

## РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОУДАРА ДЛЯ ТРУБ ИЗ КОМПОЗИТОВ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ

С. В. КИРГИНЦЕВА, В. В. МОЖАРОВСКИЙ

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Республика Беларусь

Одними из способов защиты трубопроводов от нежелательных повреждений из-за эффекта гидроудара являются численное моделирование и прогнозирование внезапного повышения или понижения давления, а также выбор надежных материалов, например, композитов. Предельно возможное значение напора при гидравлическом ударе (прямой удар) можно легко определять с помощью формул, предложенных известным российским ученым Н. Е. Жуковским [1]:

$$\Delta P = \pm \rho \cdot C \cdot V_0 \quad \text{или} \quad \Delta H = \pm C V_0 / g,$$

$\Delta P$  – ударное повышение давления;  $\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости;  $C$  – скорость ударной волны;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,82 \text{ м/с}^2$ ;  $H$  – пьезометрический напор;  $V_0 = 4Q / (\pi D^2)$  – скорость жидкости в трубе;  $Q$  – расход жидкости;  $D$  – внутренний диаметр трубы.

Максимальный напор  $H_{\text{max}}$  для изотропных труб легко вычисляется, например, по программе Excel [2]:

$$H_{\text{max}} = H_0 + H_{\text{изм}} + H_{\text{тр}},$$

$H_0$  – напор в резервуаре;  $H_{\text{изм}}$  – максимальное изменение напора,  $H_{\text{изм}} = CQ / (gS)$ ;  $S$  – площадь поперечного сечения трубопровода,  $S = \pi D^2 / 4$ ;  $H_{\text{тр}}$  – напор с учетом трения,  $H_{\text{тр}} = f L Q^2 / (2gDS^2)$ ;  $f$  – коэффициент трения Дарси – Вайсбаха;  $L$  – длина трубы.

Широко известны формулы для определения скорости ударных волн в однослойных изотропных трубах [3], однако они дают некоторые погрешности при их применении для труб из композитных материалов. В то же время в работе [4] представлены зависимости, определяющие скорость волны жидкости в однослойных и двухслойных изотропных и ортотропных трубах. В настоящей работе построена методика и создана программа в среде Delphi, позволяющая определять параметры гидроудара в трубах из композита (скорость волны, напор и расход жидкости), однослойных и двухслойных, методом характеристик [1, 5]. Скорость волны жидкости в ортотропной трубе определялась по разработанной методике [4]:

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

$$\Omega = \frac{-2}{1 - (r_c / r_a)^{2k}} \left( \frac{1}{A_{11}k + A_{12}} + \frac{(r_c / r_a)^{2k}}{A_{11}k - A_{12}} \right); \quad k = \sqrt{A_{22} / A_{11}}; \quad A_{11} = E_r / (1 - \nu_{r0}\nu_{\theta r}); \quad A_{12} = \nu_{r0}E_0 / (1 - \nu_{r0}\nu_{\theta r});$$

$A_{22} = E_0 / (1 - \nu_{r0}\nu_{\theta r})$ ;  $r_c$  и  $r_a$  – внешний и внутренний радиусы трубы соответственно;  $K$  – модуль объемной упругости жидкости; модули упругости материала трубы  $E_0$ ,  $E_r$  и коэффициенты Пуассона  $\nu_{\theta r}$ ,  $\nu_{r0}$  определяются по правилу «смесей» с объемным содержанием  $V$  волокна в матрице волокнистых материалов при различных способах расположения волокон [4].

Проведен расчет и анализ результатов о влиянии физико-механических характеристик гидравлического удара на напор (давление) и расход жидкости на примере трубы из полиэтилена, усиленной обмоткой стальных волокон [6] с различными схемами армирования [4] при мгновенном закрытии задвижки. Рассмотрена труба из композита длиной  $L = 2500 \text{ м}$ , разделенная на 5 секций; задаются условия  $H_0 = 49,95 \text{ м}$ ;  $Q_0 = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ ; коэффициент трения  $f = 0,018$ ;  $T_{\text{max}} = 50 \text{ с}$ ; время закрытия задвижки  $t_c = 0 \text{ с}$ ; безразмерное время закрытия задвижки определяется по формуле  $\tau = (1 - t / t_c)^s$ . Построена зависимость скорости волны  $C$  от объемного содержания волокна  $V$  и расположения волокон в матрице материала. Колебание давления в трубе также рассчитывается в пяти точках трубы для разного временного состояния при течении жидкости до положения задвижки. Результат зависимости напора  $H$  (давления  $P$ ) от времени  $t$  вблизи клапана (задвижки) представлен

на рисунке 1. Расчет проводился по методу характеристик. В таблице представлены графики зависимости максимального напора  $H_{\max}$ , вычисленного по формуле Жуковского, по программе в Excel, которая адаптирована для труб из композитов, и по методу характеристик – от объемного содержания волокон  $V$  при их перпендикулярном расположении.

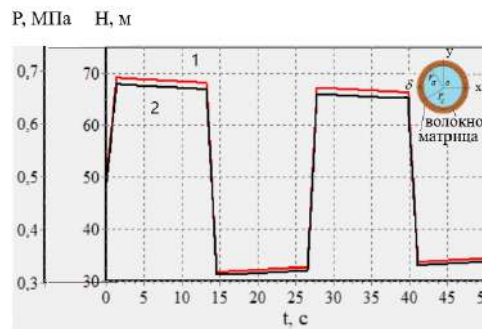


Рисунок 1 – Графики зависимости напора  $H$  (давления  $P$ ) от времени  $t$  вблизи клапана (задвижки) (при  $t_c = 0$  с;  $s = 0$ ;  $V = 1,48$  %) при перпендикулярном расположении волокон: график 1 –  $H$ , график 2 –  $P$  (толщина стенки  $\delta = 0,018$  м)

Таблица 1 – Изменение максимального напора  $H_{\max}$  (в метрах) и скорости  $C$  в зависимости от  $V$

Показатель	$V$ , %										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Скорость $C$ , м/с	225	680	823	916	990	1053	1109	1160	1208	1251	1291
Формула Жуковского $H_{\max}$ , м	61,6	82,3	92,7	97,5	101,3	104,6	107,5	110,2	112,6	114,9	117,0
Расчет Excel $H_{\max}$ , м	62,8	86,4	93,9	98,7	102,5	105,8	108,7	111,4	113,8	116,1	118,1
Метод характеристик $H_{\max}$ , м	61,4	85,0	92,4	97,3	101,1	104,3	107,3	110,0	112,4	114,6	116,7

Как видно из рисунка 1 и таблицы 1, армирование может увеличить скорость ударной волны и вызвать дополнительные гидравлические скачки давления в трубопроводе в основном за счет увеличения объемного содержания  $V$  армирующих волокон в трубе из композита. Значения  $H_{\max}$ , вычисленные по формуле Жуковского, по программе в Excel и по методу характеристик, достаточно близки (см. таблицу 1), отличие не превышает 3 %.

#### Список литературы

- 1 Жуковский, Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н. Е. Жуковский. – М. : Гостехтеоретлитиздат, 1949. – 104 с.
- 2 Water hammer Calculation Excel Sheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://engineeringxls.blogspot.com/2019/01/water-hammer-calculation-excel-sheet.html>. – Дата доступа : 15.05.2023.
- 3 Mahdy, M. 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). – Vol. VIII, is. I. 2019. – P. 9.
- 4 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.
- 5 Rahul Kr. Garg. Analysis of Hydraulic Transients in a Reservoir-Valve-Pipeline Arrangement by Using Method of Characteristics (MOC) / Rahul Kr. Garg, Dr. Arun Kumar // Conference Paper. – April 2018. – P. 9.
- 6 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. – Vol. 2016. – Article ID 8705031. – P. 10.

УДК 662.769.21

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДОРОДА ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

А. И. КИРИЛЕНКО, И. Л. БУРДИН

Белорусская государственная академия авиации, г. Минск

Во всех отраслях транспорта возрастает потребность в энергии, прежде всего нужен более эффективный энергоноситель. Перспективным направлением для достижения этих целей является во-