

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ДВУХ БЛИЗКОРАСПОЛОЖЕННЫХ ЗАГЛУБЛЕННЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ*

© 2018 г.

Баженов В.Г., Дюкина Н.С.

*Научно-исследовательский институт механики
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

ndyukina@inbox.ru

Поступила в редакцию 27.12.2017

Предлагаются математическая модель и методика численного моделирования, учитывающие контактное взаимодействие сооружений с грунтовым основанием, адекватно описывающие сейсмические процессы в грунте и позволяющие проводить численные исследования сейсмических вибраций сооружений при различных параметрах процесса. 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. Решение определяющей системы уравнений при заданных начальных и граничных условиях основывается на вариационно-разностном методе дискретизации по пространственным координатам и явной схеме интегрирования по времени. Массив грунта представляется прямоугольным параллелепипедом, размеры которого в совокупности с неотражающими граничными условиями достаточны для исключения влияния краевых эффектов на результаты расчета вблизи сооружения. Грунт считается идеально упругим. Жесткие грунты моделируются однородной или многослойной средой, для мягких оснований применяется трансверсально-изотропная модель, учитывающая изменение характеристик грунта с глубиной. Слои грунта полагаются жестко склеенными, а между сооружением и грунтом моделируется контактное взаимодействие с трением: нормальные к поверхности контакта компоненты усилий находятся из условия непроникания, а касательные усилия – в соответствии с законом Амонта – Кулона. Расчетная область находится в поле сил тяжести. Расчет полей перемещений и напряжений от действия сил тяжести производится с применением процедуры гашения кинетической энергии в момент достижения максимума до ее установления с заданной точностью. Эффективность вычислений по данной методике определяется разработанными неотражающими граничными условиями, способом воспроизведения заданной экспериментальной сейсмограммы и применением методов параллельных вычислений. Проведены численные исследования динамических вибраций системы двух

* Выполнено при поддержке РФФИ (грант №17-08-00986-а).

разновеликих крупногабаритных сооружений, позволяющие выявить закономерности поведения близкорасположенных сооружений при землетрясении.

Ключевые слова: сейсмические вибрации, близкорасположенные сооружения, взаимодействие с грунтом, численное моделирование.

Введение

Исследование прочности и надежности строительных конструкций проводится с учетом наличия в окрестности строительной площадки крупных неоднородностей геологического и искусственного характера: полостей, разломов, многослойности грунтовой среды, близкорасположенных сооружений. Учет взаимного влияния сооружений наиболее распространен в условиях плотной городской застройки: в квазистатической постановке оценивается влияние возводимых строительных конструкций на дополнительную осадку существующих сооружений [1–4]. Взаимное влияние сооружений при динамических воздействиях изучено мало. Как правило, проводится анализ переотраженных волн краткосрочного динамического воздействия (взрыва) от отдельно стоящей строительной конструкции [5, 6]. Переотражение динамических волн в грунте и приведение в движение массивных близкорасположенных сооружений может стать дополнительным фактором повреждения и разрушения строительной конструкции. Подобные исследования весьма трудоемки, поскольку анализ взаимного влияния сооружений возможен лишь при рассмотрении совместной модели проектируемых зданий, их фундаментов и грунтового основания [4, 7]. Принятие в расчет удаленных объектов подразумевает включение в рассмотрение массива прилегающего к сооружению грунта, достаточно большого для минимизации краевых эффектов вблизи сооружения. Выбор мелкой разностной сетки, необходимой для точного описания сооружения и вибраций грунта, делает численное моделирование подобных крупногабаритных задач крайне трудоемким. Моделирование взаимного влияния сооружений при землетрясении является значительно более сложным ввиду высокочастотного характера и значительной длительности сейсмического воздействия. Предлагаемый авторами метод анализа сейсмостойкости заглубленных сооружений [8] учитывает эффекты контактного взаимодействия стенок сооружения с грунтовым основанием и существенно сокращает вычислительные затраты, что делает его эффективным средством анализа взаимного влияния сооружений при сейсмических воздействиях.

1. Методы расчетов

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 $Oxyz$:

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

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

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 [9]. Процесс деформирования сплошной среды во времени разбивается на временные слои t^k 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:

$$\begin{aligned} (\dot{u}_\alpha)_j^{k+1/2} &= (\dot{u}_\alpha)_j^{k-1/2} + (F_\alpha)_j \frac{\Delta t^{k+1/2}}{M_j^k}, \\ (u_\alpha)_j^{k+1} &= (u_\alpha)_j^k + (\dot{u}_\alpha)_j^{k+1/2} \Delta t^{k+1}, \\ \Delta t^{k+1} &= t^{k+1} - t^k, \quad \Delta t^{k+1/2} = \frac{1}{2}(\Delta t^{k+1} + \Delta t^k), \quad \alpha = x, y, z. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь F_j – обобщенные силы, действующие на j -й узел, M – масса в j -м узле.

Массив грунта представляется прямоугольным параллелепипедом, размеры которого в совокупности с неотражающими граничными условиями достаточны для исключения влияния краевых эффектов на результаты расчета вблизи сооружения [8]. Поскольку давление в грунте при прохождении волн 8-балльной магнитуды не превосходит 0,5 МПа и отсутствуют значительные локальные формоизменения, допустимо считать поведение грунта идеально упругим [10–12]. Жесткие грунты моделируются однородной или многослойной средой, для мягких оснований применяется трансверсально-изотропная модель, учитывающая изменение характеристик грунта в зависимости от глубины [13, 14]. Слои грунта полагаются жестко склеенными, а между сооружением и грунтом моделируется контактное взаимодействие с трением: нормальные к поверхности контакта компоненты усилий находятся из условия непроникания, а касательные усилия – в соответствии с законом Амонтона – Кулона. Расчетная область находится в поле сил тяжести. Расчет полей перемещений и напряжений от действия сил тяжести производится с применением процедуры гашения кинетической энергии в момент достижения максимума до ее установления с заданной точностью.

Ранее авторами были предложены способы моделирования мелкофокусных и глубокофокусных землетрясений в виде компонент вектора скорости, вычисленных так [8, 15, 16], чтобы вблизи сооружения воспроизводилась заданная акселерограмма землетрясения, и сделаны рекомендации по дискретизации расчетной области, позволяющие при численном решении точно описать заданную акселерограмму [8]. При моделировании глубокофокусного землетрясения полагается, что приходящие от источника землетрясения к сооружению волны можно считать плоскими и распространяющимися по нормали к дневной поверхности грунта [7, 14]. При моделировании мелкофокусного сейсмического воздействия как совокупности продольных, сдвиговых и поверхностных волн на вертикальной боковой поверхности грунтовой среды задаются компоненты скоростей, впоследствии дополнительно порождающие поверхностные волны Рэлея на дневной поверхности расчетного массива грунта.

Описанные методы решения, алгоритмы моделирования контактного взаимодействия и учета поля сил тяжести реализованы в сертифицированном программном комплексе «Динамика-3» и применены для оценки сейсмостойкости подзем-

ных трубопроводов, примыкающих к ответственным сооружениям АЭС Бушер (Иран), Нововоронежской АЭС-2, Калининской, Ростовской АЭС (Россия), Белорусской АЭС (Белоруссия). Распараллеливание алгоритма по методу пространственной декомпозиции позволило сократить вычислительные затраты и повысить эффективность численных исследований [17]. Благодаря этому стал технически возможным многократный пересчет задачи с различными вариантами воздействия, сформированного вероятностными методами из экспериментальной сейсмограммы. Такие расчеты позволяют достоверно описывать последствия реальных землетрясений.

2. Исследование взаимного влияния близкорасположенных сооружений

Изучение различных сценариев поведения сооружений при сейсмическом воздействии подразумевает анализ влияния множества параметров: строение грунтовой среды [8, 13, 14], массивность и строение сооружения [8], направление распространения и состав сейсмических волн [15, 16, 18, 19], а также взаимное расположение сооружений [3, 4]. Обычно исследования взаимного влияния близкорасположенных сооружений проводятся в квазистатической постановке для определения неравномерных осадок сооружений [1–4], в динамической постановке с краткосрочной ударной нагрузкой [5, 6], в частотном диапазоне [20] и не требуют включения в рассмотрение больших объемов прилегающего грунта. В настоящей статье проведен анализ взаимного влияния вибраций двух близкорасположенных крупногабаритных заглубленных сооружений. Разработанная численная методика и программные средства позволили включить в рассмотрение значительный объем грунта, достаточный для адекватного описания длительных сейсмических процессов в грунте.

Ниже приведены примеры модельных расчетов для двух разновеликих заглубленных сооружений – насосной станции и реакторного отделения АЭС. Здание насосной станции представлено параллелепипедом с размерами в плане 24×24 м, высотой над поверхностью грунта 10 м, заглубленным в грунт на 9 м. Здание реакторного отделения также представляет собой параллелепипед с размерами в плане 64×64 м, высотой над поверхностью грунта 66 м, заглубленный в грунт на 9 м. Рассматривался двухслойный массив грунта, толщина верхнего слоя 50 м, толщина подстилающего слоя 250 м. Механические характеристики материала сооружений (насосной станции и реакторного отделения): модуль Юнга $E = 21000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$, плотность $\rho = 803$ кг/м³; для верхнего слоя грунта: $E = 27$ МПа, $\nu = 0,4$, $\rho = 2030$ кг/м³; для нижнего слоя грунта: $E = 2700$ МПа, $\nu = 0,4$, $\rho = 2030$ кг/м³. Между сооружениями и грунтом моделируется контактное взаимодействие с трением (коэффициент трения 0,58), слои грунта жестко склеены между собой. На рис. 1 представлен вид расчетной области в сечении плоскостью $y = 0$ (размеры указаны в метрах). Дискретизация расчетной области проведена в соответствии с разработанной методикой [8, 9], что обеспечивает необходимую точность и устойчивость решения. По окончании процесса осадки расчетной области от силы тяжести к нижней границе грунтового массива прикладывалась вертикальная компонента скорости v_z , заданная кусочно-постоянной функцией $v_z = \{0, t < 4$ с; 1 м/с, $t \geq 4$ с}.

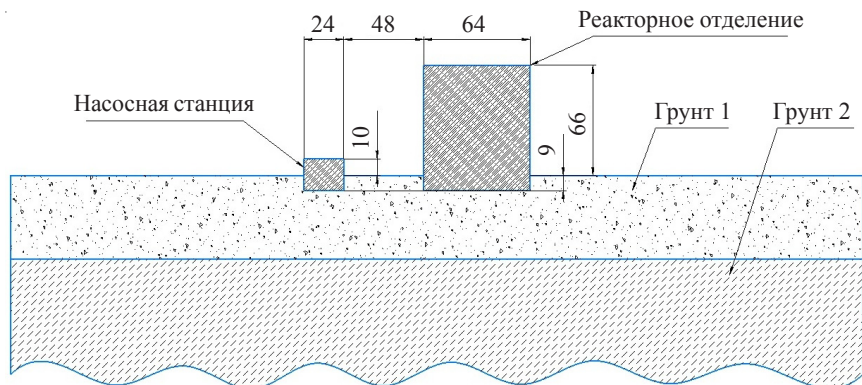
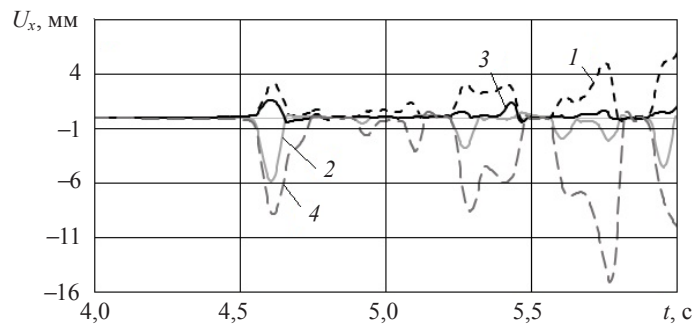
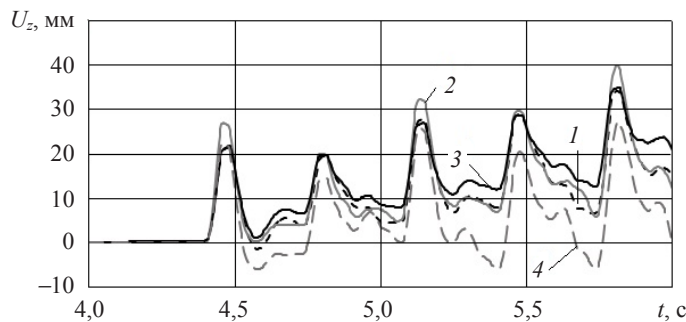


Рис. 1. Вид расчетной области в сечении плоскостью симметрии $y = 0$

На рис. 2 представлены взаимные горизонтальные и вертикальные смещения стенок здания насосной станции и грунта для точек на глубине 3 м: для случая изолированного сооружения на левой стенке здания – кривая 1 и на правой стенке здания – кривая 2; для случая двух близкорасположенных сооружений на левой стенке здания – кривая 3 и на правой стенке здания – кривая 4.



а)



б)

Рис. 2. Взаимные горизонтальные (а) и вертикальные (б) смещения стенок здания насосной станции

На рис. 3 представлены аналогичные смещения стенок реакторного отделения и грунта.

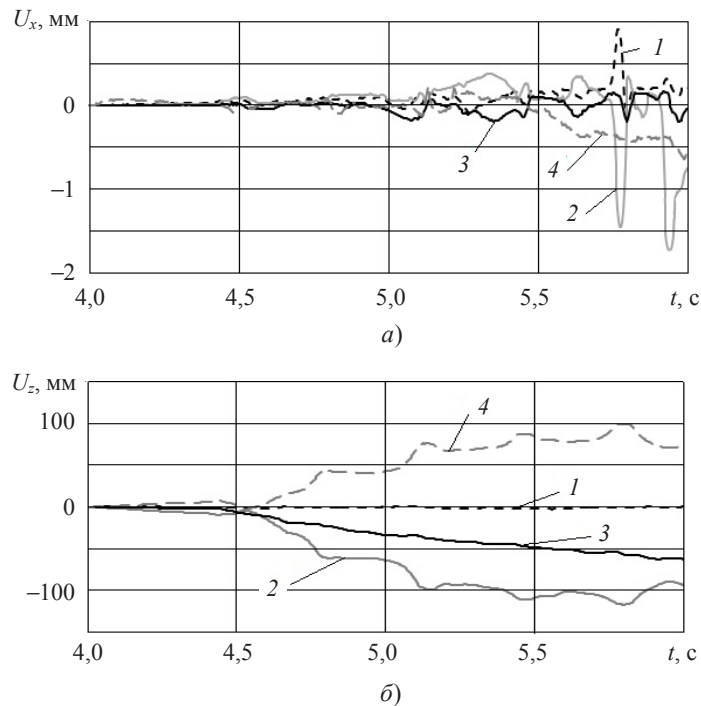


Рис. 3. Взаимные горизонтальные (а) и вертикальные (б) смещения стенок реакторного отделения

Анализ взаимных смещений стенок сооружений и грунта позволяет сделать вывод, что сейсмические вибрации близкорасположенных сооружений приводят к возникновению различных эффектов для различных зданий:

- для менее габаритного сооружения заметно значительное, в 5 раз, увеличение взаимных горизонтальных смещений стенки здания и грунта со стороны близкорасположенного более габаритного сооружения;

- для более габаритного сооружения характерно сглаживание временной зависимости взаимных горизонтальных смещений стенок сооружения и грунта, что хорошо согласуется с выводами [20] о незначительном влиянии легкого сооружения на сейсмическую реакцию более тяжелого сооружения;

- сооружения накрываются навстречу друг другу, со временем этот крен увеличивается. Для насосной станции крен ΔU_z в различные моменты времени: $\Delta U_z(4,6) = 7$ мм, $\Delta U_z(5,3) = 11$ мм, $\Delta U_z(5,9) = 15$ мм, для реакторного отделения: $\Delta U_z(4,6) = 24$ мм, $\Delta U_z(5,3) = 110$ мм, $\Delta U_z(5,9) = 132$ мм;

- на горизонтальные взаимные смещения в большей степени влияют волновые эффекты от волн, переотраженных от близкорасположенного сооружения;

- на вертикальные смещения в большей степени влияет осадка и раскачивание близкорасположенного здания и связанное с этим изменение волновой картины в некотором объеме прилегающего грунта.

Заключение

Представлены примеры влияния близкорасположенных строительных объектов на поведение зданий при сейсмических воздействиях и оценена величина такого воз-

действия. Установлено, что поведение сооружения при наличии близкорасположенных крупногабаритных конструкций может изменяться по-разному в зависимости от соотношения размеров и расстояния между сооружениями.

Если варьирование неизменных для конкретной строительной площадки параметров, таких как особенности геологического строения или сейсмичность, позволяет лучше понять суть процесса, то варьирование доступных для изменения параметров сооружений позволяет выбрать оптимальную конструкцию и взаимное расположение сооружений, а также рассмотреть возможность применения защитных сооружений [6].

Список литературы

1. Elwood D.E.Y., Martin C.D. Ground response of closely spaced twin tunnels constructed in heavily overconsolidated soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 51. P. 226–237.
2. Du J.-h., Huang H.-w. Three-dimensional numerical simulation of construction for bias closely spaced tunnels with altitude difference. CNKI [A]; [C]; 2007.
3. Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. *Взаимодействие здания и основания: Методика расчета и практическое применение при проектировании*. СПб.: Стройиздат, 2002. 48 с.
4. Четвериков А.Л. Взаимное влияние оснований и фундаментов зданий и сооружений в условиях городской застройки (На примере Ростова-на-Дону). *Дис. ... канд. техн. наук*. Ростов-на-Дону. 2003. 145 с.
5. Фаворская А.В., Петров И.Б. О численном моделировании пространственных динамических волновых эффектов в скальных массивах. *Доклады РАН*. 2017. Т. 474. №4. С. 418–422.
6. Орехов В.В., Негахдар Х. Некоторые аспекты изучения применения траншейных барьеров для уменьшения энергии поверхностных волн в грунте. *Вестник МГСУ*. 2013. №3. С. 98–104.
7. Dyukina N.S., Bazhenov V.G. Simulation of the seismic-stability problem for buried constructions. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015. Vol. 44. No 2. P. 189–193.
8. Дюкина Н.С., Баженов В.Г. *Методы численного исследования сейсмостойкости заглубленных сооружений*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG. 2012. 141 с.
9. Баженов В.Г., Чекмарев Д.Т. *Решение задач нестационарной динамики пластин и оболочек вариационно-разностным методом*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2000. 118 с.
10. Алешин А.С. *Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов*. М.: ООО «Светоч Плюс», 2010. 293 с.
11. Сакс М.В., Синюхина С.В., Алешин А.С. Оценка влияния неупругости грунта на характеристики колебаний при землетрясении. *Физика Земли*. 2003. №8. С. 41–47.
12. Семенова Ю.В. Моделирование реакции грунта при сейсмическом микрорайонировании строительных участков. *Геофизический журнал*. 2015. Т. 37. №6. С. 137–153.
13. 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.
14. Квасов И.Е., Петров И.Б. Численное моделирование волновых процессов в геологических средах в задачах сейсморазведки с помощью высокопроизводительных ЭВМ. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2012. Т. 52. №2. С. 330–341.
15. Дюкина Н.С., Баженов В.Г., Артемьева А.А. Моделирование поведения сооружений при мелкофокусном и глубокофокусном землетрясениях. *Проблемы прочности и пластичности*. 2014. Т. 76. №4. С. 279–287.
16. Baranova M.S., Dyukina N.S. Influence of earthquake hypocenter location on soil-structure dynamic behavior. *Materials Physics and Mechanics*. 2016. Vol. 28. P. 21–25.
17. Баженов В.Г., Дюкина Н.С., Гордиенко А.В., Кибец А.И. Конечно-элементное решение трехмерных задач сеймики на многопроцессорных вычислительных системах. *Мате-*

риалы XVIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным средствам. 22-31 мая 2013 г. Алушта, 2013. С. 37–39.

18. Furinghetti M., Pavese A., Foti A. Effects of equivalent radial accelerograms for bidirectional seismic events on base-isolated structures. *COMPADYN 2017. 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. 2017. DOI: 10.7712/120117.5726.17256.

19. Beyer K., Bommer J. Selection and scaling of real accelerograms for bi-directional loading: A review of current practice and code provisions. *Journal of Earthquake Engineering*. 2007. Vol. 11. P. 13–45.

20. Тяпин А.Г. Сейсмическая реакция комплекса зданий с учетом их взаимодействия через грунт: пример расчета для заглубленных фундаментов. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2009. №5. С. 59–64.

References

1. Elwood D.E.Y., Martin C.D. Ground response of closely spaced twin tunnels constructed in heavily overconsolidated soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 51. P. 226–237.

2. Du J.-h., Huang H.-w. Three-dimensional numerical simulation of construction for bias closely spaced tunnels with altitude difference. CNKI [A]; [C]; 2007.

3. Shashkin A.G., Shashkin K.G. *Vzaimodeystvie zdaniya i osnovaniya: Metodika rascheta i prakticheskoe primeneniye pri proektirovanii* [Interaction of the Building and the Foundation: Calculation Methods and Practical Application in the Design]. Saint-Petersburg. Stroizdat Publ. 2002. 48 p. (In Russian).

4. Chetverikov A.L. *Vzaimnoe vliyaniye osnovaniy i fundamentov zdaniy i sooruzheniy v usloviyakh gorodskoy zastroyki (Na primere Rostova-na-Donu)* [Mutual influence of bases and foundations of buildings and structures in urban development (on the example of Rostov-on-Don)]. *Dis. ... Cand. Techn. Sciences*. Rostov-na-Donu. 2003. 145 p. (In Russian).

5. Favorskaya A.V., Petrov I.B. Numerical modeling of dynamic wave effects in rock masses. *Doklady Mathematics*. 2017. Vol. 95. No 3. P. 287–290.

6. Orekhov V.V., Negahdar H. Nekotorye aspekty izucheniya primeneniya transheynykh bar'yerov dlya umen'sheniya energii poverkhnostnykh voln v grunte [Particular aspects of research into application of trench barriers aimed at reduction of the energy of surface waves in the soil]. *Vestnik MGSU [Vestnik MGSU. Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2013. No 3. P. 98–104 (In Russian).

7. Dyukina N.S., Bazhenov V.G. Simulation of the seismic-stability problem for buried constructions. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015. Vol. 44. No 2. P. 189–193.

8. Dyukina N.S., Bazhenov V.G. *Metody chislenogo issledovaniya seysmostoykosti zaglublennykh sooruzheniy* [Methods for the Numerical Research of Earthquake Resistance of Buried Structures]. Saarbrücken. LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG. 2012. 141 p. (In Russian).

9. Bazhenov V.G., Chekmarev D.T. *Reshenie zadach nestatsionarnoy dinamiki plastin i obolochek variatsionno-raznostnym metodom* [Solving Problems of Unsteady Dynamics of Plates and Shells by Variational-difference Method]. Nizhni Novgorod. UNN Publ. 2000. 118 p. (In Russian).

10. Aleshin A.S. *Seysmicheskoe mikrorayonirovaniye osobo otvetstvennykh ob'ektov* [Seismic Micro-regionalization of Specially Important Objects]. Moscow. Svetoch Plyus Publ. 2010. 293 p. (In Russian).

11. Saks M.V., Sinyukhina S.V., Aleshin A.S. Otsenka vliyaniya neuprugosti grunta na kharakteristiki kolebaniy pri zemletryasenii [Assessment of the influence of soil inelasticity on the characteristics of oscillations in an earthquake]. *Fizika Zemli [Physics of the Solid Earth]*. 2003. No 8. P. 41–47 (In Russian).

12. Semenova Yu.V. Modelirovaniye reaktsii grunta pri seysmicheskom mikrorayonirovanii stroitelnykh uchastkov [Modeling response of soil under seismic mikro-regionalization of construction sites]. *Rossiyskiy geofizicheskiy zhurnal [Russian Geophysical Journal]*. 2015. Vol. 37. No 6. P. 137–153 (In Russian).

13. Dyukina N.S., Kibets A.I., Zhestkov M.N. Analiz seysmicheskikh kolebaniy zaglublennykh sooruzheniy s uchetom transversalno-izotropnogo osnovaniya [Analysis of seismic oscillations of submerged structures, accounting for a transversally-isotropic foundation]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2013. Vol. 75. No 1. P. 40–46 (In Russian).
14. Kvasov I.E., Petrov I.B. High-performance computer simulation of wave processes in geological media in seismic exploration. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2012. Vol. 52. No 2. P. 302–313.
15. Dyukina N.S., Bazhenov V.G., Arnen'eva A.A. Modelirovanie povedeniya sooruzheniy pri melkofokusnom i glubokofokusnom zemletryaseniya [Modeling of structures behavior under shallow-focus and deep-focus earthquakes]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2014. Vol. 76. No 4. P. 279–287 (In Russian).
16. Baranova M.S., Dyukina N.S. Influence of earthquake hypocenter location on soil-structure dynamic behavior. *Materials Physics and Mechanics*. 2016. Vol. 28. P. 21–25.
17. Bazhenov V.G., Dyukina N.S., Gordienko A.V., Kibets A.I. Konechno-elementnoe reshenie trekhmernykh zadach seysmiki na mnogoprotsessornykh vychislitelnykh sistemakh [Finite element solution of three-dimensional seismic problems on multiprocessor computing systems]. *Materialy XVIII Mezhdunarodnoy konferentsii po vychislitelnoy mekhanike i sovremennym prikladnym programmnyim sredstvam [Materials of XVIII International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Software Tools]*. 22-31 May 2013. Alushta. 2013. P. 37–39 (In Russian).
18. Furinghetti M., Pavese A., Foti A. Effects of equivalent radial accelerograms for bidirectional seismic events on base-isolated structures. *COMPADYN 2017. 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. 2017. DOI: 10.7712/120117.5726.17256.
19. Beyer K., Bommer J. Selection and scaling of real accelerograms for bi-directional loading: A review of current practice and code provisions. *Journal of Earthquake Engineering*. 2007. Vol. 11. P. 13–45.
20. Tyapin A.G. Seysmicheskaya reaktsiya kompleksa zdaniy s uchetom ikh vzaimodeystviya cherez grunt: primer rascheta dlya zaglublennykh fundamentov [Seismic response of the multiple buildings considering structure-soil-structure interaction: sample analysis for the embedded basements]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Construction Mechanics and Calculation of Structures]*. 2009. No 5. P. 59–64 (In Russian).

NUMERICALLY ANALYZING VIBRATIONS OF TWO CLOSELY LOCATED SUBMERGED LARGE-SIZE STRUCTURES

Bazhenov V.G., Dyukina N.S.

*Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

The proposed mathematical model and method of numerical simulation are taking into account soil-structure contact interaction, adequately describe the seismic processes in the soil and allow the numerical study of seismic vibrations of structures under different process parameters. To describe deformation of bodies in the framework of the hypotheses of continuum mechanics, a variation-difference approach is used. The displacement of the medium is described in Lagrange variables, using equations following from the D'Alembert – Lagrange variational principle in Jourdin's form, in a fixed Cartesian coordinate system. The solution of the defining equation set for prescribed initial and boundary conditions is based on the variational-difference method of discretization along the spatial coordinates and an explicit time-integration scheme. The soil bulk is represented as a rectangular parallelepiped, the dimensions of which, in combination with the non-reflection boundary conditions, are big enough to prevent the effect of any boundary effects on the results of the computations in the vicinity of the structure. The soil is considered ideally elastic. Hard soils are modeled by a homogeneous or a multilayered medium; for soft soil

foundations, a transversal-isotropic model is used, which accounts for the through-depth variation of the characteristics of soils. The soil layers are considered rigidly agglutinate; the soil-structure contact interaction is modeled by interaction with friction: the traction components normal to the contact surface are determined from the condition of non-penetration, whereas the tangential tractions are determined according to the Hammon-ton – Coulomb law. The analyzed region is in the gravity field. The displacement and stress fields caused by gravity are computed using the procedure of damping the kinetic energy at the moment it reaches its maximum until it has been determined up to the prescribed accuracy. The efficiency of the calculation by this method is determined by the designed non-reflecting boundary conditions, a method of loading a given experimental seismograms, and methods of parallel computing. Numerical experiments on the dynamic vibrations of the system of two different-sized large structures, which allows to identify regularities in the behavior of closely spaced buildings during an earthquake, were made.

Keywords: seismic vibration, closely spaced structures, the interaction with the soil, numerical simulation.