

С. В. Киргинцева

(ГГУ имени Ф. Скорины, Гомель)

Науч. рук. **В. В. Можаровский**, д-р техн. наук, профессор

**КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТА
СКОРОСТИ ВОЛНЫ И МАКСИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ
ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ УДАРЕ В ТРУБАХ ИЗ КОМПОЗИТА**

Введение и постановка задачи

Одной из основных разновидностей гидравлических нагрузок в трубопроводе является гидравлический удар, являющийся потенциальным источником возникновения кризисных ситуаций. Под гидравлическим ударом понимается кратковременное, резкое и сильное повышение давления в трубопроводе при внезапном торможении движущегося по нему потока жидкости. Явление гидравлического удара известно с давних времён, теоретически это явление было впервые обосновано Н. Е. Жуковским (1898 г.), установившим, что гидравлический удар является сложным физическим процессом [1].

В данной работе рассматривается труба, однослойная и двухслойная, длиной L и диаметром D с протекающей внутри жидкостью плотностью ρ . На рисунках 1,а и 1,б показаны модели однослойной и двухслойной трубы с футеровкой (покрытием) из ортотропных материалов соответственно, которая может быть и трансверсально-изотропной.

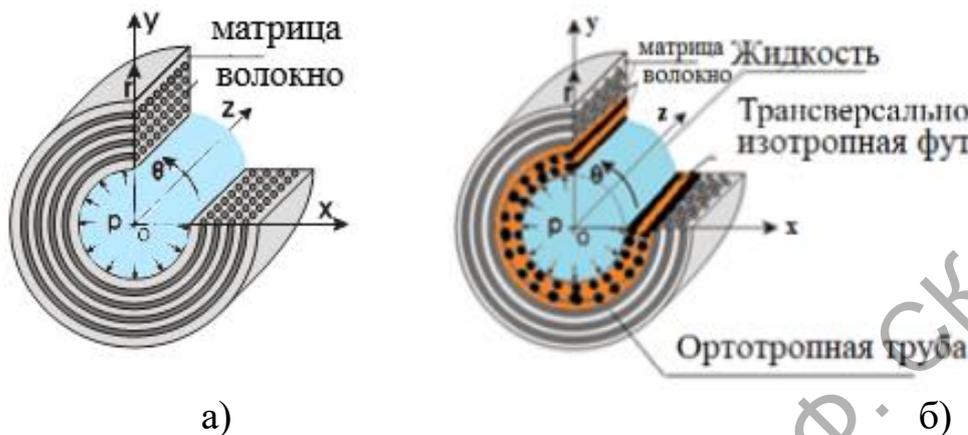


Рисунок 1 – Модели однослойной (а) и двухслойной (б) трубы

Решается задача компьютерной реализации определения скорости волны и максимального давления при гидравлическом ударе.

Методика определения скорости волны и максимального давления при гидравлическом ударе

Н. Е. Жуковский определил зависимость для предельно возможного значения напора при гидравлическом ударе (прямой удар) и установил факт, выражающий независимость величины напора в начале трубопровода от его длины [1]:

$$\Delta P = \rho \cdot c \cdot \Delta v, \quad (1)$$

где ΔP – ударное повышение давления, $P = \rho \cdot g \cdot (H - Z)$, ρ – плотность перекачиваемой жидкости, c – скорость ударной волны, Δv – изменение скорости потока жидкости, Z – высота центральной линии трубы от заданной точки отсчета, H – пьезометрический напор.

Согласно экспериментальным опытам, приведенным в [1], следует, что скорость распространения ударной волны снижается с увеличением диаметра трубы, уменьшением толщины её стенок и коэффициента упругости материала труб:

$$c = 1 / \sqrt{\frac{\rho}{E_0} + \rho \cdot \frac{D}{E\delta}}, \quad (2)$$

где E_0 – модуль объемной упругости жидкости, E – модуль упругости материала трубы; D – диаметр трубопровода, δ – толщина стенки трубопровода.

Формула (2) определяет скорость волны для однослойных изотропных труб. В работе [2] выведены зависимости, определяющие скорость волны при гидроударе для различных комбинаций слоистых упругих ортотропных свойств трубы и футеровки.

Максимальное давление, возникающее внутри трубы, определяется следующим образом:

$$H_{\max} = H_0 + Dh_{\text{hammer}} + Dh_{\text{friction}}, \quad (3)$$

где $Dh_{\text{friction}} = I \frac{LV^2}{2Dg}$, $Dh_{\text{hammer}} = \frac{cV}{g}$, I – коэффициент трения трубы;

V – средняя скорость воды в трубе, ($V = Q/S$, где H – значение напора в м, вод.ст., Q – общий расход жидкости, S – площадь поперечного сечения трубы); g – ускорение силы тяжести, $g=9,81 \text{ м/с}^3$.

Расчет скорости волны и максимального давления при гидравлическом ударе

Создана программа в среде Delphi для расчета скорости волны и максимального давления внутри труб различных конструкций и характеристик: однослойных и двуслойных, изотропных и ортотропных. Для примера рассмотрим *однослойную ортотропную* трубу. Скорость волны определяется по зависимости

$$c = \sqrt{\frac{K / \rho}{1 + K\Omega}}, \quad (4)$$

здесь K – объемный модуль упругости для жидкости, r_c и r_a – внешний и внутренний радиусы трубы соответственно.

Упругие постоянные и геометрические параметры будут [2]

$$A_{11} = E_2 / (1 - \nu_{21}\nu_{12}), \quad A_{12} = \nu_{21}E_1 / (1 - \nu_{21}\nu_{12}), \quad A_{22} = E_1 / (1 - \nu_{21}\nu_{12}),$$

$$\Omega = \frac{-2}{1 - (r_c / r_a)^{2k}} \left(\frac{1}{A_{11}k + A_{12}} + \frac{(r_c / r_a)^{2k}}{A_{11}k - A_{12}} \right), k = \sqrt{m} = \sqrt{A_{22} / A_{11}}.$$

Так как материал трубы имеет волокнистую структуру, состоящую из матрицы и волокна, то применяем правило «смесей» для оценки влияния объемного содержания волокна на изменения модулей упругости и коэф. Пуассона. Соответственно меняется скорость волны гидроудара и происходит изменение ударного давления.

Пример. Рассмотрим трубу из полиэтилена ($E_m=1,43$ ГПа, $\nu_m=0,4$) радиусом $r_a=0,232$ м и толщиной стенки $\delta=0,018$ м, усиленную обмоткой стальных волокон ($E_f=207$ ГПа, $\nu_f=0,3$) [3]. Влияние процентного содержания волокна в матрице композиционного материала на скорость волны при гидроударе показано на рисунке 2, что хорошо согласуется с экспериментальными данными работы [3].

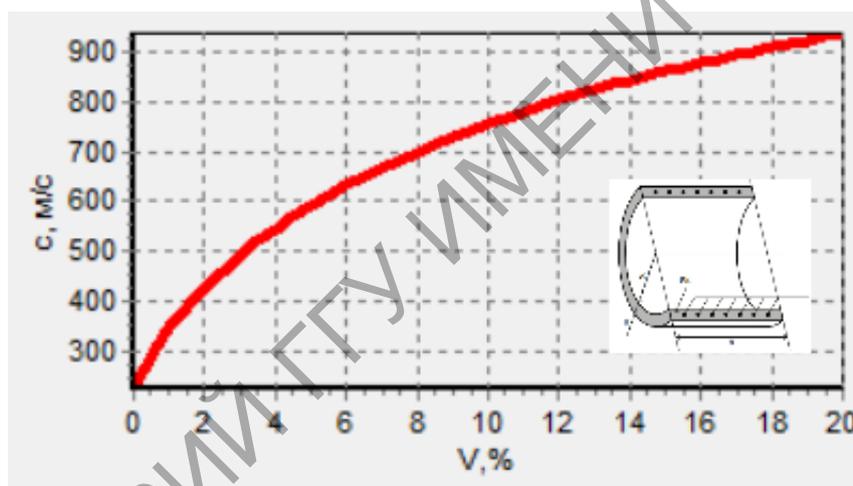


Рисунок 2 – График зависимости скорости волны от объёмного содержания волокон в матрице композиционного материала

Литература

1. Жуковский, Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н. Е. Жуковский. – М. Д. : Гостехтеоретлитиздат, 1949. – 104 с.
2. Можаровский, В. В. Скорость волны при гидроударе и напряженно-деформированное состояние слоистых футерованных труб из ортотропных материалов / В. В. Можаровский, С. В. Киргинцева // Проблемы физики, математики и техники, 2022. – № 2 (51). – С. 44–51.
3. Wuyi, Wan Shock wave speed and transient response of PE pipe with steel-mesh reinforcement / Wuyi Wan, Xinwei Mao // Hindawi Publishing

Corporation Shock and Vibration, 2016. – Vol. 2016. – 10 p.
<https://doi.org/10.1155/2016/8705031>.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ