

**Стародубцев В.В., Мусаев А.В., Шиянов М.И., Куранцов В.А., Шиянов С.М.**

**Применение комплекса программ Мусаева В.К. для моделирования сосредоточенного воздействия в виде треугольного импульса на свободной поверхности упругой полуплоскости с надземным нефтепроводом**

**Аннотация:** Рассматривается волновая теория взрывной безопасности. Решена задача о воздействии сосредоточенной взрывной волны на свободной поверхности упругой полуплоскости с надземным нефтепроводом (воздействие приложено на расстоянии двух средних диаметров от края трубы). Решается система уравнений из 8016288 неизвестных. Взрывное воздействие моделируется в виде треугольного импульса.

**Ключевые слова:** напряженное состояние, несущая способность, взрывное воздействие, надземный нефтепровод, упругая полуплоскость, дельта функция, комплекс программ Мусаева В.К., треугольный импульс, взаимодействие сооружения с основанием

В работах [1–6] приведена информация о моделировании нестационарных волн напряжений в деформируемых телах. Некоторая информация о верификации рассматриваемого численного метода, алгоритма и комплекса программ приведена в следующих работах [1–4, 6].

Рассмотрим задачу о воздействии сосредоточенной взрывной волны (рис. 2) на свободной поверхности упругой полуплоскости с надземным нефтепроводом (рис. 1).

Расчеты проводились при следующих единицах измерения: килограмм-сила (кгс); сантиметр (см); секунда (с). Для перехода в другие единицы измерения были приняты следующие допущения:  $1 \text{ кгс/см}^2 \approx 0,098 \text{ МПа}$ ;  $1 \text{ кгс}\cdot\text{с}^2/\text{см}^4 \approx 0,98\cdot 10^9 \text{ кг/м}^3$ .

Взрывное воздействие моделируется в виде треугольного импульса (рис. 2), которое приложено на расстоянии двух средних диаметров от края трубы (рис. 1).

В точке J перпендикулярно свободной поверхности KGI приложено сосредоточенное нормальное напряжение  $\sigma_y$  (рис. 1),

которое при  $0 \leq n \leq 11$  ( $n = t/\Delta t$ ) изменяется линейно от 0 до  $P$ , а при  $11 \leq n \leq 21$  от  $P$  до 0 ( $P = \sigma_0$ ,  $\sigma_0 = 0,098$  МПа ( $\sigma_0 = 1$  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.

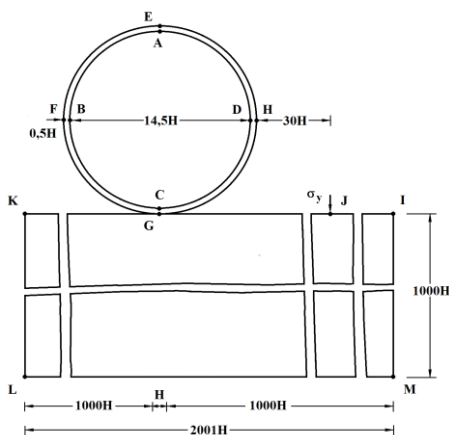


Рис. 1 – Постановка задачи о воздействии сосредоточенной взрывной волны на надземный нефтепровод с основание в виде упругой полуплоскости (воздействие приложено на расстоянии двух средних диаметров от края трубы)

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.

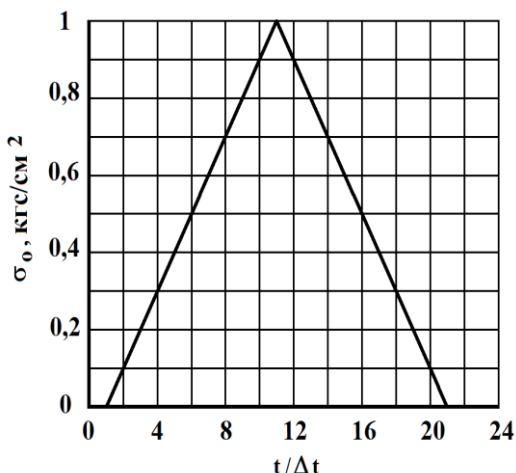


Рис. 2 – Взрывное воздействие в виде треугольного импульса

Для исследуемых материалов приняты следующие исходные данные. Для трубы приняты следующие исходные данные:  $\Delta t = 9,309 \cdot 10^{-7}$  с;  $E = 2,06 \cdot 10^5$  МПа ( $2,1 \cdot 10^6$  кгс/см<sup>2</sup>);  $\nu = 0,3$ ;  $\rho = 0,784 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup> ( $0,8 \cdot 10^{-5}$  кгс·с<sup>2</sup>/см<sup>4</sup>);  $C_p = 5371$  м/с;  $C_s = 3177$  м/с.

Для основания приняты следующие исходные данные:  $H = \Delta x = \Delta y$ ;  $\Delta t = 2,788 \cdot 10^{-6}$  с;  $E = 3,09 \cdot 10^4$  МПа ( $3,15 \cdot 10^5$  кгс/см<sup>2</sup>);  $\nu = 0,2$ ;  $\rho = 0,25 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup> ( $0,255 \cdot 10^{-5}$  кгс·с<sup>2</sup>/см<sup>4</sup>);  $C_p = 3587$  м/с;  $C_s = 2269$  м/с.

При расчетах принимается минимальный шаг по времени  $\Delta t = 9,309 \cdot 10^{-7}$  с.

Внутренний диаметр трубы равен  $14,5H$ . Средний диаметр трубы равен  $15H$ . Наружный диаметр трубы равен  $15,5H$ . Толщина трубы равна  $0,5H$ .

Исследуемая расчетная область имеет 2004072 узловых точек. Решается система уравнений из 8016288 неизвестных.

Исследуемая расчетная область имеет 2004072 узловых точек. Решается система уравнений из 8016288 неизвестных.

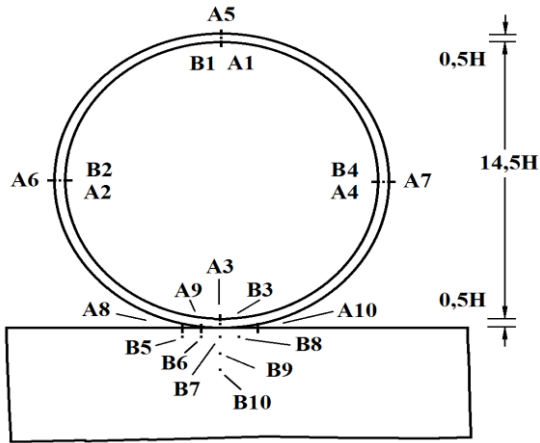


Рис. 3 – Точки, в которых приводятся упругие напряжения во времени

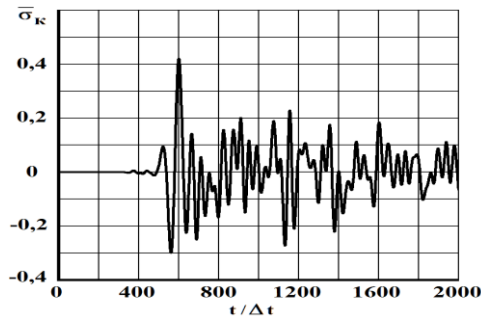


Рис. 4 – Изменение упругого контурного напряжения  $\bar{\sigma}_k$  во времени  $t/\Delta t$  в точке A1 (воздействие приложено на расстоянии двух средних диаметров от края трубы)

Исследуемая расчетная область имеет 2004072 узловых точек. Решается система уравнений из 8016288 неизвестных.

Получено изменение упругого нормального напряжения  $\bar{\sigma}_x$  ( $\bar{\sigma}_x = \sigma_x / |\sigma_0|$ ) во времени  $n$  в точках B1-B10 (рис. 3), находящихся в надземном трубопроводе с основанием. Получено изменение упругого нормального напряжения  $\bar{\sigma}_y$  ( $\bar{\sigma}_y = \sigma_y / |\sigma_0|$ ) во

времени  $p$  в точках В1 - В10 (рис. 3), находящихся в надземном трубопроводе с основанием. Получено изменение упругого касательного напряжения  $\bar{\tau}_{xy}$  ( $\bar{\tau}_{xy} = \tau_{xy} / |\sigma_0|$ ) во времени  $p$  в точках В1 - В10 (рис. 3), находящихся в надземном трубопроводе с основанием.

В качестве примера на рис. 4 показано изменение упругого контурного напряжения  $\bar{\sigma}_k$  ( $\bar{\sigma}_k = \sigma_k / |\sigma_0|$ ) во времени  $p$  в точке А1 (рис. 3), находящейся в надземном трубопроводе с основанием.

Авторы выражают благодарность Мусаеву В.К. за оказанную помощь и внимание к работе.

#### Литература:

1. *Мусаев В.К.* Численное решение задачи о распространении нестационарных упругих волн напряжений в подкрепленном круглом отверстии // *Современные наукоемкие технологии.* – 2015. – № 2. – С. 93–97.
2. *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. – Volume 11, Issue 1. – P. 135–146.
3. *Musayev V.K.* On the mathematical modeling of nonstationary elastic waves stresses in corroborated by the round hole // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering.* – 2015. – Volume 11, Issue 1. – P. 147–156.
4. *Мусаев В.К., Дикова Е.В., Акатьев С.В., Стародубцев В.В., Самойлов С.Н.* Оценка точности результатов численного моделирования при решении задачи о распространении импульсного воздействия в виде треугольника в упругой полуплоскости // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* – 2015. – № 6. – С. 8–12.
5. *Стародубцев В.В.* Моделирование безопасности сосредоточенного нестационарного упругого взрывного воздействия на надземный нефтепровод с помощью численного метода, алгоритма и комплекса программ Мусаева В.К. // *Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XXIV Международной конференции.* – М.: РГГУ, 2016. – С. 251–254.

6. *Мусаев В.К., Суцев С.П., Дикова Е.В., Мусаев А.В., Самойлов С.Н.* Компьютерное моделирование отражения нестационарных упругих волн напряжений в виде треугольного импульса от жесткой поверхности бесконечной пластинки // *Двойные технологии.* – 2017. – № 3. – С. 72–75.