

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-2-160-169

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПАКЕТА ПРОГРАММ ЛОГОС ПРИ РАСЧЕТЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СООРУЖЕНИЕ

© 2021 г.

**Дюкина Н.С., Котов В.Л.,
Дьянов Д.Ю., Борляев В.В.**

*Институт теоретической и математической физики
Российского федерального ядерного центра – Всероссийского
научно-исследовательского института экспериментальной физики,
Саров, Российская Федерация*

DYDyanov@vniief.ru, VIVBorlyaev@vniief.ru

Поступила в редакцию 31.05.2021

Исследованы и расширены возможности пакета программ ЛОГОС для расчетов сейсмических вибраций заглубленных сооружений с учетом контактного взаимодействия с грунтом и поля силы тяжести. Для сокращения вычислительных затрат в пакет программ ЛОГОС внедрен разработанный ранее и реализованный в программном комплексе «Динамика-2» метод моделирования неотражающих граничных условий, позволяющий уменьшить размеры расчетной области. Приведены результаты численного моделирования в ЛОГОС распространения сдвиговой волны в упругой ограниченной подобласти сплошной среды, демонстрирующие эффективность неотражающих граничных условий для трехмерной постановки. Исследована методика динамической релаксации, используемая в модуле динамической прочности пакета программ ЛОГОС для расчета статической задачи начальных напряжений расчетной области от поля силы тяжести с последующим решением нестационарной задачи. Получены численные оценки ожидаемой точности динамического решения в зависимости от задаваемой точности статического расчета. Так, погрешность по изменению кинетической энергии при использовании алгоритма динамической релаксации 10^{-4} дает относительную погрешность 10^{-3} в скоростях и 10^{-2} в напряжениях, уменьшение задаваемой погрешности статических расчетов на 2 порядка уменьшает относительную погрешность в вычислениях скоростей в 3 раза, напряжений – в 5 раз. Проведено сравнение расчета начального напряженно-деформированного состояния системы здание–грунт от действия поля сил тяжести с применением процедуры динамической релаксации и с применением процедуры стационарирования, реализованной в пакете программ «Динамика-2». Во всех задачах в трехмерной постановке использованы объемные 8-узловые конечные элементы с одноточечным интегрированием, в двумерной постановке – эквивалентные 4-узловые конечные элементы, для интегрирования определяющей системы уравнений применяется явная схема «крест». Между подобластями реализованы варианты контакта со склейкой и контакта с трением. Возможности ЛОГОСа по проведению многопроцессорных вычислений позволили на основании серии вы-

числительных экспериментов сделать оценки сходимости рассматриваемой задачи.

Ключевые слова: сейсмические вибрации, пакет программ ЛОГОС, пакет программ «Динамика-2», поле силы тяжести, осадка сооружения, неотражающие граничные условия.

Введение

Численное моделирование сейсмических вибраций крупногабаритных сооружений подразумевает решение ряда сопутствующих задач. Сейсмическое воздействие – длительный (до 10 с) вибрационный процесс, захватывающий как сооружение, так и прилегающий грунт. Упругие волны сжатия, растяжения и сдвига, распространяясь в неоднородной грунтовой среде, могут порождать дополнительные отраженные и преломленные импульсы и изменять свойства грунтовой среды [1–4]. Таким образом, для полного понимания волновой картины сейсмического воздействия вблизи сооружения важно включать в расчеты представительный объем прилегающего к сооружению грунта. Расчетная область грунта покрывается мелкой конечно-элементной сеткой, достаточной для описания высокочастотных осцилляций в грунте и контактного взаимодействия сооружения с грунтом. Сокращение вычислительных затрат в крупногабаритной расчетной области грунта весьма актуально [5–7]. Поле силы тяжести порождает дополнительные инерционные нагрузки в строительной конструкции и неоднородность поля напряжений, возникающую под сооружением [8–10], поэтому важно в расчетах на сейсмостойкость учитывать поле силы тяжести и провести предварительный расчет осадки сооружения.

Для решения описанных проблем предложена численная методика [11, 12], позволяющая эффективно проводить численное моделирование сейсмических вибраций сооружений с учетом поля силы тяжести и контактного взаимодействия сооружения с грунтом. Методика программно реализована для двумерных задач в функционирующем в НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского программном комплексе «Динамика-2» [13]. Поскольку ограничения двумерной идеализации не позволяют учесть ряд важных особенностей поведения сооружения, актуален перевод методики в трехмерную постановку. За основу взят функционирующий в РФЯЦ – ВНИИЭФ пакет программ ЛОГОС (ПП ЛОГОС) [14–16], в который в виде отдельного программного модуля встроены ранее разработанные неотражающие граничные условия. В статье продемонстрированы особенности реализации и верификации численной методики расчета трехмерных задач сейсмике на базе ЛОГОС: тестирование алгоритма моделирования неотражающих граничных условий, оценка сходимости задачи, сопоставление результатов численного расчета задач осадки сооружения и задач сейсмике в двух программных комплексах («Динамика-2» и ЛОГОС).

Численная методика моделирования безграничной сплошной среды

Исходя из средней длительности сейсмограммы, скорости распространения волн в грунте и максимально возможного размера ячеек, можно ожидать, что расчетную область трехмерной задачи составят десятки миллиардов конечных элементов (КЭ). Реализация методов параллельных вычислений для рассматриваемой крупногабаритной задачи лишь до определенной степени позволяет получить выигрыш в скорости расчетов [5, 17, 18]. Действительно, единственный возможный способ распа-

раллеливания задачи о распространении сейсмических волн в грунтовой среде – метод пространственной декомпозиции. Поскольку форма расчетной области не имеет утонений, обмен данными между соседними блоками параллельных вычислений на каждом временном шаге с увеличением количества процессоров начинает влиять на эффективность параллельного счета. Поэтому для организации эффективного счета подобных задач необходимо применять иные методы для исключения влияния отраженных от границ расчетной области волн на результаты расчетов вблизи сооружения – методы моделирования безграничной сплошной среды.

Для задач взрыва использование квазиравномерных сеток на границе, моделирующей бесконечность, дает хорошие результаты [19, 20]: нефизические осцилляции, порожденные неравномерностями сетки, могут быть сглажены введением вязкости. Для случая, когда источник воздействия находится на значительном расстоянии, сглаживание численного решения будет вносить искажение в волны нагрузки, поэтому квазиравномерные сетки для задач сеймики применять нельзя.

В [12] предложен алгоритм, учитывающий особенности распространения сейсмических импульсов от нижней границы расчетной области грунта к дневной поверхности, благодаря которому волны сжатия-растяжения могут свободно распространяться вдоль вертикальных граничных поверхностей грунта. Для исключения влияния на расчеты отраженных от боковых границ сдвиговых волн реализован специальный алгоритм, заключающийся в пересылке скоростей перемещений из приграничных узлов сетки в граничные узлы на каждом временном шаге, в результате волны сдвига не искажаются при распространении вдоль границы. Численные эксперименты подтвердили эффективность этого алгоритма, который будем называть алгоритмом с неотражающими граничными условиями.

В ПП ЛОГОС введен модуль пользовательских нагрузок, позволяющий, в частности, реализовать описанный алгоритм. Тестирование алгоритма проведено на задаче о распространении сдвиговой волны от основания грунта к дневной поверхности, на которой расположено сооружение.

Рассматривается прямоугольный массив грунта $100 \times 100 \times 100$ м, моделируемый сплошной идеально-упругой средой с характеристиками $E = 2,4$ ГПа, $\nu = 0,4$, $\rho = 2000$ кг/м³. На дневной поверхности грунта в центре расположено сооружение – массив идеально-упругой среды $20 \times 20 \times 20$ м с механическими характеристиками $E = 20$ ГПа, $\nu = 0,25$, $\rho = 1000$ кг/м³ (плотность сооружения предполагается одинаковой по всему объему). На боковых поверхностях массива грунта заданы неотражающие граничные условия, реализованные в виде пользовательских нагрузок. На нижней границе грунта задается импульс скорости волны сдвига v_y (рис. 1).

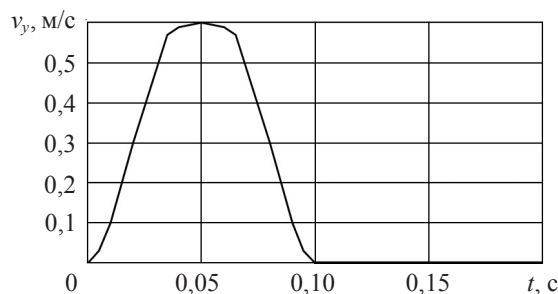


Рис. 1. Импульс скорости волны сдвига на нижней границе грунта

На рис. 2 показаны распределения поля скоростей v_y в расчетной области при $t = 0,16$ с (а), на срезе плоскостью симметрии $\{z = 50 \text{ м}\}$ при $t = 0,14$ с (б) и при $t = 0,18$ с (в). Результаты расчета, представленные на рисунке, показывают, что распространение упругой сдвиговой волны v_y к сооружению происходит без искажений от боковых границ расчетной области грунта. Сравнение сдвиговых скоростей на вертикальных профилях $\{0 < x < 100; y = 10; z = 50\}$, $\{0 < x < 100; y = 50; z = 50\}$, $\{0 < x < 100; y = 50; z = 10\}$ в моменты подхода сдвиговой волны к поверхности ($t = 0,1$ с, $t = 0,13$ с) и после отражения от поверхности ($t = 0,2$ с) показало, что на различия в вертикальных профилях в большей мере влияет наличие сооружения, чем близость к границе с неотражающими граничными условиями. Различия амплитуд сдвиговых волн на профилях до момента отражения волн от сооружения не превышают 0,0015%.

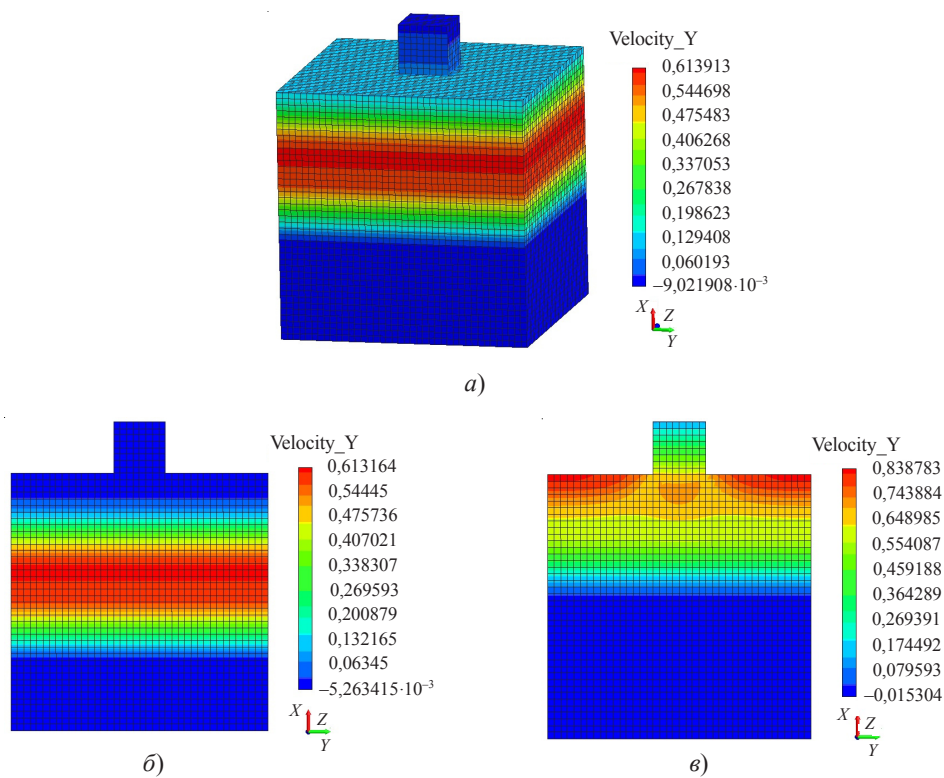


Рис. 2. Распределение поля скоростей v_y

Проведено сравнение полученных скоростей сдвига со случаем, когда на верхней поверхности массива грунта отсутствует здание. Установлено, что на пяти горизонтальных профилях $\{x = 50 + 10i; 0 < y < 100; z = 50\}$, ($i = \overline{0,4}$) отличие решений задач со зданием и без него до момента отражения волн от сооружения не превышает 0,003%.

Численная методика моделирования действия поля силы тяжести

В ПП ЛОГОС не реализована связка, позволяющая решать динамические задачи прочности с предварительным моделированием квазистационарного напряженно-

деформированного состояния в модуле статической прочности. Для учета предварительного напряженного состояния, обусловленного действием силы тяжести, приходится в модуле динамической прочности в ПП ЛОГОС сначала решать статическую задачу с применением различных технологий, базовой из которых является динамическая релаксация. Процедура динамической релаксации, реализованная в модуле динамической прочности ПП ЛОГОС, позволяет решить задачу об осадке сооружения под действием поля силы тяжести в статической постановке с заданной точностью. Задаваемая точность в параметрах алгоритма динамической релаксации определяет итоговый остаточный относительный уровень общей кинетической энергии относительно максимального ее значения:

$$\frac{E_{\text{кин}}}{E_{\text{кин}}^{\text{max}}} < \varepsilon,$$

где $E_{\text{кин}}$ – кинетическая энергия системы за вычетом кинетической энергии тела как жесткого целого, $E_{\text{кин}}^{\text{max}}$ – максимальная по шагам процесса динамической релаксации кинетическая энергия, ε – погрешность. Погрешность кинетической энергии системы влияет на точность определения итоговых полей перемещений и напряжений, при этом отклонение найденного начально статического поля напряжений от точного решения за счет выбора ε может быть получено достаточно малым. Так, погрешность статических расчетов, равная 10^{-4} , дает относительную погрешность 10^{-3} в скоростях и 10^{-2} в напряжениях, уменьшение задаваемой погрешности статических расчетов на 2 порядка уменьшает относительную погрешность в вычислении скоростей в 3 раза, напряжений – в 5 раз. Итерационный процесс определения напряжений показан на рис. 3 для нескольких вариантов параметров динамической релаксации, представленных в таблице 1. На рисунке представлены вертикальные сжимающие напряжения в центре закрепленной грани расчетной области под сооружением (см. рис. 2), фиктивное время – это время, используемое для решения задачи динамической релаксации. Видны различия процесса решения задачи статики при разных погрешностях решения и коэффициентах динамической релаксации.

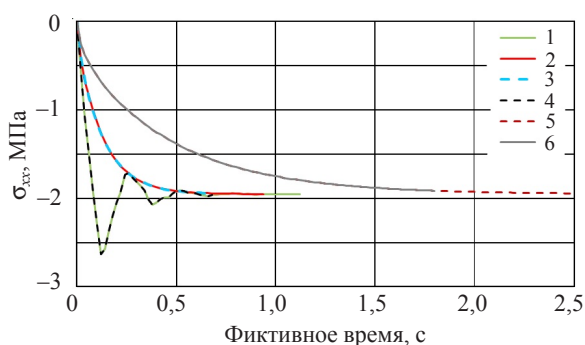


Рис. 3. Вертикальные сжимающие напряжения для различных параметров динамической релаксации

Таблица 1

Вариант расчета	1	2	3	4	5	6
Погрешность сходимости решения по кинетической энергии	10^{-6}	10^{-6}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-6}	10^{-3}
Коэффициент динамической релаксации	0,995	0,97	0,97	0,995	0,9	0,9

На рис. 4, 5 представлены результаты расчета сжимающих напряжений от поля силы тяжести на вертикальном профиле под сооружением $\{0 < x < 100; y = 50; z = 50\}$ и на горизонтальном профиле на глубине 12,5 м $\{x = 87,5; 0 < y < 100; z = 50\}$. Рисунки демонстрируют, что с ростом размерности задачи (двумерная постановка в «Динамике-2», трехмерная – в ЛОГОС) растет и перераспределение вертикальных сжимающих напряжений в некоторой окрестности сооружения.

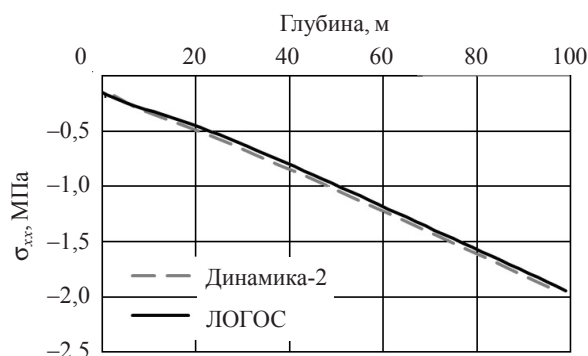


Рис. 4. Сжимающие напряжения от поля силы тяжести на вертикальном профиле под сооружением

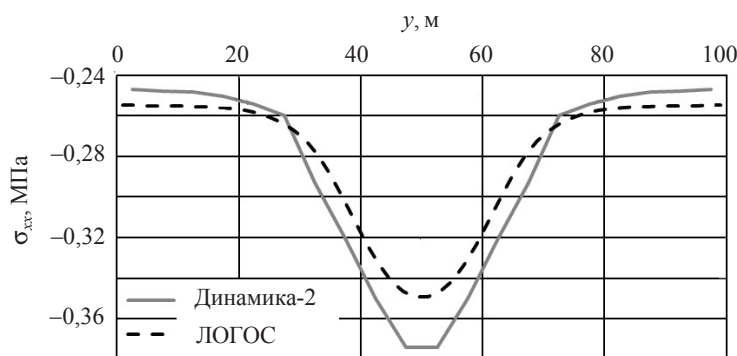


Рис. 5. Сжимающие напряжения от поля силы тяжести на горизонтальном профиле под сооружением

Оценка сходимости задачи

Рассмотрено четыре варианта дискретизации задачи от 1008 до 516096 КЭ, длина ребра кубических КЭ при этом принималась равной 10, 5, 2,5 и 1,25 м. На нижней границе грунтового массива задавались кинематические граничные условия, моделирующие продольную или сдвиговую волну, распространяющуюся к дневной поверхности грунта, то есть для каждого варианта дискретизации рассмотрено два варианта воздействия. Расчетная область находится в поле силы тяжести, на боковых границах грунтового массива заданы неотражающие граничные условия.

На рис. 6 представлены компоненты вертикальной скорости в центре масс сооружения при задании продольной волны сжатия на нижней поверхности (временная зависимость кинематической нагрузки приведена на рисунке серым цветом).

Принимая за точное решение результаты расчета на самой мелкой конечно-элементной сетке, можно оценить абсолютную погрешность вертикальной компонен-

ты скорости в расчетах с продольной волной: 0,026 м/с для сетки $2,5 \times 2,5 \times 2,5$ м; 0,081 м/с для сетки $5 \times 5 \times 5$ м; 0,205 м/с для сетки $10 \times 10 \times 10$ м. Для сдвиговой волны чувствительность к размерам конечно-элементной сетки более заметная, абсолютная разность в амплитудах сдвиговых скоростей на поверхности по сравнению с расчетами на сетке $1,25 \times 1,25$ м составила: 0,057 м/с для сетки $2,5 \times 2,5 \times 2,5$ м; 0,142 м/с для сетки $5 \times 5 \times 5$ м; 0,542 м/с для сетки $10 \times 10 \times 10$ м.

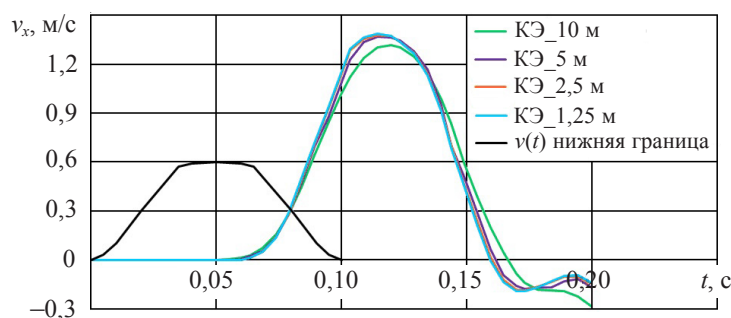


Рис. 6. Сравнение скоростей в центре масс сооружения для различных вариантов дискретизации

Заключение

Сделаны оценки применимости метода определения начального поля напряжений от поля силы тяжести, реализованного разными способами в рассматриваемых пакетах программ. Программно реализован алгоритм моделирования неотражающих граничных условий. Сделаны оценки сходимости трехмерной задачи о сейсмических вибрациях сооружения на идеально-упругом массиве грунта. Для верификации реализованных в ПП ЛОГОС методик проведено сопоставление результатов численного расчета в двух программных комплексах: «Динамика-2» и ЛОГОС. Результаты проведенных исследований подтвердили достоверность расчетов трехмерных и двумерных задач сейсмоки в представленных программных комплексах.

Список литературы

1. Петрашень Г.И., Молотков Л.А., Крауклис П.В. *Волны в слоисто-однородных изотропных упругих средах*. Л.: Наука, 1985. 302 с.
2. Aki K., Richards P. *Quantitative Seismology*. Sausalito: University Science Books, 2002. 700 p.
3. Favorskaya A.V., Petrov I.B. Study of seismic isolation by full-wave numerical modeling. *Doklady Earth Sciences*. 2018. Vol. 481. Iss. 2. P. 1070–1072. DOI: 10.1134/S1028334X18080135.
4. Favorskaya A.V., Petrov I.B. Numerical modelling of dynamic wave effects in rock masses. *Doklady Mathematics*. 2017. Vol. 95. No 3. P. 287–290. DOI: 10.7868/S0869565217040041.
5. Петров И.Б., Хохлов Н.И. Моделирование задач 3D сейсмоки на высокопроизводительных вычислительных системах. *Математическое моделирование*. 2014. Т. 26. №1. С. 83–95.
6. Pan G., Abubakar A. Iterative solution of 3D acoustic wave equation with perfectly matched layer boundary condition and multigrid preconditioner. *Geophysics*. 2013. Vol. 78. Iss. 5. P. T133–T140. <https://doi.org/10.1190/geo2012-0287.1>.
7. Favorskaya A.V., Zhdanov M.S., Khokhlov N.I., Petrov I.B. Modelling the wave phenomena in acoustic and elastic media with sharp variations of physical properties using the grid-characteristic method. *Geophys. Prospect*. 2018. Vol. 66. Iss. 8. P. 1485–1502. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12639>.

8. Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. *Взаимодействие здания и основания: Методика расчета и практическое применение при проектировании*. СПб.: НПФ Геореконструкция, 2001.
9. Nazarov Y.P., Poznyak E.V., 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. DOI: 10.1016/j.soildyn.2015.01.013.
10. 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. DOI: 10.3103/S105261881502003X.
11. Bazhenov V.G., Dyukina N.S. Numerical study of seismic vibrations of closely located buried large structures. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2019. Vol. 40. Iss. 11. P. 1915–1921. <https://doi.org/10.1134/S1995080219110088>.
12. Дюкина Н.С., Баженов В.Г. *Методы численного исследования сейсмостойкости заглубленных сооружений*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. 148 с.
13. Баженов В.Г., Зефиоров С.В., Кочетков А.В., Крылов С.В., Фельдгун В.Р. Пакет программ «Динамика-2» для решения плоских и осесимметричных нелинейных задач нестационарного взаимодействия конструкций со сжимаемыми средами. *Математическое моделирование*. 2000. Т. 12. №6. С. 67–72.
14. Циберев К.В., Авдеев П.А., Артамонов М.В и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач прочности. *Супервычисления и математическое моделирование: Тр. XIII международ. семинара*. 3–7 окт. 2011. Саров, 2011. С. 541–550.
15. Дьянов Д.Ю., Спиридонов В.Ф., Циберев К.В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения динамических задач прочности. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов*. 2018. №1. С. 3–13. <https://elibrary.ru/item.asp?id=32712320>.
16. Дьянов Д.Ю., Казанцев А.В., Стародубов С.В., Циберев К.В., Челаков А.А. Пакет программ ЛОГОС. Учет контактного взаимодействия при решении нелинейных быстропротекающих задач механики деформируемого твердого тела. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов*. 2020. №2. С. 45–59. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43110929>.
17. Воеводин В.В., Воеводин Вл.Вл. *Параллельные вычисления*. СПб.: БХВ-Петербург. 2002. 609 с.
18. Иванов А.М., Хохлов Н.И. Параллельная реализация сеточно-характеристического метода в случае явного выделения контактных границ. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2018. Т. 10. №5. С. 667–678. DOI: 10.20537/2076-7633-2018-10-5-667-678.
19. Белов А.А., Калиткин Н.Н., Численное моделирование задач с пограничным слоем. *Математическое моделирование*. 2015. Т. 27. №11. С. 47–55.
20. Калиткин Н.Н., Альшин А.Б., Альшина Е.А., Рогов Б.В. *Вычисления на квазиравномерных сетках*. М.: Физматлит, 2005. 223 с.

References

1. Petrashen G.I., Molotkov L.A., Krauklis P.V. *Volny v sloisto-odnorodnykh izotropnykh uprugikh sredakh [Waves in Layered Homogeneous Isotropic Elastic Media]*. Leningrad. Nauka Publ. 1985. 302 p. (In Russian).
2. Aki K., Richards P. *Quantitative Seismology*. Sausalito. University Science Books, 2002. 700 p.
3. Favorskaya A.V., Petrov I.B. Study of seismic isolation by full-wave numerical modeling. *Doklady Earth Sciences*. 2018. Vol. 481. Iss. 2. P. 1070–1072. DOI: 10.1134/S1028334X18080135.
4. Favorskaya A.V., Petrov I.B. Numerical modelling of dynamic wave effects in rock masses. *Doklady Mathematics*. 2017. Vol. 95. No 3. P. 287–290. DOI: 10.7868/S0869565217040041.
5. Petrov I.B., Khokhlov N.I. Modeling 3D seismic problems using high-performance computing systems. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2014. Vol. 6. Iss. 4. P. 342–350.
6. Pan G., Abubakar A. Iterative solution of 3D acoustic wave equation with perfectly matched layer boundary condition and multigrid preconditioner. *Geophysics*. 2013. Vol. 78. No 5. P. T133–T140. <https://doi.org/10.1190/geo2012-0287.1>.

7. Favorskaya A.V., Zhdanov M.S., Khokhlov N.I., Petrov I.B. Modelling the wave phenomena in acoustic and elastic media with sharp variations of physical properties using the grid-characteristic method. *Geophys. Prospect.* 2018. Vol. 66. Iss. 8. P. 1485–1502. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12639>.
8. Shashkin A.G., Shashkin K.G. *Vzaimodeystvie zdaniya i osnovaniya: Metodika rascheta i prakticheskoe primenenie pri proektirovanii*. [The Interaction of Buildings and Grounds: Methods of Calculation and Practical Application in the Design]. Saint Petersburg. NPF Georekonstruktsiya Publ. 2001 (In Russian).
9. Nazarov Y.P., Poznyak E.V., 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. DOI: 10.1016/j.soildyn.2015.01.013.
10. Dyukina N.S., Bazhenov V.G. Simulation of the seismic-stability problem for buried constructions. *Mach. Manufact. Reliab.* 2015. Vol. 44. No 2. P. 189–193. DOI: 10.3103/S105261881502003X.
11. Bazhenov V.G., Dyukina N.S. Numerical study of seismic vibrations of closely located buried large structures. *Lobachevskii J. Math.* 2019. Vol. 40. Iss. 11. P. 1915–1921. <https://doi.org/10.1134/S1995080219110088>.
12. Dyukina N.S., Bazhenov V.G. *Metody chislennogo issledovaniya seysmostoykosti zaglublennykh sooruzheniy* [Methods of Numerical Study of Seismic Resistance of Buried Structures]. Saarbrücken. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. 2012. 148 p. (In Russian).
13. Bazhenov V.G., Zefirov S.V., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Feldgun V.R. Paket programm “Dinamika-2” dlya resheniya ploskikh i osesimmetrichnykh nelineynykh zadach nestatsionarnogo vzaimodeystviya konstruktsey so szhimaemyimi sredami [The “Dynamica-2” software package for analysing plane and axisymmetric nonlinear problems of nonstationary interaction of structures with compressible media]. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Models and Computer Simulations]. 2000. Vol. 12. No 6. P. 67–72 (In Russian).
14. Tsiberev K. V., Avdeev P. A., Artamonov M. V. et al. Paket programm LOGOS. Funktsionalnye vozmozhnosti dlya resheniya zadach prochnosti [LOGOS software package: Functionality for solving strength problems]. *Supervychisleniya i matematicheskoe modelirovanie: Trudy XIII mezhdunarodnogo seminar* [Supercomputations and Mathematical Modeling: Proceedings of the XIII International Seminar]. 3–7 Oct. 2011. Sarov. 2011. P. 541–550 (In Russian).
15. Dyanov D.Yu., Spiridonov V.F., Tsiberev K.V., et al. Paket programm LOGOS: Modul resheniya dinamicheskikh zadach prochnosti [LOGOS software package. A module for solving the dynamic strength problems]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov* [Problems of Atomic Science and Technology. Series Mathematical Modeling of Physical Processes]. 2018. No 1. P. 3–13. <https://elibrary.ru/item.asp?id=32712320> (In Russian).
16. Dyanov D.Yu., Kazantsev A.V., Starodubov S.V., Tsiberev K.V., Chelakov A.A. Paket programm LOGOS. Uchet kontaktnogo vzaimodeystviya pri reshenii nelineynykh bystroprotekayu shchikh zadach mekhaniki deformiruемого tverdogo tela [LOGOS software package: solution of nonlinear transient problems of deformable solid mechanics with regard to contact interactions]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov* [Problems of Atomic Science and Technology. Series Mathematical Modeling of Physical Processes]. 2020. No 2. P. 45–59. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43110929> (In Russian).
17. Voevodin V.V., Voevodin V.I. *Parallelnye vychisleniya* [Parallel Calculation]. Saint Petersburg. BKhV-Petersburg Publ. 2002. 609 p. (In Russian).
18. Ivanov A.M., Khokhlov N.I. Parallelnaya realizatsiya setochno-kharakteristicheskogo metoda v sluchae yavnogo vydeleniya kontaktnykh granits [Parallel implementation of the grid-characteristic method in the case of explicit contact boundaries]. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computational Research and Modeling]. 2018. Vol. 10. Iss. 5. P. 667–678. DOI: 10.20537/2076-7633-2018-10-5-667-678 (In Russian).
19. Belov A.A., Kalitkin N.N. Numerical simulations of boundary layer problems. *Mathematical Models and Computer Simulations.* 2016. Vol. 8. No 4. P. 341–347.
20. Kalitkin N.N., Alshin A.B., Alshina E.A., Rogov B.V. *Vychisleniya na kvaziravnomernykh setkakh* [Calculations on Quasi-Uniform Grids]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2005. 223 p. (In Russian).

ANALYSIS OF THE CAPABILITIES OF THE LOGOS SOFTWARE PACKAGE FOR CALCULATING THE SEISMIC IMPACT ON A STRUCTURE

Dyukina N.S., Kotov V.L., Dyanov D.Yu., Borlyayev V.V.

*Institute of Theoretical and Mathematical Physics
of Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Russian Federation*

The possibilities of the LOGOS software package for calculating seismic vibrations of buried structures, considering the contact interaction with the ground and the gravity field, are investigated and expanded. To reduce computational costs, the LOGOS software package includes a method for modeling non-reflective boundary conditions that was developed earlier and implemented in the “Dynamics-2” software package, which allows reducing the size of the computational domain. The results of numerical simulation in the LOGOS of shear wave propagation in an elastic bounded subdomain of a continuous medium are presented, demonstrating the effectiveness of non-reflecting boundary conditions for a three-dimensional formulation. The dynamic relaxation technique used in the dynamic strength module of the LOGOS software package for calculating the initial static stresses from the action of the gravity field with the subsequent solution of the non-stationary problem is investigated. Numerical estimates of the expected accuracy of the dynamic solution are obtained, depending on the specified accuracy of the static calculation. Thus, the relative error in the change in kinetic energy when using the dynamic relaxation algorithm 10^{-4} gives a relative error of 10^{-3} in velocities and 10^{-2} in stresses, reducing the specified calculation error by 2 orders of magnitude reduces the relative error in calculating velocities by 3 times, stresses – by 5 times. The calculation of the initial stress-strain state of the building-ground system from the action of the gravity field is compared using the dynamic relaxation procedure and using the stationing procedure implemented in the “Dynamics-2” software package. In all problems in the three-dimensional formulation, 8-node hexahedra with one-point integration are used, in the two-dimensional formulation – equivalent 4-node finite elements, for the integration of the defining system of equations, an explicit “cross” scheme is used. Between the subdomains, variants of contact with gluing and contact with friction are implemented. The capabilities of LOGOS for conducting multiprocessor calculations allowed us to make estimates of the convergence of the problem under consideration based on a series of computational experiments.

Keywords: seismic vibrations, LOGOS software package, “Dynamics-2” software package, gravity field, structures subsidence, non-reflective boundary conditions.