

Оригинальная статья

УДК 502/504:532.542/.543

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-102-108

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДА С УЧЕТОМ ДЛИН ВЛИЯНИЯ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

ПАЛИИВЕЦ МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент

maxim6663@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, ул. Б. Академическая, 44, Россия

Проектирование и расчет трубопроводов с учетом взаимного влияния местных сопротивлений является актуальной задачей в гидравлике напорных потоков. Приведен анализ и результаты гидравлического расчета металлополимерного трубопровода Valtec с учетом длин влияния местных сопротивлений их взаимного влияния (интерференции). Приведены табличные данные длин влияния местных сопротивлений, коэффициенты взаимного влияния, используемые в разработанной программе среды Delphi (Object Pascal). Представлен график зависимости удельных потерь давления на 1 метр длины трубопровода от расхода для трубопровода Valtec с эквивалентной шероховатостью $\Delta\epsilon/d = 0,007$ мм, полученных экспериментально и данных для аналогичного трубопровода по таблицам справочных данных с эквивалентной шероховатостью $\Delta\epsilon/d = 0,01$ мм. Показаны результаты расчетов и интерфейс прикладной программы среды Delphi 7 с данными в табличной форме для гидравлического расчета общих суммарных потерь давления в трубопроводах с учетом справочных и экспериментальных значений коэффициентов местных сопротивлений. Приводятся данные результатов гидравлического расчета суммарных потерь напора с учетом удельной линейной потери давления на 1 метр длины трубопровода без местных сопротивлений для определения потерь напора по длине. Разработанная программа может быть использована при проектировании, компоновке и гидравлическом расчете металлополимерных трубопроводов с заданными параметрами.

Ключевые слова: суммарные потери давления, длина начального участка, коэффициент взаимного влияния местных сопротивлений (интерференции), расход жидкости в трубе, скорость потока, число Рейнольдса

Формат цитирования: Палиивец М.С. Гидравлический расчет трубопровода с учетом длин влияния местных сопротивлений и их интерференции // Природообустройство. – 2022. – № 1. – С. 102-108. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-102-108.

© Палиивец М.С., 2022

Original article

HYDRAULIC CALCULATION OF THE PIPELINE TAKING INTO ACCOUNT THE LENGTHS OF THE INFLUENCE OF LOCAL RESISTANCES AND THEIR INTERFERENCE

PALIVETS MAXIM SERGEEVICH, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

maxim6663@mail.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev, 127434, Moscow, B. Akademicheskaya, 44, Russia

The design and calculation of pipelines taking into account the mutual influence of local resistances is an urgent task in the hydraulics of pressure flows. The analysis and results of the hydraulic calculation of the Valtec metal-polymer pipeline are given, taking into account the lengths of the influence of local resistances of their mutual influence (interference). Tabular data on the lengths of influence of local resistances, coefficients of mutual influence used in the developed program of the Delphi (Object Pascal) environment are given. A graph of the dependence of specific pressure losses per 1 meter of pipeline length on the flow rate for the Valtec pipeline with an equivalent roughness of $\Delta\epsilon/d = 0.007$ mm, obtained experimentally and data for a similar pipeline according to the reference data tables with an equivalent

roughness of $\Delta e / d = 0.01$ mm, is presented. The results of the calculations and the interface of the Delphi 7 environment application program with the data in a tabular form for the hydraulic calculation of the total pressure losses in pipelines are shown, taking into account reference and experimental values of coefficients of local resistances. The data of the results of the hydraulic calculation of the total head losses, taking into account the specific linear pressure loss per 1 meter of the pipeline length without local resistances, are given to determine the head losses by length. The developed program can be used in the design, layout and hydraulic calculation of metal-polymer pipelines with specified parameters.

Keywords: total pressure loss, pressure loss in local resistances, length of the initial, coefficient of mutual influence of local resistances (interference), fluid flow rate in the pipe, flow rate, Reynolds number

Format of citation: Paliivets M.S. Hydraulic calculation of the pipeline taking into account the lengths of the influence of local resistances and their interference // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – № 1. – S. 102-108. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-102-108.

Введение. Повсеместное применение композитных материалов и новые технологии изготовления труб способствуют более широкому применению трубопроводов из полимерных и металлополимерных материалов. Снижение суммарных потерь напора наряду с точным определением их значений является актуальной проблемой при транспортировке жидкостей трубопроводами. При гидравлическом расчете трубопроводов систем водо-, газо- и теплоснабжения, выполненных из полимерных и металлополимерных труб, необходимым условием является определение суммарной величины линейных потерь на трение и местных потерь напора.

Материал металлополимерного трубопровода был выбран для исследований вследствие его стойкости к отложениям минеральных солей и биологическому обрастанию оксидом железа в процессе эксплуатации в отличие от стальных трубопроводов, которые подвержены солевым отложениям (рис. 1) как это представлено в руководстве [1], а также широкого использования полимерных и металлополимерных труб в системах водоснабжения, отопления, почвенного подогрева, в составе трубопроводов, которые перекачивают неагрессивные жидкости.



Рис. 1. Сечение стального трубопровода после 8 лет эксплуатации

Fig. 1. Cross-section of the steel pipeline after 8 years of operation

При проектировании трубопроводов и гидравлическом расчете полимерных и металлополимерных труб рассчитывают два вида потерь напора:

- удельные линейные потери давления на 1 метр длины трубопровода;
- потери давления в местных сопротивлениях (сопротивления в арматуре трубопровода, в фасонных частях и элементах труб, в конфузорах и диффузорах, в отводах, поворотах и тройниках, в обратных клапанах, шаровых кранах, вентилях и других элементах.

При гидравлических расчетах трубопроводов суммарные потери напора, как правило, рассчитываются без учета взаимного влияния местных сопротивлений [1] или с применением методов учета, полученных И.Е. Идельчиком [2], некоторые численные данные расчетов элементов гидравлических систем получены в работе [3], исследования взаимного влияния местных сопротивлений приведены в работах [4-7].

При проектировании и расчете трубопроводов требуется учитывать значения удельных линейных потерь давления на 1 метр длины трубопровода и местных потерь напора с учетом их взаимного влияния для повышения точности гидравлического расчета, что является актуальной задачей.

Материал и методы исследований. Экспериментальный металлополимерный трубопровод Valtec размещался в лаборатории гидравлики РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (рис. 2), трубопровод закреплялся пластиковыми стяжками к основанию и состоял из внутренних и наружных слоев спитого полиэтилена, между ними слой алюминиевой фольги и клей на основе полиэтилена.

Через входной патрубок самовсасывающегося насоса Pedrollo JSWm 1CX (эжекторного типа) и далее через патрубок выходного отверстия вода поступала в трубопровод, который размещался вдоль лаборатории. Отдельные участки трубопровода объединялись с помощью

присоединительных фитингов, секции трубопровода размещались через заданное расстояние между фитингами, которое выбиралось с учетом длин влияния сопротивлений, и укладывались по всей длине равной $l = 625d = 10$ м.

Контрольно-измерительные приборы размещались с учетом длин влияния сопротивлений вниз по длине трубопровода и с учетом характеристик измерительного прибора. На трубопроводе размещались манометры VIEIR для фиксации потерь давления. Расход воды измерялся по показаниям портативного ультразвукового расходомера-счетчика Streamlux.

Так как вход напорного потока в трубопровод производился через патрубок и колено насоса, поэтому требовалось определить длину начального участка. Длина начального участка (стабилизации) в трубопроводе после выходного патрубка насоса в экспериментах составляла $l_{\text{нач}} = 93,75 \cdot d = 1,5$ м, что больше по значениям теоретических расчетов по формулам В.С. Боровкова и Ф.Г. Майрановского [8]:

$$l_{\text{нач}} = d \cdot \frac{0,52}{\lambda}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент Дарси в равномерном потоке; d – внутренний диаметр трубопровода.

Значения гидравлического коэффициента трения в опытах получены по зависимости $\lambda = 0,215 \cdot \text{Re}^{0,208}$ и изменялись в диапазоне $\lambda = 0,02052 \div 0,02910$ в пределах чисел Рейнольдса $\text{Re} = 1,0 \cdot 10^4 \div 8,0 \cdot 10^4$, тогда $l_{\text{нач}}$ по формуле (1) будет равна:

$$l_{\text{нач}} = 0,016 \cdot \frac{0,52}{(0,02052 \div 0,02910)} = (0,2859 \div 0,4054) \text{ м}$$

Контроль и запись измерений на экспериментальной установке производился после 15-30 минут работы насоса, чтобы обеспечить установившийся (стабилизированный) характер движения напорного потока.

Для того чтобы исключить влияние расходомера-счетчика Streamlux на результаты измерений расхода, измерительный створ располагался на таком расстоянии, где эпюра скоростей была уже равномерной, то есть на длине после узла местных сопротивлений равной $15d-35d$ (табл.).

Суммарные потери давления в трубопроводе рассчитывались по формуле:

$$\Delta P = R \cdot l + Z, \quad (2)$$

где R – удельная линейная потеря давления на один метр длины трубопровода, Па/м (определяется экспериментально или по таблицам справочных данных [1,9,10]); l – длина трубопровода, м; Z – потеря давления в местных сопротивлениях, Па/м.



Рис. 2. Экспериментальный трубопровод
Fig. 2. Experimental pipeline

Определение потерь давления на местных сопротивлениях: коэффициенты местных сопротивлений каждого из сопротивлений (повороты, отводы, фитинги, арматура), находящиеся вне зоны влияния друг от друга суммировались, в противном случае при их взаимном влиянии друг на друга общая сумма отдельных значений коэффициентов местных сопротивлений умножалась на коэффициент интерференции (табл.):

$$\psi = \zeta_{\text{узла}} / \sum \zeta, \quad (3)$$

где ψ – коэффициент взаимного влияния местных сопротивлений (интерференции) определяемый по таблице 1; $\zeta_{\text{узла}}$ – значение коэффициента местных сопротивлений узла для местных сопротивлений, находящихся в зоне взаимного влияния (меньше, чем длина влияния первого местного сопротивления); $\sum \zeta$ – алгебраическая сумма местных сопротивлений.

Сумма коэффициентов местных сопротивлений умножается на коэффициент интерференции (в случае их взаимного влияния) и на динамическое давление в этом случае потеря давления на местных сопротивлениях определялась по формуле:

$$Z = \psi \sum \zeta \frac{V^2}{2} \rho, \quad (4)$$

где $\psi \sum \zeta$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений на рассматриваемом участке трубопровода; V – средняя скорость потока в трубопроводе, м/с; ρ – плотность воды, кг/м³.

Значения длин влияния местных сопротивлений и коэффициенты интерференции узлов сопротивлений

Table 1

Values of the influence lengths of local resistances and interference coefficients of resistance nodes

№ п/п items	Комбинация узла местных сопротивлений <i>Combination of the node of local resistances</i>	Расстояние между двумя взаимовлияющими сопротивлениями $l_{вл}$ <i>Distance between two interacting resistances l_{vl}</i>	Значение коэффициента взаимного влияния ψ (коэффициент интерференции) <i>Value of the coefficient of mutual influence of ψ (interference coefficient)</i>
1	«Диафрагма – диафрагма» “Diaphragm – diaphragm”	1. $l > 5 \div 6d$ 2. $l = 0,25d$ 3. $l = 5 \div 6d$ $l_{вл} = (15...20) d$	1. $\psi = 1,05$ 2. $\psi = 0,36$ 3. $\psi = 1$
2	«Тройник – тройник» “Tee bend – tee bend”	1. $l < 20d$ 2. $l < 5d$ (зона интенсивного взаимного влияния) 1. $l < 20d$ 2. $l < 5d$ (zone of intensive influence)	1. $\psi = 0,6 \dots 1,6$
3	«Отвод – арматура», «отвод – отвод», «отвод – арматура», «арматура – отвод», «напорный патрубок насоса – трубные элементы и арматура» “Bend – armature”, “bend – bend”, “bend – armature”, “armature – bend”, “pressure branch pipe – pipe elements and armature”	1. $l < 10d$	1. $\psi = 0,85...1,25$
4	«Отвод – отвод», «Отвод – отвод – отвод» “Bend – bend”, “Bend – bend– bend”	1. $l < 5d, l = 5d$ (зона интенсивного взаимного влияния) 1. $l < 5d, l = 5d$ (zone of intensive mutual influence)	1. $\psi = 0,6...1,0$ 2. $\psi = 0,71...0,92; 0,83...0,92$ 3. $\psi = 0,68..0,81; 0,5...0,69$
5	«Проходной клапан – проходной клапан» “Full-flow valve – full-flow valve”	1. $l < 5d$ 2. $l = 5 \div 6d$	1. $\psi = 0,36$ 2. $\psi = 1,05$
6	«Запорная арматура – запорная арматура» “Shutoff valves – shutoff valves”	1. $l = 30 \div 40d$	1. $\psi = 0,85...1,07$
7	«Запорная арматура – тройник» “Shutoff valves – tee-bend”	1. $l = 2d$ 2. $l = 3,7d \div 17d$	1. $\psi = 0,8...1,10$ 2. $\psi = 0,8...1,10$
Параметры длин влияния местных сопротивлений при измерении расходомером- счетчиком Streamlux <i>Parameters of the lengths of influence of local resistances when measuring with a flowmeter- Streamlux</i>			
8	«Отвод – отвод» “Bend – bend”	$l = 15d$	-
9	«Конфузор – конфузор» “Taper pipe – taper pipe”	$l = 15d$	-
10	«Диффузор – Диффузор» “Diffuser – Diffuser”	$l = 15d$	-
11	«Соединение отводов «Утка» – отвод» “Connection of bends «Duck» – bend”	$l = 17d$	-
12	«Колено 90°-отвод-отвод» “Elbow 90°-bend-bend”	$l = 25d$	-
13	«Запорная арматура – арматура» “Shutoff valves – armature”	$l = 25d$	-
14	«Напорный патрубок насоса – трубные элементы и арматура» “Pressure branch pipe – pipe elements and armature”	$l = 35d$	-

В трубопроводе определялись площадь сечения и скорость течения воды:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (5)$$

$$V = \frac{Q}{\omega}. \quad (6)$$

В каждой серии экспериментов термометром измеряли температуру воды. По замерам определялся коэффициент кинематической вязкости воды и число Рейнольдса:

$$Re = \frac{Vd}{\nu}, \quad (7)$$

где V – средняя скорость потока, м/с; d – диаметр трубы, м; ω – площадь живого сечения трубы, м²; Q – расход воды, м³/с; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

Результаты и обсуждение. В результаты проведенных экспериментальных исследований по определению потерь напора по длине получены зависимости удельной потери энергии на один метр трубопровода от расхода, произведено сравнение справочных данных по руководству [1] с результатами экспериментов для трубопроводов Valtec с внутренним диаметром DN = 16 мм и DN = 20 мм (рис. 3), данные использованы в разработанной программе (рис. 4) для гидравлического расчета суммарных потерь давления по длине трубопровода с заданной относительной шероховатостью стенок $\Delta\varepsilon/d = 0,01$ мм или $\Delta\varepsilon/d = 0,007$ мм, диаметром DN = 16 мм = 0,016 м и диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 1,8 \cdot 10^4 \div 3,1 \cdot 10^4$, а также для расчета суммарных потерь давления по длине трубопровода с учетом взаимного влияния местных сопротивлений (рис. 4).

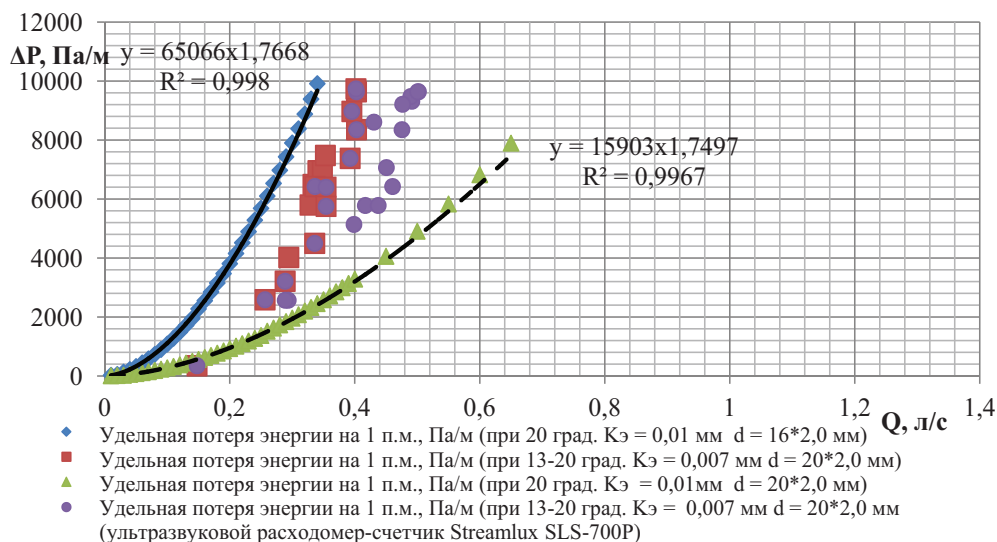


Рис. 3. График зависимости удельной потери давления на один метр трубопровода от расхода при $Re > 10^4$

Fig. 3. Graph of the dependence of the specific energy loss per one meter of the pipeline on the flow rate at $Re > 10^4$

В соответствии с разработанной в среде Delhi программой получены данные результатов расчета потерь напора в трубопроводе с учетом потерь в узлах местных сопротивлений при их взаимном влиянии (рис. 4) и без учета местных сопротивлений (только потери напора по длине).

Выводы

По экспериментальным гидравлическим исследованиям потерь напора по длине и местных потерь в коротком металлополимерном трубопроводе Valtec получены зависимости удельной потери энергии на один метр трубопровода с соответствующими гидравлическими характеристиками для расчета суммарных потерь давления без учета местных сопротивлений.

Результаты расчетов по разработанной программе показали, что относительное расхождение суммарных потерь давления в трубопроводе с учетом взаимного влияния местных сопротивлений узлов на 0,6%-3% ниже, чем без учета интерференции. Разработанная программа может быть использована при проектировании, компоновке и гидравлическом расчете металлополимерных трубопроводов с заданными параметрами: длины трубопровода l , внутреннего диаметра DN, плотности жидкости с учетом температуры, удельной линейной потери давления на 1 метр длины и расхода в трубопроводе, суммарного коэффициента местных потерь сопротивления на всем участке трубопровода, полученного по результатам экспериментальных данных

или справочных данных. Результаты расчетов могут быть использованы при выборе характеристик

насосного оборудования $H = f(Q)$ с учетом общих потерь давления в гидравлической системе.

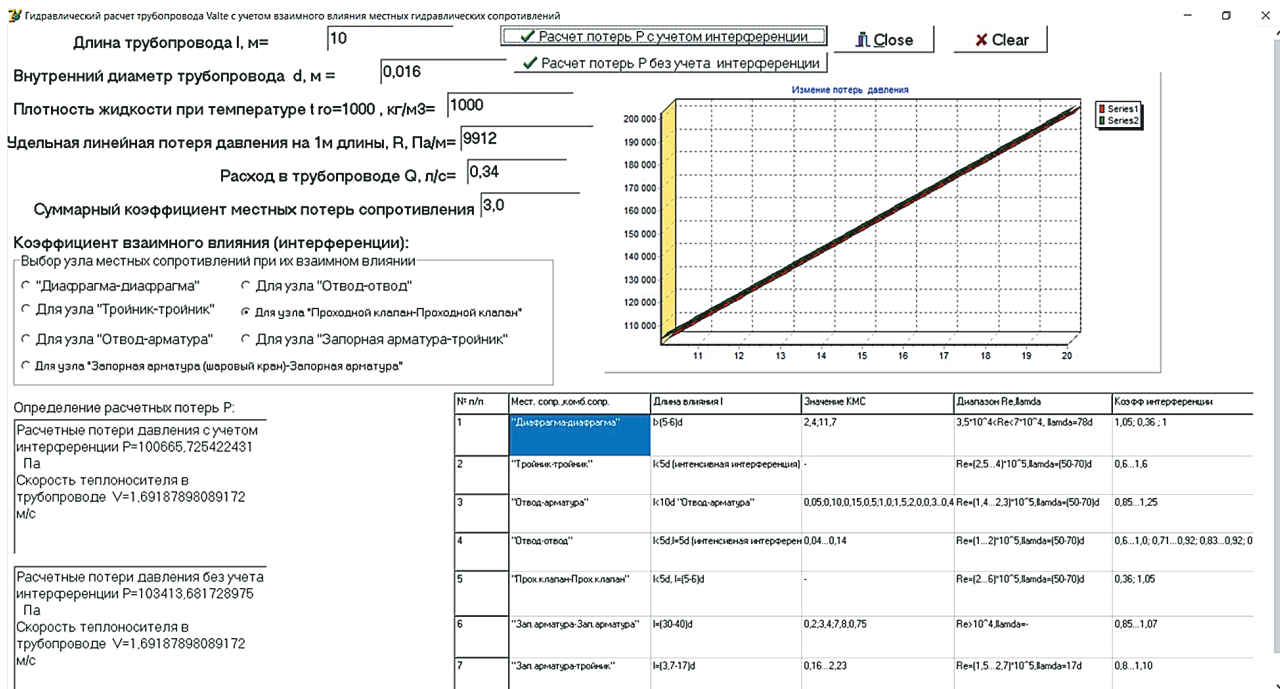


Рис. 4. Интерфейс программы гидравлического расчета

Fig. 4. Hydraulic calculation program interface

Библиографический список

1. Афонин А.Н., Сушицкий О.И. Руководство по проектированию, монтажу и эксплуатации систем холодного, горячего водоснабжения и отопления с использованием металлополимерных труб TM VALTEC. Под редакцией Горбунова В.И. – М.: ОАО «НИИСантехник», 2009. – 199 с.

2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.–Л.: Государственное энергетическое изд-во, 1960. – 464 с.

3. Левинтан Е.Ю., Шейпак А.А. Численное моделирование взаимного влияния элементов гидравлических систем // Известия Московского государственного промышленного университета. – 2009. – № 4(17). – С. 50-55.

4. Ковалев-Кривоносов П.А., Зюбан В.А., Умбрасас М.-Р.А. Рекомендации по компоновке отводов и арматуры в составе блоков и агрегатов судовых систем. Сб. НТО им. А.Н. Крылова. Вып. 285. – Л.: Судостроение, 1978. – С. 95-100.

5. Гольденберг И.З., Умбрасас М.-Р.А. Связь гидравлических потерь со скоростью вторичного течения в отводах трубопроводов. – Труды / Калининградский техн. ин-т рыб.пром. и hoz., 1975. – Вып. 58. – С. 36-42.

6. Снежко В.Л. Взаимное влияние местных гидравлических сопротивлений в трубопроводах блочно-комплектных насосных

References

1. Afonin A.N., Sushitskij O.I. Rukovodstvo po projektirovaniyu, montazhu i expluatatsii sistem holodnogo, goryachego vodosnabzheniya i otopleniya s ispolzovaniem metallopolimernyh trub TM VALTEC. Pod red. Gorbunova V.I. – M.: OAO "NIISantehniki, 2009. – 199 s.

2. Idelchik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam. – M.–L.: Gosudarstvennoe energeticheskoe izd-vo, 1960. – 464 s.

3. Levintan E. Yu, Shejpak A.A. Chislennoe modelirovanie vzaimnogo vliyaniya elementov gidravlicheskih system // Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta. – 2009. – № 4(17). – S. 50-55.

4. Kovalev-Krivososov P.A., Zyuban V.A., Umbrasas M.-R.A. Rekomendatsii po komponovke otvodov i armatury v sostave blokov i agregatov sudovyh system // Sb. NTO im. A.N. Krylova. Vyp. 285. – L.: Sudostroenie, 1978. – S. 95-100.

5. Goldenberg I.Z., Umbrasas M.-R.A. Svyaz gidravlicheskih poter so skorostjyu vtorichnogo techeniya v otvodah truboprovodov. Trudy Kaliningradskogo tehn. in-t ryb. prom. i hoz. Vyp. 58. – Kaliningrad: 1975. – S. 36-42.

6. Snezhko V.L. Vzaimnoe vliyaniye mestnyh gidravlicheskih soprotivlenij v truboprovodah blochno-komplektnykh nasosnyh stantsij / V.L. Snezhko // Otrasleyve aspekty tehnikeskikh nauk. – 2011. – № 2. – S. 06-08.

станций // Отраслевые аспекты технических наук. – 2011. – № 2. – С. 06-08.

7. **Снежко В.Л., Палиивец М.С.** Кинематическая структура потока и гидравлические сопротивления узла «регулируемая задвижка-тройник» в напорном водоводе // Природообустройство. – 2010. – № 2. – С. 54-59.

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

9. СП 40-103-98. Проектирование и монтаж трубопроводов систем холодного и горячего водоснабжения с использованием металлополимерных труб. <https://docs.cntd.ru/document/1200001315>

10. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / И.Г. Грачев, В.М. Низовцев, С.Ю. Пирогов, и др. – СПб.: АНО НПО «Мир и семья», 2001. – 1154 с.

Критерии авторства

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

Статья поступила в редакцию: 05.01.2022 г.

Одобрена после рецензирования 21.01.2022 г.

Принята к публикации 14.02.2022 г.

7. **Snezhko V.L., Paliivets M.S.** Kinematicheskaya struktura potoka i gidravlicheskie soprotivleniya uzla “reguliruemaya zadvizhka-trojnik” v napornom vodovode // Prirodoobustrojstvo. – 2010. – № 2. – S. 54-59.

8. **Shterenliht D.V.** Gidravlika: uchebnik. – 5-e izd., ster. – SPb.: Izdatelstvo “Lan”, 2015. – 656 s.

9. СП 40-103-98. Proektirovanie i montazh truboprovodov system holodnogo i goryachego vodosnabzheniya s spolzovaniem metallopolimernyh trub. <https://docs.cntd.ru/document/1200001315>

10. Spravochnik po raschetam gidravlicheskih i ventilyatsionnyh sistem / I.G. Grachev, V.M. Nizovtsev, S.Yu. Pirogov i dr. – SPb.: ANO NPO “Mir i semja”, 2001. – 1154 s.

Criteria of authorship

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

The article was submitted to the editorial office 05.01.2022

Approved after reviewing 21.01.2022

Accepted for publication 14.02.2022