

ВЛИЯНИЕ КОМПОЗИТНОЙ ФУТЕРОВКИ ДВУХСЛОЙНЫХ ТРУБ, ПРИМЕНЯЮЩЕЙСЯ ПРИ ТЕХНОЛОГИИ САНАЦИИ ПОЛИМЕРНЫМ «ЧУЛКОМ», НА ПАРАМЕТРЫ ГИДРОУДАРА

В.В. Можаровский, С.В. Киргинцева

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

THE EFFECT OF THE COMPOSITE LINING OF DOUBLE-LAYER PIPES USED IN THE TECHNOLOGY OF POLYMER “STOCKING” SANITATION ON THE PARAMETERS OF A WATER HAMMER

V.V. Mozharovsky, S.V. Kirhintsava

Francisk Skorina Gomel State University

Аннотация. Исследуется влияние характеристик внутреннего покрытия двухслойных труб на параметры гидравлического удара (напор, давление) и расход (скорость) движущейся жидкости известным методом характеристик [1], [2]. Предложена методика и создана программа в среде Delphi, позволяющая определять параметры гидроудара при движении жидкостей в двухслойных трубах с покрытием из композита с различным расположением волокон в матрице композиционного материала при условии, что оси анизотропии совпадают с направлением волокон. Скорость волны жидкости в ортотропной трубе определялась по разработанной методике [3]–[5], показано, что полученные результаты хорошо согласуются с другими экспериментальными и теоретическими данными. Предложенная методика может применяться для новой технологии восстановления работоспособности трубопроводов путем вставки специального «чулка» из синтетического войлока (композита).

Ключевые слова: труба с покрытием, ортотропия, волокна, матрица, скорость волны, гидравлический удар, метод характеристик, напор, расход жидкости.

Для цитирования: Можаровский, В.В. Влияние композитной футеровки двухслойных труб, применяющейся при технологии санации полимерным «чулком», на параметры гидроудара / В.В. Можаровский, С.В. Киргинцева // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 4 (61). – С. 25–29. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_4_61_25. – EDN: QYDGBF

Abstract. The influence of the characteristics of the inner coating of double-layer pipes on the parameters of hydraulic shock (head (pressure) and flow rate (velocity) of a moving liquid) by the well-known method of characteristics is investigated [1], [2]. A technique has been proposed and a program has been created in the Delphi environment that allows determining the parameters of a water hammer when liquids move in two-layer pipes coated with a composite with a different arrangement of fibers in the matrix of a composite material, provided that the axes of anisotropy coincide with the direction of the fibers. The velocity of the liquid wave in the orthotropic tube was determined according to the developed method [3]–[5], it is shown that the results obtained are in good agreement with other experimental and theoretical data. The proposed technique can be used for a new technology for restoring the operability of pipelines by inserting a special “stocking” made of synthetic felt (composite).

Keywords: coated pipe, orthotropy, fibers, matrix, wave velocity, hydraulic shock, method of characteristics, pressure, fluid flow.

For citation: Mozharovsky, V.V. The effect of the composite lining of double-layer pipes used in the technology of polymer “stocking” sanitation on the parameters of a water hammer / V.V. Mozharovsky, S.V. Kirhintsava // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2024. – № 4 (61). – P. 25–29. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_4_61_25 (in Russian). – EDN: QYDGBF

Введение

При длительной эксплуатации трубопроводов часто возникают локальные повреждения вследствие коррозии металла, трещин, разрывов, устранение которых требует значительных затрат для ремонта. Действительно, обслуживание и ремонт подземных трубопроводов проводится путем извлечения поверхностных слоев грунта и раскопки открытых траншей, удаления изношенных трубопроводов, замены. Эти мероприятия по ремонту трудоемкие и длительные.

Поэтому во всем мире применяется новая технология восстановления работоспособности трубопроводов путем вставки специального «чулка» из синтетического войлока (или композита), который пропитан композитным материалом. Далее «чулок» из композита твердеет и внутри старого трубопровода формируется новая труба. В других странах эту технологию восстановления ещё называют технология CIPP («Cured – In – Place Pipe») трубопроводов. Несущая способность новой сформированной трубы остается сравнима с реконструируемой. Поэтому

очень важно изучать и строить математические модели расчета двухслойных труб, то есть, которые имеют футеровку. Так, в процессе эксплуатации таких трубопроводов для транспортировки любой жидкости или её прокачки насосом, безусловно, возникает явление гидроудара, которое может привести к разрушению покрытия из композита (футеровки). Для правильного выбора геометрических и физических параметров (свойств материала, выбор специальных волокон и т. д.) таких покрытий требуется создать методику расчета скорости движения ударной волны, силы удара и других механических параметров для характеристики при эксплуатации трубопровода.

1 Постановка задачи

Необходимо провести теоретические исследования, касающиеся определения скорости волны, напора и расхода жидкости при её течении в двухслойных трубах с изотропной и ортотропной футеровками при гидравлическом ударе. Рассматриваются двухслойные трубы длиной L с внутренним, средним и внешним радиусом r_a , r_b и r_c соответственно, с протекающей внутри жидкостью плотностью ρ (рисунок 1.1).

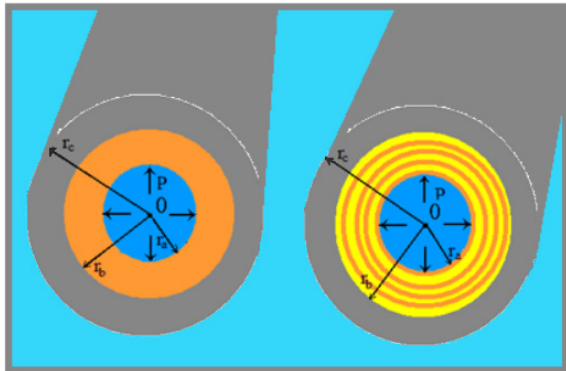


Рисунок 1.1 – Изотропная труба
а) с изотропной футеровкой;
б) с ортотропной футеровкой

2 Методика определения скорости волны и максимального давления при гидравлическом ударе

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]:

$$\Delta P = \pm \rho C V_0 \text{ или } \Delta H = \pm C V_0 / g, \quad (2.1)$$

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

Известно, что скорость ударной волны при движении жидкости в трубе, входящая в (2.1) для изотропных труб, определяется по формуле Н.Е. Жуковского [1]:

$$C = 1 / \sqrt{\frac{\rho}{K} + \rho \frac{D}{E\delta}}, \quad (2.2)$$

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

В настоящее время для расчета ударной волны для двухслойных труб и труб из композитов производится расчет скорости ударной волны на основе теории упругости анизотропного тела [3]–[6]. Так, в работе [3] выведены формулы, определяющие скорость волны при гидроударе для различных комбинаций слоистых упругих ортотропных свойств трубы и футеровки. Поэтому расчетная зависимость, определяющая скорость волны в двухслойных трубах, как для изотропных, так и для анизотропных, определяется по формуле:

$$C = \sqrt{\frac{K/\rho}{1+K\Omega}}, \quad (2.3)$$

– для изотропной трубы с изотропной футеровкой

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

$$\gamma = \frac{E^{(2)}}{1-\nu^{(2)}}, \quad g = \frac{-E^{(2)}}{1+\nu^{(2)}}, \quad \beta = \frac{-E^{(1)}}{1+\nu^{(1)}}, \quad \alpha = \frac{E^{(1)}}{1-\nu^{(1)}},$$

$E^{(2)}$ и $\nu^{(2)}$ – характеристики изотропной трубы, $E^{(1)}$ и $\nu^{(1)}$ – характеристики изотропной футеровки;

– для изотропной трубы с ортотропной футеровкой

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

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

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

$$A_{11} = \frac{E_r}{1 - \nu_{r0}\nu_{0r}}, A_{12} = \nu_{r0} \frac{E_0}{1 - \nu_{r0}\nu_{0r}}, A_{22} = \frac{E_0}{1 - \nu_{r0}\nu_{0r}}.$$

Механические свойства (модули упругости материала трубы E_0 , E_r и коэффициенты Пуассона ν_{0r} , ν_{r0}) представлены в случае плоского напряженного состояния в цилиндрической системе координат θrz 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], [5]:

– перпендикулярное расположение волокон по отношению к оси z :

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

$$E_0 = VE_f + (1 - V)E_m, \quad \nu_{r0} = V\nu_f + (1 - V)\nu_m,$$

$$\nu_{0r} = \frac{E_0}{E_r} \nu_{r0};$$

– радиальное расположение волокон по отношению к оси z :

$$E_r = VE_f + (1 - V)E_m, \quad E_0 = E_m \frac{1 + \eta V}{1 - \eta V},$$

$$\eta = \frac{E_f - E_m}{E_f + E_m}, \quad \nu_{r0} = \frac{E_r}{E_0} \nu_{0r}, \quad \nu_{0r} = V\nu_f + (1 - V)\nu_m;$$

– параллельное расположение волокон по отношению к оси z :

$$E_r = VE_f + (1 - V)E_m, \quad E_0 = E_r, \quad \nu_{r0} = \nu_{0r},$$

$$\nu_{0r} = V\nu_f + (1 - V)\nu_m.$$

3 Пример расчета давления и расхода жидкости в двухслойных трубах

По разработанной методике составлена программа в среде Delphi на основе метода характеристик, в которой учитывался расчет скорости волны для двухслойных труб и определялись основные параметры. Рассмотрим расчет

изотропной трубы (модуль упругости и коэффициент Пуассона трубы равны $E = 210$ ГПа, $\nu = 0,3$) с внутренним покрытием с радиусами $r_a = 0,147$ м, $r_b = 0,150$ м $r_c = 0,156$ м. Труба длиной $L = 2500$ м была 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; константа s , характеризующая быстроту закрытия клапана, принята равной 0 [5]. Скорость жидкости в трубе $V_0 = 1,47$ м/с. Произведен расчет напора и расхода жидкости и сделан анализ о влиянии расположения волокон (перпендикулярное, параллельное, радиальное) в матрице композиционного материала футеровки на скорость волны, давление и расход жидкости при гидроударе. В таблице 3.1 представлены характеристики покрытий, а также значения скорости, максимального напора H_{max} , вычисленного по методу характеристик, по формуле Жуковского и по программе в Excel [7].

Скорость волны для двухслойной трубы с изотропным покрытием, вычисленная по разработанной методике [3] совпадает с результатами, представленными в работе [6]. Из данных таблицы 3.1 видно, что H_{max} для двухслойной трубы с изотропным покрытием, вычисленные тремя способами (по методу характеристик, формуле Жуковского (2.1) со скоростью, вычисленной по формуле (2.3) и расчету Excel, используя формулу (2.3)), близки по значению.

На рисунке 3.1 представлены графики зависимости напора H и расхода жидкости Q от времени t для трубы с изотропным покрытием при $t_c = 0$ с, $s = 0$, вычисленные методом характеристик.

В формуле определения скорости волны и параметров гидроудара можно использовать формулу Жуковского (2.2), применяя правило «смесей» для определения эффективного модуля упругости двухслойной трубы.

Таблица 3.1 – Изменение максимального напора H_{max} (в метрах) и скорости C (м/с) в зависимости от характеристик покрытия

Покрытие	C , м/с	H_{max} , м (метод характеристик, формула (2.3))	H_{max} , м (формула (2.3))	H_{max} , м (расчет Excel, формула (2.3))
Изотропное ($E = 14,804$ ГПа, $\nu = 0,3$ [6])	1187	224,72	228,11	245,04
Ортотропное ($E_f = 86$ ГПа, $\nu_f = 0,22$, $E_m = 3,76$ ГПа, $\nu_m = 0,374$)	Перпендикулярное расположение волокон ($V = 30\%$) $E_r = 6,6$ ГПа, $E_0 = 28,4$ ГПа, $\nu_{r0} = 0,328$, $\nu_{0r} = 1,410$			
	1184,25	224,30	227,68	244,61
	Параллельное расположение волокон ($V = 30\%$) $E_r = 28,4$ ГПа, $E_0 = 28,4$ ГПа, $\nu_{r0} = 0,328$, $\nu_{0r} = 0,328$			
	1194,34	225,81	229,20	246,12
	Радиальное расположение волокон ($V = 30\%$) $E_r = 28,4$ ГПа, $E_0 = 6,6$ ГПа, $\nu_{r0} = 1,410$, $\nu_{0r} = 0,328$			
	1184,21	224,29	227,68	244,60

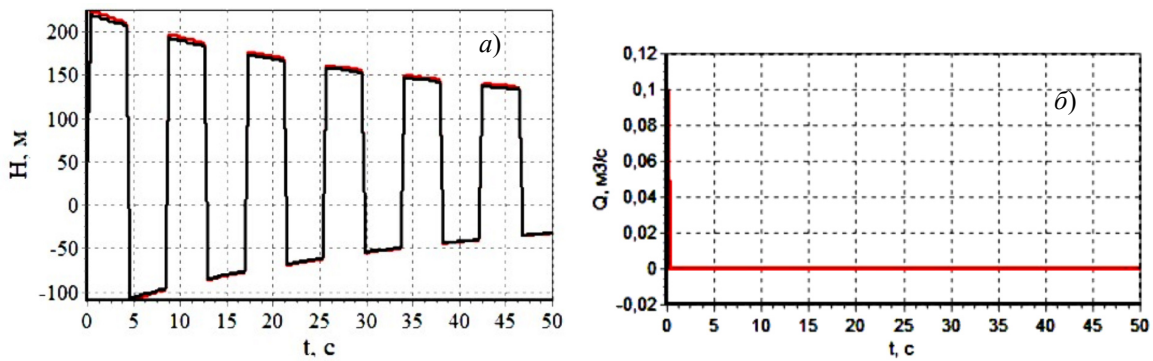


Рисунок 3.1 – а) напор H ; б) расход жидкости Q ($t_c = 0$ с, $s = 0$)

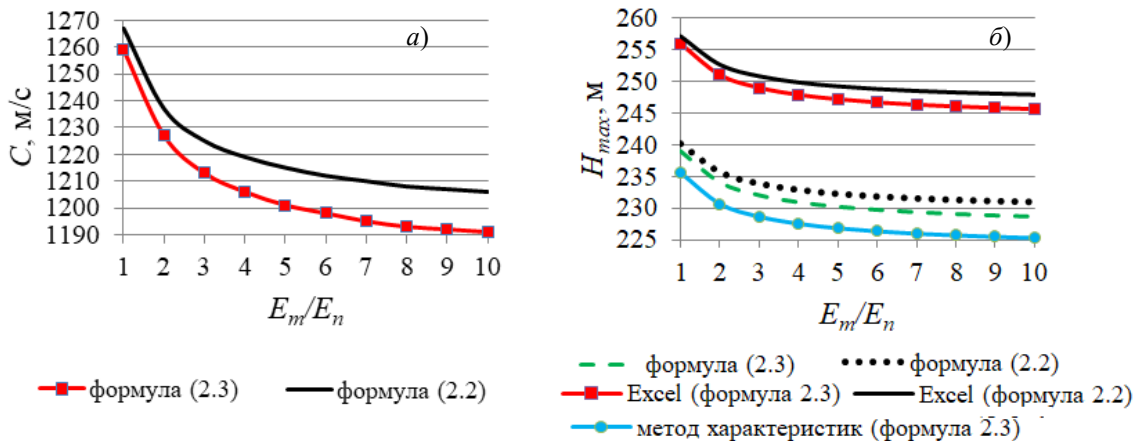


Рисунок 3.2 – Графики зависимости: а) скорости волны C от E_m / E_n ; б) напора H_{max} от E_m / E_n (покрытие изотропное)

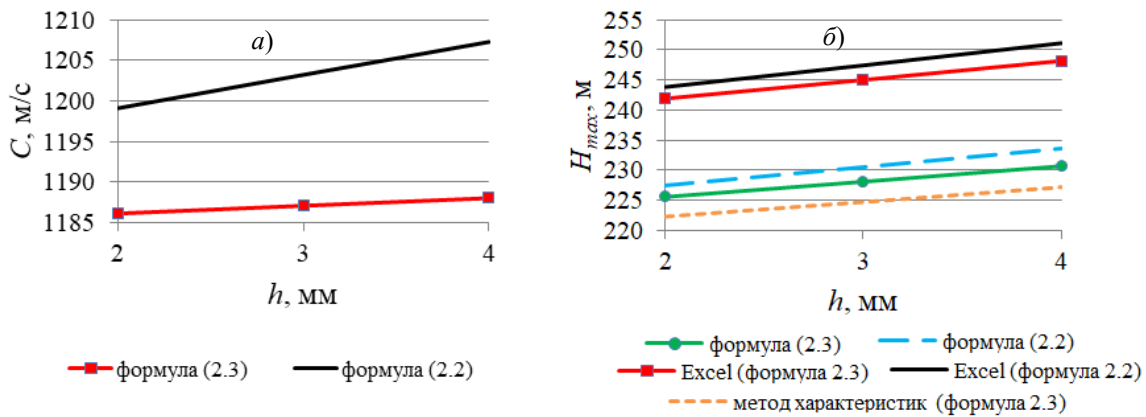


Рисунок 3.3 – Графики зависимости: а) скорости волны C от h ; б) напора H_{max} от толщины покрытия h (покрытие изотропное)

Графики зависимости скорости волны от соотношения модулей упругости трубы и покрытия E_m / E_n ($E_m = 210$ ГПа, E_n – модули упругости трубы и покрытия соответственно) в двухслойной трубе с изотропным покрытием, вычисленные по разработанной методике и по формуле Жуковского (в которой скорость волны гидроудара определяется, как по формуле (2.2), так и по (2.3)), представлены на рисунке 3.2 (а). Следует отметить, что в данном рассматриваемом

случае при заданных физико-механических характеристиках, отличие полученных результатов расчета параметров гидроудара незначительны, что может быть не характерно для других случаев, например, в случае двухслойной трубы с покрытием из композита.

На рисунке 3.2 (б) показаны графики зависимости напора H_{max} при движении жидкости в трубе с покрытием от соотношения модулей упругости трубы и покрытия E_m / E_n , вычисленные

по разработанной методике (формула (2.3)), формуле Жуковского (формулы (2.1), (2.2)), методом характеристик (формула (2.3)) и программой в Excel, используя формулы (2.2) и (2.3).

Исследование влияния толщины изотропного покрытия с механическими характеристиками, указанными в таблице 3.1, на параметры гидроудара показало, что в данном рассматриваемом случае с увеличением толщины внутреннего покрытия трубы скорость волны и напор увеличиваются по линейной зависимости, что отражено на рисунке 3.3.

На рисунке 3.4 представлен график зависимости скорости волны C от объемного содержания V и расположения волокон в футеровке двухслойной трубы.

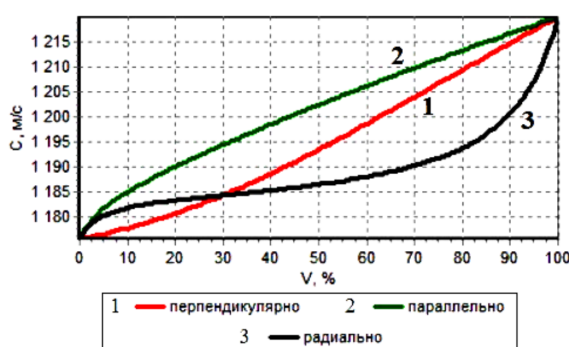


Рисунок 3.4 – График зависимости скорости волны C от объемного содержания V и расположения волокон в футеровке двухслойной трубы

На рисунке 3.5 представлен график зависимости напора H при движении жидкости в трубе от времени t при перпендикулярном расположении волокон по отношению к оси z ($V = 30\%$) при $t_c = 0$ с, $s = 0$. Расчеты показали, что существенных отличий в значениях напора H от рассматриваемых случаев расположения волокон для данной задачи не выявлено. В тоже время можно заметить о влиянии объемного содержания V и расположения волокон в футеровке двухслойной трубы на скорости волны C (рисунок 3.4).

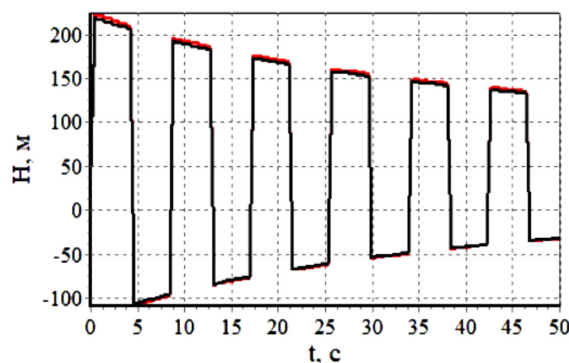


Рисунок 3.5 – График зависимости напора H от времени t при перпендикулярном расположении волокон ($V = 30\%$)

Заключение

Предложена методика определения параметров гидравлического удара (скорости волны, напора, расхода жидкости) при движении жидкостей в двухслойных трубах с внутренним покрытием, изотропным и из композита с разным расположением волокон в матрице композиционного материала при условии, что оси анизотропии совпадают с направлением волокон. Разработана компьютерная программа определения параметров гидроудара на основе метода характеристик. Показана необходимость проведения компьютерного расчета скорости, напора для оптимизации применяемых материалов труб и исключения гидравлических скачков давлений в трубопроводах с целью защиты от разрушений. Предложенная методика может применяться для новой технологии восстановления работоспособности трубопроводов путем вставки специального «чулка» (рукава) из синтетического войлока (композита).

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуковский, Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н.Е. Жуковский. – Москва: Гостехтеоретлитиздат, 1949. – 104 с.
2. 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 // International Conference Advancement in Technologies & its applications in Current Era (ICATACE-2018): Conference Paper, April 2018. – India. – 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. Wave celerity in hydraulic transients computation for cipp-rehabilitated pipes / F. Evangelista [et al.] // Int. J. Comp. Meth. and Exp. Meas. – 2020. – Vol. 8, № 4. – P. 326–340.
7. Water hammer Calculation Excel Sheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.coursehero.com/file/46340495/Water-Hammer-Calculationxsl/>. – Дата доступа: 15.05.2023.

Поступила в редакцию 24.06.2024.

Информация об авторах

Можаровский Валентин Васильевич – д.т.н., профессор
Киргинцева Светлана Викторовна – старший преподаватель