

Научная статья

УДК 532.542/.543

DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-79-85



## К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТРОЙНИКОВ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

*Палиивец Максим Сергеевич, канд. техн. наук, доцент;*

SPIN-код: 7783-7503; AuthorID: 705251; ORCID0000-0002-2518-2141; Scopus 57217030624; WOS Research ID AAE-5800-2022; paliivets@rgau-msha.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127454, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

**Аннотация.** Цель исследований – экспериментальное определение гидравлических сопротивлений несимметричных равнопроходных тройников с углом  $\alpha=90^\circ$  в металлополимерном трубопроводе, выявление зависимостей значений коэффициентов местных сопротивлений  $\zeta$  от соотношения расходов прямого прохода  $Q_2$  и расходов сборного рукава  $Q_3$ , их сравнение с существующими справочными данными и теоретическими зависимостями. В статье приведены результаты экспериментов и анализа по определению гидравлических сопротивлений в металлополимерном трубопроводе, метод теоретического определения коэффициентов сопротивлений в металлополимерном трубопроводе VALTECISO и метод определения значений коэффициентов местных гидравлических сопротивлений несимметричного равнопроходного (приточного) тройника с углом  $\alpha=90^\circ$ . Представлены полученные эмпирические зависимости значений коэффициентов местных сопротивлений  $\zeta=f(Q_2/Q_3)$  в несимметричном равнопроходном тройнике с углом  $\alpha=90^\circ$  в металлополимерном трубопроводе от соотношения разделяемых расходов  $Q_2/Q_3$  в ответвление вверх, на проход в прямом тройнике и деление потоков при различных внутренних диаметрах трубопровода VALTECISO для диапазона чисел Рейнольдса  $Re = 1 \cdot 10^4 \div 3,2 \cdot 10^4$ . Произведено сравнение полученных эмпирических зависимостей со справочными данными по формулам и экспериментальными данными для стандартных тройников с углами  $\alpha = 90^\circ$  и тройников из ковкого чугуна на резьбе  $\alpha = 90^\circ$  при делении потоков жидкости.

**Ключевые слова:** общие гидравлические потери напора, потери напора на трение, местные потери напора в тройнике, несимметричный равнопроходный (приточный) тройник с углом  $\alpha=90^\circ$ , коэффициент Дарси, коэффициент местного сопротивления

Формат цитирования. Палиивец М.С. К вопросу определения гидравлических сопротивлений тройников металлополимерных трубопроводов // Природообустройство. 2023. № 4. С. 79-85. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-79-85.

© Палиивец М.С., 2023

Original article

## ON THE ISSUE OF DETERMINING HYDRAULIC RESISTANCES OF TEES OF METAL-POLYMER PIPELINES

*Paliivets Maxim Sergeevich, Cand. tech. sciences, associate professor;*

SPIN code: 7783-7503; AuthorID: 705251; ORCID0000-0002-2518-2141; Scopus 57217030624; WOS Research ID AAE-5800-2022; paliivets@rgau-msha.ru

Russian State Agrarian University – MAA named after C.A. Timiryazev, 127454, Moscow, Timiryazevskaya st., 49, Russia

**Annotation.** The purpose of the conducted studies is experimental determination of hydraulic resistances of asymmetrical equal-pass tees with  $\alpha=90^\circ$  angle in the metal-polymer pipeline, identification of dependencies of local resistance coefficients  $\zeta$  on the ratio of flow rates of direct passage  $Q_2$  and flow rates of assembly hose  $Q_3$ , their comparison with existing reference data and theoretical dependencies. The article presents the results of experiments and analysis to determine hydraulic resistances in the metal polymer pipeline, provides the method of theoretical determination of resistance coefficients in the metal polymer pipeline VALTEC ISO and the method of determining the values of local hydraulic resistances of an asymmetric equal-pass (supply) T-joint with an angle of  $\alpha=90^\circ$ . The obtained empirical dependencies of the values of the local resistance coefficients of the  $\zeta=f(Q_2/Q_3)$  in the asymmetric equal-pass tee with an angle

of  $\alpha=90^\circ$  in the metal-polymer pipeline from the ratio of the separated flows  $Q_1/Q_3$  to the branch upwards, to the passage in the straight tee and the division of flows at different internal diameters of the VALTEC ISO pipeline for the range of Reynolds numbers  $Re = 1 \cdot 10^4 \div 3,2 \cdot 10^4$  are presented. The obtained empirical relationships were compared with reference data on formulas and experimental data for standard tees with angle  $\alpha = 90^\circ$  and tees made of ductile iron on thread  $\alpha = 90^\circ$  when dividing liquid flows.

**Keywords:** total hydraulic head losses, friction head losses, local head losses in the tee, asymmetric equal-pass (supply) tee with  $\alpha=90^\circ$  angle, Darcy coefficient, local resistance coefficient

**Format of citation:** Paliivets M.S. On the issue of determining hydraulic resistances of tees of metal-polymer pipelines // Prirodoobustrojstvo. 2023. № 4. P. 79-85. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-79-85.

**Введение.** При проектировании трубопроводов из металлополимерных материалов и их гидравлическом расчете учитываются потери напора на трение и потери напора на местных участках сопротивлений: в тройниках (приточных и вытяжных), в отводах, поворотах, в клапанах, шаровых кранах, вентилях и в других сопротивлениях.

Общие гидравлические потери напора – это сумма вышеприведенных потерь. Потери по длине определяются теоретически или экспериментальным путем. На местных участках они определяются по справочным данным или экспериментальным методом для конкретного местного участка сопротивлений. Кинематическая структура потока за этими местными участками сопротивлений является сложной, следовательно, в расчетах применение справочных данных или зависимостей не всегда возможно и корректно.

Повсеместное использование полимерных и пластиковых материалов способствует более широкому применению трубопроводов из металлополимерных материалов.

При гидравлическом расчете и проектировании металлополимерного трубопровода обязательным является использование значений экспериментальных коэффициентов местных потерь для точного учета потерь, что является актуальной задачей.

Исследованию гидравлических сопротивлений полипропиленовых труб и фитингов посвящена работа I. Cisowska, A. Kotowski [1]. Экспериментальные испытания потерь напора в пластмассовой арматуре изложены в статье T. Siwies, D. Morawski, G. Karaban [2], анализ формул расчета потерь напора по длине – в статье S.E. Kutukova [3]. Исследованию потерь напора трубопровода водоснабжения в процессе эксплуатации посвящена работа A. Lal, D. Morawski, M. Chalecki [4].

Исследованиями сопротивлений в тройниках трубопроводов занимались различные ученые. Так, в России тройники исследовали А.Д. Альтшуль, П.Н. Каменев, В.Н. Талиев, С.И. Левин, А.М. Курганов, П.Г. Киселев и В.И. Калищун, М.М. Андрияшев, а также И.Е. Идельчик [5, 6].

В силу специфики исследований подробнее будем рассматривать только несимметричные тройники (приточные) с углом  $\alpha = 90^\circ$  при условии равенства площади бокового подвода, прямого прохода и сборного рукава  $F_6 = F_{\pi} = F_c$ .

Данные экспериментов В.А. Зюбана [7] в стандартизованных тройниках трубопроводов судовых систем охлаждения показали, что значение коэффициента сопротивления  $\zeta$  тройников практически не зависит от числа Рейнольдса. В основном оно зависит от соотношения расходов и конструкции тройника, однако определить зависимости  $\zeta=f(Re)$  удалось [8].

Коэффициенты сопротивления тройника  $\zeta$  (приточный) при  $F_6 + F_{\pi} > F_c$ ,  $F_{\pi} = F_c$  из ковкого чугуна на резьбе  $\alpha = 90^\circ$  определяются по формулам из справочника [5]:

$$\text{в ответвление вверх} - \zeta_{c.6} = \frac{\Delta p_6}{\rho w_c^2 / 2}; \quad (1)$$

таблица и кривые  $\zeta_{c.6} = f\left(\frac{Q_6}{Q_c}\right)$  при различных  $\frac{F_6}{F_{\pi}}$  [5]:

$$\zeta_6 = \frac{\Delta p_6}{\rho w_6^2 / 2} = \frac{\zeta_{c.6}}{\left(\frac{Q_6}{Q_c} \frac{F_c}{F_6}\right)^2}. \quad (2)$$

Прямой проход:

$$\zeta_{c.\pi} = \frac{\Delta p_{\pi}}{\rho w_c^2 / 2}; \quad (3)$$

таблица и кривые  $\zeta_{c.\pi} = f\left(\frac{Q_{\pi}}{Q_c}\right)$  при различных  $\frac{F_6}{F_c}$  [5]:

$$\zeta_{\pi} = \frac{\Delta p_{\pi}}{\rho w_{\pi}^2 / 2} = \frac{\zeta_{c.\pi}}{\left(1 - \frac{Q_6}{Q_c}\right)^2}. \quad (4)$$

Для тройников типа  $F'_6 + F'_n > F'_c$ ,  $F'_n = F'_c$  величина  $A'$  представлена в таблице 1.54 [5], а  $K'_6$  принимается равной нулю.

Для тройников при  $F'_6 + F'_n = F'_c$  значения  $A' = 1,0$ , а  $K'_6$  – в таблице 1.55 [5].

Прямой проход:

для тройников при  $F'_6 + F'_n > F'_c$ ,  $F'_n = F'_c$  (в пределах  $\frac{w_n}{w_c} \leq 1,0$ ):

$$\zeta_{c.n} \equiv \frac{\Delta p_n}{\rho w_c^2 / 2} = \tau_n \left( \frac{Q_6}{Q_c} \right)^2, \quad (5)$$

где  $Q_6$  – расход бокового подвода;  $Q_c$  – расход сборного рукава;  $\tau_n$  – справочные данные [5].

В технической литературе имеется не так много новых публикаций по экспериментальному определению гидравлических потерь при течении ньютоновских жидкостей [9-12]. Есть большое количество экспериментов по определению коэффициентов местных сопротивлений в различных видах раздаточных и сборных тройниках, которые выполнили В.П. Зубов, Г. Фогель, Е. Кинне, Ф. Петерман, А. Гардель, J. Štigler [13], N.P. Costa [14], A. Li [15], F. Koka [16]. Также в полипропиленовых тройниках с дефектами эксперимент проводил коллектив исследователей M. Kalenik, M. Chalecki, P. Wichowski [17].

Конструктивное исполнение тройников является весьма разнообразным. Исследования проводились в результате отбора и сравнения коэффициентов сопротивлений приточных и вытяжных тройников с углом  $\alpha = 90^\circ$ , похожих по конструктивному исполнению и их применению при монтаже и использованию в составе металлополимерных трубопроводов.

#### Материал и методы исследований.

Экспериментальная установка в лаборатории гидравлики РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (рис. 1): насос Pedrollo с входным коленом, металлополимерный трубопровод VALTEC ISO, размещенный за выходным отверстием насоса. Далее – отдельные секции трубопровода соединялись фитингами и прямыми участками трубопровода с несимметричными тройниками (приточные) с углом  $\alpha = 90^\circ$ , прямые участки выбирались с учетом длин влияния местных сопротивлений экспериментальной установки, длина установки составляла  $625d = 10$  м.

Измерительные манометры для замера давлений размещались с учетом длин влияния измерительного расходомера и несимметричного равнопроходного тройника с углом  $\alpha = 90^\circ$  вверх и вниз по течению металлополимерного трубопровода. Скорость и расходы на участках

трубопровода измерялись с помощью датчиков TS-2 расходомера Streamlux.

Запись потерь давления и расходов датчика расходомера каждого измерения производилась через 30 мин после работы насоса установки при установившемся режиме.

*Методика расчета экспериментов.* В напорной металлополимерной трубе с внутренним диаметром  $d=0,16$  и  $0,20$ м расхода  $Q$  вычисляли площадь сечения и среднюю скорость по формулам:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}; \quad (6)$$

$$V = \frac{Q}{\omega}. \quad (7)$$

Зная температуру воды в лотке и значение коэффициента кинематической вязкости воды, вычисляли безразмерное число Рейнольдса по формуле:

$$Re = \frac{Vd}{\nu}, \quad (8)$$

где  $V$  – средняя скорость потока, м/с;  $d$  – внутренний диаметр трубопровода (0,16 и 0,20 м), м;  $\omega$  – площадь сечения трубопровода, м<sup>2</sup>;  $Q$  – расход потока жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с, при заданной температуре  $t^0=14^0-16^0$ С.

В соответствии с уравнением Дарси-Вейсбаха [18] определялись потери по длине:

$$h_{\omega_{1-2}} = \lambda \frac{l V^2}{d 2g}, \quad (9)$$

где  $V$  – средняя скорость потока, м/с;  $d$  – внутренний диаметр трубопровода (0,16 и 0,20), м;  $h_{\omega_{1-2}}$  – потери напора по длине, м;  $l$  – длина участка между манометрами;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

При оценке местных потерь напора из общих потерь вычислялись потери напора по длине на эквивалентном участке длины, где значения коэффициента Дарси изменялись в интервале  $\lambda = 0,02052 \div 0,02910$  в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re = 1 \cdot 10^4 \div 8 \cdot 10^4$ .

Экспериментально коэффициент местных сопротивлений тройника  $\zeta$  вычислялся на длине участка



Рис. 1. Экспериментальная установка

Fig. 1. Experimental setup

напорного металлополимерного трубопровода (рис. 2), а потеря напора местная в несимметричном (приточном) равнопроходном тройнике вычислялась по формуле [18] (рис. 2):

$$h_m = \zeta \frac{V^2}{2g}, \quad (10)$$

где  $V$  – средняя скорость потока, м/с;  $h_m$  – потеря напора на местном участке (тройнике), м;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

**Результаты и их обсуждение.** В результате экспериментов для различных  $Q_2$  – расходов прямого прохода,  $Q_3$  – расходов сборного рукава и средней скорости потока  $V$  для внутренних диаметров металлополимерного трубопровода VALTEC Ø16 и Ø20 мм получены статистические зависимости изменения значений коэффициента местных сопротивлений  $\zeta$  несимметричных равнопроходных тройников с углом  $\alpha=90^\circ$  в функции от соотношения расходов  $Q_2/Q_3$  для диапазона чисел Рейнольдса  $Re = 1 \cdot 10^4 \div 3,2 \cdot 10^4$  (рис. 3-6).

Погрешности экспериментальных значений оценивались по ГОСТ Р ИСО [19]: параметры – коэффициент Дарси  $\lambda$  и коэф-

фициент местных сопротивлений  $\zeta$ , формулы для оценки значений которых –

$$\lambda = 2 \cdot g \cdot \frac{\pi^2}{16} \cdot d^5 \cdot h_l \cdot l^{-1} \cdot Q^{-2}; \quad (11)$$

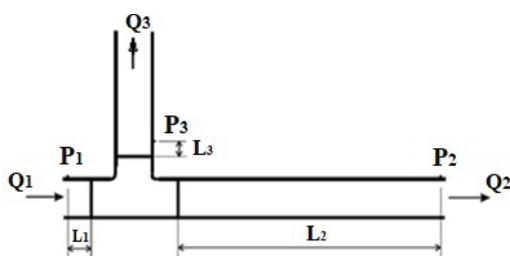
$$\zeta = g \cdot \frac{\pi^2}{2} \cdot d^4 \cdot h_m \cdot Q^{-2}. \quad (12)$$

В соответствии с формулами (11)-(12) были рассчитаны погрешности значений  $\lambda$  и  $\zeta$ . В формулы по расчету систематических ошибок  $\lambda$  и  $\zeta$  подставлялись измеряемые в эксперименте величины:

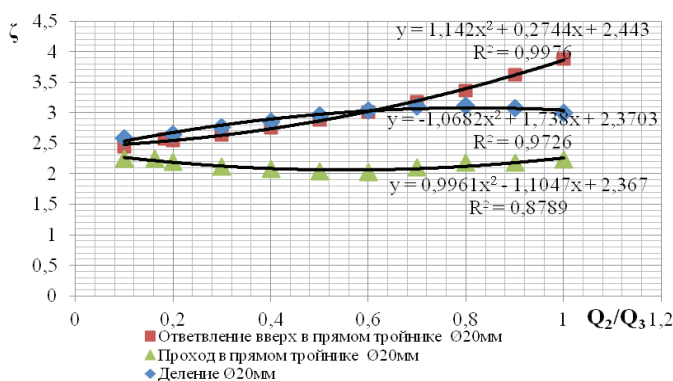
$$B_\lambda = \pm \lambda \cdot const \cdot \left( 5 \cdot \frac{B_d}{d} + \frac{B_{h_l}}{h_l} + (-1) \cdot \frac{B_l}{l} + (-2) \cdot \frac{B_Q}{Q} \right). \quad (13)$$

Случайная составляющая ошибки коэффициента  $\lambda$ :

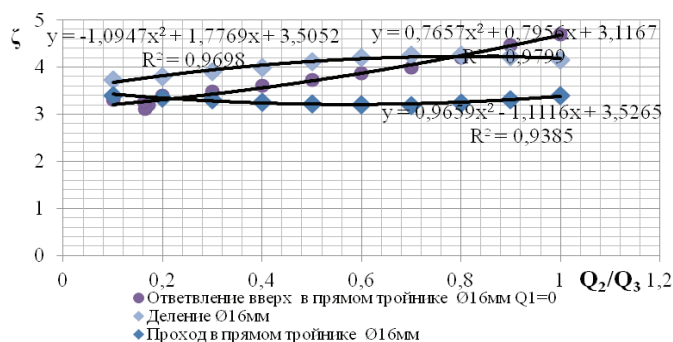
$$e_\lambda = \pm \lambda \cdot const \times \sqrt{5^2 \cdot \left(\frac{e_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{e_{h_l}}{h_l}\right)^2 + (-1)^2 \cdot \left(\frac{e_l}{l}\right)^2 + (-2)^2 \cdot \left(\frac{e_Q}{Q}\right)^2}. \quad (14)$$



**Рис. 2. Определение местной потери напора в несимметричном равнопроходном тройнике при делении потоков под углом  $\alpha = 90^\circ$**   
 Fig. 2. Determination of local head loss in an asymmetrical equal-pass tee when dividing flows at an angle of  $\alpha = 90^\circ$



**Рис. 3. Зависимости  $\zeta = f(Q_2/Q_3)$  прямого равнопроходного тройника VALTEC Ø 16 мм при делении потоков под углом  $\alpha = 90^\circ$ ,  $Re > 10^4$**   
 Fig. 3. Dependencies  $\zeta = f(Q_2/Q_3)$  of a straight equal-pass tee VALTEC Ø 16 mm when dividing flows at an angle of  $\alpha = 90^\circ$ ,  $Re > 10^4$



**Рис. 4. Зависимости  $\zeta = f(Q_2/Q_3)$  прямого равнопроходного тройника VALTEC Ø 20 мм при делении потоков под углом  $\alpha = 90^\circ$ ,  $Re > 10^4$**   
 Fig. 4. Dependencies  $\zeta = f(Q_2/Q_3)$  of a straight equal-pass tee VALTEC Ø 20 mm when dividing flows at an angle of  $\alpha = 90^\circ$ ,  $Re > 10^4$

Общая относительная ошибка определения коэффициента  $\lambda$ :

$$e = \pm \frac{\sqrt{B_\lambda^2 + e_\lambda^2}}{\lambda} \cdot 100\% = \pm 4,05\%. \quad (15)$$

Систематическая составляющая ошибки определения коэффициента  $\zeta$ :

$$B_\zeta = \pm \zeta \cdot const \cdot \left( 4 \cdot \frac{B_d}{d} + \frac{B_{h_M}}{h_M} + (-2) \cdot \frac{B_Q}{Q} \right). \quad (16)$$

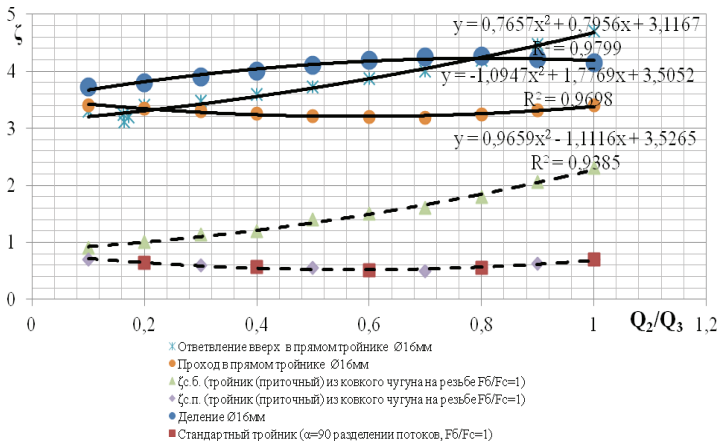


Рис. 5. Зависимости  $\zeta = f(Q_2/Q_3)$  прямого равнопроходного тройника VALTECØ16 мм при делении потоков под углом  $\alpha = 90^\circ$  и значениям  $\zeta$  с.б.,  $\zeta$  с.п. тройника (приточного) из ковкого чугуна на резьбе и стандартного тройника  $\alpha = 90^\circ$ ,  $Re > 10^4$

Fig. 5. Dependencies  $\zeta = f(Q_2/Q_3)$  of the VALTECØ 16 mm straight equal-pass tee when dividing flows at an angle of  $\alpha = 90^\circ$  and the values of  $\zeta$  s.b.,  $\zeta$  s.p. of the threaded ductile iron tee and standard tee  $\alpha = 90^\circ$ ,  $Re > 10^4$

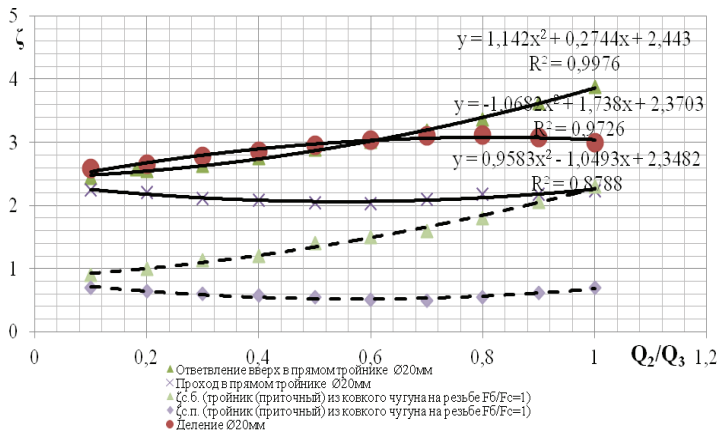


Рис. 6. Зависимости  $\zeta = f(Q_2/Q_3)$  прямого равнопроходного тройника VALTECØ 20 мм при делении потоков под углом  $\alpha = 90^\circ$  и значениям  $\zeta$  с.б.,  $\zeta$  с.п. тройника (приточного) из ковкого чугуна на резьбе и стандартного тройника  $\alpha = 90^\circ$ ,  $Re > 10^4$

Fig. 6. Dependencies  $\zeta = f(Q_2/Q_3)$  of the VALTECØ 20 mm straight equal-pass tee when dividing flows at an angle of  $\alpha = 90^\circ$  and the values of  $\zeta$  s.b.,  $\zeta$  s.p. of the threaded ductile iron tee and standard tee  $\alpha = 90^\circ$ ,  $Re > 10^4$

Случайная составляющая ошибки определения коэффициента  $\zeta$ :

$$e_\zeta = \pm \zeta \cdot const \cdot \sqrt{4^2 \cdot \left(\frac{e_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{e_{h_M}}{h_M}\right)^2 + (-2)^2 \cdot \left(\frac{e_Q}{Q}\right)^2}. \quad (17)$$

Общая относительная ошибка определения коэффициента  $\zeta$ :

$$e = \pm \frac{\sqrt{B_\zeta^2 + e_\zeta^2}}{\zeta} \cdot 100\% = \pm 3\%. \quad (18)$$

На рисунках 3-6 представлены экспериментально выявленные статистически достоверные зависимости коэффициентов местных сопротивлений тройников под углом  $\alpha=90^\circ$  в ответвление вверх, на проход и деление потока в трубопроводе VALTECØ16, Ø20 мм и сравнение со значениями  $\zeta$  с.б. (в ответвление вверх), и  $\zeta$  с.п. (на прямой проход) тройника (приточного) из ковкого чугуна на резьбе и стандартного тройника  $\alpha=90^\circ$  (справочные данные [5]) при числах Рейнольдса  $Re > 10^4$ .

Экспериментальные данные (рис. 3-6) по коэффициентам местных сопротивлений тройников получены в зависимости от соотношения расходов  $Q_2/Q_3$  и неизменном конструктивном исполнении тройников в отличие от исследований коллектива авторов М. Kalenik, М. Chalecki, Р. Wichowski [20, 21], которые получили коэффициенты местных сопротивлений в сварных полипропиленовых Т-образных соединениях диаметром 13,2 мм с различными дефектами, возникающими в результате прижатия сварных элементов(фитингов) друг к другу. Значения сопротивлений, выявленные авторами, и данные [20-22], полученные в зависимости от чисел Рейнольдса в интервале  $Re = 1 \cdot 10^4 \div 3,2 \cdot 10^4$ , выше значений данных D.C. Rennels, Н.М. Hudson [23] и справочных данных по стандартным тройникам с углом  $\alpha=90^\circ$  и тройникам (приточным) из ковкого чугуна на резьбе, использующихся для проектирования инженерных систем водоснабжения.

На рисунках 3-4 представлены графики зависимостей изменения коэффициентов местных сопротивлений  $\zeta$  при делении потока жидкости соотношения расходов  $Q_2/Q_3$  прямого равнопроходного тройника под углом  $\alpha=90^\circ$  в ответвление вверх, на проход и деление потока в трубопроводе VALTEC Ø16, Ø20мм при числах Рейнольдса  $Re > 10^4$ .

На рисунках 5-6 представлено сравнение зависимостей  $\zeta=f(Q_2/Q_3)$  прямого равнопроходного тройника под углом  $\alpha=90^\circ$  в ответвление вверх, на проход и деление потока в трубопроводе VALTEC  $\varnothing 16, \varnothing 20$  мм при делении потоков со значениям  $\zeta$  с.б. и  $\zeta$  с.п. тройника (приточного) из ковкого чугуна на резьбе и стандартного тройника  $\alpha=90^\circ$  при  $Re>10^4$ , значения коэффициентов местных сопротивлений тройников в трубопроводе VALTEC  $\varnothing 16, \varnothing 20$  мм выше, чем значения коэффициентов местных сопротивлений тройника (приточного) из ковкого чугуна на резьбе и стандартного тройника  $\alpha=90^\circ$ . Относительное расхождение между сравниваемыми значениями для значений коэффициентов местных сопротивлений изменяется от 45 до 84%.

Точность результатов экспериментов устанавливалась по требованиям ГОСТ Р ИСО, относительные ошибки составили: для коэффициента  $\lambda - \pm 4,05\%$ ; для местных сопротивлений  $\zeta - \pm 3\%$ .

#### Список использованных источников

1. **Cisowska I., Kotowski A.** Studies of hydraulic resistance in polypropylene pipes and pipe fittings // Foundations of Civil and Environmental Engineering. 2006. № 8. Pp. 37-57.
2. **Siwiec T., Morawski D., Karaban G.** Experimental tests of head losses in welded plastic fittings // Gaz Woda Technika Sanitarna. 2002. № 2. Pp. 49-68.
3. **Kutukov S.E., Golianov A.I., Chetvertkova O.V.** The establishment of pipeline hydraulics: retrospective of researches of hydraulic losses in pipes // OIJ. 2019. Iss. 7. Pp. 128-133. DOI: 10.24887/0028-2448-2019-7-128-133.
4. **Lal A., Morawski D., Chalecki M.** Hydraulic and Technological Investigations of a Phenomenon Responsible for Increase of Major Head Losses in Exploited Cast-Iron Water Supply Pipes // Water. 2021. № 13. P. 1604. <https://doi.org/10.3390/w13111604>.
5. **Грачев И.Г.** Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / Низовцев В.М., Пирогов С.Ю. и др. СПб.: АНО НПО «Мир и семья», 2001. 1154 с.
6. Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd Edn. By I.E. Idelchik. // Journal of Fluid Mechanics. 1998. Vol. 354. Pp. 376-378.
7. **Ковалев-Кривоносов П.А., Зюбан В.А., Умбрасас М.** – Р.А. Рекомендации по компоновке отводов и арматуры в составе блоков и агрегатов судовых систем. Вып. 285. // Сборник НТО им. А.Н. Крылова. Л.: Судостроение, 1978. С. 95-100.
8. **Kalenik M., Chalecki M., Wichowski P.** Real Values of Local Resistance Coefficients during Water Flow through Welded Polypropylene T-Junctions // Water. 2020. № 12(3). P. 895. DOI: 10.3390/w12030895.
9. **Kalenik M.** Empirical Formulas for Calculation of Negative Pressure Difference in Vacuum Pipelines // Water. 2015. № 7(10). Pp. 5284-5304.
10. **Kalenik M.** Real Values of Local Resistance Coefficient During Flow of Water Through Welded Polypropylene Elbows // Ochr. Sr. 2019. № 41. Pp. 23-30.
11. **Wichowski P., Siwiec T., Kalenik M.** Effect of the Concentration of Sand in a Mixture of Water and Sand Flowing through PP and PVC Elbows on the Minor Head Loss Coefficient // Water. 2019. № 11. Pp. 828.
12. **Basset M., Winterbone D., Pearson R.** Calculation of steady flow pressure loss coefficients for pipe

#### Выводы

В результате выполненных экспериментов получены эмпирические зависимости значений коэффициентов местных сопротивлений  $\zeta=f(Q_2/Q_3)$  в несимметричных равнопроходных тройниках (приточных)  $\alpha = 90^\circ$  при делении потока жидкости в зависимости от соотношения расходов  $Q_2/Q_3$  в ответвлении вверх, на прямой проход и делении потоков для диапазона чисел Рейнольдса  $Re = 1 \cdot 10^4 \div 3,2 \cdot 10^4$  для внутренних диаметров металлополимерного трубопровода VALTEC  $\varnothing 16$  и  $\varnothing 20$  мм, которые согласуются с известными справочными зависимостями и экспериментальными данными. Экспериментальные данные согласуются со справочными и теоретическими значениями для металлополимерных трубопроводов при числах Рейнольдса  $Re > 10^4$  и могут быть использованы при проектировании и гидравлических расчетах металлополимерного трубопровода VALTEC.

#### References

1. **Cisowska I., Kotowski A.** Studies of hydraulic resistance in polypropylene pipes and pipe fittings / I. Cisowska, A. Kotowski // Foundations of Civil and Environmental Engineering. 2006. № 8. P. 37-57.
2. **Siwiec T., Morawski D., Karaban G.** Experimental tests of head losses in welded plastic fittings / T. Siwiec, D. Morawski, G. Karaban // Gaz Woda Technika Sanitarna. 2002. 2. P. 49-68.
3. **Kutukov S.E.** The establishment of pipeline hydraulics: retrospective of researches of hydraulic losses in pipes / S.E. Kutukov, A.I. Golianov, O.V. Chetvertkova // OIJ. – 2019. – Volume 2019, Issue 07. P. 128-133. – DOI 10.24887/0028-2448-2019-7-128-133.
4. **Lal A., Morawski D., Chalecki M.** Hydraulic and Technological Investigations of a Phenomenon Responsible for Increase of Major Head Losses in Exploited Cast-Iron Water Supply Pipes / A. Lal, D. Morawski, M. Chalecki // Water. 2021. 13. P. 1604. <https://doi.org/10.3390/w13111604>.
5. **Grachev I.G.** Handbook on calculations of hydraulic and ventilation systems / I.G. Grachev, V.M. Nizovtsev, S.Yu. Pirogov N.P. and others. St. Petersburg: ANO NPO "The world and family", 2001. 1154 p.
6. Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd Edn. By I.E. Idelchik. Begell House, 1994. 790 pp. ISBN0-8493-9908-4. £138.95 // Journal of Fluid Mechanics. 1998. Vol. 354. P. 376-378.
7. **Kovalev-Krivososov P.A., Zyuban V.A., Umbra-sas M.** – P. Recommendations for the arrangement of bends and fittings as part of blocks and assemblies of ship systems. Sb. Scientific and Technical Association named after A.N. Krylov. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978. Vol. 285. P. 95-100.
8. **Kalenik M., Chalecki M., Wichowski P.** Real Values of Local Resistance Coefficients during Water Flow through Welded Polypropylene T-Junctions / Marek Kalenik, Marek Chalecki and Piotr Wichowski // Water. – 2020. 12(3). P. 895. DOI: 10.3390/w12030895.
9. **Kalenik M.** Empirical Formulas for Calculation of Negative Pressure Difference in Vacuum Pipelines / M. Kalenik // Water. 2015. 7(10). P. 5284-5304.
10. **Kalenik M.** Real Values of Local Resistance Coefficient During Flow of Water Through Welded Polypropylene Elbows / M. Kalenik // Ochr. Sr. 2019. 41. P. 23-30.

junctions // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2001. Pp. 861-881.

13. **Costa N.P., Maia R., Proença M.F., Pinho F.T.** Edge effects on the flow characteristics in a 90 deg Tee junction // Journal of Fluids Engineering. 2006. Vol. 128, Iss. 6. Pp. 1204-1217. <https://doi.org/10.1115/1.2354524>.

14. **Li A., Chen X., Chen L., Ga R.** Study on local drag reduction effects of wedge-shaped components in elbow and T-junction close-coupled pipes // Building Simulation. 2014. № 7(2). Pp. 175-184. DOI: 10.1007/s12273-013-0113-z.

15. **Koka F., Myoseb R., Hoffmannb K.A.** Numerical assessment of pulsatile flow through diverging tees with a sharp and round-edge junction // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2019. Vol. 76. Pp. 1-13. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.01.008.

16. **Kalenik M.** Real values of local resistance coefficient during flow of water through welded polypropylene elbows // OchronaSrodowiska. 2019. Vol. 41, Is. 1. Pp. 23-30.

17. **Kalenik M., Witowska B.** Research of local hydraulic resistance in PVC fittings // ACTA Scientiarum Polonorum. Architectura. 2007. Is. 6 (3). Pp. 15-24.

18. **Штеренлихт Д.В.** Гидравлика: учебник. 5-е изд., стер. СПб.: Издательство «Лань», 2015. 656 с.: ил.

19. ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Использование значений точности на практике. Введ. 2002-04-23. М.: Изд-во стандартов, 2002. 43 с.

20. **Kalenik M., Chalecki M., Wichowski P.** Real Values of Local Resistance Coefficients during Water Flow through Welded Polypropylene T-Junctions // Water. 2020. № 12(3). Pp. 895. DOI: 10.3390/w12030895.

21. **Kalenik M., Witowska B.** Research of local hydraulic resistance in PVC fittings // ACTA Scientiarum Polonorum. Architectura. 2007. Is. 6 (3). Pp. 15-24.

22. **Weinerowska-Bords K.** Experimental analysis of local energy loss coefficients for selected fittings and connectors in polymeric multilayer pipe systems // Instal. 2014. № 6. Pp. 42-49.

23. **Rennels D.C., Hudson H.M.** // A Practical and Comprehensive Guide; John Wiley Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2012. 320p.

11. **Wichowski P., Siwiec T., Kalenik M.** Effect of the Concentration of Sand in a Mixture of Water and Sand Flowing through PP and PVC Elbows on the Minor Head Loss Coefficient / P. Wichowski, T. Siwiec, M. Kalenik // Water. 2019.11. P. 828.

12. **Basset M., Winterbone D., Pearson R.** Calculation of steady flow pressure loss coefficients for pipe junctions / M. Basset, D. Winterbone, R. Pearson // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2001. P. 861-881.

13. **Costa N.P., Maia R., Proença M.F., Pinho F.T.** Edge effects on the flow characteristics in a 90 deg Tee junction / N.P. Costa, R. Maia, M.F. Proença, F.T. Pinho // Journal of Fluids Engineering. 2006. Volume 128, Issue 6. P. 1204-1217. <https://doi.org/10.1115/1.2354524>.

14. **Li, A., Chen X., Chen L., Ga, R.** Study on local drag reduction effects of wedge-shaped components in elbow and T-junction close-coupled pipes / A. Li, X. Chen, L. Chen, R. Gao // Building Simulation. 2014. 7(2). P. 175-184. DOI: 10.1007/s12273-013-0113-z.

15. **Koka F., Myoseb R., Hoffmannb K.A.** Numerical assessment of pulsatile flow through diverging tees with a sharp and round-edge junction / F. Koka, R. Myoseb, K.A. Hoffmannb // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2019. Volume 76. P. 1-13. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.01.008.

16. **Kalenik M.** Real values of local resistance coefficient during flow of water through welded polypropylene elbows / M. Kalenik // Ochrona Srodowiska. 2019. Vol. 41, No. 1. Pp. 23-30.

17. **Kalenik M., Witowska B.** Research of local hydraulic resistance in PVC fittings / M. Kalenik, B. Witowska // ACTA Scientiarum Polonorum. Architectura. 2007. Issue 6 (3). P. 15-24.

18. **Shterenlicht D.V.** Hydraulics: textbook. 5th ed., ster. St. Petersburg: "Lan" Publishing House, 2015. 656 p.

19. ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002. Accuracy (correctness and precision) of measurement methods and results. Putting accuracy values into practice. Introduction. 2002-04-23. Moscow: Publishing house of standards, 2002. 43 p.

20. **Kalenik M., Chalecki M., Wichowski, P.** Real Values of Local Resistance Coefficients during Water Flow through Welded Polypropylene T-Junctions / Marek Kalenik, Marek Chalecki and Piotr Wichowski // Water. 2020. 12(3). P. 895. DOI: 10.3390/w12030895.

21. **Kalenik M., Witowska B.** Research of local hydraulic resistance in PVC fittings // ACTA Scientiarum Polonorum. Architectura. 2007. Issue 6 (3). P. 15-24.

22. **Weinerowska-Bords K.** Experimental analysis of local energy loss coefficients for selected fittings and connectors in polymeric multilayer pipe systems / K. Weinerowska-Bords // Instal. 2014. 6. P. 42-49.

23. **Rennels D.C., Hudson H.M.** Pipe Flow / D.C. Rennels, H.M. Hudson // A Practical and Comprehensive Guide; John Wiley Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2012. 320p. ISBN: 978-0-470-90102-1.

#### Критерии авторства

Палиивец М.С. выполнил теоретические исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись. Палиивец М.С. имеет на статью авторское право и не сёт ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 19.03.2023

Одобрена после рецензирования 28.08.2023

Принята к публикации 28.08.2023

#### Criteria of authorship

Paliivets M.S. carried out theoretical research, on the basis of which he carried out a generalization and wrote a manuscript. Paliivets M.S. has copyright on the article and is responsible for plagiarism.

The article was submitted to the editorial office 19.03.2023

Approved after review 28.08.2023

Accepted for publication 28.08.2023