

УДК 539.3

## ВОЗДЕЙСТВИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ВЗРЫВА НА МАГИСТРАЛЬНЫЙ ТРУБОПРОВОД

© 2011 г.

Д.М. Заринов, Р.Г. Якупов

Институт механики Уфимского научного центра РАН

damir@anrb.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Действие сейсмической волны, возникающей в результате взрыва заряда ВВ в грунтах, на магистральный трубопровод исследовано ранее [1]. Определены силы, действующие на трубопровод, напряжения и деформации трубопровода в зависимости от величины ВВ и глубины его взрыва. С использованием преобразования Лапласа по времени решены уравнения движения теории балок Тимошенко. В настоящем исследовании решается уравнение движения теории изгиба балок.

Получены аналитические выражения для определения деформаций и напряжений в трубопроводе в зависимости от величины сейсмической волны взрыва по технической теории изгиба балки. Сравняются результаты расчета по теории балок типа Тимошенко и по теории изгиба балок.

Прогиб трубопровода в эпицентре взрыва по теории изгиба в два раза меньше по сравнению с теорией, учитывающей деформацию сдвига, а напряжения – на 35–40% больше.

*Ключевые слова:* взрыв, землетрясение, сейсмическая волна, напряжения и деформации, трубопровод.

### Введение

Наблюдения за движением земной поверхности при землетрясениях и взрывах показывают, что по кинематическим и динамическим признакам сейсмические волны, возникающие и в том, и в другом случаях, родственны, аналогичны и их действия на инженерные сооружения. Отличаются волны размерами источника. При взрыве взрывчатого вещества (ВВ) параметры волны взрыва известны. Это позволяет определить предельные значения параметров волны, при которых возникают повреждения трубопровода. Работа является продолжением [1], где решены уравнения движения теории балок Тимошенко, определены напряжения и деформации в трубопроводе.

### Постановка задачи

Заряд ВВ сферической формы весом  $S$  и радиусом  $R_0$  заложен под трубой на глубине  $l$ . Трубопровод находится на глубине  $h$ . Требуется определить напряжения и деформации трубопровода, возникающие в результате взрыва заряда ВВ.

По-прежнему магистральный трубопровод моделируем тонким стержнем бесконечной длины, находящимся в грунте, и уравнение движения записываем в виде

$$EJ \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + (\rho F + m_2) \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = p(x, t), \quad (1)$$

где  $W$  – прогиб,  $x$  – продольная координата,  $t$  – время,  $\rho$  и  $E$  – плотность и модуль упругости материала трубопровода,  $F$  – площадь поперечного сечения,  $J$  – осевой момент инерции,  $m_2$  – масса грунта над трубой,  $p(x, t)$  – внешняя сила [1]. Геометрические параметры задачи приведены на рис. 1.

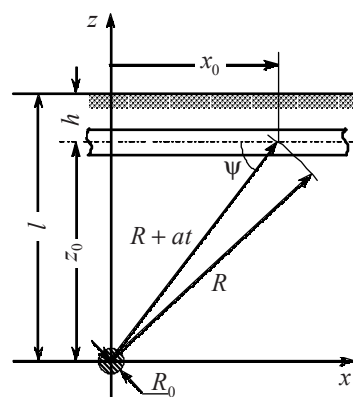


Рис. 1

### Решение задачи

К уравнению (1) применим преобразование Лапласа по времени и получим в безразмерном

виде

$$\frac{d^4 \bar{w}}{d\xi^4} + \gamma s^2 \bar{w} = \frac{\beta r^3 p(\xi_0)}{EJ} \int_0^\infty e^{-s\tau} \delta(\tau_2 - \xi \beta) d\tau_2, \quad (2)$$

где  $s$  – параметр преобразования,  $\bar{w}$  – изображение прогиба. После интегрирования правой части уравнения (2) получим

$$\frac{d^4 \bar{w}}{d\xi^4} + 4\lambda^4 \bar{w} = k e^{-\beta s \xi}. \quad (3)$$

Здесь  $4\lambda^4 = \gamma s^2$ ,  $\lambda = \sqrt[4]{\gamma \sqrt{s/2}}$ ,  $k = \beta r^3 p(\xi_0)/EJ$ . Решение уравнения (3), удовлетворяющее условиям затухания на бесконечности, имеет вид

$$\bar{w} = e^{-\lambda \xi} (A_1 \sin \lambda \xi + A_2 \cos \lambda \xi) + A_3 e^{-\beta s \xi}, \quad (4)$$

где  $A_{1,2}$  – постоянные интегрирования,  $A_3 = k/s^2 \times (\beta^4 s^2 + \gamma)$ . Частное решение (3) находим методом неопределенных коэффициентов.

Сечение стержня  $x = 0$  представляет собой подвижную заделку, где вследствие симметрии относительно оси  $Z$  угол поворота касательной к осевой линии и поперечные силы равны нулю:

$$\xi = 0, \quad \frac{d\bar{w}}{d\xi} = \frac{d^3 \bar{w}}{d\xi^3} = 0.$$

### Численный пример

Заряд весом  $C = 30$  кг ( $R_0 = 0.158$  м) взрывается в песчаном грунте плотностью  $\rho_2 = 1.53$  т/м<sup>3</sup>,  $a_* = 660$  м/с на глубине  $l = z + h$ . Трубопровод диаметром  $D = 1$  м с толщиной стенки  $h_0 = 0.01$  м проложен на глубине  $h = 1.5$  м,  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $\rho = 8$  т/м<sup>3</sup>,  $c_1 = 5 \cdot 10^3$  м/с (см. рис. 1). Угол внутреннего трения песчаного грунта  $\varphi = 30^\circ$ . Принимаем  $z = 150R_0$ ,  $t_0 = 0.1$  с.

Наибольший изгибающий момент и прогиб возникают в области  $-\xi_0 \leq \xi$ . Построены графики изменения максимального изгибающего момента  $m_{\max}(\tau)$  и прогиба  $w(\tau)$  в эпицентре взрыва в сечении трубопровода  $\xi = 0$  в зависимости от времени (кривые 1, построенные по теории изгиба балки, на рис. 2 и 3). Эти величины можно определить по формулам

$$m_{\max} = \frac{2r\beta p(\xi_0)}{\sqrt{\gamma EF}}, \quad w(0, \tau_2) = \frac{k}{\gamma} (\tau_2 - \beta \xi),$$

$$\tau_2 > \beta \xi_0.$$

Кривые 2 на рис. 2 и 3 построены по результатам решения уравнений движения балки типа Тимошенко, приведенным в [1]. Прогиб трубопро-

вода в эпицентре взрыва по теории изгиба в два раза меньше по сравнению с теорией, учитывающей деформацию сдвига, а напряжения – на 35–40% больше. Согласно теории типа Тимошенко, полный угол поворота равен  $\partial w / \partial \xi = \theta + \beta_*$ , где  $\theta, \beta_*$  – углы поворота, обусловленные изгибающим моментом и поперечной силой соответственно. По теории изгиба изгибающий момент определяется производной полного угла поворота, по более точной теории – производной только угла  $\theta$ .

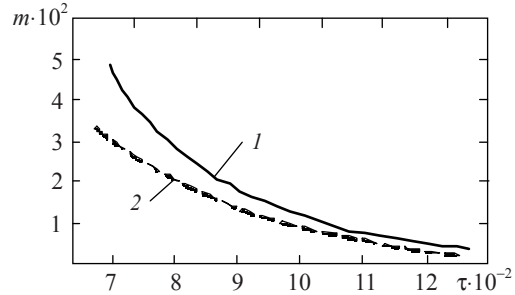


Рис. 2

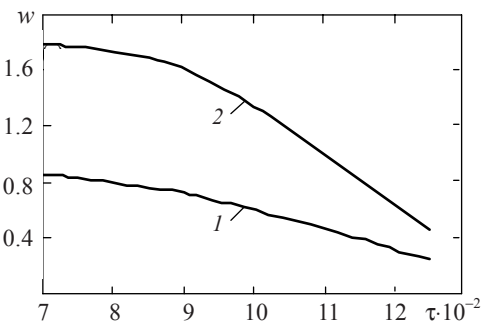


Рис. 3

### Заключение

Получены аналитические выражения для определения деформаций и напряжений в трубопроводе в зависимости от величины сейсмической волны взрыва по технической теории изгиба балки. Сравниваются результаты расчета по теории балок типа Тимошенко и по теории изгиба балок.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №11-01-97000-р\_поволжье\_а.

### Список литературы

1. Якупов Р.Г., Зарипов Д.М. Воздействие сейсмических волн взрыва на магистральный трубопровод // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2010. №3. С. 60–75.

**THE EFFECT OF A SEISMIC WAVE ON A LONG-DISTANCE PIPE LINE*****D.M. Zaripov, R.G. Yakupov***

The effect of the seismic wave resulting from an explosion of an underground explosive charge on the main pipeline was investigated by authors earlier. The forces acting on the pipeline, stresses and strains in the pipeline depending on size of the explosive and depths of its explosion are determined. Using time Laplace transform, the equations of motion of the theory of Timoshenko-beams are solved. In the present work, the equation of motion of the beam flexural theory is solved.

Analytical expressions for calculating the strains and stresses in the pipeline depending on the size of a seismic wave of explosion according to the technical beam flexural theory are derived. The results of calculations according to both the theories are compared.

The deflection of the pipeline in the explosion epicenter as predicted by the beam flexural theory is twice less than the prediction of the theory accounting for the shear deformation, whereas the stresses are 35–40% higher.

*Keywords:* explosion, earthquake, seismic wave, tensions and deformations, pipe line.