

УДК 539.3

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-1-24-33

Научная статья

EDN: GTYDDW

ВОЛНОВАЯ ТЕОРИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В МЕЛКОЗАГЛУБЛЕННОМ СООРУЖЕНИИ

В.К. Мусаев

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ,
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНЫЙ
ИНСТИТУТ МИНСТРОЯ РОССИИ,
РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА,
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ РАКЕТНЫХ
И АРТИЛЛЕРИЙСКИХ НАУК, Г. МОСКВА,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

В статье рассматриваются возможности использования цифровых технологий для моделирования нестационарных волн, возникающих в неглубоких структурах во время сейсмических воздействий. Для изучения, идентификации и анализа переходных волновых явлений была создана уникальная методология, а также набор алгоритмов и расчетных программ. Для определения надежности и точности разработанного программного пакета авторы решили задачу о том, как два геометрических объекта – треугольник и трапеция – влияют на упругую полуплоскость. В ходе работы удалось найти решение проблемы, связанной с воздействием внешних сейсмических волн на сооружение, расположенное на небольшой глубине. Моделирование выполнено с использованием функции ступенчатого типа. В ходе исследования были определены напряжения в характерных зонах рассматриваемого объекта – структурах с небольшой глубиной залегания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: безопасность в чрезвычайных ситуациях, природная и антропогенная безопасность, сооружение неглубокого заложения, сейсмическое воздействие, контурное напряжение, несущая способность, вычислительный комплекс
В.К. Мусаева

Original article

THE WAVE THEORY OF SEISMIC SAFETY IN THE PROBLEM OF DETERMINING THE STRESS STATE IN A SHALLOW-BURIED STRUCTURE

V.K. Musayev

RUSSIAN STATE GEOLOGICAL EXPLORATION
UNIVERSITY NAMED AFTER SERGO
ORDZHONIKIDZE, CENTRAL RESEARCH
AND DESIGN INSTITUTE OF THE MINISTRY
OF CONSTRUCTION OF RUSSIA, RUSSIAN
UNIVERSITY OF TRANSPORT, RUSSIAN
ACADEMY OF ROCKET AND ARTILLERY
SCIENCES, MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

This article discusses how digital technologies can be used to simulate non-stationary waves that occur in shallow structures during seismic impacts. A unique methodology, as well as a set of algorithms and calculation programs, was created to study, identify and analyze transient wave phenomena. To determine how reliable and accurate the developed software package is, we solved the problem of how two geometric objects - a triangle and a trapezoid-affect the elastic half-plane. The tasks were solved according to the following scheme: explicit, two-layer. We managed to find a solution to the problem associated with the impact of external seismic waves on a structure located at a shallow depth. The simulation is performed using a step-type function. In the course of the study, stresses were determined in the characteristic zones of the object under consideration – structures with a small depth of occurrence.

KEYWORDS: safety in emergency situations, natural and anthropogenic safety, construction site shallow emplacement, seismic impact, contour stress, load-bearing capacity, computing complex
V.K. Musayev

ВВЕДЕНИЕ

Программированный и алгоритмический подход представления научных результатов в настоящее

время является приоритетным в экономике информационных технологий. В настоящее время имеется возможность создания наук под общим названием «фундаментальная инженерия».

Статья посвящена численному (математическому) моделированию воздействия нестационарной сейс-

© В.К. Мусаев

Поступила в редакцию 31.01.2025

мической волны на сооружение мелкозаглубленного заложения с упругим основанием при фундаментальном воздействии в виде ступеньки или функции Хевисайда.

В этой области имеются некоторые исследования разных ученых. Ниже приведены сведения о ряде работ о применении волн напряжений в различных объектах, которые выполнены с помощью математического моделирования.

В работах ряда ученых [1, 6, 8–15, 20–24] приводится некоторая информация о численном моделировании нестационарных упругих волн в сложных деформируемых областях. При решении сложных задач возникают проблемы оценки достоверности полученных результатов. Анализ численных результатов показывает, что численный метод с успехом применяется для решения нестационарных динамических задач. Проведенные исследования сходимости и устойчивости, сравнение с результатами других методов показало хорошее совпадение, что позволяет сделать вывод о физической достоверности и математической точности результатов численного решения динамических задач, полученных методом конечных элементов в перемещениях. Методика, алгоритм, комплекс программ и результаты решенных задач рекомендуются для использования в научно-технических организациях, специализирующихся в области динамического расчета сооружений с окружающей средой при ударных, взрывных и сейсмических воздействиях.

Кузнецов С.В., Нафасов А.Э. [4] описывают защитные средства от сейсмических воздействий в виде горизонтальных барьеров. Однако приводится схема горизонтальных барьеров без привязки исследуемых элементов к единой системе координат. То есть приводится рисунок на уровне произведений художника. В механике такой подход к исследованию не применяется. Далее приводятся некоторые аналитические зависимости из исследований других авторов в области скоростей распространения в сплошной деформируемой среде. Авторы статей приводят в перемещениях решение задачи с горизонтальными барьерами. Однако осцилляции перемещений достигают почти 50%. Результаты расчетов в напряжениях не приводятся. Наверное, при такой осцилляции перемещений напряжения будут непонятными и их анализ невозможно будет сделать. Полученные результаты не могут претендовать на законченное исследование сейсмической безопасности с горизонтальными барьерами, так как полученные результаты в перемещениях нельзя квалифицировать как новые знания, новые закономерности и рекомендации для нормативно-правовых документов.

В работе Кукуджанова В.Н. и др. [5] исследуются задачи распространения упругих волн с плоским фронтом в стержне и слое. Приводятся численные результаты моделирования распространения ударного

фронта в стержне. Сообщается, что возникают колебания за счет вычислительной дисперсии и вязкости. Приводится информация, что в граничных узлах могут быть неточное соответствие исследуемых неизвестных приложенной нагрузке. Для выполнения расчетов применяются зарубежные программные продукты Ansys/LS-Dyna и Abaqus, которые используют метод конечных элементов. Однако по полученным результатам можно сделать следующие замечания. Авторы приводят подробно постановку краевой задачи для решения волновых уравнений. Постановка задачи общая. Приводится решение ступенчатой волны (воздействие функции Хевисайда) на фронте. Однако на рисунке авторы приводят погрешность напряжения на фронте волны по сравнению с точным решением. Далее имеются осцилляции численного решения, которые имеют большой период времени и не могут быть приняты как достоверные на уровне апробации численного метода. Авторы приводят решение перемещений и напряжения в стержне при воздействии в виде треугольника и ступеньки. По результатам можно сделать вывод, что численное решение не соответствует известным научным знаниям и имеют очень большое качественное несоответствие с результатами аналитического решения. Авторы проблему моделирования нестационарных волн в стержне не довели до уровня качественного и количественного сопоставления с результатами аналитического метода и с известными знаниями в области решения таких классов задач. Проблема численного моделирования волн напряжений в стержнях не решена и актуальность сохраняется. Отсутствует однозначная, корректная постановка решаемой задачи с точки зрения волновой вычислительной механики. Авторы напряжения не исследуют, поэтому получение контурных напряжений и компонентов тензора напряжений остается актуальным для задач моделирования волн напряжений в деформируемых телах. Волны напряжений в деформируемых телах получить сложнее, чем кинематические неизвестные (перемещения, скорости перемещений и ускорения), поэтому получение напряжений должно быть приоритетным при решении задач о моделировании волн напряжений в деформируемых объектах. Однако оценку несущей способности строительных объектов и прочности машиностроительных конструкций без исследования и получения напряжений выполнить невозможно. Отсюда новизна и актуальность изучения напряжений в исследуемых задачах повышается.

Лэмба при сосредоточенной вертикальной нагрузке, которое меняется по треугольному закону во времени. В модели исследования вертикальные барьеры не участвуют. Внимательное рассмотрение графиков изменения перемещений позволяет сделать предварительный вывод о том, что они нарисованы от руки, но не графическим редактором. В настоящее время с помощью численного моделирования волновых задач

получаются цифры, которые с помощью графического редактора переводятся в графики. Этот алгоритм можно назвать следующим образом: корректность результатов математического моделирования. В статье результаты в напряжениях отсутствуют.

В работе Belostotsky A.M., Akimov P.A., Dmitriev D.S. [17] приводится информация о расчете подземных сооружений на сейсмические воздействия. Подземные объекты, возведенные в сейсмоопасных районах, должны быть обеспечены сейсмической (динамической) безопасностью. Задача обеспечения обоснованного проектирования безопасных сейсмостойких подземных сооружений является актуальной задачей. Представлено описание статического метода конечных элементов для расчета подземных сооружений. Внимательное ознакомление с научной статьей позволило отметить следующее. Волновая теория сейсмической безопасности является в настоящее время актуальной. В научной статье приводятся методы расчета подземных сооружений на уровне допущений и некоторых аналогий для статических воздействий. Описание метода расчета на уровне формализации уравнений динамики для уравнений волновой механики деформируемых тел отсутствует. В статье отсутствует пример решения задачи сейсмостойкости подземных сооружений численным методом. Хотя в названии статьи имеются слова «О методах сейсмического расчета подземных сооружений». Название статьи должно соответствовать содержанию. Иначе возникают вопросы у читателей о целесообразности такого подхода и стиля написания статьи.

Belostotsky A.M., Potapenko A.L., Akimov P.A. [18] приводят следующую информацию. Представлена общая характеристика «наукоемкого универсального программного комплекса СТАДИО», который предназначен для численного решения статического и динамического напряженно-деформированного состояния, устойчивости и прочности произвольных комбинированных механических систем в плоской, осесимметричной и трехмерной линейной и нелинейной постановках. При внимательном рассмотрении содержания статьи можно отметить следующее в области динамического моделирования. Авторы приводят аппроксимацию трехмерных тел, которые состоят из пространственных конечных элементов. Рисунки представлены как очередное творчество в области графического дизайна различных технических объектов. Однако их нельзя рассматривать как элементы математической формализации для решения задач механики деформируемого твердого тела в области получения основных неизвестных, так как этой информации очень мало, она не может квалифицироваться, как решение задач динамического воздействия на строительные объекты. В статье не приведена методическая или академическая задача для оценки достоверности программного продукта. Содержание статьи можно

воспринимать как один из вариантов рекламы, но для этого нужно встать на сторону читателя. А читатель так и не понял, какие задачи решает программный продукт, можно ли результатам расчета доверять, так как о достоверности нет информации.

В работе Bratov V.A. et al. [19] авторы претендуют на защитные средства от сейсмических воздействий в виде вертикальных и горизонтальных барьеров. Однако приводится некоторая информация о волнах в деформируемых телах. Приводится цветная фотография схемы расчета, но отсутствует связь между основными элементами корректной постановки задачи в декартовой системе координат. Постановка задачи с начальными и граничными условиями не приводится, поэтому оценить и повторить полученные результаты с помощью другого метода не представляется возможным. Представленные результаты в статье можно квалифицировать как информационный шум или макулатура.

В монографии Мусаева В.К. [10] представлены актуальные исследования о безопасности уникальных объектов, которые сталкиваются с нестационарными волновыми нагрузками, возникающими в деформируемых упругих и упруговязкопластических средах. Для решения этих задач переходного (волнового) процесса применяется математическое моделирование. В монографии получены напряжения (контурные и компоненты тензора) в характерных областях исследуемых объектов на ударные, взрывные и сейсмические волновые воздействия.

Моделирование волн напряжений в разных деформируемых телах различной формы и оценка достоверности приведены в статье Musayev V.K. [20].

Целью другой работы этого же автора [21] является рассмотрение задач численного моделирования сейсмостойкости сооружений с основанием в виде упругой полуплоскости при нестационарных волновых воздействиях. Моделирование задач переходного периода является актуальной фундаментальной и прикладной научной задачей. При разработке программного пакета использовался алгоритмический язык Fortran-90. Для оценки физической достоверности и математической точности рассматривается задача о воздействии плоской продольной волны на упругую полуплоскость в виде четырех трапеций и в виде двух полупериодов синусоиды. Рассматривается задача о воздействии плоской продольной упругой волны в виде функции Хевисайда или ступенчатой функции на консоль с основанием (соотношение ширины к высоте – один к десяти). Рассматривается задача о воздействии плоской продольной упругой волны в виде функции Хевисайда на десятиэтажное здание с основанием в виде полуплоскости. Получены напряжения и в характерных областях исследуемой задачи. На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы. Упругие контурные напряжения по бокам

консоли и десятиэтажного здания являются почти зеркальным отражением друг друга, то есть антисимметричны. Консоль и несущие конструкции здания работают как балка во время сейсмической активности, то есть, если с одной стороны возникают растягивающие напряжения, то с другой – сжимающие. При сейсмическом воздействии на контурах консоли и несущих конструкций здания преобладают изгибные волны.

В работе Musayev V.K. [22] рассматривается задача о математическом моделировании нестационарных сейсмических волн в упругой полуплоскости с вертикальной прямоугольной полостью, заполненной водой. Для оценки достоверности разработанной методики, алгоритма и комплекса программ была решена задача о воздействии плоской продольной волны в виде функции Хевисайда на упругую полуплоскость. Численное решение количественно соответствует аналитическому решению. Решена задача о математическом моделировании нестационарных упругих волн напряжений в полуплоскости с полостью, заполненной водой (соотношение ширины к высоте один к десяти) при сейсмическом воздействии. В характерных областях исследуемой задачи получены контурные напряжения и компоненты тензора напряжений. Пустота, заполненная водой, с соотношением ширины к высоте один к десяти, уменьшает величину упругого контурного напряжения.

В статье Musayev V.K. [23] рассматривается математическое моделирование нестационарных плоских, дифракционных, поверхностных и изгибных волн напряжений в различных строительных объектах сложной формы. Для решения этой задачи используется нестационарное волновое уравнение вычислительной механики деформируемого твердого тела. В исследовании проводится сравнение с результатами аналитических и экспериментальных методов, а также рассматривается задача о воздействии плоской продольной упругой волны на свободное круглое отверстие. В статье также рассматривается воздействие плоской продольной упругой волны на подкрепленное круглое отверстие и воздействие сейсмической нестационарной волны на бетонные плотины с основанием под воздействием плоской продольной упругой волны. В рассматриваемых задачах сейсмической безопасности плотин преобладают изгибные волны. Проведенное исследование напряженного состояния нестационарной волны показывает, что результаты численного моделирования соответствуют характеру повреждений, наблюдаемых на плотине Койна после землетрясения. В исследовании решается задача математического моделирования нестационарных волн упругих напряжений (импульс в виде ступеньки) в полуплоскости с воздушной полостью (соотношение ширины и высоты один к десяти) при сейсмическом воздействии, а также при локализованной взрывной нагрузке в форме треугольного импульса.

В этой статье (Musayev V.K. [24]) представлены результаты математического (численного) моделирования нестационарных волн в подземных конструкциях, которые возникают из-за взрывов (как внутренних, так и внешних) и сейсмической активности. С помощью разработанного вычислительного комплекса программ была решена задача о воздействии импульса в виде синусоидальной волны, охватывающей три полупериода. Проведено сопоставление волн напряжений для оценки точности и достоверности разработанного численного метода. Были рассмотрены следующие сценарии. Внутреннее нестационарное взрывное воздействие (треугольный импульс) в подземном сооружении и его влияние на окружающую среду. Внешнее взрывное воздействие на подземное сооружение (импульс треугольного вида). Фундаментальное сейсмическое воздействие (импульс в виде ступеньки) на подземное сооружение. Были получены новые результаты, касающиеся контурных напряжений.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенный анализ литературы позволяет сделать следующие выводы.

1. Постановка решаемой задачи должна удовлетворять всем условиям корректности для волновых задач, в том числе расчетная схема должна быть представлена в декартовой или в другой системе координат.
2. Полученные результаты должны быть понятны читателями для оценки и возможности повторить другим численным методом.
3. Оценку несущей способности и прочности для технических систем можно реализовать с помощью напряженного состояния.
4. Физическая достоверность и математическая точность должна быть реализована для напряженного состояния, так как из перемещений переход к деформациям реализуется через производную, при этом теряется точность полученных результатов.

Выше приведенным критериям удовлетворяют научные работы выполненные Мусаяевым В.К. и его учениками [1, 6, 8–15, 20–24].

Таким образом, исследования в статье о сейсмическом воздействии на мелкозаглубленное сооружение является актуальным и удовлетворяет всем критериям, представленным выше.

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Для моделирования нестационарных волн в деформируемых телах рассмотрено некоторое тело в прямоугольной декартовой системе координат, которому в начальный момент времени сообщается импульсное механическое воздействие. Для решения задачи о распространении волн напряжений в деформируемых телах применяем уравнения динамической теории

упругости [10]. Систему уравнений в некоторой области деформируемого тела, следует интегрировать при начальных и граничных условиях. Для решения нестационарной динамической задачи теории упругости с начальными и граничными условиями (задача Коши) используем метод конечных элементов (численное моделирование уравнений переходного процесса). Задача решается с помощью метода математического моделирования (вычислительный эксперимент) для распространения нестационарных волн напряжений в сложных деформируемых объектах. С помощью метода Галеркина, получена двумерная явная двухслойная линейная схема для внутренних и граничных узловых точек исследуемых объектов. Шаг по временной переменной определяем из условия Куранта-Фридрихса-Леви. Систему с бесконечным числом неизвестных привели к системе с конечным числом неизвестных. Исследуемая область разбивается на конечные элементы первого порядка, так как конечные элементы первого порядка позволяют хорошо моделировать фронты нестационарных волн в деформируемых телах, а также аппроксимировать разрывы на фронтах различных волн. На основе численного метода конечных элементов разработана методика, разработан алгоритм и составлен комплекс программ для решения двумерных волновых задач динамической теории упругости. Оценка точности и достоверности (верификация) рассматриваемого численного метода, алгоритма и комплекса программ приведена в следующих работах [1, 6, 8–15, 20–24]. Приводится численное решение задачи о моделировании нестационарных сейсмических волн на мелкозаглубленное сооружение.

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ

Рассматривается задача о распространении в упругой полуплоскости (рис. 1) плоской продольной волны в виде двух трапеций и двух треугольников (рис. 2) для оценки физической достоверности и математической точности [10].

Исследуемая задача впервые решена В.К. Мусеевым с помощью разработанной методики, алгоритма и комплекса программ [10].

Расчеты проводились при следующих единицах измерения: килограмм-сила (кгс); сантиметр (см); секунда (с). Для перехода в другие единицы измерения были приняты следующие допущения: $1 \text{ кгс/см}^2 \approx 0,1 \text{ МПа}$; $1 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{см}^4 \approx 10^9 \text{ кг/м}^3$.

На границе полуплоскости АВ (рис. 1) приложено нормальное напряжение σ_y , которое изменяется от $0 \leq n \leq 101$ ($n=t/\Delta t$) и максимальное значение равно P ($P=\sigma_0$, $\sigma_0 = -0,1 \text{ МПа}$ (-1 кгс/см^2)). Граничные условия для контура BCDA при $t=0$ $u=v=\dot{u}=\dot{v}$. Отраженные волны от контура BCDA не доходят до исследуемых точек при $0 \leq n \leq 160$. Расчеты проведены при следующих исходных данных: $H=\Delta x=\Delta y$; $\Delta t=1,862 \times 10^{-6} \text{ с}$;

$E=2,1 \times 10^5 \text{ МПа}$ ($2,1 \times 10^6 \text{ кгс/см}^2$); $\nu=0,3$; $\rho=0,8 \times 10^4 \text{ кг/м}^3$ ($0,8 \times 10^{-5} \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{см}^4$); $C_p = 5371 \text{ м/с}$; $C_s = 3177 \text{ м/с}$. Исследуемая расчетная (аппроксимированная) область имеет 2004002 узловые точки. Решается система уравнений из 8016008 неизвестных по явной двухслойной схеме. Результаты расчетов волновых напряжений получены в характерных точках B1-B10 исследуемой области (рис. 1). В качестве примера на рис. 3 приводится изменение нормального напряжения σ_y ($\sigma_y = \sigma_y / |\sigma_0|$) (рис. 1) во времени n в точке B1 (1 – численное решение; 2 – аналитическое решение).

В данном случае можно использовать условия на фронте плоской волны, которые изложены в работе Тимошенко С.П., Гудьер Д. [16]. На фронте плоской продольной волны имеются следующие аналитические зависимости для плоского напряженного состояния: $\sigma_y = -|\sigma_0|$. Отсюда видим, что точное решение задачи соответствует воздействию σ_0 (рис. 2).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В МЕЛКОЗАГЛУБЛЕННОМ СООРУЖЕНИИ ПРИ ВНЕШНЕМ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Рассматривается задача о моделировании напряженного состояния в сооружении неглубокого заложения (рис. 4) при волновом сейсмическом воздействии в виде ступеньки или функции Хевисайда (рис. 5).

Расчеты проводились при следующих единицах измерения: килограмм-сила (кгс); сантиметр (см); секунда (с). Для перехода в другие единицы измерения были приняты следующие допущения: $1 \text{ кгс/см}^2 \approx 0,1 \text{ МПа}$; $1 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{см}^4 \approx 10^9 \text{ кг/м}^3$. Исследуемая задача впервые решена В.К. Мусеевым с помощью разработанной методики, алгоритма и комплекса программ [10].

Начальные условия приняты нулевыми. От точки F параллельно свободной поверхности GFE приложено нормальное напряжение σ_x , которое при $0 \leq n \leq 11$

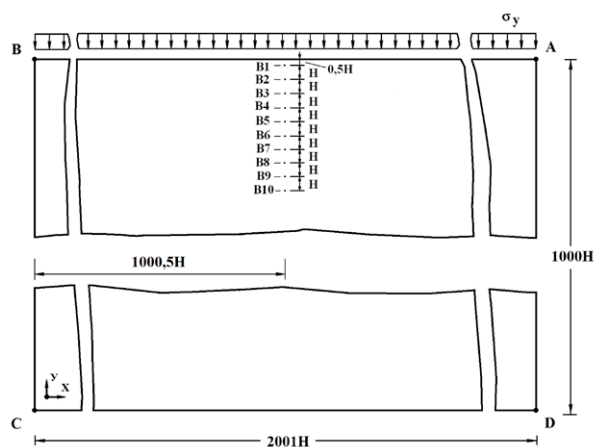


Рис. 1.

Постановка задачи о распространении плоских продольных волн в виде двух трапеций и двух треугольников в упругой полуплоскости. Составлено автором

($n=t/\Delta t$) изменяется от 0 до P ($P=\sigma_0$, $\sigma_0=0,1$ МПа ($1 \text{ кгс}/\text{см}^2$)). Граничные условия для контура ГНГА объекта при $t>0$ $u=v=\dot{u}=\dot{v}=0$. Отраженные волны от контура ГНГА объекта не доходят до исследуемых точек при $0 \leq n \leq 500$. Решается система уравнений из 16016004 неизвестных. Контурные напряжения получены в точках А1-А10 (рис. 6).

Расчеты проведены при следующих исходных данных: $H=\Delta x=\Delta y$; $\Delta t=1,393 \times 10^{-6}$ с; $E=3,15 \times 10^4$ МПа ($3,15 \times 10^5 \text{ кгс}/\text{см}^2$); $\nu=0,2$; $\rho=0,255 \times 10^4 \text{ кг}/\text{м}^3$ ($0,255 \times 10^{-5} \text{ кгс}/\text{см}^3$); $C_p=3587 \text{ м}/\text{с}$; $C_s=2269 \text{ м}/\text{с}$. Контурное напряжение σ_k получено в точках А1 (рис. 7), А4 (рис. 8), А8 (рис. 9) и А10 (рис. 10).

ВЫВОДЫ

1. Для анализа нестационарных волновых задач был создан набор программных инструментов, разработанный Мусавым В.К.
2. В результате исследования научных трудов, посвященных динамическому моделированию деформируемых объектов, был разработан ряд рекомендаций.
3. Доказано, что для корректного решения задачи необходимо, чтобы все условия были соблюдены, в

том числе использование любой системы координат в расчетной схеме.

4. Результаты, которые были получены, должны быть доступны для понимания читателями, чтобы они могли оценить их и воспроизвести другими численными методами.
5. Для определения способности технических систем выдерживать нагрузки и сохранять целостность можно использовать анализ напряженного состояния.

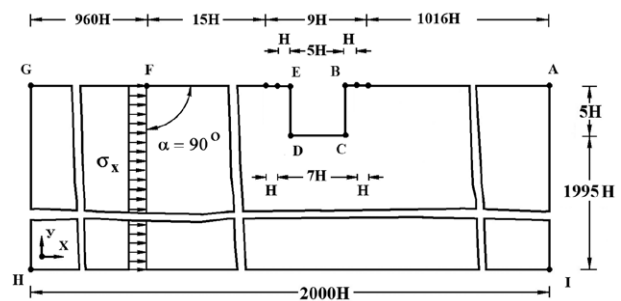


Рис. 4.

Постановка задачи о сейсмическом волновом воздействии на мелкозаглубленное сооружение. Составлено автором

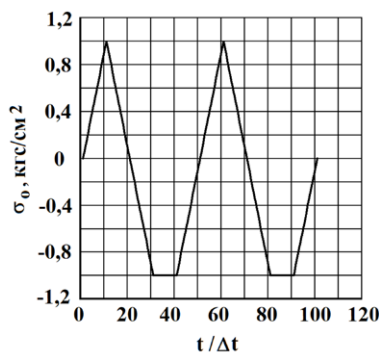


Рис. 2.

Импульсное воздействие в виде двух периодов из треугольника и трапеции. Составлено автором

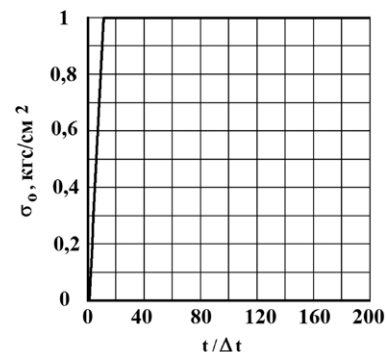


Рис. 5.

Импульсное воздействие в виде ступеньки. Начальные условия приняты нулевыми. Составлено автором

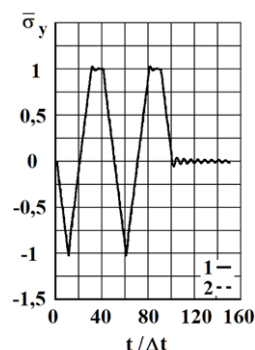


Рис. 3.

Изменение упругого нормального напряжения σ_y во времени в точке В: 1 — численное (цифровое) решение; 2 — аналитическое (точное) решение. Составлено автором

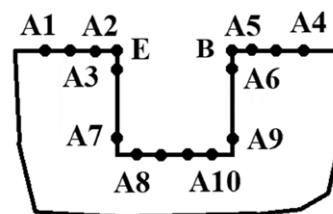


Рис. 6.

Точки, в которых получены упругие напряжения в сооружении неглубокого заложения. Составлено автором

6. Для того чтобы обеспечить достоверность численного метода расчетов напряженного состояния, необходимо провести верификацию. Это связано с тем, что при переходе от перемещений к деформациям через производную происходит потеря точности полученных результатов.
7. Была решена задача о распространении волны в упругой полуплоскости импульса, состоящего из двух периодов треугольника и трапеции. Сравнение полученных результатов с точным решением позволяет сделать вывод о том, что разработанный вычислительный комплекс продемонстрировал их полное соответствие.
8. Была решена задача, связанная с сейсмическим влиянием на конструкцию, которая находится на небольшой глубине. Сейсмическое воздействие моделировалось в виде резкого изменения интенсивности. В результате были определены напряжения в ключевых зонах рассматриваемой задачи.

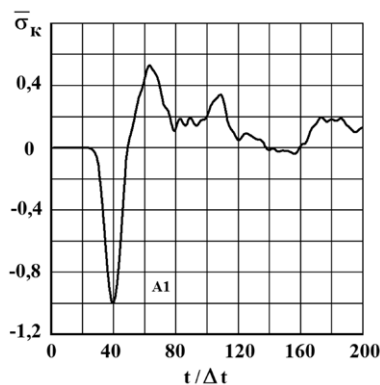


РИС. 7.

Изменение упругого контурного напряжения в точке A1 во времени. Составлено автором

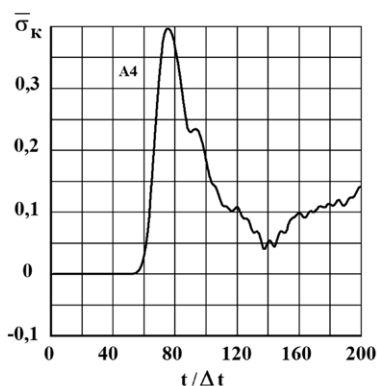


РИС. 8.

Изменение упругого контурного напряжения в точке A4 во времени. Составлено автором

ЛИТЕРАТУРА

1. Дикова Е.В. Достоверность численного метода, алгоритма и комплекса программ В.К. Мусаева при решении задачи о распространении плоских продольных упругих волн (восходящая часть – линейная, нисходящая часть – четверть круга) в полуплоскости // Международный журнал экспериментального образования. 2016. № 12–3. С. 354–357.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 543 с.
3. Кольский Г. Волны напряжений в твердых телах. М.: Иностранная литература, 1955. 192 с.
4. Кузнецов С.В., Нафасов А.Э. Моделирование распространения сейсмических волн и их взаимодействия с горизонтальными сейсмическими барьерами // Вестник НИЦ строительство. Исследования по теории сооружений. 2011. № 3–4. С. 43–54.
5. Кукуджанов В.Н., Кузнецов С.В., Гришин А.С., Левитин А.А. Исследование распространения ударных волн в упругом слое и призма-

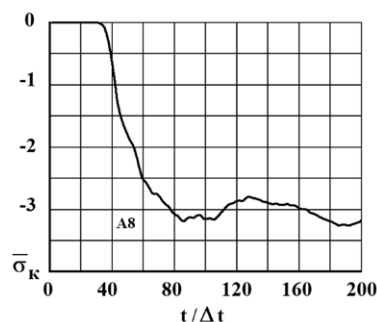


РИС. 9.

Изменение упругого контурного напряжения в точке A8 во времени. Составлено автором

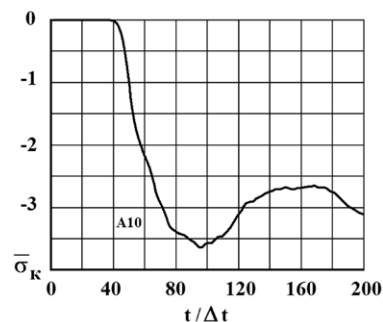


РИС. 10.

Изменение упругого контурного напряжения в точке A10 во времени. Составлено автором

- тическом стержне // Вестник НИЦ строительство. Исследования по теории сооружений. 2011. № 3–4. С. 35–42.
6. Куранцов В.А., Стародубцев В.В., Мусаев А.В., Самойлов С.Н., Кузнецов М.Е. Моделирование импульса (первая ветвь: восходящая часть – четверть круга, нисходящая часть – линейная; вторая ветвь: треугольник) в упругой полуплоскости с помощью численного метода Мусаева В.К. // Проблемы безопасности российского общества. 2017. № 2. С. 51–55.
 7. Морозов Н.Ф., Братков В.А., Кузнецов С.В. Сейсмические барьеры для защиты от поверхностных и головных волн: множественные рассеиватели и метаматериалы // Известия российской академии наук. Механика твердого тела. № 6. 2021. С. 33–44.
 8. Мусаев В.К. О моделировании сейсмической волны параллельной свободной поверхности упругой полуплоскости // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2009. № 4. С. 61–64.
 9. Мусаев В.К. Применение волновой теории сейсмического воздействия для моделирования упругих напряжений в Курпсайской плотине с грунтовым основанием при незаполненном водохранилище // Геология и геофизика Юга России. 2017. № 2. С. 98–105.
 10. Мусаев В.К. Математическое моделирование нестационарных волн напряжений в деформируемых телах при ударных, взрывных и сейсмических воздействиях. М.: Российский университет транспорта, 2021. 629 с. ISBN 978-5-7473-1067-4.
 11. Спиридонов В.П. Определение некоторых закономерностей волнового напряженного состояния в геобъектах с помощью численного метода, алгоритма и комплекса программ В.К. Мусаева // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 12–5. С. 832–835.
 12. Стародубцев В.В., Мусаев А.В., Куранцов В.А., Мусаева С.В., Кулагина Н.В. Оценка точности и достоверности моделирования плоских нестационарных упругих волн напряжений (треугольный импульс) в полуплоскости с помощью численного метода, алгоритма и комплекса программ Мусаева В.К. // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Мат-лы XXIV Междунар. конф. М.: РГГУ. 2016. С. 352–355.
 13. Стародубцев В.В., Акатьев С.В., Мусаев А.В., Шиянов С.М., Куранцов О.В. Моделирование упругих волн в виде импульсного воздействия (восходящая часть – четверть круга, нисходящая часть – четверть круга) в полуплоскости с помощью численного метода Мусаева В.К. // Проблемы безопасности российского общества. 2017. № 1. С. 36–40.
 14. Стародубцев В.В., Акатьев С.В., Мусаев А.В., Шиянов С.М., Куранцов О.В. Моделирование с помощью численного метода Мусаева В.К. нестационарных упругих волн в виде импульсного воздействия (восходящая часть – четверть круга, средняя – горизонтальная, нисходящая часть – линейная) в сплошной деформируемой среде // Проблемы безопасности российского общества. 2017. № 1. С. 63–68.
 15. Стародубцев В.В., Мусаев А.В., Дикова Е.В., Крылов А.И. Моделирование достоверности и точности импульсного воздействия в упругой полуплоскости с помощью численного метода, алгоритма и комплекса программ Мусаева В.К. // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Мат-лы Всероссийской конф. с междунар. участием. М.: РУДН. 2017. С. 339–341.
 16. Тимошенко С.П., Гудьер Д. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.
 17. BELOSTOTSKY A.M., AKIMOV P.A., DMITRIEV D.S. About methods of seismic analysis of underground structures // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Vol. 14, Is. 3. P. 14–25.
 18. BELOSTOTSKY A.M., POTAPENKO A.L., AKIMOV P.A. Universal software system «STADTO» for the numerical solution of linear and nonlinear problems of the field theory, statics, stability and dynamics of spatial combined systems: general parameters and superelemental featerus // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Vol. 14, Is. 3. P. 26–41.
 19. BRATOV V.A., ILYASHENKO A.V., KUZNETSOV S.V., LIN T.-K., MOROZOV N.F. Homogeneous horizontal and vertical seismic barriers: Mathematical foundation and dimensional analysis // Materials Physics and Mechanics. 2019. 44 (2020). P. 61–65.
 20. MUSAYEV V.K. Estimation of accuracy of the results of numerical simulation of unsteady wave of the stress in deformable objects of complex shape // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2015. Vol. 11, Is. 1. P. 135–146.
 21. MUSAYEV V.K. Computer simulation of unsteady elastic stress waves in a console and a ten-storey building under fundamental influence in the form of a Heaviside function // RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies. 2022. N14(2). P. 187–196.
 22. MUSAYEV V.K. Modeling of seismic waves stresses in a half-plane with a vertical cavity filled with water (the ratio of width to height is one to ten) // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18, Is. 3. P. 114–125.
 23. MUSAYEV V.K. Mathematical Modeling of Stresses Under Unsteady Wave Action in Geo-Objects // Power Technology and Engineering. 2023. 57(3). P. 351–364.
 24. MUSAYEV V.K. Mathematical Modeling of Explosive and Seismic Impacts on an Underground Structure

// Power Technology and Engineering. 2024. 57(6). P. 875–881.

REFERENCES

1. DIKOVA E.V. Reliability of the numerical method, algorithm and software package Musayev V.K. in solving the problem of propagation of plane longitudinal elastic waves (ascending part-linear, descending part-quarter circle) in a half-plane. *Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*. 2016;12–3:354–357. (In Russian).
2. ZENKEVICH O. The finite element method in engineering. Moscow: Mir, 1975:543. (In Russian).
3. KOI'SKII G. Stress waves in solids. Moscow: Inostrannaya literatura, 1955:192. (In Russian).
4. KUZNETSOV S.V., NAFASOV A.E. Modeling the propagation of seismic waves and their interaction with horizontal seismic barriers. *Vestnik NITS stroitel'stvo. Issledovaniya po teorii sooruzheniy*. 2011;3–4:43–54. (in Russian).
5. KUKUDZHANOV V.N., KUZNETSOV S.V., GRISHIN A.S., LEVITIN A.L. Investigation of shock wave propagation in an elastic layer and a prismatic rod. *Vestnik NITS stroitel'stvo. Issledovaniya po teorii sooruzheniy*. 2011;3–4: 35–42. (In Russian).
6. KURANTSOV V.A., STARODUBTSEV V.V., MUSAYEV A.V., SAMOILOV S.N., KUZNETSOV M.E. Pulse modeling (first branch: ascending part – quarter circle, descending part – linear; second branch: triangle) in an elastic half-plane using the numerical method of Musayev V.K. *Problemy bezopasnosti rossiyskogo obshchestva*. 2017;2:51–55. (In Russian).
7. MOROZOV N.F., BRATKOV V.A., KUZNETSOV S.V. Seismic barriers for protection against surface and head-waves: multiple scatterers and metamaterials. *Izvestiya rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela*. 2021;6:33–44. (In Russian).
8. MUSAYEV V.K. On modeling a seismic wave parallel to the free surface of an elastic half-plane. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy*. 2009;4:61–64. (In Russian).
9. MUSAYEV V.K. Application of the wave theory of seismic impact for modeling elastic stresses in the Kurpsai dam with a soil base in an unfilled reservoir. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*. 2017;2:98–105. (In Russian).
10. MUSAYEV V.K. Mathematical modeling of unsteady stress waves in deformable bodies under shock, explosive and seismic impacts. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta, 2021:629. ISBN 978-5-7473-1067-4. (In Russian).
11. SPIRIDONOV V.P. Determination of some patterns of the wave stress state in geo objects using the numerical method, algorithm and software package of Musayev V.K. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*. 2015;12–5:832–835. (In Russian).
12. STARODUBTSEV V.V., MUSAYEV A.V., KURANTSOV V.A., MUSAEVA S.V., KULAGINA N.V. Evaluation of the accuracy and reliability of modeling plane unsteady elastic stress waves (triangular pulse) in a half-plane using the numerical method, algorithm and software package of Musayev V.K. Problems of security management of complex systems. Materials of the XXIV International Conference. Moscow: RGGU. 2016:352–355. (In Russian).
13. STARODUBTSEV V.V., AKATIEV S.V., MUSAYEV A.V., SHIYANOV S.M., KURANTSOV O.V. Modeling of elastic waves in the form of pulsed action (ascending part is a quarter circle, descending part is a quarter circle) in a half-plane using the numerical method of Musayev V.K. *Problemy bezopasnosti rossiyskogo obshchestva*. 2017;1:36–40. (In Russian).
14. STARODUBTSEV V.V., AKATIEV S.V., MUSAYEV A.V., SHIYANOV S.M., KURANTSOV O.V. Modeling using the numerical method of Musayev V.K. Unsteady elastic waves in the form of pulsed action (ascending part – quarter circle, middle – horizontal, descending part – linear) in a continuous deformable medium. *Problemy bezopasnosti rossiyskogo obshchestva*. 2017;1:63–68. (In Russian).
15. STARODUBTSEV V.V., MUSAYEV A.V., DIKOVA E.V., KRYLOV A.I. Modeling the reliability and accuracy of pulse action in an elastic half-plane using a numerical method, algorithm and software package V.K. Musayev. Information and telecommunication technologies and mathematical modeling of high-tech systems. Materials of the All-Russian conference with international participation. Moscow: RUDN. 2017:339–341. (In Russian).
16. TIMOSHENKO S.P., GOODYEAR D. Theory of elasticity. Moscow: Nauka. 1975:576. (In Russian).
17. BELOSTOTSKY A.M., AKIMOV P.A., DMITRIEV D.S. About methods of seismic analysis of underground structures. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018;14;(3):14–25.
18. BELOSTOTSKY A.M., POTAPENKO A.L., AKIMOV P.A. Universal software system «STADTO» for the numerical solution of linear and nonlinear problems of the field theory, statics, stability and dynamics of spatial combined systems: general parameters and superelemental featerus. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018;14;(3):26–41.
19. BRATOV V.A., ILYASHENKO A.V., KUZNETSOV S.V., LIN T.-K., MOROZOV N.F. Homogeneous horizontal and vertical seismic barriers: Mathematical foundation and dimensional analysis. *Materials Physics and Mechanics*. 2019;44;(2020):61–65.
20. MUSAYEV V.K. Estimation of accuracy of the results of numerical simulation of unsteady wave of the stress in deformable objects of complex shape. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2015;11;1:135–146.

21. MUSAYEV V.K. Computer simulation of unsteady elastic stress waves in a console and a ten-storey building under fundamental influence in the form of a Heaviside function. RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies. 2022.;14;(2):187–196.
22. MUSAYEV V.K. Modeling of seismic waves stresses in a half-plane with a vertical cavity filled with water (the ratio of width to height is one to ten). International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022;18;(3):114–125.
23. MUSAYEV V.K. Mathematical Modeling of Stresses Under Unsteady Wave Action in Geo-Objects. Power Technology and Engineering. 2023;57;(3):351–364.
24. MUSAYEV V.K. Mathematical Modeling of Explosive and Seismic Impacts on an Underground Structure. Power Technology and Engineering. 2024;57(6):875–881.

Мусаев Вячеслав Кадыр оглы,
д.т.н., профессор Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе, Центрального научно-исследовательского и проектного института Минстроя России, Российского университета транспорта, Российской академии ракетных и артиллерийских наук

☎ 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
117997, Moscow, Miklukho-Maklaya st., 23,
тел.: +7 (926) 567-05-58, e-mail: musayev-vk@yandex.ru