

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОУДАРА ДЛЯ КОМПОЗИТНЫХ ТРУБ В ТРУБОПРОВОДАХ

В. В. МОЖАРОВСКИЙ, С. В. КИРГИНЦЕВА

*Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,
Республика Беларусь*

val-mozh@yandex.ru, kirgintseva.s@mail.ru

Актуальность. При интенсивной эксплуатации подземных трубопроводов могут возникать такие явления, как коррозия, разрывы, разрушение системы, утечка жидкости. В этом случае требуются значительные затраты на обслуживание и ремонт сетей. Решением этой проблемы может быть применение новых бестраншейных методов восстановления трубопроводов, которые заключаются в ремонте существующих трубопроводов без выемки грунта. На современном этапе развития новых технологий начали использовать так называемую технологию CIPP («Cured-in-place pipe») трубопроводов или применение композитных рукавов (чулок) для бестраншейного ремонта трубопровода. Такая же технология используется для восстановления внутренней поверхности изношенных самотечных и напорных трубопроводов с помощью использования композитного рукава (трубы). В трубопроводах, работающих под давлением, могут происходить гидравлические удары, которые могут привести к их повреждениям и, возможно, к выходу из строя насосной системы.

Целью данной работы является математическое моделирование расчета таких слоистых трубопроводов и изучение возможности контроля гидравлического удара. Представлены исследования определения скорости волны напора и расхода воды при гидроударе для двухслойных труб из композитов методом характеристик. Решается задача компьютерной реализации расчета вышеуказанных параметров для труб из композитов.

Методика определения скорости волны и максимального давления при гидравлическом ударе при течении жидкости в композитных трубах. В расчетах по гидравлике известно, что с помощью формул, предложенных российским ученым Н. Е. Жуковским, можно легко определять предельно возможное значение напора при гидравлическом ударе (прямой удар) [1]:

$$\Delta P = \pm \rho \cdot C \cdot v_0 \quad \text{или} \quad \Delta H = \pm C \cdot v_0 / g, \quad (1)$$

где ΔP – ударное повышение давления; ρ – плотность перекачиваемой жидкости; C – скорость ударной волны; $v_0 = 4Q / (\pi D^2)$ – скорость жидкости в трубе; Q – расход жидкости; D – внутренний диаметр трубы; H – пьезометрический напор; $g = 9,82 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Скорость ударной волны в однородных изотропных трубах определяется соотношением [2]

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

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

Эти теоретические подходы, разработанные для расчета параметров гидроудара металлических (изотропных) труб, можно также применять и для композитных, но с учетом, что скорость ударной волны определяется на основе теории упругости анизотропного тела. Так, в работе [3] выведены формулы, определяющие скорость волны при гидроударе для различных комбинаций слоистых упругих ортотропных (трансверсально-изотропных) свойств трубы и футеровки. Зависимость, определяющая скорость волны в изотропных трубах с ортотропным покрытием, будет [3]

$$C = \sqrt{\frac{K / \rho}{1 + K\Omega}},$$

$$\Omega = \frac{2}{\alpha} \left[-1 + \left(\frac{-\beta}{\alpha} + 1 \right) \left(\frac{r_a}{r_b} \right)^{-2k_1} \times \right.$$

$$\left. \times \frac{\left[\alpha \left(1 - (r_c / r_b)^{-2} g / \gamma \right) - g \left(1 - (r_c / r_b)^{-2} \right) \right]}{\beta \left(1 - (r_a / r_b)^{-2k_1} \right) \left(1 - (r_c / r_b)^{-2} g / \gamma \right) - g \left(1 - (r_c / r_b)^{-2} \right) \left(1 - (r_a / r_b)^{-2k_1} \beta / \alpha \right)} \right],$$

$$\beta = A_{12}^{(1)} - k_1 A_{11}^{(1)}, \alpha = A_{11}^{(1)} k_1 + A_{12}^{(1)}, \gamma = E / (1 - \nu), g = -E / (1 + \nu),$$

где E и ν – характеристики изотропной трубы, k_1 – коэффициент для покрытия;

$$A_{11} = \frac{E_r}{1 - \nu_{r\theta} \nu_{\theta r}}, \quad A_{12} = \nu_{r0} \frac{E_\theta}{1 - \nu_{r0} \nu_{\theta r}}, \quad A_{22} = \frac{E_\theta}{1 - \nu_{r0} \nu_{\theta r}},$$

где r_a – внутренний радиус; r_c – внешний радиус; r_b – межслойный радиус для двуслойной трубы.

Механические свойства (модули упругости материала трубы E_θ , E_r и коэффициенты Пуассона $\nu_{\theta r}$, $\nu_{r\theta}$, представлены в случае плоского напряженного состояния в цилиндрической системе координат $\theta r z$ и определяются по правилу «смесей» с объемным содержанием V волокна (индекс f) в матрице (индекс m) волокнистых материалов при различных способах расположения волокон и определяются следующим образом [4]:

– перпендикулярное расположение волокон по отношению к оси z :

$$E_r = E_m \frac{1 + \eta V}{1 - \eta V},$$

$$\eta = \frac{E_f - E_m}{E_f + E_m},$$

$$E_\theta = V E_f + (1 - V) E_m,$$

$$\nu_{r\theta} = V \nu_f + (1 - V) \nu_m,$$

$$\nu_{\theta r} = \frac{E_\theta}{E_r} \nu_{r\theta};$$

– радиальное расположение волокон по отношению к оси z :

$$E_r = V E_f + (1 - V) E_m,$$

$$E_\theta = E_m \frac{1 + \eta V}{1 - \eta V},$$

$$\eta = \frac{E_f - E_m}{E_f + E_m},$$

$$\nu_{\theta r} = V \nu_f + (1 - V) \nu_m.$$

$$\nu_{r\theta} = \frac{E_r}{E_\theta} \nu_{\theta r};$$

– параллельное расположение волокон по отношению к оси z :

$$E_r = V E_f + (1 - V) E_m,$$

$$E_\theta = E_r,$$

$$v_{\theta r} = v_{r\theta} ,$$

$$v_{\theta r} = Vv_f + (1-V)v_m .$$

Разработан алгоритм и написана программа расчета скорости волны при движении жидкости в слоистой трубе.

Пример расчета. Рассмотрим стальную трубу (модуль упругости $E = 210$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; толщина $h_2 = 6$ мм) с внутренним покрытием из стеклопластика (модуль упругости волокна $E_f = 71$ ГПа; модуль упругости матрицы $E_m = 3,5$ ГПа; коэффициент Пуассона волокна $\nu_f = 0,22$; коэффициент Пуассона матрицы $\nu_m = 0,38$; толщина $h_1 = 3$ мм, процентное содержание волокна составляет 30 %). Внутренний радиус $r_a = 147$ мм, средний радиус $r_b = 150$ мм, внешний радиус $r_c = 156$ мм. Длина трубы $L = 2500$ м, разделена на 5 секций; задаются условия $H_0 = 49,95$ м; $Q_0 = 0,1$ м³/с; коэффициент трения $f = 0,018$; $T_{\max} = 50$ с; время закрытия задвижки $t_c = 0$ с; безразмерное время закрытия задвижки определяется по формуле: $\tau = (1 - t/t_c)^5$.

Результат зависимости напора H от времени t вблизи клапана (задвижки) представлен на рисунке 1. Расчет проводился по методу характеристик [5]. В таблице 1 представлены графики зависимости максимального напора $H_{\max}$, вычисленного по формуле Жуковского, по программе в Excel [4, 6], которая адаптирована для труб из композитов, и по методу характеристик, при различном расположении волокон.

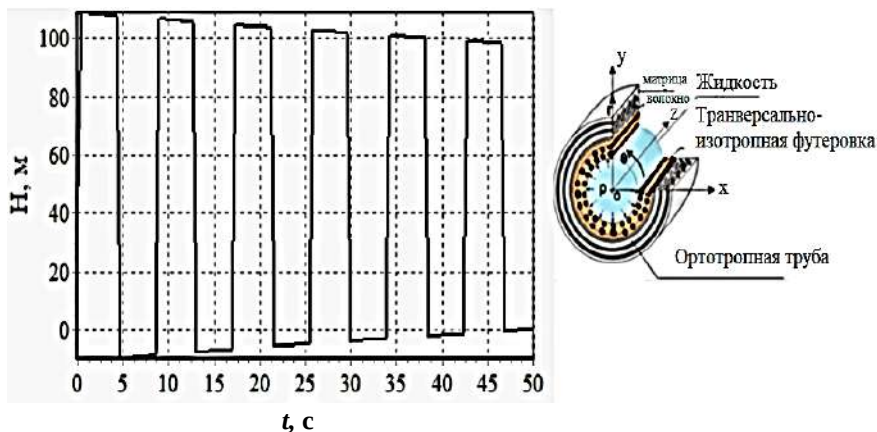


Рисунок 1 – График зависимости напора H от времени t при перпендикулярном расположении волокон

Таблица 1 – Изменение максимального напора $H_{\max}$, м, и скорости C , м/с, в зависимости от расположения волокон

Параметр	Расположение волокон		
	перпендикулярно	радиально	параллельно
Скорость C , м/с	1183	1184	1192
Формула Жуковского $H_{\max}$, М	111,3	111,4	111,8
Расчет Excel $H_{\max}$, М	112,5	112,6	113,0
Метод характеристик $H_{\max}$, М	111,1	111,1	111,6

Выводы. Применение армированных рукавов из композита для санации трубопроводов дает возможность защитить трубы от разрушения, но в то же время может увеличить скорость ударной волны и вызвать дополнительные гидравлические скачки давления в трубопроводе. Поэтому для оптимизации необходимо производить компьютерный расчет. Для расчета труб (тестирование) с изотропных материалов можно применять приближенный расчет, так как значения $H_{\max}$, вычисленные по формуле Жуковского, по программе в Excel и методу характеристик, достаточно близки (см. таблицу 1), отличие незначительно.

Список литературы

- 1 Жуковский, Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н. Е. Жуковский. – М. ; Д. : Гостехтеоретлитиздат, 1949. – 104 с.
- 2 Mostafa Mahdy. Analysis of water hammer using method of characteristics for different pipes material / Mostafa Mahdy // International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS). – 2019. – Vol. VIII, is. I. – 9 p.
- 3 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.
- 4 Можаровский, В. В. Влияние схем армирования трубы из композита на скорость волны при гидравлическом ударе / В. В. Можаровский, С. В. Киргинцева // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 3 (56). – С. 21–25.
- 5 Можаровский, В. В. Влияние расположения волокон в трубе из композита на параметры гидравлического удара / В. В. Можаровский, С. В. Киргинцева // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 4 (57). – С. 30–35.
- 6 Water hammer Calculation Excel Sheet [Electronic resource]. – Mode of access : <https://engineeringxls.blogspot.com/2019/01/water-hammer-calculation-excel-sheet.html>. – Date of access : 15.05.2023.

MATHEMATICAL MODELING CALCULATION OF WATER HAMMER PARAMETERS FOR COMPOSITE PIPES IN PIPELINES

V. V. MOZHAROVSKY, S. V. KIRHINTSAVA

F. Scorina Gomel State University, Republic of Belarus