

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2025-87-2-181-191

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СЕЙСМИЧЕСКИХ ВИБРАЦИЙ
ЗАГЛУБЛЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ
В ПОЛУБЕЗГРАНИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ
НА КВАЗИРАВНОМЕРНЫХ СЕТКАХ***

© 2025 г.

**Баженов В.Г., Дюкина Н.С.,
Линник Е.Ю., Калинина Ю.А.**

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

dyukina@itmm.unn.ru

Поступила в редакцию 24.11.2024

Представлено развитие метода численного моделирования сейсмических вибраций заглубленных сооружений с учетом нелинейного взаимодействия с грунтовым основанием. Предлагаемый комплекс вычислительных методик включает в себя применение метода наложенных сеток для разделения падающих, прошедших и отраженных волн в полубесконечном массиве грунта на границе расчетной подобласти, контактирующей с сооружением, а также использование квазиравномерных сеток с квадратичной и линейной вязкостью для гашения излученных волн, уменьшения размерности дискретной конечно-элементной задачи и снижения вычислительных затрат.

Тестирование программно реализованной методики наложенных сеток проведено в двумерной постановке на задаче об излучении волны от точечного источника на одной из границ прямоугольной расчетной области через слой наложенных сеток на противоположной границе. Оценена абсолютная ошибка распределения поля скоростей после двух периодов пробега в расчетной области с наложенными сетками по сравнению с результатами, полученными в увеличенной расчетной области.

Предложен метод пространственной дискретизации области гашения излученных волн. Сетки, разрежающиеся в двух направлениях для двумерной задачи и в трех направлениях для трехмерной, позволяют обеспечить эффективное излучение не только волн сжатия, но и волн сдвига.

Исследовано влияние законов изменения численной вязкости на уменьшение шага по времени для сеток, разрежающихся по квадратичному, кубическому, биквадратичному, гиперболическому законам. Рекомендованы варианты задания квадратичной и линейной вязкости, позволяющие не допустить уменьшения временного шага в области с квазиравномерной сеткой. Предложенный способ расчета сейсмостойкости крупногабаритных заглубленных сооружений сочетает вышеописанные методики и позволяет конструировать разнообразные сетки, повышая эффективность счета.

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

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

Введение

Расчет ответственных сооружений на сейсмические воздействия необходимо проводить в максимально детализированной постановке [1, 2]. Поэтому компьютерное моделирование сейсмических колебаний заглубленных сооружений АЭС должно выполняться с учетом нелинейного взаимодействия с грунтовым основанием, поля силы тяжести, конструктивных особенностей сооружения и геологических свойств основания [3, 4]. Расчет на заданный набор сейсмограмм [5] подразумевает задание кинематического воздействия на границе массива грунтового основания так, чтобы сгенерированные в грунтовой среде волны на поверхности полупространства воспроизводили известную сейсмограмму [6].

Требования к детализации расчетной модели и необходимость исключения влияния краевых эффектов на решение вблизи сооружения для методов конечных элементов и конечных разностей приводят к большим вычислительным затратам. Вопрос снижения вычислительных затрат без понижения точности расчетов для таких задач имеет большое практическое значение при проектировании сооружений АЭС и нефтехранилищ [7, 8]. Поэтому для рассматриваемой задачи актуальным является обоснование выбираемой детализации математической модели и развитие эффективных численных методов снижения вычислительных затрат. К таким методам относятся методы моделирования неотражающих условий на границах расчетной области грунта [6, 9–12], поиск преднапряженного состояния системы от поля сил тяжести [13, 14], понижение размерности задачи.

В статье представлены результаты численных экспериментов, подтверждающих допустимость понижения размерности задачи – замены трехмерной области двумерной, продемонстрирован способ применения разрежающихся сеток для моделирования безграничного полупространства. Метод наложенных сеток позволяет задавать сейсмическое воздействие вблизи сооружения – на границе сшивки сеток – и моделировать беспрепятственный выход волн, отраженных от поверхности грунта и сооружения, в безграничное полупространство, описываемое при помощи квазиравномерных сеток. Предложен способ построения и конечно-элементной (КЭ) дискретизации расчетной области.

Пространственная дискретизация расчетной модели с использованием метода наложенных сеток

При задании сейсмического воздействия на границе расчетной области грунтового основания затрачивается дополнительное время на моделирование подхода сейсмических волн от границы к сооружению [6], возникают искажения в амплитудно-частотном составе сейсмограммы за счет накопления вычислительных ошибок и вязкости численных схем. С помощью метода наложенных сеток можно приблизить границу, на которой задается кинематическое воздействие, и на наложенном на один ряд слоев ячеек реализовать беспрепятственный проход отраженных волн через эту границу для исключения влияния вторичных волн на результаты расчета вблизи сооружения.

Для реализации этого подхода при численном решении конечно-элементную расчетную область массива грунта следует представить комплексом трех подобластей,

наслаивающихся друг на друга на глубину одного ряда конечных элементов. В первой подобласти проводится расчет падающих от источника сейсмического воздействия волн, во второй подобласти грунтовой среды, примыкающей к сооружению, рассматривается суперпозиция падающих, прошедших и отраженных волн, в третьей – расчет излученных от сооружения волн. В отличие от аналитического решения, для согласования КЭ-решения в трех этих подобластях необходимо применение наложенных на один ряд ячеек сеток, так как иным способом разделить излученные и падающие волны невозможно. Уменьшение объема вычислений возможно для первой и третьей подобластей: решение задачи о падающих волнах в первой подобласти может быть выполнено в одномерной постановке, а в третьей подобласти для расчета излученных волн могут быть использованы разрежающиеся по двум направлениям сетки с линейной вязкостью. Расчетная область для двумерной задачи схематично представлена на рис. 1, в трехмерном случае – аналогично.

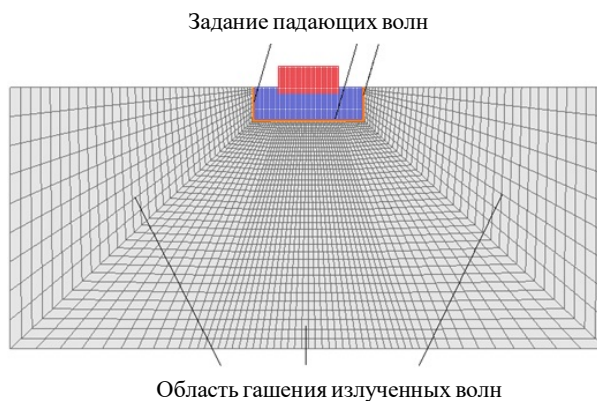


Рис. 1. Вид расчетной области

В [15] подробно описана технология информационного обмена между подобластями и приведен пример расчета одномерной задачи на наложенных сетках. В настоящей статье тестирование методики наложенных сеток в двумерной постановке проводится на задаче об излучении волны в области $\{0 \leq x \leq 80 \text{ м}, 0 \leq y \leq 32 \text{ м}\}$. На границах $x = 0$, $x = 80 \text{ м}$ задано проскальзывание вдоль оси y , граница $y = 0$ свободна от напряжений, на границе $y = 32 \text{ м}$ осуществляется коррекция скоростей перемещений $\dot{u}_x, \dot{u}_y$ по описанной ранее методике [15], кинематическое воздействие задается в одном узле и имеет вид:

$$\dot{u}_y|_{x=0, y=0} = \begin{cases} 1, & t \in (0,0001, 0,01), \\ 0, & t \notin (0,0001, 0,01). \end{cases}$$

Механические свойства материала: модуль Юнга $E = 13,2 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,33$, плотность $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$, период пробега волны сжатия от $y = 0$ до $y = 32 \text{ м}$ составляет $0,011 \text{ с}$. Расчет выполнен в пакете программ «Динамика-2» без применения консервативной вязкости с числом Куранта, равным 1. На рис. 2 приведена абсолютная ошибка поля скоростей $\dot{u}_y$ в расчетной области в момент времени $t = 0,023 \text{ с}$ по сравнению с полем скоростей $\dot{u}_y$ в увеличенной области $\{0 \leq x \leq 80 \text{ м}, 0 \leq y \leq 80 \text{ м}\}$. Ошибка не превышает 5% от амплитуды задаваемого импульса, и можно ожидать ее уменьшения с увеличением размеров расчетной области, уменьшением числа Куранта и с введением вязкости.

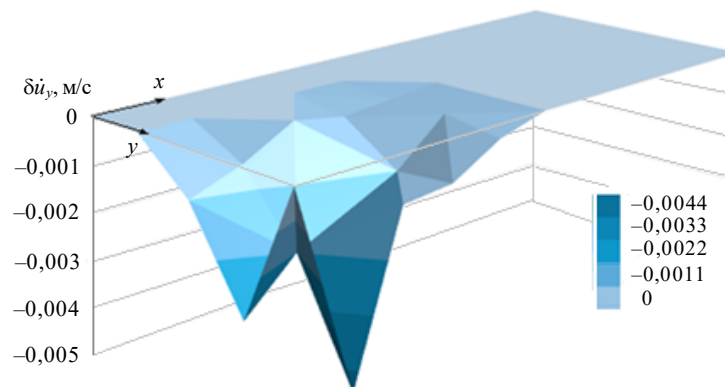


Рис. 2. Абсолютная ошибка скоростей после двух периодов пробега волны

Погрешность применения двумерной плоской постановки для моделирования трехмерной задачи сейсмостойкости сооружений оценена на модельной задаче о распространении плоской сдвиговой волны от нижней границы грунтового массива с размерами $200 \times 200 \times 200$ м к дневной поверхности с расположенным на ней сооружением размером $20 \times 20 \times 20$ м. Механические свойства материалов грунта и сооружения полагались упругими: $E = 2,4$ ГПа, $\nu = 0,4$, $\rho = 2000$ кг/м³ (грунт) и $E = 20$ ГПа, $\nu = 0,25$, $\rho = 1000$ кг/м³ (сооружение). Расчетная область находилась в поле сил тяжести, на боковых границах грунта задавались неотражающие граничные условия [11], контакт между сооружением и грунтом описывается в соответствии с алгоритмом жесткой склейки. В пакете программ «Логос Прочность» выполнено численное моделирование задачи в трехмерной и двумерной постановках для сечения трехмерной расчетной области плоскостью симметрии. Использованы 8-узловые конечные элементы (кубы) с длиной ребра 2,5 м.

На горизонтальных профилях на поверхности грунта оценен уровень шума в сдвиговой волне от сооружения до достижения границы расчетной области излученными сооружением вторичными волнами. Рассмотрены три горизонтальных профиля: от здания к границе расчетной области вдоль движения частиц в сдвиговой волне и перпендикулярно этому направлению движения, а также вдоль стенки здания.

Сравнительный анализ результатов расчета двумерной и трехмерной задач показал, что краевые эффекты ближе к углам сооружения не превышают 5% от амплитуды задаваемого импульса на фронте волны сжатия, 9% – за фронтом волны сжатия. На расстоянии 10 м от углов сооружения влияние краевых эффектов не превышает 5% от амплитуды задаваемого импульса. Таким образом, двумерная постановка задачи для квадратного в плане малозаглубленного сооружения дает удовлетворительное согласование с более полной трехмерной постановкой.

Для двумерных и трехмерных задач сеймики выигрыш в счете по предложенной расчетной схеме складывается из экономии на времени счета при моделировании падающих волн, уменьшения количества узлов КЭ-сетки в области гашения излученных волн (более чем в 2 раза), а также понижения размерности задачи с трехмерной на двумерную. Для грунтов со скоростью волны сжатия 1500–2000 м/с при расчете на воздействие длительностью порядка 10 с получено ускорение счета более чем в 100 раз.

Анализ законов разрежения конечно-элементной сетки и численной вязкости для моделирования излученных волн

Использование разрежающихся сеток для описания безграничного полупространства в задачах взрыва рассмотрено, например, в [16], где в решении для гашения возмущений, вызванных неоднородностями сетки, используется сглаживание по Лаксу. Если источник воздействия находится на некотором удалении от объекта, как в задачах сеймики, введение вязкости во всей расчетной области не позволит качественно описать распространение возмущающих импульсов в сплошной среде [6]. В этом случае может быть использована комбинированная КЭ-сетка: однородная с малой вязкостью вблизи рассматриваемого объекта и разрежающаяся с нарастающей с увеличением размеров ячеек сетки вязкостью – на удалении от объекта.

В области с разрежающейся сеткой для сглаживания осцилляций, вызванных неоднородностями сетки, вводятся линейная и квадратичная вязкость. Временной шаг Δt численного интегрирования задачи зависит от вязкости [17]:

$$\Delta t = \frac{h(n)}{Q(n) + \sqrt{Q^2(n) + c^2}}, \quad (1)$$

$$Q(n) = \begin{cases} c_1(n)c + c_0(n)h(n)|\dot{\epsilon}_{kk}|, & \dot{\epsilon}_{kk} < 0, \\ 0, & \dot{\epsilon}_{kk} \geq 0, \end{cases}$$

где h – шаг по пространственной координате, Q – функция вязкости, c_1 и c_0 – коэффициенты линейной и квадратичной вязкости соответственно, $\dot{\epsilon}_{kk}$ – скорость деформации, c – скорость звука в сплошной среде, n – номер узла пространственной сетки.

Как видно из (1), с ростом пространственного шага $h \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty$ при постоянном значении вязкости $\Delta t \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty$. Нарастающая с увеличением размера ячеек вязкость дает для (1) в пределе неопределенность:

$$\Delta t = \frac{h(n)}{Q(n)(1 + \sqrt{1 + c^2/Q^2(n)})} \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{Q \rightarrow \infty} \frac{h(n)}{2Q(n)} = \frac{h(n)}{2(c_1(n)c + c_0(n)h(n)|\dot{\epsilon}_{kk}|)} = \left(\frac{\infty}{\infty} \right). \quad (2)$$

Разрешение неопределенности (2) по правилу Лопиталя позволяет оценить характер изменения коэффициентов вязкости c_1 и c_0 . Так, при постоянном коэффициенте линейной вязкости рост коэффициента квадратичной вязкости со скоростью роста пространственного шага $c_1(n) = \tilde{c}_1 h(n)$ позволяет сохранить шаг по времени Δt постоянным. Слагаемое $c_0(n)h(n)|\dot{\epsilon}_{kk}|$ в знаменателе (2) определяется не только функцией $c_0(n)$, но и скоростью деформаций.

На одномерной задаче о распространении волн сжатия проанализированы параметры и эффективность сеток, разрежающихся по степенному и гиперболическому законам. Рассматривается упругая сплошная среда со скоростью волны сжатия 1668 м/с. Цель численного моделирования – обеспечить распространение упругой волны на заданное расстояние ($L = 1800$ м) и минимизировать возмущения, возвращающиеся в контрольную точку, не допуская при этом необходимости уменьшения временного шага, следующего из условия устойчивости схемы.

Для трех вариантов разрежения сетки – линейный $\omega_1 = \{x_{n1} = 0,3 + 2n^2, n = \overline{1, 30}\}$, квадратичный $\omega_2 = \{x_{n2} = 1 + 0,01733n^3, n = \overline{1, 47}\}$ и кубический $\omega_3 = \{x_{n3} = 1 + 0,00014n^4, n = \overline{1, 60}\}$ рост шага – выполнено варьирование коэффициентов вязкости

(для сетки ω_1 : $c_1(n) = \tilde{c}_1 h(n)$, $c_0(n) = 0,2$, для ω_2 и ω_3 : $c_1(n) = \tilde{c}_1 h(n)$, $c_0(n) = \tilde{c}_0 \times h(n)$) и построена зависимость изменения шага Δt с учетом возможного нелинейного изменения скоростей деформаций в расчетной области. На рис. 3 показано изменение Δt : черные линии соответствуют постоянному значению скоростей деформаций для сеток ω_1 , ω_2 , ω_3 , серые линии – линейному росту скоростей деформаций для сеток ω_1 , ω_2 и квадратичному росту для сетки ω_3 , сплошная линия – сетка ω_1 , пунктирная – сетка ω_2 , штриховая – ω_3 .

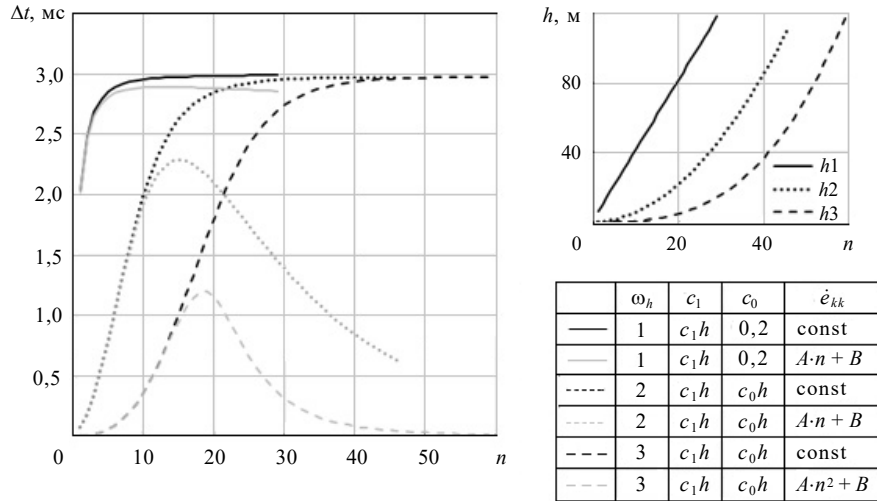


Рис. 3. Влияние характера изменения коэффициентов вязкости и скоростей деформации на временной шаг Δt

Для одномерной области $\{0 \leq x \leq L\}$ рассмотрены также три сетки, разрежающиеся по гиперболическому закону:

$$\omega_N = \left\{ x_n = 1 + \frac{k(n-1)}{N-n+1}, \quad n = \overline{1, N} \right\}, \quad (3)$$

где N – количество узлов сетки, а коэффициент k определяется размером расчетной области L . Исследованы три типа сеток, определяемых соотношением (3): первый – при $N = 30$, второй – при $N = 47$, третий – при $N = 60$. Зависимости координат узлов сетки от номера узла для рассмотренных случаев приведены на рис. 4.

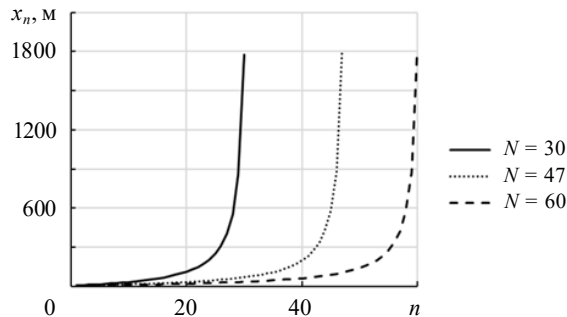


Рис. 4. Зависимости координат узлов сетки от номера узла

Для первого варианта сеток для линейной и квадратичной вязкости приняты параметры роста: $c_1 = h/10$, $c_0 = 0,2n$, для второго варианта сеток $c_1 = h/10$, $c_0 = 0,1n$. На рис. 5 приведены графики изменения шага по времени Δt , определенные по (1) для скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_{kk} = 0,1$ (сплошные линии) и $\dot{\epsilon}_{kk} = 10$ (штриховые линии). На рисунке черным цветом показаны результаты для первого варианта сеток, серым – для второго варианта.

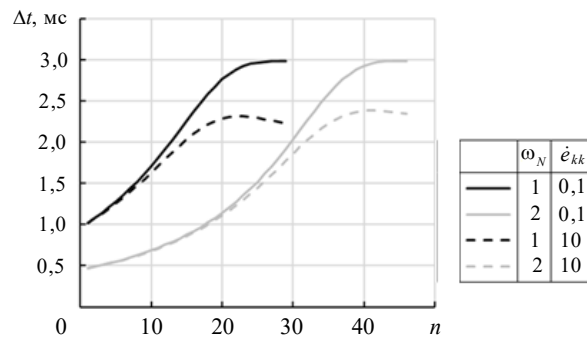


Рис. 5. Влияние скорости деформации и вязкости на выбор минимально допустимого шага по времени для $N = 30$ (черный цвет), $N = 47$ (серый цвет)

Для третьего варианта сетки для линейной и квадратичной вязкости приняты параметры роста вида: $c_1 = c_0 = h/10$ и $c_1 = c_0 = h/5$ соответственно. Графики изменения шага по времени Δt , определенные по (1) для скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_{kk} = 0,1$ и $\dot{\epsilon}_{kk} = 10$, приведены на рис. 6 сплошными и штриховыми линиями.

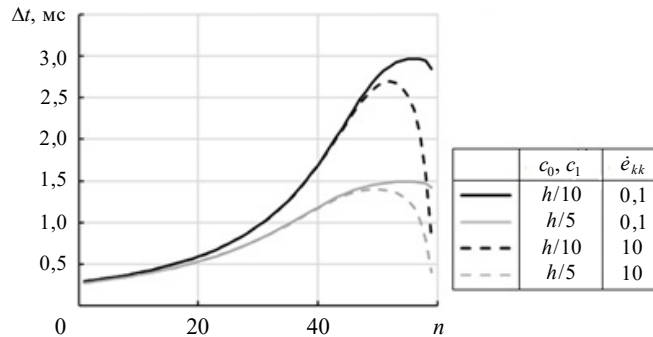


Рис. 6. Влияние скорости деформации и вязкости на выбор минимально допустимого шага по времени для $N = 60$

Как видно из рис. 3 и 5, задание для коэффициента линейной вязкости скорости роста меньшей, чем скорость роста пространственного шага, позволяет не допустить уменьшения временного шага Δt при расчете на разрежающихся сетках с постепенно увеличивающейся численной вязкостью.

Варьирование вязкости численной схемы, проведенное в [18] на задачах о пробеге волн сжатия и сдвига в областях с двумерными сетками, разрежающимися в одном и в двух направлениях, показало, что для сеток, разрежающихся в одном направлении, увеличение коэффициентов вязкости, приводящее к уменьшению шага по времени, может быть также частично компенсировано выбором большего числа Куранта. На сетке, разрежающейся по двум направлениям, варьирование коэффициентов вязкости (от 0,9 до 2) не влияет на результаты расчета.

Заключение

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 [19, 20]. В задачах сейсмоки метод наложенных сеток позволяет разделить падающие и излученные сооружением и поверхностью грунта вторичные волны, а также осуществить задание известных падающих сейсмических волн непосредственно на расчетной сетке, примыкающей к сооружению. Исследовано влияние законов изменения численной вязкости на уменьшение шага по времени для сеток, разрежающихся по квадратичному, кубическому, биквадратичному и гиперболическому законам. Разработана методика задания квадратичной и линейной вязкости, позволяющая не допустить уменьшения временного шага в области с разрежающимися сетками.

Предложенные методики КЭ-дискретизации расчетной области в виде полупространства позволяют проводить расчеты сейсмостойкости крупногабаритных заглубленных сооружений, на порядки повышая эффективность счета.

Список литературы

1. Gazetas G., Anastasopoulos I., Drosos V. Seismic analysis of underground structures: State of the art. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 1996. Vol. 15. Iss. 7. P. 429–448.
2. Maeva M.N.H., Cai H. Seismic design of underground structures' vulnerability – Review. *International Journal of Innovations and Interdisciplinary Research*. 2024. Vol. 2. Iss. 1. P. 130–139. DOI: 10.61108/ijirr.v2i1.116.
3. Мкртычев О.В., Решетов А.А. Обеспечение сейсмостойкости железобетонных зданий. *Железобетонные конструкции*. 2024. Т. 5. №1. С. 57–67.
4. Тяпин А.Г., Антонов Н.А. Расчет сейсмической реакции слоистого основания для побочных грунтовых профилей. *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2020. №1. С. 11–17.
5. Мкртычев О.В., Решетов А.А. Представительный набор акселерограмм для расчета на сейсмические воздействия. *Промышленное и гражданское строительство*. 2023. № 9. С. 43–50. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.09.43-50.
6. Zhao J., Yu Y., Xu H. et al. Multi-directional viscous damping absorbing boundary in numerical simulation of elastic wave dynamic response. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Iss. 5. P. 2183-1 – 2183-22. DOI: 10.3390/app14052183.
7. Alembagheri M. A new dynamic procedure for evaluation of steel tanks under multi-directional seismic excitations. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2014. Vol. 18. P. 1696–1703. DOI: 10.1007/s12205-014-0100-7.
8. Абрамян С.Г., Бурлаченко О.В., Оганесян О.В. и др. Технологические решения, обеспечивающие надежность функционирования стальных вертикальных резервуаров в сейсмических районах. *Строительные материалы и изделия*. 2022. Т. 5. №5. С. 5–16. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-5-5-16.
9. Li B., Liu Y., Zhao Y., Liu X. Hybrid absorbing boundary condition for piecewise smooth curved boundary in 2D acoustic finite difference modeling. *Exploration Geophysics*. 2017. Vol. 49. No 2. P. 469–483. DOI: 10.1071/EG17012.
10. Izadian S., Aghazade K., Amini N., Wang Y. Semi-exact local absorbing boundary condition for seismic wave simulation. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2021. Vol. 18. Iss. 1. P. 62–73. <https://doi.org/10.1093/jge/gxaa068>.
11. Баженов В.Г., Дюкина Н.С., Кибец А.И. Численное решение трехмерных задач взаимодействия сооружений с грунтовым основанием при сейсмических нагрузениях. *Проблемы прочности и пластичности*. 2007. №69. С. 137–142.
12. Lee J., Shin Ch. Time-domain formulation of a Perfectly Matched Layer for the second-order elastic wave equation with VTI media. *Journal of Seismic Exploration*. 2015. Vol. 24. Iss. 3. P. 231–257.

13. Дюкина Н.С., Котов В.Л., Дьянов Д.Ю., Борляев В.В. Анализ возможностей пакета программ Логос при расчете сейсмического воздействия на сооружение. *Проблемы прочности и пластичности*. 2021. Т. 83. №2. С. 160–169. DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-2-160-169.
14. Дюкина Н.С., Домрачева А.В. Расчет предварительной осадки системы «сооружение–грунт» в задачах динамики конструкций. *Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред им. А.Г. Горикова: Матер. XXX Междунар. симпози.* г. Кременки, Калужская область, 20–24 мая 2024 г. М.: ООО «ТПМ», 2024. С. 96–97.
15. Баженов В.Г., Дюкина Н.С. Повышение эффективности численного моделирования сейсмических вибраций заглубленных сооружений с учетом взаимодействия с грунтовым основанием. *Проблемы прочности и пластичности*. 2023. Т. 85. №4. С. 470–480. DOI: 10.32326/1814-9146-2023-85-4-470-480.
16. 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. DOI: 10.1016/j.soildyn.2016.03.003.
17. Hallquist J.O. *LS-DYNA. Theory Manual*. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2005. 680 p.
18. Баженов В.Г., Дюкина Н.С. Метод компьютерного моделирования сейсмических вибраций заглубленных сооружений с учетом взаимодействия с грунтовым основанием. *ДАН. Физика, технические науки*. 2025. Т. 521. С. 44–49.
19. 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.
20. Courbet B., Benoit C., Couaillier V. et al. *Space Discretization Methods*. AerospaceLab, 2011. 14 p.

References

1. Gazetas G., Anastasopoulos I., Drosos V. Seismic analysis of underground structures: State of the art. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 1996. Vol. 15. Iss. 7. P. 429–448.
2. Maeva M.N.H., Cai H. Seismic design of underground structures' vulnerability – Review. *International Journal of Innovations and Interdisciplinary Research*. 2024. Vol. 2. Iss. 1. P. 130–139. DOI: 10.61108/ijir.v2i1.116.
3. Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. Obespechenie seysmostoykosti zhelezobetonnykh zdaniy [Ensuring seismic resistance of reinforced concrete buildings]. *Zhelezobetonnye konstruktsii [Reinforced Concrete Structures]*. 2024. Vol. 5. No 1. P. 57–67 (In Russian).
4. Tyapin A.G., Antonov N.A. Raschet seysmicheskoy reaktsii sloistogo osnovaniya dlya pobochnykh gruntovykh profiley [Ensuring seismic resistance of reinforced concrete buildings]. *Seysmostoykoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy [Earthquake Engineering Constructions Safety]*. 2020. No 1. P. 11–17 (In Russian).
5. Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. Predstavitelnyy nabor akselerogramm dlya rascheta na seysmicheskie vozddeystviya [A representative set of accelerograms for calculating seismic impacts]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo [Industrial and Civil Construction]*. 2023. No 9. P. 43–50 (In Russian).
6. Zhao J., Yu Y., Xu H. et al. Multi-directional viscous damping absorbing boundary in numerical simulation of elastic wave dynamic response. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Iss. 5. P. 2183-1 – 2183-22. DOI: 10.3390/app14052183.
7. Alembagheri M. A new dynamic procedure for evaluation of steel tanks under multi-directional seismic excitations. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2014. Vol. 18. P. 1696–1703. DOI: 10.1007/s12205-014-0100-7.
8. Abramyan S.G., Burlachenko O.V., Oganessian O.V. et al. Tekhnologicheskie resheniya, obespechivayushchie nadezhnost funktsionirovaniya stalnykh vertikalnykh rezervuarov v seysmicheskikh rayonakh [Technological solutions ensuring reliable operation of steel vertical

reservoirs in seismic areas]. *Stroitelnye materialy i izdeliya* [Construction Materials and Products]. 2022. Vol. 5. No 5. P. 5–16 (In Russian).

9. Li B., Liu Y., Zhao Y., Liu X. Hybrid absorbing boundary condition for piecewise smooth curved boundary in 2D acoustic finite difference modeling. *Explor. Geophys.* 2017. Vol. 49. No 2. P. 469–483. DOI: 10.1071/EG17012.

10. Izadian S., Aghazade K., Amini N., Wang Y. Semi-exact local absorbing boundary condition for seismic wave simulation. *Journal of Geophysics and Engineering.* 2021. Vol. 18. Iss. 1. P. 62–73. <https://doi.org/10.1093/jge/gxaa068>.

11. Bazhenov V.G., Dyukina N.S., Kibets A.I. Chislennoe reshenie trekhmernykh zadach vzaimodeystviya sooruzheniy s gruntovym osnovaniem pri seysmicheskikh nagruzheniyakh [Numerical solution of 3-dimensional problems of construction interacting with soil foundation under seismic loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2007. No 69. P. 137–142 (In Russian).

12. Lee J., Shin Ch. Time-domain formulation of a Perfectly Matched Layer for the second-order elastic wave equation with VTI media. *J. Seism. Explor.* 2015. Vol. 24. Iss. 3. P. 231–257.

13. Dyukina N.S., Kotov V.L., Dyanov D.Yu., Borlyayev V.V. Analiz vozmozhnostey paketa program Logos pri raschete seysmicheskogo vozdeystviya na sooruzhenie [Analysis of the capabilities of the Logos software package for calculating the seismic impact on a structure]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2021. Vol. 83. No 2. P. 160–169 (In Russian)..

14. Dyukina N.S., Domracheva A.V. Raschet predvaritelnoy osadki sistemy «sooruzhenie–grunt» v zadachakh dinamiki konstruksiy [Calculation of the preliminary precipitation of the “structure–ground” system in problems of structural dynamics]. *Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruksiy i sploshnykh sred im. A.G. Gorshkova: Materialy XXX Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Dynamic and Technological Problems of Mechanics of Structures and Continuous Media: Materials of the XXX International Symposium n.a. A.G. Gorshkov]. Kremenki, Kaluga region, Russian Federation, 20–24 May 2024. Moscow. OOO «TPM». 2024. P. 96–97 (In Russian).

15. Bazhenov V.G., Dyukina N.S. Povyshenie effektivnosti chislennogo modelirovaniya seysmicheskikh vibratsiy zaglublennykh sooruzheniy s uchetom vzaimodeystviya s gruntovym osnovaniem [Improving the efficiency of numerical simulation of seismic vibrations of buried structures, taking into account the interaction with the ground base]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2023. Vol. 85. No 4. P. 470–480 (In Russian).

16. 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. DOI: 10.1016/j.soildyn.2016.03.003.

17. Hallquist J.O. *LS-DYNA. Theory Manual*. Livermore, California. Livermore Software Technology Corporation. 2005. 680 p.

18. Bazhenov V.G., Dyukina N.S. Metod kompyuternogo modelirovaniya seysmicheskikh vibratsiy zaglublennykh sooruzheniy s uchetom vzaimodeystviya s gruntovym osnovaniem [The method of computer simulation of seismic vibrations buried structures, taking into account the interaction with the soil base]. *Doklady Akademii Nauk. Fizika, Tekhnicheskie nauki* [Doklady Physics]. 2025. Vol. 521. P. 44–49 (In Russian).

19. 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).

20. Courbet B., Benoit C., Couaillier V. et al. *Space Discretization Methods*. AerospaceLab. 2011. 14 p.

NUMERICAL SIMULATION OF SEISMIC VIBRATIONS OF BURIED STRUCTURES IN SEMI-LIMITLESS AREAS ON QUASI-UNIFORM GRIDS*

Bazhenov V.G., Dyukina N.S., Linnik E.Yu., Kalinina Yu.A.

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

dyukina@itmm.unn.ru

Received by the Editor 2024/11/24

An effective method for numerical simulation of seismic vibrations of buried structures is presented, taking into account the nonlinear interaction with the ground base. The novelty of the proposed approaches lies in the application of the superimposed grid method to separate incident, transmitted and reflected waves in the ground base at the boundary of the calculated subdomain in contact with the structure, as well as the use of quasi-uniform grids with quadratic and linear viscosity to dampen radiated waves, reduce the dimension of a discrete finite element problem and reduce computational costs.

The testing of the superimposed grid technique was performed in a two-dimensional formulation on the problem of radiation of a wave from a point source on a boundary of a rectangular computational domain through a layer of superimposed grids on the opposite boundary. The absolute velocity error in the calculated area after two run periods is estimated in comparison with the velocity field distribution in the enlarged calculated area.

A method of spatial discretization of the attenuation region of the emitted waves is proposed, grids that are sparse in two directions – for a two-dimensional problem and three directions - for a three-dimensional one make it possible to ensure effective emission of not only compression waves, but also shear waves. The effect of the laws of change in numerical viscosity on reducing the time step for grids discharging according to quadratic, cubic, biquadratic, and hyperbolic laws is investigated. The options for setting the quadratic and linear viscosity are recommended, which make it possible to prevent a decrease in the time step. The proposed method for calculating the seismic resistance of large-sized buried structures combines the above techniques and allows you to design a variety of grids, increasing the efficiency of counting.

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

* Carried out with financial support of the Russian Science Foundation (project No 23-29-00103).