

DOI: 10.18721/JEST.25206
УДК 621.64

Е.А. Локтионова, А.А. Голощапова, Е.А. Голощапова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Трубопроводы представляют собой инженерные сооружения разной степени сложности. Применение трубопроводов из полимерных материалов, нанесение защитных покрытий на внутреннюю поверхность труб, использование современной и высоконадежной трубопроводной арматуры приводят к снижению потерь энергии при движении текучих сред, увеличивают срок службы трубопроводных систем и, как следствие, уменьшают затраты на их эксплуатацию. Для гидравлического расчета трубопроводов на стадии их проектирования необходимы сведения о шероховатостях и коэффициентах сопротивления, а также экспериментальные исследования гидравлической совместимости используемых материалов. Предлагается переход от традиционной оценки пропускной способности трубопроводов к фильтрационным характеристикам потока. Приводятся результаты экспериментальных исследований на трубопроводах с разным гидравлическим сопротивлением.

Ключевые слова: напорный трубопровод, потери энергии, пропускная способность, коэффициент скорости, гидравлическое сопротивление, пористая среда, коэффициент фильтрации, коэффициент проницаемости.

Ссылка при цитировании:

Е.А. Локтионова, А.А. Голощапова, Е.А. Голощапова. Фильтрационная модель гидродинамического сопротивления напорных трубопроводов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 2. С. 78–86. DOI: 10.18721/JEST.25206.

E.A. Loktionova, A.A. Goloshchapova, E.A. Goloshchapova

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

FILTRATION MODEL OF HYDRODYNAMIC RESISTANCE OF PRESSURE PIPELINES

Pipelines are engineering structures of varying degrees of complexity. Using pipelines made of polymer materials, applying protective coatings to the inner surface of the pipes, using modern and highly reliable pipeline fittings lead to a decrease in energy losses during movement of fluid, increase the service life of pipeline systems and, as a result, reduce the cost of their operation. Hydraulic calculation of pipelines at the stage of their design involves obtaining information about the roughness and resistance coefficients, as well as experimental studies of hydraulic compatibility of the materials used. The transition from traditional assessment of pipeline capacity to the filtration characteristics of the flow is proposed. The results of experimental studies on pipelines with different hydraulic resistances are presented.

Keywords: Pressure pipelines, energy loss capacity, speed index, hydraulic resistance, porous medium, filtration coefficient.

Citation: E.A. Loktionova, A.A. Goloshchapova, E.A. Goloshchapova, Filtration model of hydrodynamic resistance of pressure pipelines, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25 (2) (2019) 78–86, DOI: 10.18721/JEST.25206.

Введение. Рост внимания к гидравлическому расчету и экспериментальным исследованиям трубопроводов в последние десятилетия связан, главным образом, с экономическими и социальными аспектами [1–7].

Использование новых высокотехнологичных материалов при производстве трубопроводов, широкое применение контрольно-измерительных приборов, установка расходомеров и редукторов давления, использование запорного оборудования и трубопроводной арматуры высокого качества и надежности – все это обусловлено насущными потребностями практики, с одной стороны и ведет к снижению энергетических затрат, с другой стороны [8].

Однако потребности практики, рост производства трубопроводов и их элементов опережают уровень экспериментальных исследований, необходимых для надежного гидравлического расчета трубопроводов разного назначения. Особенно это касается сложных трубопроводных систем (типа водопроводных), где в одну сеть объединены не только трубы разных диаметров, но и участки, выполненные из разных материалов. Ввиду разного гидравлического сопротивления таких участков в отдельных случаях может возникнуть «гидравлический дисбаланс» [2] – несоответствие скоростей движения жидкости и напоров.

Основной задачей гидравлического расчета трубопроводов является определение потерь напора (рассеиваемой мощности) при движении жидкости. Следует признать, что в настоящее время имеется недостаточно сведений о значениях шероховатостей труб, выполненных из полимерных материалов разной структуры, и трубопроводов со специальными покрытиями внутренней поверхности. Также зачастую отсутствуют данные о численных значениях коэффициентов сопротивления кранов, решеток, редукторов давления и других источников местных потерь напора, появившихся на рынке в последние годы. Все это не может дать гарантии надежной оценки потерь напора на

стадии проектирования трубопроводов и прогноза изменения пропускной способности трубы в процессе ее эксплуатации.

Методы исследования

При расчете трубопроводов различного назначения пользуются традиционными зависимостями для средней скорости v , полученными из интеграла Бернулли:

при истечении в атмосферу

$$v = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_f}} \cdot \sqrt{2gH} = \varphi \cdot \sqrt{2gH}; \quad (1)$$

при истечении под уровень

$$v = \frac{1}{\sqrt{\zeta_f}} \cdot \sqrt{2gZ} = \varphi \cdot \sqrt{2gZ}, \quad (2)$$

здесь ζ_f – полный коэффициент сопротивления (потерь напора); φ – коэффициент скорости (расхода); H и Z – соответственно напор над центром тяжести выходного сечения и разность уровней в водоемах.

Аналогично для расхода

$$Q = \varphi \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \text{ и } Q = \varphi \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot Z}. \quad (3)$$

Коэффициенты ζ_f и φ характеризуют пропускную способность трубы, которая зависит от многих факторов: геометрических особенностей трубопровода, наличия участков с местными сопротивлениями, условий на входе и выходе, материала трубопровода, условий и времени его эксплуатации и др.

Все эти зависимости для коэффициентов ζ_f и φ сложны, разнородны и зачастую не исследованы. Соответственно их невозможно представить в виде формул, удобных для практических расчетов.

В работе [9] на примере трубопроводов, снабженных на выходе перфорированными сетками, предложен переход от действительного потока жидкости через систему сопротивлений к расчетному фильтрационному потоку через пористую среду. Другими словами, средняя скорость движения жидкости в трубо-

проводе заменена на скорость фильтрации, и вместо коэффициентов скорости и сопротивления введены размерные коэффициенты фильтрации и проницаемости.

В большинстве практических задач в реальных напорных трубах имеет место область квадратичного сопротивления турбулентного режима движения жидкости (в некоторых случаях единственно допустимый). Согласно квадратичному закону турбулентной фильтрации замена в (1) и (2) средней скорости на скорость фильтрации производится в соответствии с равенством [10–13]

$$v = k\sqrt{J}, \quad (4)$$

где k – коэффициент фильтрации; J – гидравлический уклон.

При свободном истечении в атмосферу

$$J = \frac{h_f}{l} = \frac{H - v^2 / 2g}{l}, \quad (5)$$

где h_f – полная потеря напора; l – длина участка трубопровода (длина пути фильтрации).

При истечении под уровень

$$J = \frac{h_f}{l} = \frac{Z}{l}. \quad (6)$$

Тогда из (1) и (2) с учетом (4)–(6) следует

$$\varphi \cdot \sqrt{2gH} = k\sqrt{\frac{H - v^2 / 2g}{l}} \quad (7')$$

$$\text{и } \varphi \cdot \sqrt{2gZ} = k\sqrt{\frac{Z}{l}}. \quad (7'')$$

Откуда

$$k = \frac{\varphi \cdot \sqrt{2gH}}{\sqrt{\frac{H - v^2 / 2g}{l}}} = \frac{\varphi \cdot \sqrt{2gH \cdot l}}{\sqrt{H - v^2 / 2g}}, \quad (8')$$

$$k = \frac{\varphi \cdot \sqrt{2gZ}}{\sqrt{\frac{Z}{l}}} = \varphi \cdot \sqrt{2g \cdot l} = \frac{1}{\sqrt{\zeta_f + 1}} \cdot \sqrt{2g \cdot l} \quad (8'')$$

при истечении в атмосферу и под уровень соответственно.

Поскольку в реальных трубах $v^2 / 2g \ll H$, то выражения (8') и (8'') тождественны.

Как видно из равенства (8''), коэффициент фильтрации трубопровода в области квадратичного сопротивления турбулентного режима зависит от длины трубы и пропорционален \sqrt{l} (помимо зависимости от l , входящей в ζ_f в связи с потерями напора по длине). На рис. 1 представлен график $\varphi = f(k)$ в соответствии с равенством (8''). Рис. 2 иллюстрирует линейную связь между коэффициентом скорости и безразмерным комплексом $k / \sqrt{2g \cdot l}$. Зависимость коэффициента сопротивления ζ_f от $k / \sqrt{2g \cdot l}$ (рис. 3) показывает, что при больших сопротивлениях ($\zeta_f > 50$) указанный комплекс слабо зависит от величины ζ_f , при малых – его значение в значительной степени определяется набором сопротивлений в трубопроводе.

К преимуществам введения коэффициента фильтрации k следует отнести его очевидный физический смысл: k имеет размерность скорости и, как правило, порядок средней скорости в трубе. Коэффициент фильтрации зависит от тех же факторов, что ζ_f и φ , являясь обобщенным представительным параметром конкретного трубопровода. Еще один характерный параметр, принятый в теории фильтрации – коэффициент проницаемости [12], можно также рассматривать как меру фильтрационной проводимости трубопровода

$$k_{\Pi} = \frac{k \cdot v}{g}, \quad (9)$$

где v – кинематический коэффициент вязкости жидкости.

Коэффициент проницаемости имеет размерность площади и применительно к гидравлике труб представляет собой эффективную площадь сечения трубопровода, через которую фильтрует поток жидкости. Согласно (9) коэффициент проницаемости k_{Π} также пропорционален \sqrt{l} и зависимость $\varphi = f(k_{\Pi})$ имеет тот же характер, что и зависимость $\varphi = f(k)$ на рис. 1.

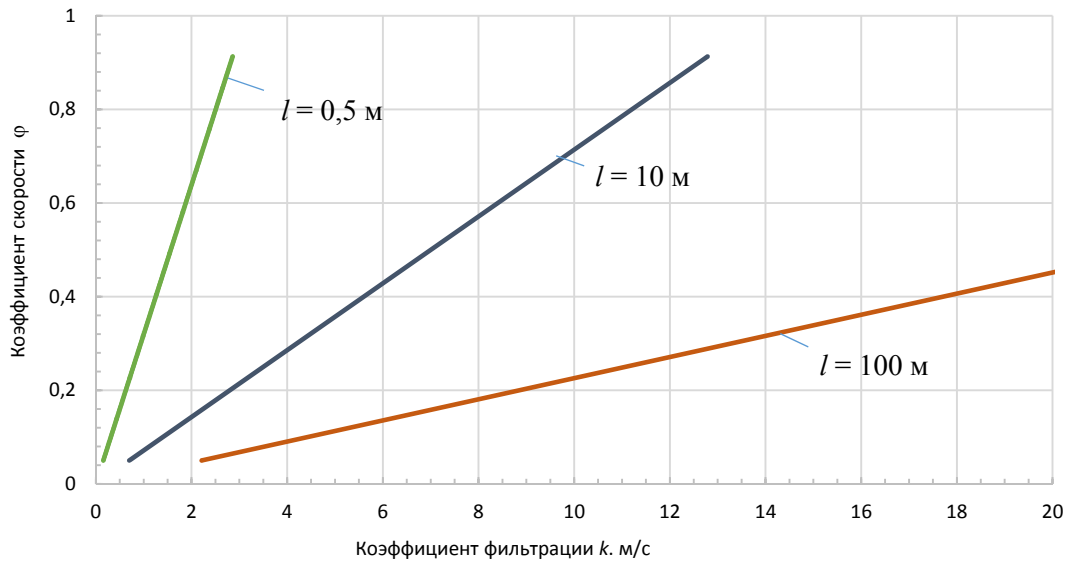


Рис. 1. График зависимости $\varphi = f(k)$
 Fig. 1. Dependency schedule $\varphi = f(k)$

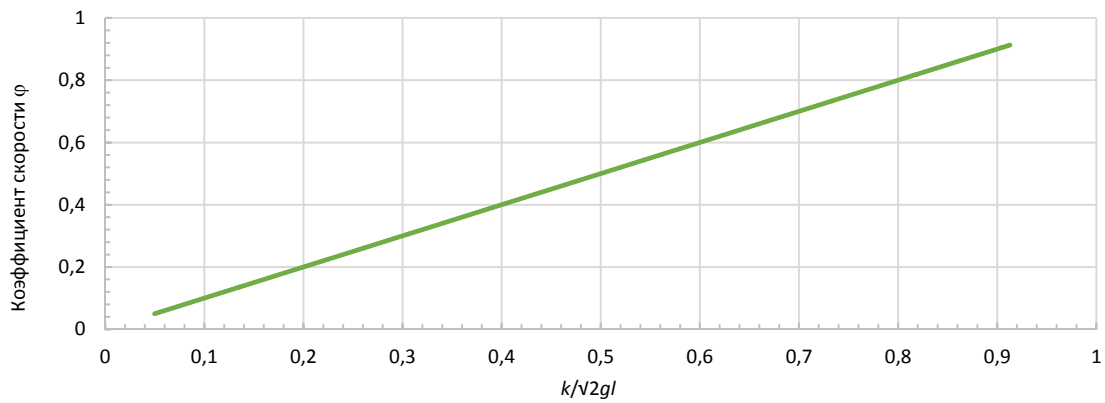


Рис. 2. График зависимости $\varphi = f\left(k / \sqrt{2g \cdot l}\right)$
 Fig. 2. Dependency schedule $\varphi = f\left(k / \sqrt{2g \cdot l}\right)$

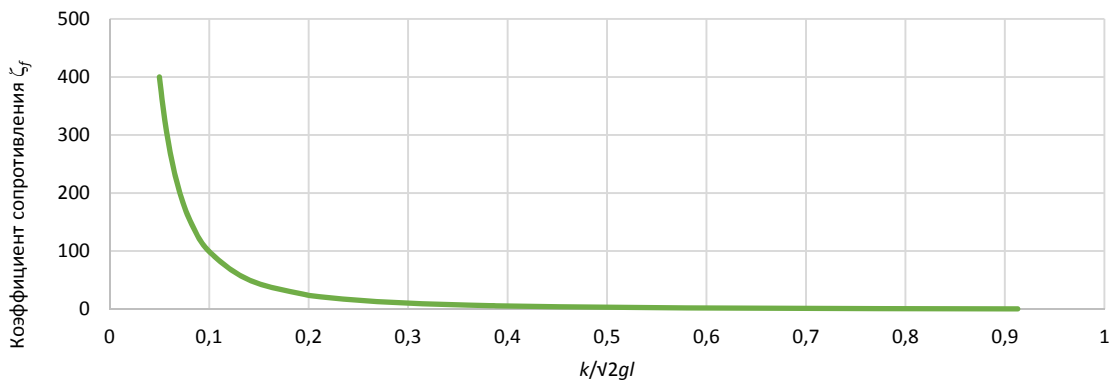


Рис. 3. Влияние гидравлических сопротивлений на величину $k / \sqrt{2g \cdot l}$
 Fig. 3. The influence of hydraulic resistance on the value $k / \sqrt{2g \cdot l}$



Рис. 4. Схема участка системы водоснабжения
Fig. 4. Schema of water supply system section

Для иллюстрации предложенного подхода рассмотрим три частных случая, исследованных экспериментально. Первый случай – короткий трубопровод, в выходном сечении которого устанавливались плоские перфорированные сетки разной поверхностной пористости [9]. Второй случай – трубопровод с искусственным засорением [14]. Случай 3 – участок модели системы внутреннего водоснабжения с набором местных сопротивлений (редуктор давления, манометр, расходомер, шаровой кран) – рис. 4. Все исследованные трубопроводы одинаковой длины и диаметра.

Пропускная способность трубопровода в каждом из указанных случаев определяется своими характерными параметрами. Для плоских перфорированных сеток такими параметрами являются: поверхностная пористость, взаимное расположение и число отверстий [9]; для засоренного трубопровода – тип и степень его засорения (некоторый аналог объемной пористости) [14]; для случая 3 – перепад давления Δp на входе к потребителю, фиксируемый редуктором давления.

Для варианта 3 на модели системы внутреннего водоснабжения проводились экспериментальные исследования по методике,

аналогичной [9] и [14]. По данным опытов определялись коэффициенты скорости φ и сопротивления ζ_f отдельных потребителей в соответствии с зависимостями [15]

$$\varphi = \frac{Q}{\omega} \sqrt{\frac{\rho}{2 \cdot \Delta p}}, \quad \zeta_f = \frac{1}{\varphi^2} - 1, \quad (12)$$

а также устанавливались коэффициенты фильтрации и проницаемости по формулам (8) и (9). На рис. 5 представлена зависимость коэффициента скорости от коэффициента проницаемости трубопровода для всех исследованных случаев.

Опытные данные, совмещенные с теоретическим расчетом рис. 3, приведены на рис. 6. На рис. 7 тот же график представлен в логарифмическом масштабе по оси ординат для более наглядного представления экспериментальных данных и их соответствия предполагаемой теории в области малых значений коэффициентов сопротивления.

Таким образом, при известных расходах жидкости Q , имея зависимости, подобные рис. 5 (или аналогичные для коэффициента фильтрации и сопротивления – рис. 6) для конкретного трубопровода, можно судить об изменении пропускной способности трубы и делать прогнозы в отношении его фильтрационной проводимости.

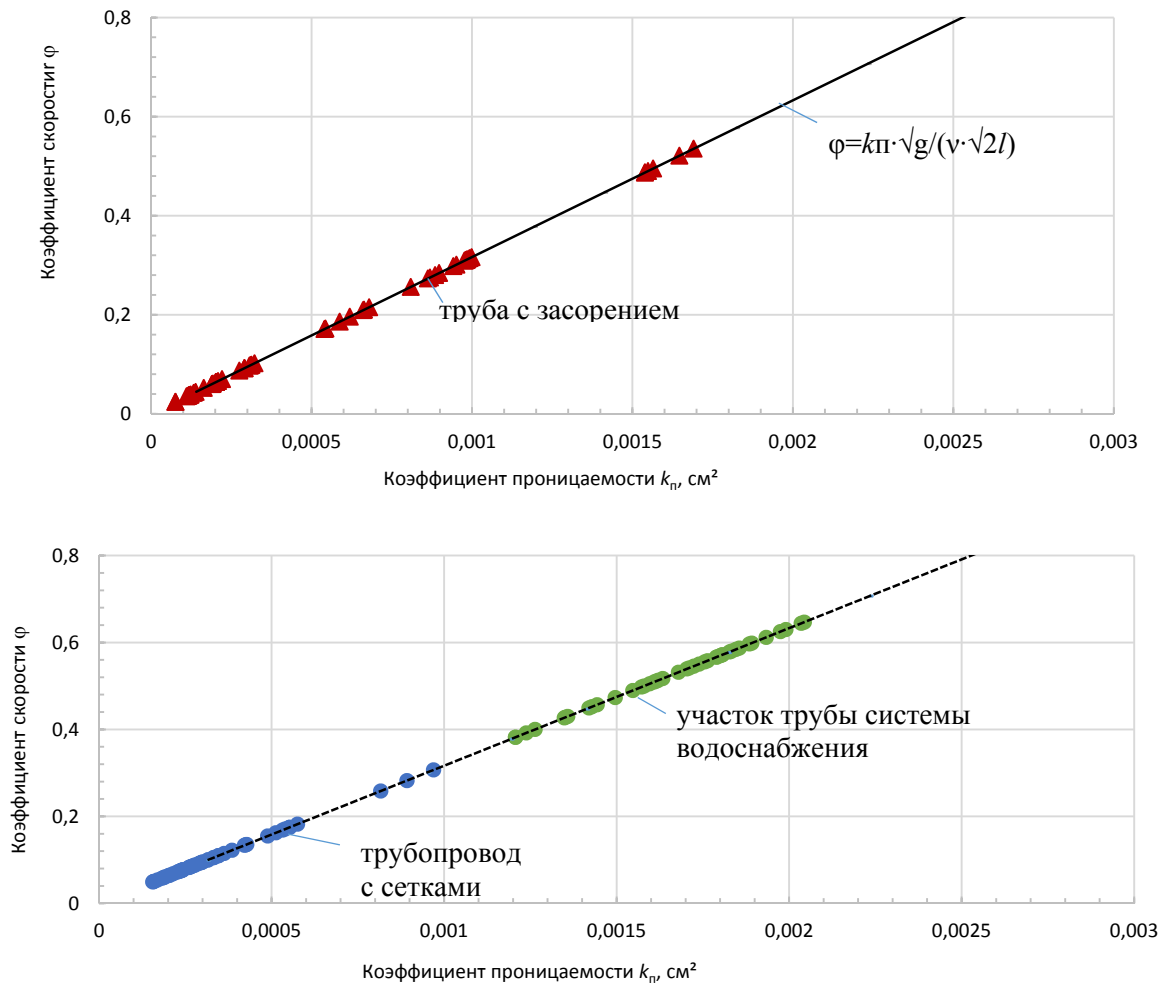


Рис. 5. Графики зависимости $\varphi = f(k_n)$ для трубопроводов с разным типом гидравлического сопротивления
 Fig. 5. Dependency schedule $\varphi = f(k_n)$ for pipelines with different types of hydraulic resistance

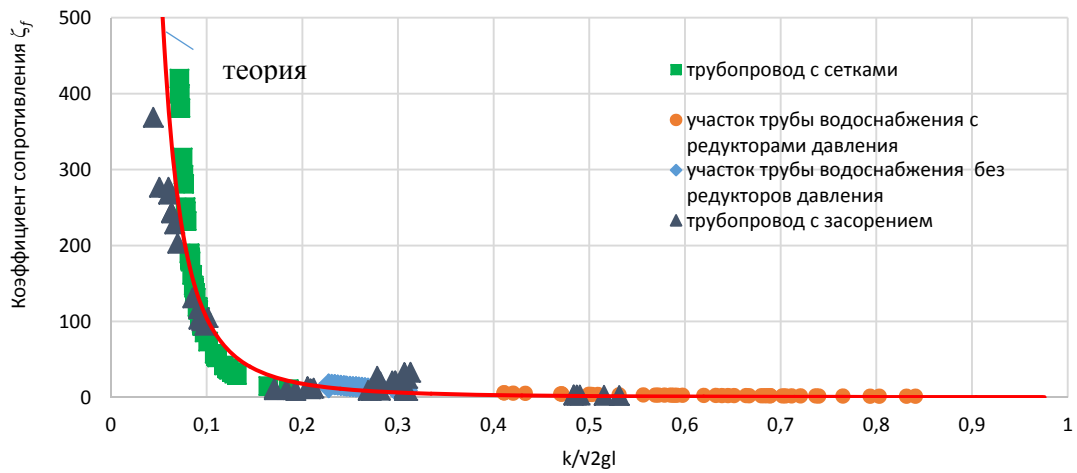


Рис. 6. Зависимость $\zeta_f = f(k/\sqrt{2g \cdot l})$ для трубопроводов с разным типом гидравлического сопротивления
 Fig. 6. Dependency schedule $\zeta_f = f(k/\sqrt{2g \cdot l})$ for pipelines with different types of hydraulic resistance

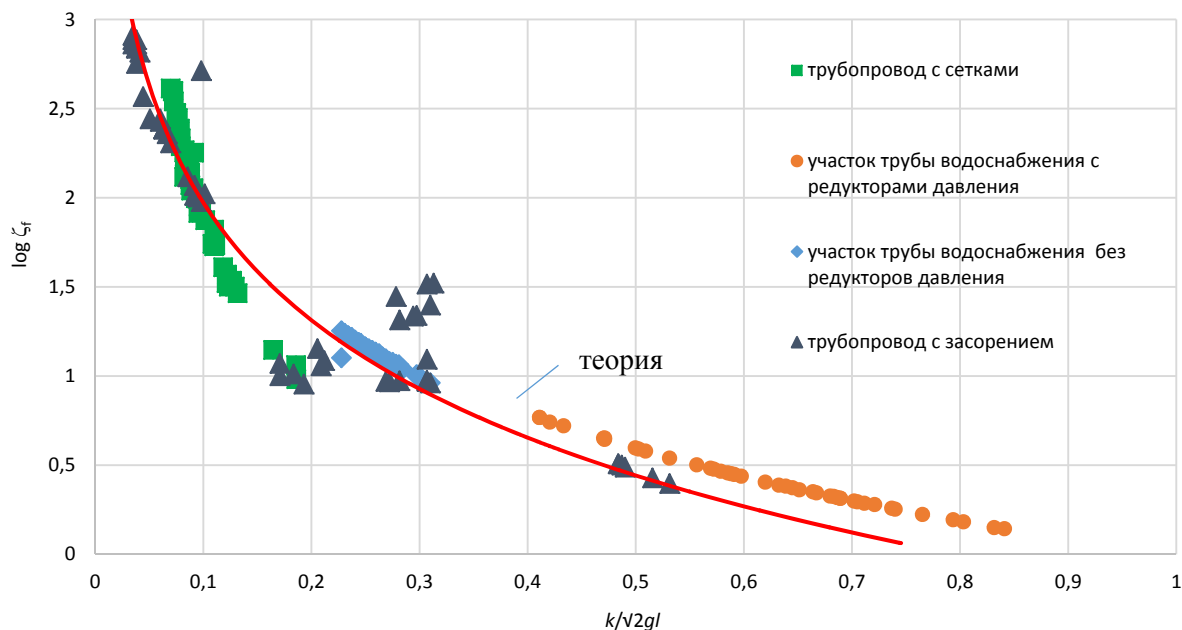


Рис. 7. График зависимости $\log \zeta_f = f\left(k / \sqrt{2g \cdot l}\right)$ для трубопроводов с разным типом гидравлического сопротивления

Fig. 7. Dependency schedule $\log \zeta_f = f\left(k / \sqrt{2g \cdot l}\right)$ for pipelines with different types of hydraulic resistance

Заключение

Пропускная способность трубопроводов и потери энергии при движении жидкостей традиционно определяются с помощью коэффициентов скорости и сопротивления. Замена потока жидкости в трубопроводе экви-

валентным по потерям напора фильтрационным потоком в пористой среде позволяет оценить фильтрационную проводимость трубопровода, произвести ориентировочный прогноз изменения его расходной характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Орлов Е.В., Комаров А.С, Мельников Ф.А., Серов А.Е. Утечки в трубопроводах систем внутреннего водоснабжения // Вестник МГСУ. 2015. № 3. С. 40–47.
 [2] Орлов В.А. Гидравлические исследования и расчет напорных трубопроводов, выполненных из разных материалов // Вестник МГСУ. 2009. № 1. С. 177–180.
 [3] Продоус О.А. Прогнозирование потерь напора в трубопроводах из разных полимерных материалов // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 11. С. 60–64.
 [4] Продоус О.А., Добромислов А.Я. О связи между эквивалентной равномерно зернистой шеро-

хатостью и параметрами физической шероховатости труб из различных материалов // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1987. № 5. С. 92–96.
 [5] Лобанов И.Е. Гидравлическое сопротивление в трубах с непостоянной шероховатостью // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2015. № 3. С. 52–56.
 [6] Добромислов А.Я. Таблицы для гидравлических расчетов трубопроводов из полимерных материалов. Том 1. Напорные трубопроводы. М.: ВНИИМП, 2004. 209 с
 [7] Стрелков А.К., Зотов Ю.Н., Михайлова И.Ю. Расчет гидравлических режимов работы внутренних систем водоснабжения в многоквартирных домах //



Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 8. С. 15–20.

[8] **Воинцева И.И., Новиков М.Г., Продоус О.А.** Продление периода эксплуатации трубопроводов систем водоснабжения из стальных и чугунных труб // Инженерные системы. АВОК – Северо-Запад. 2019. № 1. С. 44–47.

[9] **Латухина А.И., Локтионова Е.А., Мифтахова Д.Р., Полупанова Ю.Р.** Сопротивление и проницаемость напорных гидролиний с сетками // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23, № 2. С. 205–214.

[10] **Даценко Е.Н., Васильев Н.И., Авакимян Н.Н., Савенок О.В., Кошелев А.Т.** Гидравлическое сопротивление течению жидкости через пористую среду // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2014. № 12. С. 18–20.

[11] **Вартумян Г.Т., Кошелев А.Т.** Гидравлические сопротивления пористой среды // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2006. № 2. С. 27–28.

[12] **Полубаринова-Кочина П.Я.** Теория движения грунтовых вод. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1977. 664 с.

[13] **Muskat M.** The flow of homogeneous fluid through porous media. Ann Arbor, Michigan, J.W. Edwards Inc. Publ., 1946. 753 p.

[14] **Loktionova E.A., Miftakhova D.R.** Fluid Filtration in the clogged pressure pipelines // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 8 (76). P. 214–224.

[15] **Idel'chik E.** Handbook of hydraulic resistance 4th ed. rev. and augmented. United States: Begell House in Redding, CT., 2008. 881 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛОКТИОНОВА Елена Анатольевна – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: elena.lokt@yandex.ru

ГОЛОЩАПОВА Анастасия Алексеевна – студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: nastuwka.mail@mail.ru

ГОЛОЩАПОВА Елена Алексеевна – студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: lenochka05.10.95@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 02.04.2019

REFERENCES

[1] **Ye.V. Orlov, A.S. Komarov, F.A. Melnikov, A.Ye. Serov,** Utechki v truboprovodakh sistem vnutrennego vodosnabzheniya, Vestnik MGSU, 3 (2015) 40–47.

[2] **V.A. Orlov,** Gidravlicheskiye issledovaniya i raschet napornykh truboprovodov, vypolnennykh iz raznykh materialov, Vestnik MGSU, 1 (2009) 177–180.

[3] **O.A. Prodous,** Prognozirovaniye poter napora v truboprovodakh iz raznykh polimernykh materialov, Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika, 11 (2018) 60–64.

[4] **O.A. Prodous, A.Ya. Dobromyslov,** O svyazi mezhdru ekvivalentnoy ravnomerno zernistoy sherokhovatostyu i parametrami fizicheskoy sherokhovatosti trub iz razlichnykh materialov, Izvestiya vuzov. Stroitelstvo i arkhitektura, 5 (1987) 92–96.

[5] **I.Ye. Lobanov,** Gidravlicheskiye soprotivleniye v trubakh s nepostoyannoy sherokhovatostyu, Izvestiya

vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika, 3 (2015) 52–56.

[6] **A.Ya. Dobromyslov,** Tablitsy dlya gidravlicheskiykh raschetov truboprovodov iz polimernykh materialov. T. 1. Napornyye truboprovody. M.: VNIIMP, 2004.

[7] **A.K. Strelkov, Yu.N. Zotov, I.Yu. Mikhaylova,** Raschet gidravlicheskiykh rezhimov raboty vnutrennikh sistem vodosnabzheniya v mnogokvartirnykh domakh, Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika, 8 (2014) 15–20.

[8] **I.I. Voitseva, M.G. Novikov, O.A. Prodous,** Prodleniye perioda ekspluatatsii truboprovodov sistem vodosnabzheniya iz stalnykh i chugunnykh trub, Inzhenernyye sistemy. AVOK – Severo-Zapad, 1 (2019) 44–47.

[9] **A.I. Latukhina, Ye.A. Loktionova, D.R. Miftakhova, Yu.R. Polupanova,** Soprotivleniye i pronitsayemost

napornykh gidroliniy s setkami, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 23 (2) (2017) 205–214.

[10] **Ye.N. Datsenko, N.I. Vasilyev, N.N. Avakimyan, O.V. Savenok, A.T. Koshelev,** Gidravlicheskiye soprotivleniya techeniyu zhidkosti cherez poristuyu sredy, Stroitelstvo neftnykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more, 12 (2014) 18–20.

[11] **G.T. Vartumyan, A.T. Koshelev,** Gidravlicheskiye soprotivleniya poristoy sredy, Stroitelstvo neftnykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more, 2 (2006) 27–28.

[12] **P.Ya. Polubarinova-Kochina,** Teoriya dvizheniya gruntovykh vod. M.: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1977.

[13] **M. Muskat,** The flow of homogeneous fluid through porous media. Ann Arbor, Michigan, J.W. Edwards Inc. Publ., 1946,

[14] **E.A. Loktionova, D.R. Miftakhova,** Fluid Filtration in the clogged pressure pipelines, Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal, 8 (76) (2017) 214–224.

[15] **E. Idel'chik,** Handbook of hydraulic resistance 4th ed. rev. and augmented. United States: Begell House in Redding, CT., 2008.

THE AUTHORS

LOKTIONOVA Elena A. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: elena.lokt@yandex.ru

GOLOSHCHAPOVA Anastasiia A. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: nastuwka.mail@mail.ru

GOLOSHCHAPOVA Elena A. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: lenochka05.10.95@mail.ru

Received: 02.04.2019