

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2023-85-4-470-480

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧИСЛЕННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВИБРАЦИЙ
ЗАГЛУБЛЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ***

© 2023 г.

Баженов В.Г., Дюкина Н.С.

*Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

ndyukina@inbox.ru

Поступила в редакцию 01.09.2023

Расчет заглубленных крупногабаритных сооружений на заданные сейсмические воздействия должен учитывать поле сил тяжести, контактное взаимодействие с грунтом. Представление безграничного полупространства грунта ограниченной конечно-элементной областью требует принятия мер по исключению влияния краевых эффектов на результаты решения. Предложены и проанализированы способы повышения эффективности численного решения и подавления краевых эффектов: алгоритм восстановления кинематического воздействия по заданной на поверхности экспериментальной сейсмограмме, применение наложенных сеток для разделения падающих и излученных от сооружения волн и квазиравномерных сеток с вязкостью для гашения волн на бесконечности. Алгоритм восстановления сейсмограммы основывается на сопоставлении дискретного аналога экспериментальной сейсмограммы с результатами одномерной задачи о пробеге тестового импульса в грунтовой среде и учитывает переотражение упругих волн в многослойном грунте с горизонтальными дневной поверхностью и границами раздела сред. Метод наложенных сеток позволяет приблизить источник сейсмического воздействия к фундаменту сооружения. Излученные сооружением вторичные волны-помехи беспрепятственно выходят в техническую подобласть с разрежающейся сеткой, где для гашения волны и шумов, связанных с численной дисперсией решения на неоднородностях сетки, расчеты ведутся с применением линейной вязкости. Предложенный подход с применением наложенных сеток позволяет на порядки сократить время численных расчетов, поскольку только в примыкающей к зданию подобласти задаются мелкие сетки и ведется учет нелинейных эффектов (контактного взаимодействия, упругопластического деформирования). Использование квазиравномерных сеток с введением линейной вязкости приводит к сокращению вычислительных затрат на два порядка в двумерных задачах и на три порядка в трехмерных задачах.

Ключевые слова: численное моделирование, сейсмические воздействия, безграничное полупространство, наложенные сетки, квазиравномерные сетки.

* Выполнено при финансовой поддержке РФН (проект № 23-29-00103).

Введение

Важным элементом проектирования заглубленных сейсмостойких сооружений АЭС является полномасштабное численное моделирование максимально детализированной системы сооружения, прилегающей инфраструктуры и грунтового основания. Под детализацией системы понимается учет поля силы тяжести как дополнительного источника инерционности, контактного взаимодействия с учетом сухого трения, конструктивных особенностей сооружения [1] и геологических параметров грунтового основания [2, 3]. Моделируемое в расчете сейсмическое воздействие задается на границе массива грунтового основания так, чтобы в точках поверхности на площадке строительства воспроизводилась известная экспериментальная акселерограмма. Поскольку массив грунта обладает податливостью и инерционностью, в нем распространяются волны исходного сейсмического воздействия и волны, связанные с присутствием и движением фундамента. Для полного понимания волновой картины динамического воздействия вблизи сооружения [2, 4], а также для исключения влияния краевых эффектов на решение вблизи сооружения в расчет методами конечного элемента и конечных разностей должен быть включен представительный объем прилегающего к сооружению грунта, что приводит к значительным вычислительным затратам. Для рассматриваемой задачи чрезвычайно актуальным является обоснование выбираемой детализации математической модели, а также развитие эффективных численных методов моделирования безграничного полупространства.

В статье представлены способы повышения эффективности разработанного ранее метода численного моделирования сейсмических вибраций заглубленных сооружений с учетом нелинейного взаимодействия с грунтовым основанием [5]. Новизна предлагаемых подходов заключается в применении метода наложенных сеток для разделения падающих, прошедших и отраженных волн в грунтовом основании, а также использовании квазиравномерных сеток с линейной вязкостью для гашения излученных волн, уменьшения размерности дискретной задачи (числа конечных элементов) и снижения вычислительных затрат.

Среди моделей сейсмического воздействия можно выделить модели мелкофокусного и глубокофокусного землетрясения [6]. Глубокофокусная модель предполагает распространение волн сжатия-растяжения и сдвига от нижней границы грунтового массива перпендикулярно поверхности. Плюсом модели является простота определения кинематических характеристик в глубине грунтового массива по экспериментальной сейсмограмме на поверхности. Эта модель применима к наиболее редким (не более 10%) глубокофокусным землетрясениям; для мелкофокусных землетрясений, составляющих до 80% регистрируемых событий с магнитудой более 6, модель охватывает лишь 1% возможной площади землетрясения. Модель мелкофокусного воздействия предполагает распространение волн сжатия-растяжения и сдвига, а также волн Рэлея от боковой границы грунтового массива. Достоинством модели является учет характерных для мелкофокусного землетрясения рэлеевских волн, недостатком – сложность определения кинематических характеристик на границе. В [6] исследовано влияние положения источника землетрясения на поведение различных сооружений и показано, что для заглубленного сооружения более опасно воздействие снизу. Мелкофокусное землетрясение приводит к асимметрии взаимных смещений стенок и грунта за счет большего раскачивания сооружения.

Эта асимметрия может быть оценена и учтена при расчете с моделью глубоко-фокусного землетрясения.

Поскольку скорости сейсмических волн относительно невелики (не превосходят 0,3 м/с), выбор модели грунта ограничивается, как правило, идеально упругой изотропной [5, 7] или трансверсально-изотропной [8], а также вязкоупругой моделью [4]. Эти модели позволяют описать изменение свойств грунта с глубиной и рассеяние упругих волн на неоднородностях грунтовой среды, не затрудняя при этом процесс корректного определения динамического воздействия на границе расчетной области. Применение более сложных реологических моделей грунта, таких как модель Григоряна [9], Замышляева – Евтерева [10], Друкера – Прагера [11, 12], Mat_geologic_cap и FNWA [12–14], оправдано лишь в малой окрестности фундамента сооружения и связано с неоднородными полями напряжений на краях фундаментной плиты. Аналогичный подход локального применения более сложных реологических моделей основания используется не только для крупногабаритных заглубленных, но и для незначительно заглубленных [15] и свайных [16] фундаментов: применяемая в этих случаях модификация винклеровского основания [15–18] допускает нелинейное поведение грунтовой среды лишь вблизи сооружения, а нелинейность характеризует трение на контакте фундаментной плиты и грунта [15, 18].

Методика численного моделирования сейсмических вибраций сооружений

Численное моделирование сейсмических вибраций заглубленных сооружений проводится с использованием разработанного в НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского сертифицированного вычислительного комплекса «Динамика-2». В «Динамике-2» движение сплошных сред формулируется в текущей лагранжевой постановке с использованием явной схемы интегрирования по времени типа «крест» на основе моментной схемы метода конечных элементов [8], реализуется контактный алгоритм с трением на несогласованных конечно-элементных сетках (КЭ-сетках) для моделирования взаимодействия сооружения и основания. Динамические процессы в расчетной области моделируются с учетом поля сил тяжести и сейсмического воздействия в виде пакета плоских волн сжатия-растяжения и сдвига, полученных из решения одномерной задачи.

Определение параметров кинематического воздействия модели глубокофокусного землетрясения проводится в одномерной постановке. Учитывается, что в идеально упругой среде связь задаваемого и прошедшего на поверхность импульсов не зависит от амплитуды скорости и в каждый момент времени может быть выражена через некоторую задаваемую на нижней границе и получаемую на поверхности тестовые функции:

$$\frac{V_{\text{осн}}(t)}{V_{\text{пов}}(t+T)} = \frac{f_{\text{осн}}(t)}{f_{\text{пов}}(t+T)}, \quad (1)$$

где $V_{\text{осн}}$ – кинематическое воздействие на нижней границе грунтового массива, подлежащее определению; $V_{\text{пов}}$ – функция скорости, соответствующая экспериментальной сейсмограмме на дневной поверхности грунта; $f_{\text{осн}}$ и $f_{\text{пов}}$ – соответственно задаваемая на нижней и полученная на верхней границе тестовые функции, T – период пробега упругой волны в одномерном массиве сплошной среды, t – время.

В качестве тестовой функции может быть выбрана гладкая функция [19], распространяющаяся в сплошной среде без численных осцилляций, или более простая для численной обработки кусочно-постоянная функция, например функция Хевисайда, доопределенная единицей в нуле [1]:

$$f_{\text{осн}}(t) = H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t \geq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Искажений решения, возникающих на фронте волны, задаваемой разрывной функцией (2), можно избежать, проводя численный расчет одномерной задачи о восстановлении сейсмической нагрузки с числом Куранта, равным 1.

Функция $V_{\text{осн}}(t)$ из (1) представима в виде суммы:

$$V_{\text{осн}}(t) = \sum_{i=0}^n A_i f_i(t - t_i), \quad (3)$$

где n – размер дискретного массива значений экспериментальной сейсмограммы, A_i – коэффициенты, итерационно определяемые из (1) и (2). При применении кусочно-постоянной тестовой функции вида (2) коэффициенты A_i в (3) легко определяемы и (3) принимает вид:

$$V_{\text{осн}}(t) = \frac{V_{\text{пов}}(T)}{H_{\text{пов}}(T)} H(t - t_0) + \left\{ \frac{V_{\text{пов}}(t_1 + T)}{H_{\text{пов}}(t_1 + T)} - \frac{V_{\text{пов}}(T)}{H_{\text{пов}}(T)} \right\} H(t - t_0) + \dots$$

Предлагаемая методика определения кинематического воздействия основана на анализе одномерной задачи отдельно для волн сжатия и волн сдвига и учитывает переотражение упругих волн в многослойном грунте с горизонтальными дневной поверхностью и границами раздела сред. Любые другие геологические особенности (разломы, полости) и сооружение вносят возмущение в одномерное решение [20].

Как показано в [21], при выборе размеров расчетной области грунта, составляющих порядка 10–15 габаритных размеров фундамента, и применении специальных граничных условий [5, 21], волны-помехи от сооружения искажают решение не более, чем на 5%. Исходя из средних размеров сооружений АЭС, длительности сейсмограмм, требований к пространственной дискретизации, необходимой для корректного описания высокочастотного сейсмического воздействия и контактного взаимодействия стенок заглубленного сооружения с прилегающим грунтом, можно ожидать, что расчетная модель задачи будет включать в себя миллионы конечных элементов, а необходимое время счета составит десятки тысяч временных шагов.

Способ разделения падающих и излученных волн методом наложенных сеток

Повысить эффективность численного моделирования грунтовой среды можно, воспользовавшись подходом, аналогичным применяемому в акустике в задачах дифракции на деформируемых телах. В этом случае решение представляется в виде суперпозиции падающих, прошедших и отраженных от тела волн, согласование которых осуществляется на границе раздела сред или подобластей. Дискретная расчетная область задачи для реализации подхода при численном решении состоит из трех подобластей: первая – для расчета падающих волн, вторая – для расчета суммарных волн в примыкающей к сооружению грунтовой среде, третья – для расчета излученных от сооружения волн. Расчетная область для двумерной задачи схематично представлена на рис. 1, в трехмерном случае – аналогично.

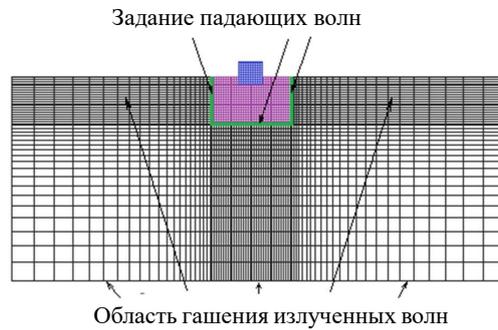


Рис. 1. Дискретная модель расчетной области задачи

В отличие от аналитического решения для согласования конечно-элементного решения в трех этих подобластях необходимо применение наложенных сеток, так как иным способом разделить излученные и падающие волны невозможно. Для окружающей сооружение подобласти граничные условия задаются в виде скоростей перемещений $u_0^{(1)}$ из решения первой задачи с коррекцией на каждом шаге по времени с учетом излученных от здания волн, определяемых на наложенных на один слой приграничных КЭ-сетках для второй и третьей расчетных подобластей путем оценки различия скоростей перемещений в граничных и приграничных узлах. Найденные различия в скоростях перемещений $\delta u_1^{(2)} = u_1^{(2)} - u_1^{(1)}$ используются в качестве граничных значений для третьей расчетной подобласти $u_n^{(3)} = \delta u_1^{(2)}$ и для коррекции граничных условий второй расчетной подобласти $u_0^{(2)} = u_0^{(1)} - u_{n-1}^{(3)}$. Схема информационного обмена между подобластями на одном шаге по времени показана для одномерного случая на рис. 2: верхние индексы в скобках соответствуют номеру подобласти, нижние индексы – шагу пространственной сетки. На рисунке падающие волны, задаваемые на границе первой подобласти, обозначены цифрой 1, высылка излученных волн в третьей подобласти – цифрой 2.

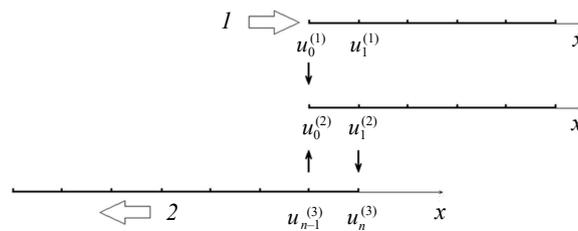


Рис. 2. Схема информационного обмена между подобластями

Описанный метод реализован в вычислительном комплексе «Динамика-2». Тестирование метода наложенных сеток с высылкой скоростей проведено на тестовой одномерной задаче об ударе поршня об упругую однородную область сплошной среды. Механические характеристики поршня и сплошной среды одинаковы: модуль объемного сжатия $K = 13,2$ ГПа, модуль сдвига $G = 4,95$ ГПа, плотность $\rho = 2200$ кг/м³. Скорость удара составляла 10 м/с. Вид расчетной области и параметры пространственной дискретизации показаны на рис. 3. Основная подобласть ($-40 < z < 0$ м) жестко заделана снизу ($z = -40$ м). На наложенных сетках проводится сопоставление скоростей в узлах основной области с невозмущенным эталонным решением, излученная волна пересылается в техническую подобласть.

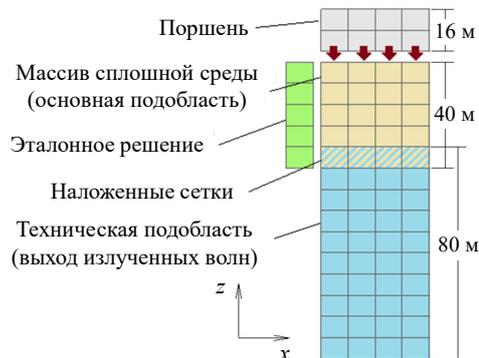


Рис. 3. Вид расчетной области для тестовой задачи о поршне

На рис. 4 приведены результаты расчета в моменты формирования ударного импульса и его ухода в техническую область.

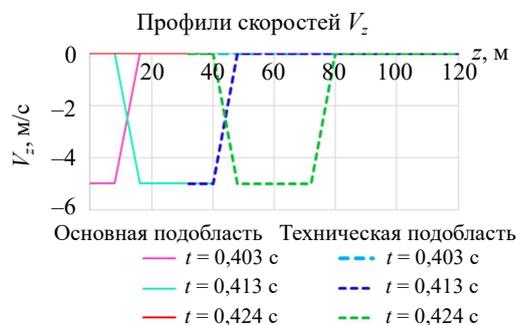


Рис. 4. Результаты расчета тестовой задачи о поршне

Применение квазиравномерных сеток и искусственной вязкости

Для снижения вычислительных затрат в третьей подобласти могут быть использованы квазиравномерные сетки [22], разрежающиеся по мере удаления от сооружения. Отметим, что ранее метод квазиравномерных сеток применялся только для волновых задач, в которых источник возмущения находится внутри расчетной области.

Эффективность применения квазиравномерных сеток для моделирования полупространства продемонстрируем на одномерной задаче о пробеге волны сжатия в упругой области $0 \leq x \leq L$ ($L = 6000$ м), покрытой комбинированной сеткой вида:

$$\omega_m = \begin{cases} \{x_n = 6 \text{ м}, \quad x_0 = 0\}, & n = \overline{1, 50}, \\ \left\{x_n = 306 \text{ м} + \frac{k(n-51)}{N-n+1}\right\}, & n = \overline{51, N}. \end{cases} \quad (4)$$

Рассмотрены варианты сеток $N = 80$ и $N = 110$, коэффициент k в (4) определяется размером расчетной области L и выбранным N : $k = (L - 306 \text{ м}) / (N - 51)$. Механические свойства среды: модуль упругости $E = 2400$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,41$, плотность $\rho = 2000$ кг/м³ (скорость волны сжатия $c_p = 1668$ м/с). Граничные условия вида:

$$\dot{u}(x=0, t) = \begin{cases} A \sin 5\pi t, & 0 \leq t \leq 0,2 \text{ с}, \\ 0, & t \geq 0,2 \text{ с}, \end{cases} \quad \dot{u}(x=L, t) = 0$$

описывают распространение импульса сжатия от границы $x = 0$ из области с равномерной сеткой ($0 < x < 300$ м) в область с разрежающейся сеткой ($300 \text{ м} < x < L$), где для сглаживания осцилляций, вызванных неоднородностями сетки, вводится линейная вязкость. Вязкость может быть подобрана возрастающая по величине по мере удаления от места сшивки так, чтобы она не ограничивала шаг по времени в основной подобласти. На рис. 5 показаны полученные численно и отнесенные к амплитуде скорости волны сжатия в точке $x = 100$ м для рассмотренных вариантов дискретизации без вязкости и с коэффициентом вязкости 3,5.

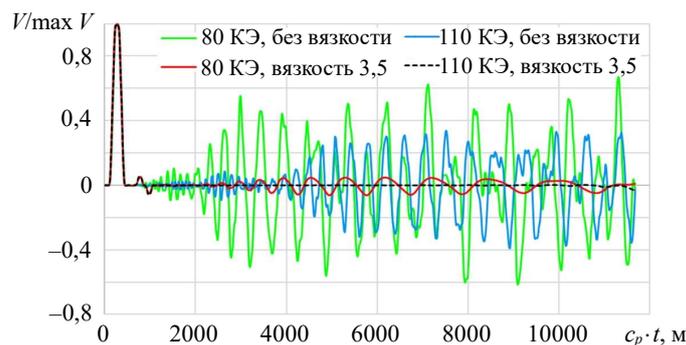


Рис. 5. Численное решение задачи в точке $x = 100$ м

Как видно из рисунка, использование квазиравномерных сеток приводит к постепенному искажению решения – шумы, возвращающиеся в контрольную точку, достигают 70% для $N = 80$, 40% – для $N = 110$. Введение линейной вязкости в области, покрытой квазиравномерной сеткой, приводит к значительному затуханию помех (до 6% для $N = 80$ и 4% – для $N = 110$) и самого импульса. Таким образом, применение квазиравномерных сеток с введением линейной вязкости позволило сократить вычислительные затраты в 12,5 раз для $N = 80$ и в 9 раз для $N = 110$, ошибка в решении при этом не превысила соответственно 6% и 4%.

Заключение

Представлена эффективная методика полномасштабного численного моделирования максимально детализированной системы сооружение–фундамент–грунт. Предложенный подход выделения падающих, прошедших и излученных волн с применением наложенных и квазиравномерных сеток с линейной вязкостью позволяет на порядки сократить время численных расчетов, особенно при трехмерной постановке задачи, поскольку только в примыкающей к зданию подобласти задаются мелкие сетки и ведется учет нелинейных эффектов (контактного взаимодействия, упругопластического деформирования). Отметим, что численные реализации метода наложенных сеток для решения задач прочности методом конечного элемента до настоящего времени отсутствовали. Ранее наложенные сетки применялись в задачах распространения ударных волн в грунтовой среде для сопряжения двух явных разностных схем – схемы «крест» и схемы Годунова в различных подобластях [23–25].

Список литературы

1. Дюкина Н.С. Применимость упрощенной модели сооружения при расчетах сейсмостойкости подземных коммуникаций. *Мат. моделирование и суперкомпьютерные техно-*

- логии: *Тр. XXII Международ. конф. Сер. «Суперкомпьютерные дни в России»*. Н.Новгород. 14–17 нояб. 2022 г. Н. Новгород, 2022. С. 28–31.
2. Nazarov Yu.P., Poznyak E., Filimonov A.V. A brief theory and computing of seismic ground rotations for structural analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015. Vol. 71. P. 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.01.013>.
 3. Bazhenov V.G., Dyukina N.S. Numerical modeling of seismic vibrations of large buried structures on sandy soil foundations. *AIP Conference Proceedings. 28th Russian Conference on Mathematical Modelling in Natural Sciences*. 2–5 Oct. 2019. Perm. Russia. Article No 030003. 2020. Vol. 2216. Iss. 1. <https://doi.org/10.1063/5.0003597>.
 4. Тяпин А.Г. *Расчет сооружений на сейсмические воздействия с учетом взаимодействия с грунтовым основанием*. М.: АСВ, 2013. 392 с.
 5. Баженов В.Г., Дюкина Н.С., Зефиоров С.В. Численное моделирование динамического взаимодействия сооружения с грунтом при сейсмических нагрузениях. *Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия*. 2007. №4(54). С. 49–55.
 6. Dyukina N.S., Baranova M.S. Influence of earthquake hypocenter location on soil-structure dynamic behavior. *Materials Physics and Mechanics*. 2016. Vol. 28. Iss. 1-2. P. 21–25.
 7. Петров И.Б., Фаворская А.В. Расчет сейсмостойкости ледового острова сеточно-характеристическим методом на комбинированных расчетных сетках. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2021. Vol. 61. Iss. 8. P. 1363–1377. DOI: 10.31857/S0044466921060120.
 8. Dyukina N.S., Bazhenov V.G. Simulation of the seismic-stability problem for buried constructions. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015. Vol. 44. Iss. 2. P. 189–193. <https://doi.org/10.3103/S105261881502003X>.
 9. Григорян С.С. Об основных представлениях динамики грунтов. *ПММ*. 1960. Т. 24. №6. С. 1057–1072.
 10. Замышляев Б.В., Евтерев Л.С. *Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред*. М.: Наука, 1990. 212 с.
 11. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*. 1952. Vol. 10. P. 157–165. DOI: <https://doi.org/10.1090/qam/48291>.
 12. *LS-DYNA. Keyword User's Manual. Vol. II. Material Models*. LS-DYNA R7.1. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). 2014. 1154 p.
 13. Sandler I.S., Rubin D. An algorithm and a modular subroutine for the CAP model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1979. Vol. 3. Iss. 2. P. 173–186. <https://doi.org/10.1002/nag.1610030206>.
 14. Evaluation of LS-DYNA Soil Material Model 147. *Report FHWA-HRT-04-094*. US Department of Transport. 2004. 77 p.
 15. Tahghighi H., Mohammadi A. Numerical evaluation of soil-structure interaction effects on the seismic performance and vulnerability of reinforced concrete buildings. *International Journal of Geomechanics*. 2020. Vol. 20. Iss. 6. Article No 04020072. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001651](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001651).
 16. Alver O., Eseller-Bayat E.E. A dynamic p - y model for piles embedded in cohesionless soils. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2023. Vol. 21. P. 3297–3320. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01677-z>.
 17. Raychowdhury P., Hutchinson T. C. Performance evaluation of a nonlinear Winkler-based shallow foundation model using centrifuge test results. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2009. Vol. 38. Iss. 5. P. 679–698. <https://doi.org/10.1002/eqe.902>.
 18. Pelekis I., McKenna F., Madabhushi G.S.P., DeJong M.J. Finite element modeling of buildings with structural and foundation rocking on dry sand. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2021. Vol. 50. Iss. 12. P. 3093–3115. <https://doi.org/10.1002/eqe.3501>.
 19. Feldgun V.R., Karinski Y.S., Yankelevsky D.Z., Kochetkov A.V. A new analytical approach to reconstruct the acceleration time history at the bedrock base from the free surface signal records. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2016. Vol. 85. P. 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.03.003>.
 20. Голубев В.И., Квасов И.Е., Петров И.Б. Воздействие природных катастроф на наземные сооружения. *Математическое моделирование*. 2011. Т. 23. №8. С. 46–54.

21. Баженов В.Г., Дюкина Н.С. *Методы численного исследования сейсмостойкости заглубленных сооружений*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 148 с.
22. Калиткин Н.Н., Альшин А.Б., Альшина Е.А., Рогов Б.В. *Вычисления на квазиравномерных сетках*. М.: Физматлит, 2005. 224 с.
23. Баженов В.Г., Кочетков А.В., Цветкова Е.В. Исследование некоторых способов согласования различных разностных схем при решении динамических контактных задач. *Проблемы прочности и пластичности*. 2002. Вып. 64. С. 162–171.
24. Баженов В.Г., Зефирова С.В., Котов В.Л. Согласование различных разностных схем в нестационарных задачах динамики сплошных сред методом наложенных сеток. *Вестник ННГУ. Серия Механика*. 2006. Т. 1. Вып. 7. С. 134–140.
25. Баженов В.Г., Котов В.Л. *Математическое моделирование нестационарных процессов удара и проникания осесимметричных тел и идентификация свойств грунтовых сред*. М.: Физматлит, 2011. 208 с.

References

1. Dyukina N.S. Primenimost uproshchennoy modeli sooruzheniya pri raschetakh seysmostoykosti podzemnykh kommunikatsiy [Applicability of the simplified model of the structure in the calculations of seismic resistance of underground utilities]. *Matematicheskoe modelirovanie i superkompyuternye tekhnologii: Trudy XXII Mezhdunarodnoy konferentsii. Seriya. "Superkompyuternye dni v Rossii"* [Proceedings of 22th International Conference and School "Mathematical Modeling and Supercomputer Technologies"]. Nizhny Novgorod, 14–17 Nov. 2022. Nizhny Novgorod, 2022. P. 28–31 (In Russian).
2. Nazarov Yu.P., Poznyak E., Filimonov A.V. A brief theory and computing of seismic ground rotations for structural analyses. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2015. Vol. 71. P. 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.01.013>.
3. Bazhenov V.G., Dyukina N.S. Numerical modeling of seismic vibrations of large buried structures on sandy soil foundations. *AIP Conference Proceedings. 28th Russian Conference on Mathematical Modelling in Natural Sciences*. 2–5 Oct. 2019. Perm. Russia. Article No 030003. Vol. 2216. Iss. 1. 2020. <https://doi.org/10.1063/5.0003597>.
4. Tyapin A.G. *Raschet sooruzheniy na seysmicheskie vozdeystviya s uchetom vzaimodeystviya s gruntovym osnovaniem* [Calculation of Structures for Seismic Impacts, Taking into Account Interaction with the Ground Base]. Moscow. ASV Publ. 2013. 392 p. (In Russian).
5. Bazhenov V.G., Dyukina N.S., Zefirov S.V. Chislennoe modelirovanie dinamicheskogo vzaimodeystviya sooruzheniya s gruntom pri seysmicheskikh nagruzheniyakh [Numerical simulation of the dynamic interaction of a structure with the ground under seismic loads]. *Vestnik SamGU. Estestvennonauchnaya seriya* [Vestnik of Samara University. Natural Science Series]. 2007. No 4(54). P. 49–55 (In Russian).
6. Dyukina N.S., Baranova M.S. Influence of earthquake hypocenter location on soil-structure dynamic behavior. *Mater. Phys. Mech.* 2016. Vol. 28. Iss. 1-2. P. 21–25.
7. Petrov I.B., Favorskaya A.V. Computation of seismic resistance of an ice island by the grid-characteristic method on combined grids. *Comput. Math. Math. Phys.* 2021. Vol. 61. Iss. 8. P. 1339–1352. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965542521060129>.
8. Dyukina N.S., Bazhenov V.G. Simulation of the seismic-stability problem for buried constructions. *J. Mach. Manuf. Reliab.* 2015. Vol. 44. Iss. 2. P. 189–193. <https://doi.org/10.3103/S105261881502003X>.
9. Grigoryan S.S. Ob osnovnykh predstavleniyakh dinamiki gruntov [On the basic concepts of soil dynamics]. *Prikladnaya matematika i mekhanika* [J. Appl. Math. Mech.]. 1960. Vol. 24. No 6. P. 1057–1072 (In Russian).
10. Zamyshlyayev B.V., Evtepev L.S. *Modeli dinamicheskogo deformirovaniya i razrusheniya gruntovykh sred* [Models of Dynamic Deformation and Destruction of Soil Media]. Moscow. Nauka Publ. 1990. 212 p. (In Russian).
11. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Q. Appl. Math.* 1952. Vol. 10. P. 157–165. DOI: <https://doi.org/10.1090/qam/48291>.
12. *LS-DYNA. Keyword User's Manual. Vol. II. Material Models*. LS-DYNA R7.1. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). 2014. 1154 p.

13. Sandler I.S., Rubin D. An algorithm and a modular subroutine for the CAP model. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 1979. Vol. 3. Iss. 2. P. 173–186. <https://doi.org/10.1002/nag.1610030206>.
14. Evaluation of LS-DYNA Soil Material Model 147. *Report FHWA-HRT-04-094*. US Department of Transport. 2004. 77 p.
15. Tahghighi H., Mohammadi A. Numerical evaluation of soil-structure interaction effects on the seismic performance and vulnerability of reinforced concrete buildings. *Int. J. Geomech.* 2020. Vol. 20. Iss. 6. Article No 04020072. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001651](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001651).
16. Alver O., Eseller-Bayat E.E. A dynamic p - y model for piles embedded in cohesionless soils. *Bull. Earthq. Eng.* 2023. Vol. 21. P. 3297–3320. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01677-z>.
17. Raychowdhury P., Hutchinson T. C. Performance evaluation of a nonlinear Winkler-based shallow foundation model using centrifuge test results. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 2009. Vol. 38. Iss. 5. P. 679–698. <https://doi.org/10.1002/eqe.902>.
18. Pelekis I., McKenna F., Madabhushi G.S.P., DeJong M.J. Finite element modeling of buildings with structural and foundation rocking on dry sand. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 2021. Vol. 50. Iss. 12. P. 3093–3115. <https://doi.org/10.1002/eqe.3501>.
19. Feldgun V.R., Karinski Y.S., Yankelevsky D.Z., Kochetkov A.V. A new analytical approach to reconstruct the acceleration time history at the bedrock base from the free surface signal records. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2016. Vol. 85. P. 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.03.003>.
20. Golubev V.I., Kvasov I.E., Petrov I.B. Influence of natural disasters on ground facilities. *Math. Models Comput. Simul.* 2012. Vol. 4. P. 129–134. <https://doi.org/10.1134/S2070048212020056>.
21. Bazhenov V.G., Dyukina N.S. *Metody chislennogo issledovaniya seysmostoykosti zaglublennykh sooruzheniy [Methods of Numerical Investigation of Seismic Resistance of Buried Structures]*. Saarbrücken. LAP Lambert Academic Publishing. 2012. 148 p. (In Russian).
22. Kalitkin N.N., Alshin A.B., Alshina E.A., Rogov B.V. *Vychisleniya na kvaziravnomernykh setkakh [Calculations on Quasi-Uniform Grids]*. Moscow. Fizmatlit. 2005. 224 p. (In Russian).
23. Bazhenov V.G., Kochetkov A.V., Tsvetkova E.V. Issledovanie nekotorykh sposobov soglasovaniya razlichnykh raznostnykh skhem pri reshenii dinamicheskikh kontaktnykh zadach [Studying certain ways of matching different difference schemes in analysing contact problems]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2002. Iss. 64. P. 162–171 (In Russian).
24. Bazhenov V.G., Zefirov S.V., Kotov V.L. Soglasovanie razlichnykh raznostnykh skhem v nestatsionarnykh zadachakh dinamiki sploshnykh sred metodom nalozhennykh setok [Coordination of various difference schemes in non-stationary problems of continuum dynamics by the method of superimposed grids]. *Vestnik NNGU. Seriya Mekhanika*. 2006. Vol. 1. Pt. 7. P. 134–140 (In Russian).
25. Bazhenov V.G., Kotov V.L. *Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov udara i pronikaniya osesimmetrichnykh tel i identifikatsiya svoystv gruntovykh sred [Mathematical Modeling of Non-stationary Processes of Impact and Penetration of Axisymmetric Bodies and Identification of Properties of Soil Media]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2011. 208 p. (In Russian).

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF NUMERICAL SIMULATION
OF SEISMIC VIBRATIONS OF BURIED STRUCTURES, TAKING
INTO ACCOUNT THE INTERACTION WITH THE GROUND BASE***

Bazhenov V.G., Dyukina N.S.

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

ndyukina@inbox.ru

Received by the Editor 2023/09/01

The calculation of buried large-sized structures for specified seismic impacts should take into account the field of gravity, contact interaction with the ground. The representation of the boundless half-space of the soil by a limited finite element domain requires taking measures to exclude the influence of boundary effects on the solution. The article proposes and analyzes a set of measures to eliminate edge effects: an algorithm for restoring kinematic load according to an experimental seismogram, the use of superimposed grids to separate the waves incident and radiated from the structure, and quasi-dimensional grids with viscosity to dampen waves at infinity. The algorithm for restoring the seismogram is based on comparing the discrete analogue of the experimental seismogram with the results of a one-dimensional problem of the test pulse run in a ground environment and considers the re-reflection of elastic waves in a multilayer soil with a horizontal upper surface and the boundaries of the media. The method of superimposed grids allows to bring the source of seismic impact closer to the foundation of the structure. The secondary interference waves emitted by the structure freely exit to the technical subdomain with a sparse grid, where calculations are carried out using linear viscosity to dampen the wave and noise associated with the numerical dispersion of the solution on the inhomogeneities of the grid. The proposed approach using superimposed grids makes it possible to reduce the time of numerical calculations by orders, since only in the subregion adjacent to the building small grids are set and nonlinear effects (contact interaction, elastic-plastic deformation) are taken into account. The use of quasi-uniform grids with the introduction of linear viscosity will reduce computational costs by two orders in two-dimensional problems and three orders in three-dimensional ones.

Keywords: numerical modeling, seismic impacts, boundless half-space, superimposed grids, quasi-dimensional grids.

*The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (grant № 23-29-00103).