

# Математическое Моделирование Импульсного Воздействия на Заглубленные в Грунт Объекты

Гуцуляк Е., Секриеру Г.

Лаборатория «Математическое моделирование»

Институт Математики и Информатики

Кишинев, Молдова

elena.gutuleac@math.md, secieru@renam.md

**Abstract** — The paper presents the computational results on the specific problems calculation at intensive dynamic loads. The two-dimensional image field of calculation given to show dynamics process of passing of shock waves, wave loading and unloading, as well as process the deformation of the investigated structures. The critical load levels that lead to the buried projectiles explosion were given.

**Ключевые слова** — математическое моделирование, динамические нагрузки, численные расчеты, сейсмическое воздействие, заглубленные конструкции.

## I. ВЕДЕНИЕ

Проблема компьютерной оценки состояния объектов, представляющие экологические риски, является весьма актуальной из-за наличия постоянных угроз их деформирования или разрушения при импульсных нагрузках. К категории потенциально опасных объектов относятся конструкции, которые используются для хранения, транспортировки или уничтожения воспламеняющихся, взрывчатых и высокотоксичных веществ. Высокоточное воспроизведение и визуализация сложных физических процессов в ходе эксплуатации таких объектов на основе их математического моделирования без натуральных экспериментов является важным научно-практическим результатом. Исследование воздействия сейсмической волны на конструкции, заполненные агрессивными или легковоспламеняющимися веществами, представляет значительный интерес, учитывая тот факт, что Молдова находится в зоне высокой сейсмической активности. Сейсмическое воздействие представляет собой волновое поле, характеристики которого носят случайный характер и зависят от среднего периода сотрясений за рассматриваемый срок. В работе представлено описание математической модели и анализ результатов численных расчетов по исследованию воздействия сейсмической волны на заглубленные в грунт объекты. Динамика поведения конструкций и других эффектов демонстрируется двумерными изображениями области расчета в различные моменты времени.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для описания поведения материала конструкции и ее заполнителя была выбрана двумерная модель упругопластической среды. Математическая модель включает в себя систему определяющих уравнений, описывающих законы сохранения массы, количества движения и энергии. Уравнения состояния среды позволяют замкнуть систему и приступить к выбору численного метода и разработке алгоритма численного решения.

Для корректного описания механических параметров различных материалов, которые участвуют в расчетах, в работе приведены несколько типов уравнений состояния. Уравнения состояния, представленные ниже, позволяют моделировать упругопластическое поведение более пятидесяти основных конструкционных материалов, воды, грунта и продуктов детонации [1, 3]:

- уравнение состояния для описания взрывчатого вещества в твердой фазе

$$p = \frac{k}{n} \left( \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right) \quad (1)$$

где  $p$  - давление,  $\rho$  - плотность,  $\rho_0$  - начальная плотность,  $k$  - модуль объемного сжатия,  $n$  - константа;

- уравнение состояния для моделирования продуктов детонации взрывчатого вещества

$$p = A \rho^\gamma \quad (2)$$

где  $A, \gamma$  - константы ВВ;

- уравнение состояния для моделирования материала конструкции и заполняющего конструкцию вещества

$$p = k_1 \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) + k_2 \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^2 + k_3 \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^3 + \gamma_0 E \quad (3)$$

где  $k_1, k_2, k_3, k_4, \gamma_0$  - константы материала;

- уравнение состояния для описания трехкомпонентного грунта

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \sum_{i=1}^3 b_i \left[ \frac{k_i(p-p_0)}{\rho_i c_i^2} + 1 \right]^{-\frac{1}{k_i}} \quad (4)$$

где  $b_1, b_2, b_3$  – содержание по объему газообразного, жидкого и твердого компонентов в грунте,

$k_1, k_2, k_3$  – показатели изэнтропы,

$\rho_1, \rho_2, \rho_3$  – плотности,  $c_1, c_2, c_3$  – скорости звука соответственно в этих компонентах при начальном давлении  $p = p_0$  [3].

Для расчета профиля давления, который действует на известном расстоянии от сейсмического источника, была выбрана модель масштабного пересчета сейсмического спектра [3-5]. Сейсмическая волна генерировалась следующим образом: в качестве граничного условия на вертикальной границе расчетной области задавалась функция давления от времени  $t$

$$P(t) = (P_0 e^{-\alpha t} + P_{oc})H(t) \quad (5)$$

где  $P_0 + P_{oc} = P_{os}$  – пиковое ударное давление,  $P_{oc}$  – установившееся давление,  $\alpha$  – постоянная затухания,  $H(t)$  – единичная ступенчатая функция (рис. 1).

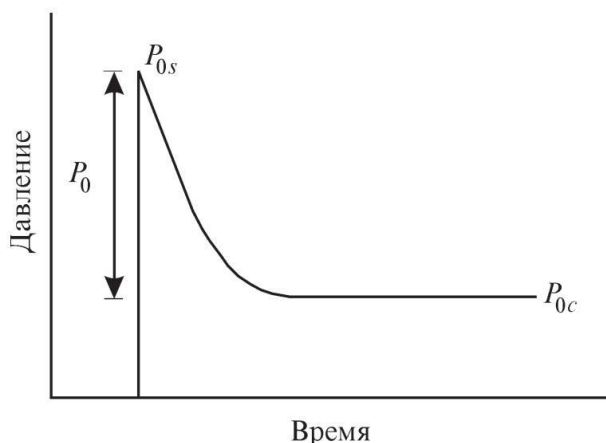


Рис. 1. Зависимость давления от времени.

### III. ПРОВЕДЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Численное решение основывается на методе конечных разностей. В начальный момент времени расчетная область представляет собой прямоугольную область в плоской системе координат. Математической базой численных расчетов является однородная конечно-разностная схема сквозного счета, основанная на модифицированной схеме Уилкинса [1] и имеющая II-ой порядок точности по пространству и по времени.

Исходная система уравнений представлена таким образом, что в единых терминах описывает упругую, упругопластическую и гидродинамическую стадии движения. Упругопластическое течение материала реализуется с помощью непрерывной корректировки напряжений таким образом, чтобы не превышать предел текучести вещества.

При проектировании вычислительного эксперимента, для решения такого рода задач, необходимо задать начальные и граничные условия, а также значения различных параметров и констант материалов для реалистичных уравнений состояния.

В ходе исследования были проведены 2 серии расчетов.

#### Вариант расчета №1.

Здесь представлены результаты моделирования сейсмического воздействия на подземный горизонтальный резервуар с жидкостью. Такие емкости предназначены для слива и хранения нефтепродуктов, химических веществ, воды, масел и др. Сейсмостойкость рассматриваемых резервуаров в немалой степени зависит от гидродинамических нагрузок от жидкого заполнителя на стенки контейнера, т. к. масса заполняющей жидкости значительно превосходит массу самого резервуара.

На рис. 2 представлено состояние рабочей области в момент времени  $t=120$  мкс. Двумерная расчетная область разделена на прямоугольные ячейки, размер области – 300 на 200 ячеек. Размеры конструкции – 210 на 140 ячеек, толщина стенок алюминиевого контейнера составляет 2 ячейки.

Контейнер заполнен жидкостью с параметрами воды и окружен водонасыщенным грунтом, который содержит 0% воздуха, 40% воды, 60% кварца. На вертикальной границе задано граничное условие по формуле (5), моделирующее сейсмическую волну с параметрами,  $P_0=17 \cdot 10^{-4}$  МБар,  $\alpha=0.02$ ,  $P_{oc}=2.8 \cdot 10^{-6}$  МБар.

Плоская волна от вертикальной границы расчетной области начала распространяться в момент времени  $t=0$  мкс, достигая торца конструкции, частично отразалась от него.

Общее время численного эксперимента составляет до 400 мкс. На внутренней горизонтальной стенке конструкции (алюминий-вода) расположены три датчика (точки, обозначенные I\_1, I\_2, I\_3), фиксирующие локальные напряжения через заданный промежуток времени слева направо (рис. 2).

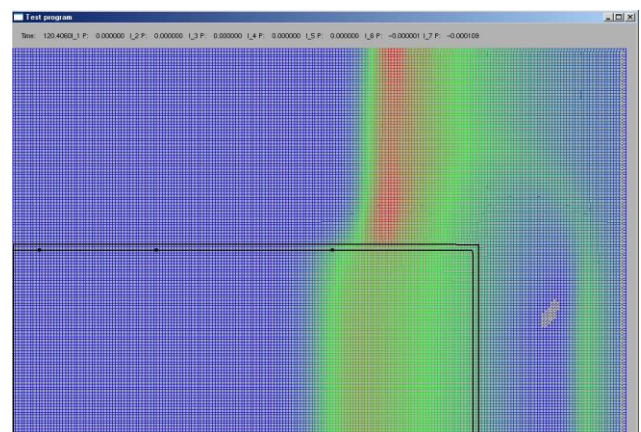


Рис. 2. Расчетная область и волновая картина в момент  $t=120$  мкс.

Заметно, что волна в воде опережает волну в грунте: это связано с тем, что скорость звука в воде больше, чем в грунте. Скорость распространения ударной волны вычисляется по формуле  $D=c+su$  (6), где  $c$  - скорость звука в веществе,  $s$  - параметр вещества,  $u$  - массовая скорость частиц вещества.

Ударная волна достигает третьего датчика в момент  $t=99.8$  мкс, второго -  $t=155.2$  мкс, первого -  $t=192.9$  мкс. Наибольшее давление (0.00218 МБар) приходится на первый датчик при  $t=255$  мкс (рис. 3).

Это объясняется, по-видимому, тем, что сейсмическая волна приводит в движение всю массу заполняющей жидкости, которая давит на первую контрольную точку. Поскольку в случае тонкостенных конструкций масса заполняющей жидкости значительно превосходит массу самой конструкции, колебания жидкости оказывают существенное влияние на поведение всей системы.

Анализ полученных численных результатов показывает, что при заданных начальных и граничных условиях не произойдет существенного деформирования или разрушения резервуара.

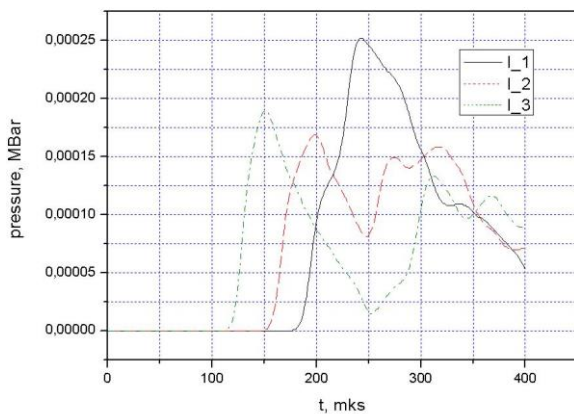


Рис. 3. Давление в контрольных точках в зависимости от времени.

#### Вариант расчета №2.

Было исследовано воздействие сейсмической волны на заглубленный в грунт снаряд с взрывателем. Снаряд моделируется как конструкция, заполненная взрывчатым веществом (ВВ) со взрывателем в торце. Взрыватель моделируется в программе прямоугольной областью с параметрами ВВ, но с более высокой чувствительностью к детонации, чем у заполняющего взрывчатого вещества (черная заштрихованная область на вертикальной стенке конструкции).

Размеры расчетной области составляют  $180 \times 100$  ячеек расчетной сетки. Снаряд моделируется как алюминиевая конструкция (ширина –  $R$ , длина -  $3R$ , толщина стенки –  $R/10$ ), заполненная взрывчатым веществом с параметрами тринитротолуола. В торце конструкции находится взрыватель (тринитротолуол, чувствительность на 4 % выше, чем у заполнителя).

Ударная волна генерировалась следующим образом: в качестве граничного условия на вертикальной границе расчетной области задавалась функция давления (5), где  $\alpha=0.02$ ,  $P_{0c}=2.8 \cdot 10^{-6}$  МБар. Начальное давление  $P_0$  принималось равным  $17 \cdot 10^{-4}$  МБар или  $19.2 \cdot 10^{-4}$  МБар.

Для значения начального давления  $P_0=17 \cdot 10^{-4}$  МБар взрыватель снаряда не сработал, для значения начального давления  $P_0=19.2 \cdot 10^{-4}$  МБар взрыватель снаряда протетонировал в момент времени  $t=51$  мкс (рис. 4).

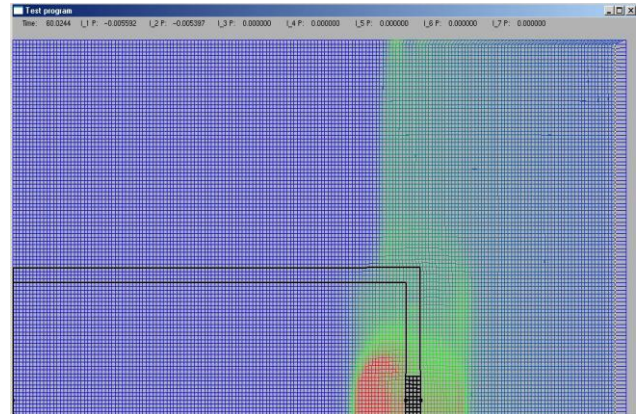


Рис. 4. Расчетная область для  $P_0=19.2 \cdot 10^{-4}$  МБар.

В обоих случаях ударная волна подходит к детонатору примерно в одно и то же время (рис. 5), но при  $P_0=17 \cdot 10^{-4}$  МБар не происходит подрыва заряда.

Из графиков давления на рис. 5 видно, что минимальное давление, при котором происходит инициирование детонации со стороны взрывателя, составляет  $P=0.0054$  МБар. Анализ полученных численных результатов показал, что при заданных начальных и граничных условиях детонация снаряда зависит, в основном, от величины начального давления  $P_0$  в функции, генерирующей сейсмическую волну.

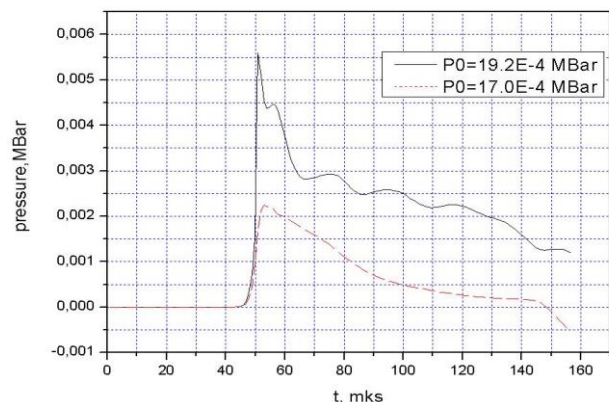


Рис. 5. Давление на границе «грунт-детонатор» для 2 значений  $P_0$

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты расчетов с помощью компьютерной программы для решения задач механики деформируемого твердого тела с учетом

влияния различных физических эффектов и характерных свойств материала. Приведены двумерные графики, которые показывают процесс прохождения ударных волн, волн нагрузки и разгрузки, а также процессы деформирования исследуемых конструкций.

Проведенные систематические расчеты, моделирующие воздействие сейсмической волны на резервуар с жидкостью результатов показывают, что при заданных начальных и граничных условиях не произойдет существенного деформирования или разрушения резервуара.

Другой тип расчетов связан с изучением воздействия сейсмической волны, на заглубленный в грунт снаряд с взрывателем. Приведены критические уровни нагрузок, которые приводят к взрыву снарядов, заглубленных в грунт.

Результаты численных экспериментов показывают, что при заданных начальных и граничных условиях критическое давление для инициирования детонации

взрывателя составляет  $P=0.0054$  МБар, а для заполнителя заряда -  $P=0.0059$  МБар.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Уилкинс М. Расчет упругопластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике. Пер. с англ. под ред. С. С. Григоряна, Ю. Д. Шмыглевского. М.: Мир, 1967. с. 212-263.
- [2] Ляхов Г.М., Покровский Г.И. Взрывные волны в грунтах. Госгортехиздат 1962. с. 104.
- [3] Навал И.К., Рыбакин Б.П., Чебан В.Г. Математическое моделирование экологических процессов. Кишинэу: "Еврика", 1998. с. 246.
- [4] Mueller R.A., Murphy J.R. Seismic characteristics of underground nuclear detonations. In: Bulletin of the Seismological Society of America, 1971, Part II, vol. 61, N 6, pp. 1693-1704.
- [5] Rybakin B., Secrieru G., Gutuleac E. Numerical analysis of reaction of buried charge to explosive or seismic loading. In: Proceedings of the International Conference on Intelligent Information Systems, 2013, Chisinau, pp. 148- 151.