

УДК 539.3

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСРЕДОТОЧЕННОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО УПРУГОГО ВЗРЫВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НАДЗЕМНЫЙ НЕФТЕПРОВОД С ОСНОВАНИЕМ В ВИДЕ ПОЛУПЛОСКОСТИ

**Мусаев В.К.**

*Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II,  
Москва, e-mail: musayev-vk@yandex.ru*

В работе приводится некоторая информация моделирования сосредоточенного вертикального взрывного воздействия на надземный нефтепровод с основанием в виде полуплоскости. Рассматривается волновая теория взрывной безопасности. Приводится информация о различных вариантах приложения взрывного воздействия на поверхности упругой полуплоскости. Решается система уравнений из 8016288 неизвестных. Взрывное воздействие моделируется в виде треугольного импульса. Приводится постановка рассматриваемых задач. Поставленная задача решается с помощью волновой теории взрывной безопасности. Для решения двумерной нестационарной динамической задачи математической теории упругости с начальными и граничными условиями используем метод конечных элементов в перемещениях. Задача решается методом сквозного счета, без выделения разрывов. Применяется однородный алгоритм. С помощью метода конечных элементов в перемещениях, линейную задачу с начальными и граничными условиями привели к линейной задаче Коши. В работе приводится постановка для четырех задач.

**Ключевые слова:** численный метод, алгоритм, комплекс программ Мусаева В.К., нестационарные упругие волны, динамика сплошных сред, волновая теория взрывной безопасности, физическая точность, математическая достоверность, верификация, фундаментальное воздействие, полуплоскость, неотражающие граничные условия, исследуемая расчетная область, нефтепровод, надземное сооружение, надземный нефтепровод, полуплоскость, треугольный импульс, дельта функция

## NUMERICAL SIMULATION OF UNSTEADY ELASTIC FOCUSING OF BLAST EFFECTS ON ABOVE-GROUND PIPELINE WITH A BASE IN THE FORM OF A HALF-PLANE

**Musayev V.K.**

*Moscow state transport University of Emperor Nicholas II, Moscow, e-mail: musayev-vk@yandex.ru*

The paper provides some information centered vertical modeling of blast effects on above-ground pipeline with a base in the form of a half-plane. Considered the wave theory of explosive safety. Provides information on different variants of application of the explosive impact on the surface of an elastic half-plane. Solve the system of equations of 8016288 unknown. Explosive impact is modeled as a triangular pulse. A formulation of the problems under consideration. The problem is solved using wave theory to explosive safety. For solving two-dimensional nonstationary dynamic problems of mathematical elasticity theory with initial and boundary conditions we use the method of finite elements in displacements. The problem is solved by the method of end-to-end account, without allocation of breaks. Applies a uniform algorithm. Using the method of finite elements in displacements, a linear problem with initial and boundary conditions led to a linear Cauchy problem. This paper provides a formulation for the four tasks.

**Keywords:** numerical method, algorithm, software complex Musayev V.K., unsteady elastic waves, dynamics of continuous media, wave theory's explosive safety, physical accuracy, mathematical accuracy, verification, and fundamental effects, half-plane, non-reflective boundary conditions, the investigated design region, pipeline, aerial construction, aerial pipeline, half-plane, a triangular pulse, of Delta function

Рассматриваются вопросы численно-го моделирования взрывного воздействия на надземный нефтепровод с основанием в виде полуплоскости.

В работах [1–10] приведена информация о моделировании нестационарных волн напряжений в деформируемых телах сложной формы с помощью рассматриваемого численного метода, алгоритма и комплекса программ.

Некоторая информация о физической достоверности и математической точности рассматриваемого численного метода, алгоритма и комплекса программ приведена в следующих работах [6–10].

### Постановка волновой задачи нестационарной теории упругости

Для решения задачи о моделировании нестационарных волн в упругих деформи-

руемых средах рассмотрим некоторое тело  $\Gamma$  в прямоугольной декартовой системе координат  $ХОУ$ , которому в начальный момент времени  $t=0$  сообщается механическое воздействие.

Предположим, что тело  $\Gamma$  изготовлено из однородного изотропного материала, подчиняющегося упругому закону Гука при малых упругих деформациях.

Точные уравнения двумерной (плоское напряженное состояние) динамической теории упругости имеют вид

$$\begin{aligned} \left\| \begin{matrix} \sigma_x, \tau_{xy} \\ \tau_{xy}, \sigma_y \end{matrix} \right\| \cdot \left\| \frac{\partial}{\partial x} \right\| &= \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left\| \begin{matrix} u \\ v \end{matrix} \right\|, (x, y) \in \Gamma, \\ \left\| \begin{matrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{matrix} \right\| &= \rho \left\| \begin{matrix} C_p^2, & C_p^2 - 2C_s^2, & 0 \\ C_p^2 - 2C_s^2, & C_p^2, & 0 \\ 0, & 0, & C_s^2 \end{matrix} \right\| \cdot \left\| \begin{matrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{matrix} \right\|, \\ \left\| \begin{matrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{matrix} \right\| &= \left\| \begin{matrix} \frac{\partial}{\partial x}, 0 \\ 0, & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y}, & \frac{\partial}{\partial x} \end{matrix} \right\| \cdot \left\| \begin{matrix} u \\ v \end{matrix} \right\|, (x, y) \in (\Gamma \cup S), \quad (1) \end{aligned}$$

где  $\sigma_x, \sigma_y$  и  $\tau_{xy}$  – компоненты тензора упругих напряжений;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  и  $\gamma_{xy}$  – ком-

поненты тензора упругих деформаций;  $u$  и  $v$  – составляющие вектора упругих перемещений вдоль осей  $ОХ$  и  $ОУ$  соответственно;  $\rho$  – плотность материала;

$C_p = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$  – скорость продольной упругой волны;

$C_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$  – скорость поперечной упругой волны;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости;  $S (S_1 \cup S_2)$  – граничный контур тела  $\Gamma$ .

Систему (1) в области, занимаемой телом  $\Gamma$ , следует интегрировать при начальных и граничных условиях.

Для прогноза безопасности надземного нефтепровода при поверхностных сосредоточенных взрывных воздействиях применяется численное моделирование. На основе метода конечных элементов в перемещениях разработаны методика, алгоритм и комплекс программ для решения линейных двумерных плоских задач, которые позволяют решать сложные задачи при нестационарных волновых воздействиях на сооружения. Основные соотношения метода конечных элементов получены с помощью принципа возможных перемещений. Матрица упругости выражена через скорость продольных волн, скорость поперечных волн и плотность.

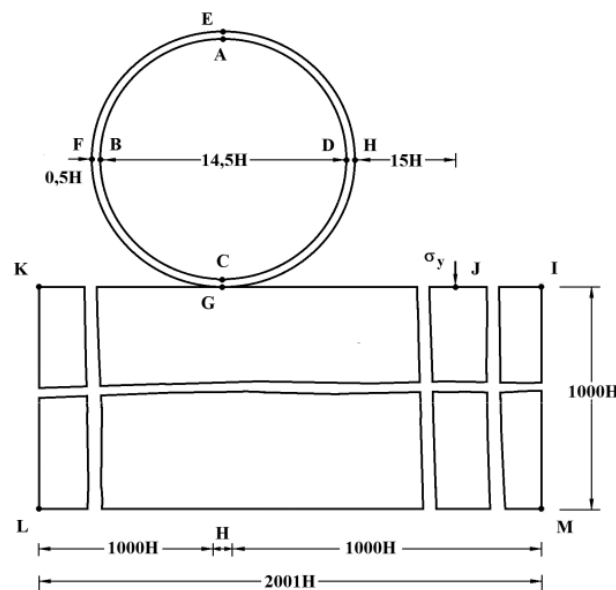


Рис. 1. Постановка задачи о воздействии сосредоточенной взрывной волны на надземный нефтепровод с основание в виде упругой полуплоскости (нагрузка приложена на расстоянии одного среднего диаметра от края трубы)

Исследуемая область разбивается по пространственным переменным на треугольные конечные элементы с тремя узловыми точками с линейной аппроксимацией упругих перемещений и на прямоугольные конечные элементы с четырьмя узловыми точками с билинейной аппроксимацией упругих перемещений. По временной переменной исследуемая область разбивается на линейные конечные элементы с двумя узловыми точками с линейной аппроксимацией упругих перемещений. За основные неизвестные приняты два перемещения и две скорости перемещений в узле конечного элемента.

Линейная динамическая задача с начальными и граничными условиями в виде дифференциальных уравнений в частных производных, для решения задач при нестационарных волновых воздействиях, с помощью метода конечных элементов в перемещениях приведена к системе линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями, которая решается по явной двухслойной схеме.

#### Постановка задач о воздействии взрывной волны на надземный нефтепровод

В работе приводится постановка для четырех задач. Расчеты проводились при следующих единицах измерения: килограмм-сила (кгс); сантиметр (см); секунда (с).

В работе для исследуемых материалов приняты следующие исходные данные. Для трубы приняты следующие исходные данные:  $H = \Delta x = \Delta y$ ;  $\Delta t = 9,309 \times 10^{-7}$  с;  $E = 2,1 \times 10^6$  кгс/см<sup>2</sup>;  $\nu = 0,3$ ;  $\rho = 0,8 \times 10^{-5}$  кгс с<sup>2</sup>/см<sup>4</sup>;  $C = 5371$  м/с;  $C_s = 3177$  м/с. Для основания приняты следующие исходные данные:  $H = \Delta x = \Delta y$ ;  $\Delta t = 2,788 \times 10^{-6}$  с;  $E = 3,15 \times 10^5$  кгс/см<sup>2</sup>;  $\nu = 0,2$ ;  $\rho = 0,255 \times 10^{-5}$  кгс с<sup>2</sup>/см<sup>4</sup>;  $C_p = 3587$  м/с;  $C_s = 2269$  м/с. Внутренний диаметр трубы равен 14,5Н. Средний диаметр трубы равен 15Н. Наружный диаметр трубы равен 15,5Н. Толщина трубы равна 0,5Н. Решается система уравнений из 8016288 неизвестных.

1. Рассмотрим задачу о воздействии сосредоточенной взрывной волны (рис. 2) на свободной поверхности упругой полуплоскости с надземным нефтепроводом (рис. 1). Взрывное воздействие приложено на расстоянии одного среднего диаметра от края трубы. В точке J перпендикулярно свободной поверхности KGLI приложено сосредоточенное нормальное напряжение  $\sigma_y$  (рис. 1), которое при  $0 \leq n \leq 10$  ( $n = t/\Delta t$ ) изменяется линейно от 0 до P, а при  $10 \leq n \leq 20$  от P до 0 ( $P = \sigma_0$ ,  $\sigma_0 = -1$  кгс/см<sup>2</sup>). Граничные условия для контура KLMI при

$t > 0$   $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$ . Отраженные волны от контура KLMI не доходят до исследуемых точек при  $0 \leq n \leq 2000$ . Внутренний контур трубы ABCD свободен от напряжений. Наружный контур EFGH трубы свободен от напряжений, кроме точки G, которая находится на контакте с упругой полуплоскостью. В точке G контакта трубы и основания приняты условия непрерывности перемещений. Контур KGJI свободен от нагрузок, кроме точки J, где приложено сосредоточенное упругое нормальное напряжение  $\sigma_y$  и точки G, которая находится на контакте с упругой полуплоскостью.

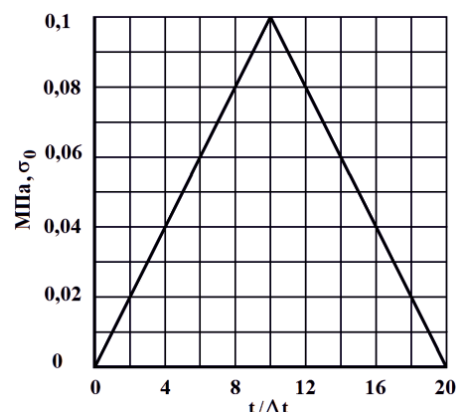


Рис. 2. Взрывное воздействие в виде треугольного импульса

2. Рассмотрим задачу о воздействии сосредоточенной взрывной волны (рис. 2) на свободной поверхности упругой полуплоскости с надземным нефтепроводом (рис. 3). Взрывное воздействие приложено на расстоянии двух средних диаметров от края трубы. В точке J перпендикулярно свободной поверхности KGLI приложено сосредоточенное нормальное напряжение  $\sigma_y$  (рис. 1), которое при  $0 \leq n \leq 10$  ( $n = t/\Delta t$ ) изменяется линейно от 0 до P, а при  $10 \leq n \leq 20$  от P до 0 ( $P = \sigma_0$ ,  $\sigma_0 = -1$  кгс/см<sup>2</sup>). Граничные условия для контура KLMI при  $t > 0$   $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$ . Отраженные волны от контура KLMI не доходят до исследуемых точек при  $0 \leq n \leq 2000$ . Внутренний контур трубы ABCD свободен от напряжений. Наружный контур EFGH трубы свободен от напряжений, кроме точки G, которая находится на контакте с упругой полуплоскостью. В точке G контакта трубы и основания приняты условия непрерывности перемещений. Контур KGJI свободен от нагрузок, кроме точки J, где приложено сосредоточенное упругое нормальное напряжение  $\sigma_y$  и точки G, которая находится на контакте с упругой полуплоскостью.

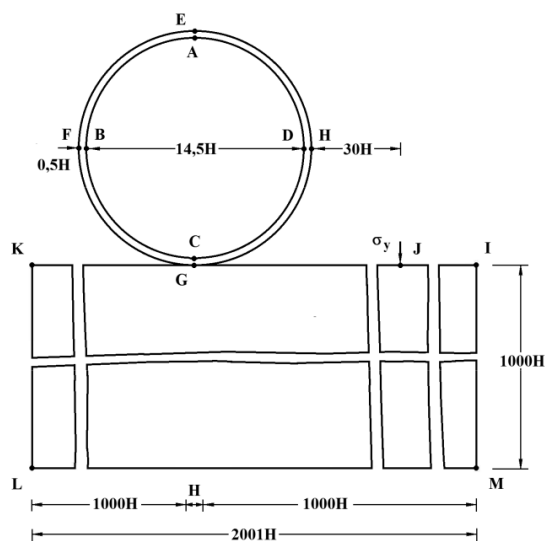


Рис. 3. Постановка задачи о воздействии сосредоточенной взрывной волны на надземный нефтепровод с основание в виде упругой полуплоскости (нагрузка приложена на расстоянии двух средних диаметров от края трубы)

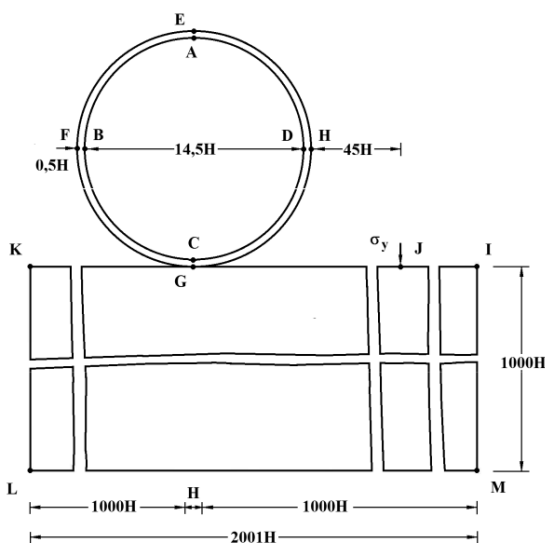


Рис. 4. Постановка задачи о воздействии сосредоточенной взрывной волны на надземный нефтепровод с основание в виде упругой полуплоскости (нагрузка приложена на расстоянии трех средних диаметров от края трубы)

3. Рассмотрим задачу о воздействии сосредоточенной взрывной волны (рис. 2) на свободной поверхности упругой полуплоскости с надземным нефтепроводом (рис. 4). Взрывное воздействие приложено на расстоянии трех средних диаметров

от края трубы. В точке J перпендикулярно свободной поверхности KGLI приложено сосредоточенное нормальное напряжение  $\sigma_y$  (рис. 1), которое при  $0 \leq n \leq 10$  ( $n = t/\Delta t$ ) изменяется линейно от 0 до  $P$ , а при  $10 \leq n \leq 20$  от  $P$  до 0 ( $P = \sigma_0$ ,  $\sigma_0 = -1$  кгс/см<sup>2</sup>). Граничные условия для контура KLMИ при  $t > 0$   $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$ . Отраженные волны от контура KLMИ не доходят до исследуемых точек при  $0 \leq n \leq 2000$ . Внутренний контур трубы ABCD свободен от напряжений. Наружный контур EFGH трубы свободен от напряжений, кроме точки G, которая находится на контакте с упругой полуплоскостью. В точке G контакта трубы и основания приняты условия непрерывности перемещений. Контур KGLI свободен от нагрузок, кроме точки J, где приложено сосредоточенное упругое нормальное напряжение  $\sigma_y$  и точки G, которая находится на контакте с упругой полуплоскостью.

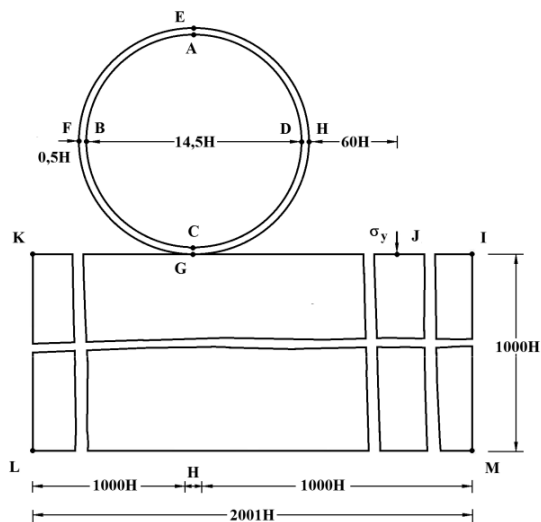


Рис. 5. Постановка задачи о воздействии сосредоточенной взрывной волны на надземный нефтепровод с основание в виде упругой полуплоскости (нагрузка приложена на расстоянии четырех средних диаметров от края трубы)

4. Рассмотрим задачу о воздействии сосредоточенной взрывной волны (рис. 2) на свободной поверхности упругой полуплоскости с надземным нефтепроводом (рис. 5). Взрывное воздействие приложено на расстоянии четырех средних диаметров от края трубы. В точке J перпендикулярно свободной поверхности KGLI приложено сосредоточенное нормальное напряжение  $\sigma_y$  (рис. 1), которое при  $0 \leq n \leq 10$  ( $n = t/\Delta t$ ) изменяется линейно от 0 до  $P$ , а при  $10 \leq n \leq 20$  от  $P$  до 0 ( $P = \sigma_0$ ,  $\sigma_0 = -1$  кгс/см<sup>2</sup>).

Граничные условия для контура KLM при  $t > 0$   $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$ . Отраженные волны от контура KLM не доходят до исследуемых точек при  $0 \leq n \leq 2000$ . Внутренний контур трубы ABCD свободен от напряжений. Наружный контур EFGH трубы свободен от напряжений, кроме точки G, которая находится на контакте с упругой полуплоскостью. В точке G контакта трубы и основания приняты условия непрерывности перемещений. Контур KGJI свободен от нагрузок, кроме точки J, где приложено сосредоточенное упругое нормальное напряжение  $\sigma_y$  и точки G, которая находится на контакте с упругой полуплоскостью.

#### Список литературы

1. Мусаев В.К. Моделирование нестационарных упругих волн напряжений в деформируемых областях с помощью метода конечных элементов в перемещениях // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 12 (1). – С. 28–32.
2. Мусаев В.К. Моделирование нестационарных упругих волн напряжений в деформируемой среде на поверхности полуплоскости при взрывном воздействии в объекте хранения опасных веществ // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 1 (часть 1). – С. 84–87.
3. Мусаев В.К. Математическое моделирование поверхностных волн напряжений в задаче Лэмба при воздействии в виде дельта функции // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 2 (часть 1). – С. 25–29.
4. Мусаев В.К. Численное моделирование вертикального сосредоточенного упругого импульсного воздействия в виде дельта функции на границе воздушной и твердой среды с полостью в виде прямоугольника (соотношение ширины к высоте один к пятнадцати) // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 2 (часть 2). – С. 220–223.
5. Мусаев В.К. Определение нестационарного напряженного состояния при вертикальном сосредоточенном взрывном воздействии на набережной речного порта с незаполненным водным объектом // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 2. – С. 88–92.
6. Мусаев В.К. Численное решение задачи о распространении нестационарных упругих волн напряжений в подкрепленном круглом отверстии // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 2. – С. 93–97.
7. Мусаев В.К. Решение задачи о распространении плоских продольных волн в виде импульсного воздействия // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 4 (часть 2). – С. 326–330.
8. Мусаев В.К. Исследования устойчивости явной двухслойной линейной конечноэлементной схемы для внутренних узловых точек на равномерной прямоугольной сетке // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 5. – С. 39–42.
9. Мусаев В.К. Численное моделирование плоских продольных волн в виде импульсного воздействия (восходящая часть – четверть круга, средняя – горизонтальная, нисходящая – линейная) в упругой полуплоскости // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 11 (часть 2). – С. 222–226.
10. Мусаев В.К. Моделирование нестационарных стоячих упругих волн в бесконечной полосе при воздействии в виде треугольного импульса // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 11 (часть 2). – С. 248–251.