.B., Khokhlov N.I. Modelirovanie zadach 3D seysmiki na vysokoproizvoditel'nykh vychislitel'nykh sistemakh // Мат. моделирование. 2014. Т. 26, №1. С. 83–95.

12. Bazhenov V.G., Dyukina N.S., Zefirov S.V., Laptev P.V. Chislennoe modelirovanie zadach vzaimodeystviya sooruzheniy s dvukhsloynym gruntovym osnovaniem pri seysmicheskikh vozdeystviyakh // Problemy prochnosti i plastichnosti: Mezhd. sb. / Nizhegorod. un-t, 2005. Vyp. 67. S. 162–167.

13. <http://earthquake.usgs.gov/>

14. НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций // Вестник Госатомнадзора России: НТЦ по ядерной и радиационной безопасности Госатомнадзора России. 2001. № 6. С. 7–31.



15. *Bazhenov V.G., Dyukina N.S.* Chislennoe issledovanie vzaimodeystviya sooruzheniy s gruntovym osnovaniem pri seysmicheskikh vozdeystviyakh // Vychislit. mekhanika sploshnykh sred. 2012. T. 5, №1. S. 19–24.

## **MODELING OF STRUCTURES BEHAVIOR UNDER SHALLOW-FOCUS AND DEEP-FOCUS EARTHQUAKES**

**Dyukina N.S., Bazhenov V.G., Artem'eva A.A.**

Building regulations stipulate seismic resistance calculation weakly deepened structures using a simplified model of soil. For deep foundation structures and adjacent underground pipelines seismic resistance investigation, a massive soil block adjacent to the system should be taken into account. The soil block size should minimize the reflection from the boundary waves in the near to the building area. The accurately describing of structures and high-frequency seismic oscillations leads to significant complexity increase of the numeric modeling of big-size seismic tasks based on differential methods. A new numerical method for large-sized buildings seismic resistance modeling is proposed in this paper. It assumes various factors: contact interaction with soil, gravity field, ground non-homogeneity and earthquake hypocenter location. Deep and shallow earthquakes modeling methods are proposed additionally. It is shown that the location of the seismic source has different effects on the behavior of different types of structures during earthquakes.

*Keywords:* seismic influence, mathematical model, numerical simulation, contact interaction, surface waves, earthquake hypocenter.