



DOI: 10.18721/JEST.230218

УДК 621.22.-225: 532.5

*А.И. Латухина, Е.А. Локтионова,
Д.Р. Мифтахова, Ю.Р. Полупанова*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

СОПРОТИВЛЕНИЕ И ПРОНИЦАЕМОСТЬ НАПОРНЫХ ГИДРОЛИНИЙ С СЕТКАМИ

Короткие гидравлические линии работают преимущественно в условиях неравномерного движения жидкости. Наличие сеток, решеток, лопаток и других устройств в гидролиниях приводит к резкому изменению характеристик потока и к дополнительным потерям энергии при их обтекании. Несмотря на широкое использование сеток и решеток, данных по пропускной способности каналов недостаточно. В работе исследованы плоские пластиковые перфорированные сетки разной степени проницаемости на выходе из трубопровода. Экспериментально определены коэффициенты сопротивления сеток. Показана тождественность двух способов определения коэффициентов сопротивления — по расходу и по перепаду давления на сетках. Установлено влияние сеток на пропускную способность напорного трубопровода. Получена зависимость относительного расхода в трубе от поверхностной пористости сеток. Предложен альтернативный переход от коэффициентов сопротивления к коэффициентам фильтрации и проницаемости трубопровода с сетками.

ПЕРФОРИРОВАННЫЕ СЕТКИ; КОЭФФИЦИЕНТ РАСХОДА; КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ; ПОВЕРХНОСТНАЯ ПОРИСТОСТЬ; КОЭФФИЦИЕНТ ФИЛЬТРАЦИИ; КОЭФФИЦИЕНТ ПРОНИЦАЕМОСТИ.

Ссылка при цитировании:

А.И. Латухина, Е.А. Локтионова, Д.Р. Мифтахова, Ю.Р. Полупанова. сопротивление и проницаемость напорных гидролиний с сетками // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 2. С. 205–214. DOI: 10.18721/JEST.230218

*A.I. Latukhina, E.A. Loktionova,
D.R. Miftakhova, J.R. Polupanova*

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, Saint-Peterburg, Russian Federation

THE RESISTANCE AND PERMEABILITY OF THE PRESSURE HYDROLINE WITH GRIDS

Short hydraulic lines operate mainly in the conditions of nonuniform fluid flow. The presence of grids, blades and other structures in hydraulic lines leads to a sharp change in the flow characteristics and to additional energy losses during the flow. Despite the extensive use of grids, there is insufficient information on the throughput of channels. In this article, flat plastic perforated grids of different degrees of permeability, installed at the outlet of the pipeline, have been investigated. The resistance coefficients of the grids have been determined experimentally. It has been demonstrated that the two methods for determining the resistance coefficient (by flow and by differential pressure on the grids) are identical. The influence of the grids on the capacity of the pipeline has been established. The dependence of the relative flow rate in the pipe on the surface porosity of the grids has been obtained. An alternative transition from the resistance coefficients to the filtration coefficients and permeability of the pipeline with grids has been proposed.

PERFORATED GRIDS; DISCHARGE COEFFICIENT; RESISTANCE COEFFICIENT; EXPOSED POROSITY; FILTRATION COEFFICIENT; PERMEABILITY COEFFICIENT.

Citation:

A.I. Latukhina, E.A. Loktionova, D.R. Mifkhatova, J.R. Polupanova, the resistance and permeability of the pressure hydroline with grids, cSt. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (02) (2017) 205–214, DOI: 10.18721/JEST.230218

Введение

Основная задача при расчете систем и конструкций, оборудованных сетками, — определение коэффициентов сопротивления этих устройств и оценка их вклада в общие потери напора [1–7, 12, 16, 17, 21]. Картина течения жидкости или газа через разного рода сопротивления чрезвычайно сложна и определяется многими факторами, поэтому точная гидромеханическая оценка потерь напора и расчет коэффициентов сопротивления не представляются возможными. Их значения устанавливаются, как правило, опытным путем [3, 5, 10, 11, 13, 14] или с помощью математических моделей [18], достоверность и надежность которых также проверяются на физических моделях [9].

В данной работе приводятся результаты гидравлических испытаний напорного водовода, на выходе из которого при свободном истечении устанавливались перфорированные пластиковые сетки. Как показал анализ литературных источников, сведений по коэффициентам сопротивления сеток указанного типа недостаточно. Поэтому проведенные опыты, являясь продолжением экспериментов [7], дают более представительный материал для обработки данных измерений и проверки достоверности полученных результатов. Исследования проведены на расширенном диапазоне сеток разной степени перфорации с заменой проточной части водовода при одном и том же отношении длины к диаметру ($l / D = 20$).

Целями исследования было:

определение значений коэффициентов сопротивления сеток для трубопровода с измененной шероховатостью внутренней поверхности на основе измерения расхода; сравнение их с данными работы [7];

определение значений коэффициентов сопротивления сеток по перепаду давления и сопоставление их с данными серии опытов по расходу;

установление зависимости относительного расхода в трубе с сетками от поверхностной пористости сеток и сравнение результатов с аппроксимацией, предложенной в [7];

выявление связи между сопротивлением и проницаемостью трубопровода с сетками.

Методика эксперимента

Первая серия опытов совпадала по методике измерений с принятой в [7], где при фиксированных напорах объемным способом определялся расход Q на выходе из горизонтального трубопровода постоянного сечения, в конце которого помещались исследуемые сетки (рис.1). Значения коэффициентов μ расхода трубопровода, а также коэффициентов ζ_f сопротивления трубы и ζ_c сетки находились расчетом по формулам

$$\mu = \frac{Q}{\omega_0 \sqrt{2gH}}, \quad \zeta_f = \frac{1}{\mu^2} - 1, \quad \zeta_c = \zeta_f - \zeta_0, \quad (1)$$

где ω_0 — площадь сечения трубы; H — напор над центром выходного сечения; ζ_0 — опытный коэффициент сопротивления трубопровода без сетки.

Во второй серии опытов фиксировались показания $\Delta p / \gamma$ пьезометров, установленных по длине трубопровода (см. рис. 1). По перепаду давления Δp непосредственно на сетке (по аналогии с [1, 3–5, 23]) вычислялись коэффициенты сопротивления устройств

$$\zeta_c = \frac{\Delta p / \gamma}{v_0^2 / 2g} = \frac{2 \Delta p}{\rho v_0^2}, \quad (2)$$

где v_0 — средняя скорость в трубопроводе.

Результаты и их обсуждение

По данным экспериментов первой серии опытов на рис. 2 построен график зависимости коэффициентов сопротивления сеток ζ_c от их поверхностной пористости $n_\omega = \frac{\omega_n}{\omega_0}$ (ω_n — суммарная площадь отверстий сетки (площадь просвета), ω_0 — площадь сечения трубы). На графике треугольными маркерами показаны экспериментальные точки, а результаты опытов [7] представлены осредненными значениями для каждой сетки (квадратные маркеры) и в виде аппроксимации

$$\zeta_c = 3 \left((1/n_\omega)^{1,6} - 1 \right). \quad (3)$$

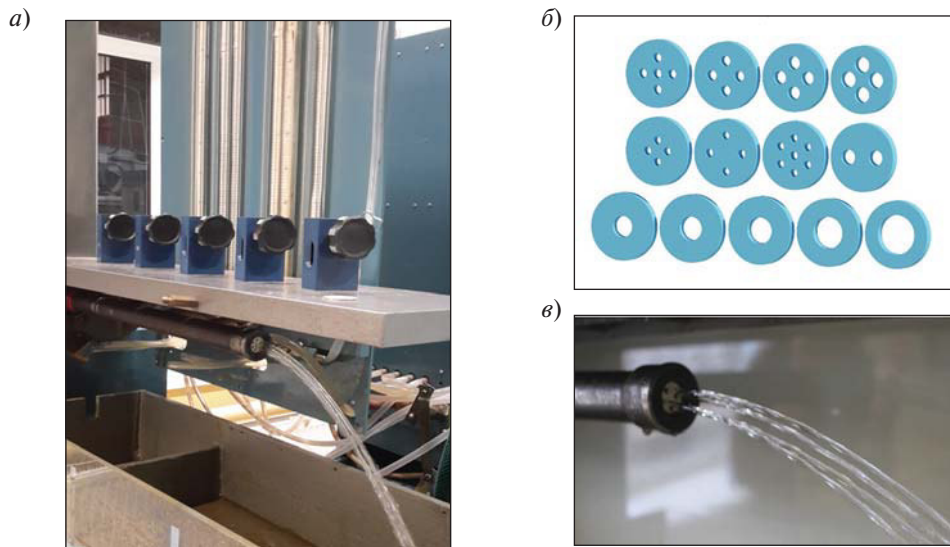


Рис. 1. Элементы физической модели (*a* — экспериментальная установка; *б* — образцы пластиковых сеток) и картина течения на выходе из трубопровода (*в*)

Fig. 1. Elements of the physical model and flow pattern: *a* — experimental assembly; *б* — examples of plastic grids; *в* — image of the flow on the outlet of the pipeline

Коэффициент сопротивления, ζ_c
Resistance coefficient, ζ_c

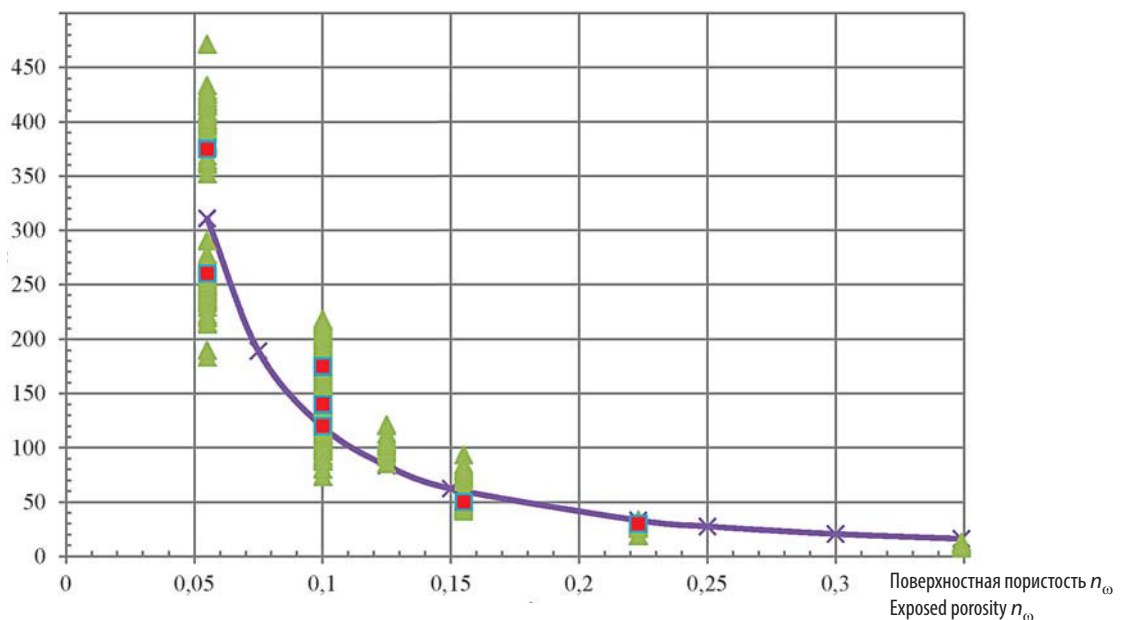


Рис.2. График зависимости $\zeta_c = f(n_{\omega})$ (серия опытов по расходу в трубе) (\times — аппроксимация опытных значений; \blacktriangle — опытные точки на новом водоводе; \blacksquare — осредненные значения на старом водоводе [7])

Fig. 2. Dependency diagram $\zeta_c = f(n_{\omega})$ (series of experiments on the flow in the pipeline) (\times — approximation of experimental data; \blacktriangle — experimental points on the new water line; \blacksquare — average values on the old water line [7])

Как видно из рис. 2, опытные значения коэффициентов сопротивления сеток, полученные в условиях новой проточной части, также соответствуют аппроксимации (3), принятой в [7]. Эту аппроксимацию можно рекомендовать как приближенную эмпирическую зависимость для использования в практических расчетах. Расположение опытных точек на рис. 2 относительно линии аппроксимации и осредненных значений опытов [7] позволяет утверждать, что численные значения коэффициентов сопротивления зависят только от геометрических особенностей сетки (поверхностная пористость, число отверстий, их взаимное расположение и т. п.) и не зависят от состояния внутренней поверхности проточной части трубы. Разброс экспериментальных точек на рис. 2 (как и в [7]) при одной и той же поверхностной пористости ото-

бражает, главным образом, влияние числа отверстий и их взаимного расположения в пределах сечения сетки (при $n_{\omega} = \text{const}$ исследованы несколько сеток) и, как показали расчеты, в меньшей степени связан с точностью проведенных измерений. Единый доверительный интервал эксперимента в данных условиях задать весьма проблематично, т. к. для различного расположения и числа отверстий в пределах одной пористости доверительные интервалы пересекаются.

По данным второй серии опытов на рис. 3 построен аналогичный график $\zeta_c = f(n_{\omega})$.

Сравнение рис. 2 и 3 показывает, что коэффициенты сопротивления, найденные по измерению расхода и по перепаду давления, с приемлемой погрешностью совпадают. Словосочетание «приемлемая погрешность»

Коэффициент сопротивления, ζ_c
Resistance coefficient, ζ_c

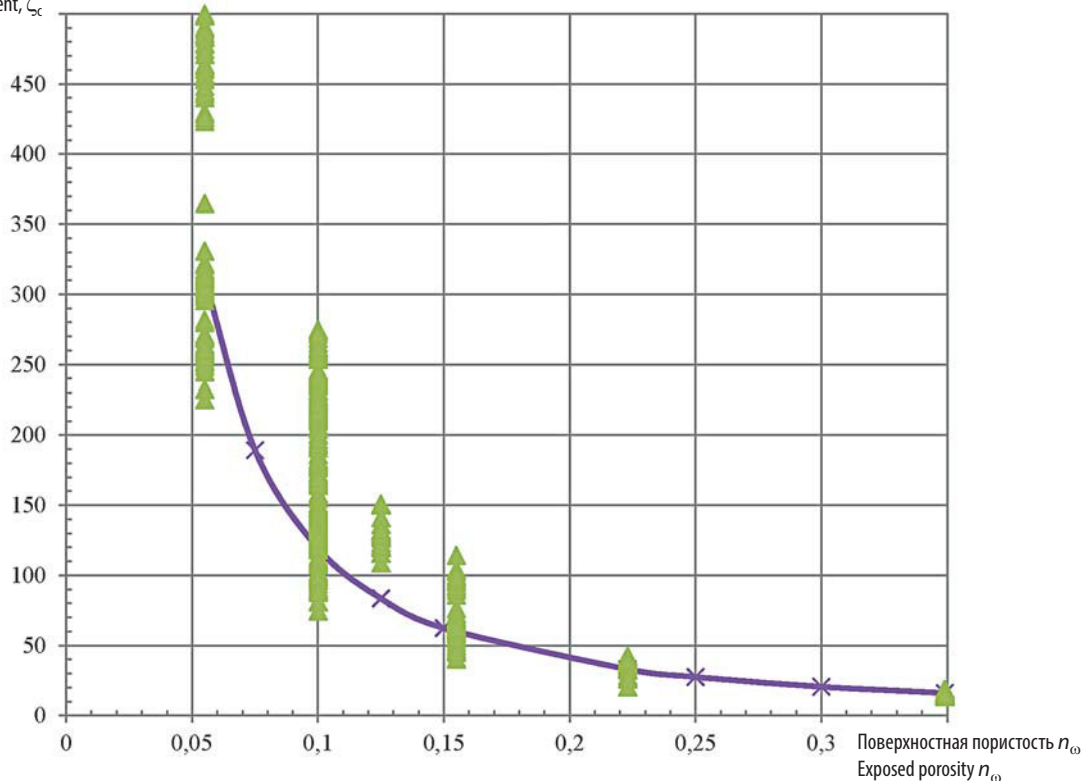


Рис. 3. График зависимости $\zeta_c = f(n_{\omega})$ (серия опытов по перепаду давления на сетках) (—x— — аппроксимация коэффициентов сопротивления по формуле 3; ▲ — опытные коэффициенты сопротивления по перепаду давления)

Fig. 3. Dependency diagram $\zeta_c = f(n_{\omega})$ (series of experiments of the pressure drop on grids) (—x— — approximation of the resistance coefficient by the formula; ▲ — experimental resistance coefficient of the pressure drop)

в данном случае означает, что в пределах имеющейся статистики (порядка 10–15 опытов на один типоразмер сетки) и в условиях, когда идентичность в изготовлении входных и выходных кромок сеток практически невозможна, вряд ли позволительно применять для оценки погрешности измерений и установления надежного доверительного интервала измерений плотности распределения по закону Гаусса. Аналогичная ситуация возникла в работе [4], в которой проводились систематические исследования перфорированных сеток и, чтобы уменьшить разброс опытных точек при представлении результатов измерений, использовались приемы теории подобия. Заметный разброс точек имелся и в работе [22], где результаты некоторых серий опытов трактовались лишь как «тенденция изменения» соответствующих величин.

На основании данных опытов установлена также зависимость между относительным расходом в трубе с сетками и поверхностной пористостью устройств (рис. 4):

$$Q_c/Q_0 = f(n_{\omega}),$$

где Q_c – расход в трубе при наличии сетки; Q_0 – расход в трубе без сетки, измеренный предварительно при том же напоре, что и Q_c . Сплошная линия на рис. 4 построена с учетом аппроксимации (3), то есть

$$\begin{aligned} Q_c/Q_0 &= \frac{\mu_c}{\mu_0} = \sqrt{\frac{1 + \zeta_0}{1 + \zeta_0 + \zeta}} = \\ &= \sqrt{\frac{1 + \zeta_0}{1 + \zeta_0 + 3((1/n_{\omega})^{1,6} - 1)}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где μ_c и μ_0 – коэффициенты расхода трубопровода соответственно при наличии сетки и без нее; ζ_0 – опытный коэффициент сопротивления трубы без сетки. Продолжение линии аппроксимации за пределы экспериментальных точек на правом конце допустимо, поскольку очевидно, что при $n_{\omega} = 1$ (сетка отсутствует) $Q_c = Q_0$, как непосредственно следует из (4).

Рис. 4 дает приближенную оценку снижения пропускной способности трубы при наличии сеток той или иной конфигурации. Так, например, видно, что установка сетки с поверхностной пористостью $n_{\omega} = 0,3$ приведет к снижению расхода в трубопроводе примерно в два раза.

Следует отметить, что приведенные выше результаты экспериментов носят частный характер. Однако полученная для других случаев сопротивлений в трубах зависимость относительного расхода от геометрических характеристик этих устройств может быть с некоторой осторожностью рекомендована в практических расчетах (наряду с коэффициентами расхода и сопротивления или вместо них).

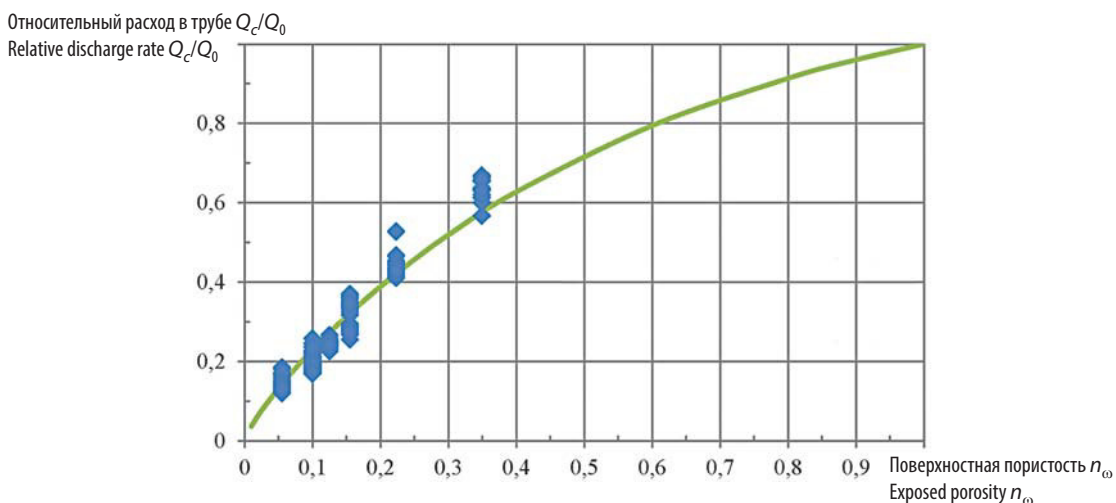


Рис. 4. График зависимости $Q_c/Q_0 = f(n_{\omega})$ (— — аппроксимация; ◆ — опытные точки)

Fig. 4. Dependency diagram $Q_c/Q_0 = f(n_{\omega})$ (— — approximation; ◆ — experimental data)

В качестве альтернативного подхода к оценке пропускной способности трубы можно предложить использовать интегральные фильтрационные характеристики трубопровода с сетками. Если поток жидкости в трубопроводе, гидравлические характеристики которого определяются в основном наличием сетки, представить как фильтрационный поток, то среднюю скорость v_0 в трубе можно интерпретировать как скорость фильтрации, определяемую соотношением

$$v_0 = k\sqrt{J}, \quad (5)$$

где k — коэффициент фильтрации; J — гидравлический уклон.

Равенство (5) представляет собой закон турбулентной фильтрации [8, 19, 20].

Поскольку для v_0 справедливо

$$v_0 = \mu_c \sqrt{2gH} = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_0 + \zeta_c}} \sqrt{2gH}, \quad (6)$$

где H — напор над центром выходного сечения трубопровода, то, приравнявая (5) и (6), получим

$$\mu_c \sqrt{2gH} = k\sqrt{J}, \text{ или } k = \frac{\mu_c \sqrt{2gH}}{\sqrt{J}}. \quad (7)$$

Подставляя в (7) гидравлический уклон $J = \frac{p/\gamma}{\delta}$ (δ — толщина сетки), придем к выражению для k :

$$k = \mu_c \sqrt{\frac{2gH\delta}{p/\gamma}} = \sqrt{\frac{2gH\delta}{(1 + \zeta_0 + \zeta_c)p/\gamma}} = \sqrt{\frac{2g\delta}{(1 + \zeta_0 + \zeta_c)}} \sqrt{\frac{H}{p/\gamma}} = C \sqrt{\frac{H}{p/\gamma}}, \quad (8)$$

где $C = \sqrt{\frac{2g\delta}{(1 + \zeta_0 + \zeta_c)}} = \sqrt{\frac{2g\delta}{\mu}}$ — постоянная величина, имеющая размерность скорости, для трубы с фиксированной сеткой.

Рис. 5 показывает связь коэффициентов фильтрации трубопровода с поверхностной пористостью сеток в соответствии с (8), где коэффициент ζ_c определен по формуле (3).

Если по принятому в теории фильтрации определению [15, 19, 20] ввести в расчетную зависимость (8) вместо коэффициента фильтрации k коэффициент проницаемости сетки $k_0 = k \frac{v}{g}$, где v — кинематический коэффициент вязкости жидкости, то полученный комплекс будет иметь размерность площади. При этом k_0 представляет собой величину площади сечения каналов пористой среды, т. е. площадь, через которую происходит действительная

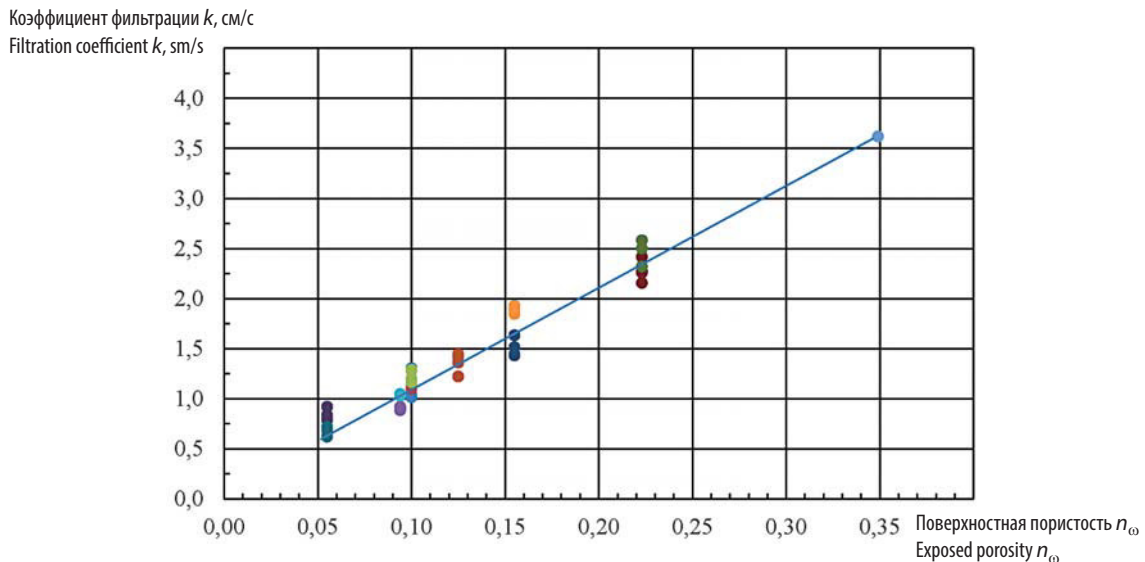


Рис. 5. График зависимости коэффициентов фильтрации от поверхностной пористости сеток $k = f(n_\omega)$

Fig. 5. Dependency diagram of filtration coefficient from exposed porosity $k = f(n_\omega)$

фильтрация (в нашем случае — это площадь отверстий сетки). Таким образом, коэффициент проницаемости можно интерпретировать как меру фильтрационной проводимости трубопровода с сеткой.

На рис. 6 представлен график зависимости коэффициентов проницаемости, отнесенных к площади сечения трубы, от поверхностной пористости сеток.

Сравнивая рис. 2 и 6 (или 3 и 6), легко заметить, что при переходе от коэффициентов сопротивления ζ_c к коэффициентам проницаемости сеток k_0 предложенная зависимость (3) превращается в линейную функцию от поверхностной пористости, где безразмерный коэффициент $k' = (k_0/\omega_0)10^{-5} \approx 2n_\omega$.

Коэффициент 2 — приближенный, и значения k' при одном и том же n_ω зависят также от числа отверстий сетки и их взаимного расположения по сечению, однако разброс точек на рис. 6 при фиксированной пористости значительно меньше, чем на рис. 2 (или 3). Поэтому параметр k_0 можно считать более удобной и более универсальной характеристикой трубопровода с сетками.

По результатам дополнительных экспериментальных исследований переход к коэффициентам проницаемости может быть предложен

также для оценки пропускной способности напорных гидролиний с другими устройствами.

Выводы

Значения коэффициентов сопротивления сеток не зависят от шероховатости поверхности трубы. Их величины определяются геометрическими особенностями сеток (поверхностная пористость, число отверстий, их взаимное расположение и т. п.).

Методы определения коэффициентов сопротивления сеток по измерению расхода в трубопроводе и по перепаду давления на сетках эквивалентны.

Зависимость величины относительного расхода трубопровода от поверхностной пористости сеток, полученная экспериментально, совпадает с аппроксимацией работы [7]. Найденная зависимость дает приближенную оценку снижения пропускной способности трубопровода при установке сеток.

Альтернативой коэффициентам расхода и сопротивления для оценки пропускной способности трубы является коэффициент проницаемости. Коэффициент проницаемости пропорционален коэффициенту фильтрации гидролинии и представляет собой меру фильтрационной проводимости трубы с сеткой.

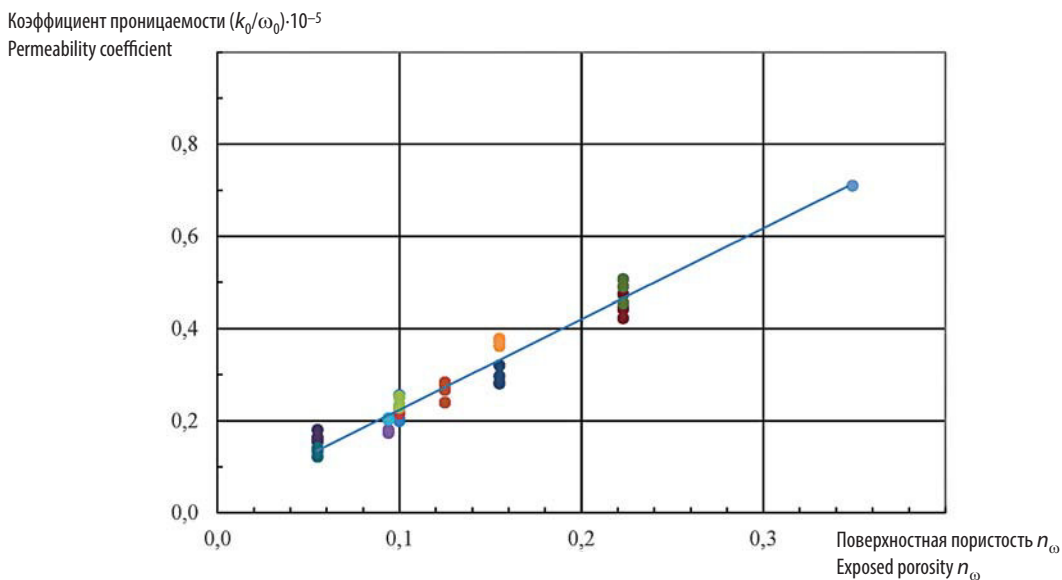


Рис. 6. График зависимости коэффициентов проницаемости от поверхностной пористости сеток $k_0/\omega_0 = f(n_\omega)$

Fig. 6. Dependency diagram of permeability coefficient from exposed porosity $k_0/\omega_0 = f(n_\omega)$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
2. **Idel'chik I.E.** Handbook of hydraulic resistance 4th ed. rev. and augment-ed. United States: Begell House in Redding, CT, 2008. 881 p.
3. **Дербунович Г.И., Земская А.С., Репик Е.У., Соседко Ю.П.** К вопросу о гидравлическом сопротивлении сеток // Ученые записки ЦАГИ. 1980. Т. XI. № 2. С. 133–136.
4. **Дербунович Г.И., Земская А.С., Репик Е.У., Соседко Ю.П.** Гидравлическое сопротивление перфорированных решеток. // Ученые записки ЦАГИ. 1984. Т. XV. № 2. С. 114–118.
5. **Великанов Н.Л., Корягин С.И., Наумов В.А.** Гидродинамическое сопротивление решеток и сеток в прямом трубопроводе // Вестник машиностроения. 2014. № 6 С. 44–47.
6. **Великанов Н.Л., Наумов В.А., Примак Л.В.** Гидродинамическое сопротивление сеток // Механизация строительства. 2014. № 11 (845) С. 28–31.
7. **Латухина А.И., Локтионова Е.А., Полупанова Ю.Р.** Гидродинамическое сопротивление сеток в напорных водоводах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № 2 (243). С. 174–180.
8. **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.
9. **Пильгунов В.Н., Ефремова К.Д.** 77–48211/645605 Верификации математических моделей типовых местных гидравлических сопротивлений // Инженерный вестник. 2013. № 11. С. 29–56.
10. **Калякин А.М., Чеснокова Е.В.** Новая зависимость для определения коэффициента гидравлического сопротивления в переходной зон сопротивления (от ламинарного к турбулентному) // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 2. С. 51–55.
11. **Макарошкин В.И., Комисарова Л.А., Герашенко Е.К.** Гидравлическое сопротивление пористого сетчатого конструкционного материала (ПСКМ), полученного методом горячей прокатки металлических сеток // Вестник МГУПИ. 2009. № 27. С. 8–13.
12. **Репик Е.У., Соседко Ю.П.** Разработка детурбулизирующих сеток с малым гидравлическим сопротивлением для аэродинамических труб // Ученые записки ЦАГИ. 2011. Т. XLII. № 3. С. 84–91.
13. **Самохвалов Н.М., Нестерова Т.Ю., Виноградов В.В.** Гидравлическое сопротивление щелевой фильтрующей перегородки // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 10 (81). С. 235–239.
14. **Лобанов И.Е.** Гидравлическое сопротивление в трубах с непостоянной шероховатостью // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2015. № 3. С. 52–56.
15. **Петриченко М.Р.** Термодинамические тождества и уравнения неизотермической фильтрации в изотропной пористой среде // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 2 (171). С. 188–192.
16. **Ханжонков В.И.** Сопротивление сеток // Промышленная аэродинамика. 1944. № 3 С. 210–214.
17. **Schlichting H.** Ergebnisse und Probleme von Gitteruntersuchungen // ZFW. 1, 109–122 (1953).
18. **Chemezov D.** The character of the fluid flow in the pipelines with the local hydraulic resistances. ISJ Theoretical & Applied Science, 12 (44): 62–68.
19. **Полубаринова-Кочина П.Я.** Теория движения грунтовых вод. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1977. — 664 с.
20. **Muskat M.** The flow of homogeneous fluid through porous media // Ann Arbor. Michigan, J.W. Edwards Inc. Publ., 1946, 753 p. [In Russian: **Masket M.** Tечenie odnorodnykh zhidkostey v poristoy srede. Moscow, Izhevsk, NIS «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika» Publ., 2004, 628 p.].
21. **Абдулаев Д.А., Маркелова Е.А., Сабирзянов А.Р., Миронов Н.Ю.** Гидравлическая устойчивость тепловой сети // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 1 (52). С. 67–85.
22. **Брянская Ю.В.** Уточнение кинематических характеристик турбулентного течения // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 6. С. 31–38.
23. **Михалев А.Д.** Гидравлический расчет напорных трубопроводов // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 2. С. 20–28.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛАТУХИНА Анастасия Игоревна — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: lai-03@mail.ru

ЛОКТИОНОВА Елена Анатольевна — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: elena.lokt@yandex.ru

МИФТАХОВА Динара Робертовна — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: dinara.miftakhova@gmail.com

ПОЛУПАНОВА Юлия Руслановна — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: julyopolup@mail.com

REFERENCES

1. **Idel'chik I.E.** Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam. [Handbook of hydraulic resistance]. Moscow; Mashinostroenie, 1992. 672 p. (rus.)
2. **Idel'chik I.E.** Handbook of hydraulic resistance 4th ed. rev. and augmented. United States: Begell House in Redding, CT, 2008. 881 p.
3. **Derbunovich G.I., Zemskaja A.S., Repik E.U., Sosedko Ju.P.** K voprosu o gidravlicheskom soprotivlenii setok. [About hydraulic resistance of the grids] *Uchenye zapiski TsAGI*, 1980. Vol. HI. № 2. P. 133–136. (rus.)
4. **Derbunovich G.I., Zemskaja A.S., Repik E.U., Sosedko Ju.P.** Gidravlichesкое soprotivlenie perforirovannyh reshetok. [Hydraulic resistance of the perforated grids] *Uchenye zapiski TsAGI*, 1984. Vol. XV. № 2. P. 114–118. (rus.)
5. **Velikanov N.L., Korjagin S.I., Naumov V.A.** Gidrodinamicheskoe soprotivlenie reshetok i setok v prjamom truboprovode. [Hydraulic resistance of grids and networks in the supply pipelines]. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2014. № 6. P. 44–47. (rus.)
6. **Velikanov N.L., Naumov V.A., Primak L.V.** Gidrodinamicheskoe soprotivlenie setok. [Hydraulic resistance of the grid]. *Mehanizacija stroitel'stva*, 2014. № 11 (845). P. 28–31. (rus.)
7. **Latuhina A.I., Loktionova E.A., Polupanova Ju.R.** Gidrodinamicheskoe soprotivlenie setok v napornyh vodovodah. [Hydraulic resistance of the grid in the pressure water conduit]. St. Petersburg State Polytechnical. *University Journal*, 2016. № 2 (243). P. 174–180. (rus.)
8. **Dacenko E.N., Vasil'ev N.I., Avakimjan N.N., Save-nok O.V., Koshelev A.T.** Gidravlichesкое soprotivlenie techeniju zhidkosti cherez poristuju sredu. [Hydraulic resistance to flow of liquid through a porous medium]. *Stroitel'stvo nefjnyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more*, 2014. № 12. P. 18–20. (rus.)
9. **Pil'gunov V.N., Efremova K.D.** 77–48211/645605 Verifikacii matematicheskikh modelej tipovyh mestnyh gidravlicheskih soprotivlenij. [Verifications of mathematical models of typical local hydraulic resistances]. *Inzhenernyj vestnik*, 2013. № 11. P. 29–56. (rus.)
10. **Kaljakin A.M., Chesnokova E.V.** Novaja zavisimost' dlja opredelenija koefitsienta gidravlicheskogo soprotivlenija v perehodnoj zone soprotivlenija (ot laminarnogo k turbulentnomu). [A new functional connection for determining the coefficient of hydraulic resistance in the transition resistance zone (from laminar to turbulent)]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. № 2. P. 51–55. (rus.)
11. **Makarochkin V.I., Komisarova L.A., Gerashenko E.K.** Gidravlichesкое soprotivlenie poristogo setchatogo konstrukcionnogo materiala (PSKM), poluchennogo metodom gorjachej prokatki metallicheskih setok. [Hydraulic resistance of a porous netted construction material (PSKM), produced of the hot rolling of metal]. *Vestnik MGUPI*, 2009. № 27, P. 8–13. (rus.)
12. **Repik E.U., Sosedko Ju.P.** Razrabotka deturbulizirujushchih setok s malym gidravlicheskim soprotivleniem dlja ajerodinamicheskikh trub. [Development of turbulence screen with a small hydraulic resistance for wind tunnels]. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2011. Vol. XLII. № 3. P. 84–91. (rus.)
13. **Samohvalov N.M., Nesterova T.Ju., Vinogradov V.V.** Gidravlichesкое soprotivlenie shhelevoj fil'trujushhej peregorodki. [Hydraulic resistance of the slotted filter diaphragm]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnic-eskogo universiteta*, 2013. № 10 (81). P. 235–239. (rus.)
14. **Lobanov I.E.** Gidravlichesкое soprotivlenie v trubah s nepostojannoju sherohovatost'ju. [Hydraulic resistance in pipes with variable roughness]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Aviacionnaja tehnika*. 2015. № 3. P. 52–56.
15. **Petrichenko M.R.** Termodinamicheskie tozhdestva i uravnenija neizotermicheskoi fil'tracii v izotropnoj poristoi srede. [Thermodynamic identities and equations of n-isothermal filtration in an isotropic porous medium]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2013, № 2 (171). P. 188–192. (rus.)
16. **Hanzhonkov V.I.** Soprotivlenie setok. [Resistance of grids]. *Promyshlennaja ajerodinamika*. 1944. № 3. P. 210–214. (rus.)
17. **Schlichting H.** Ergebnisse und Probleme von Gitteruntersuchungen. *ZFW* 1. 109–122 (1953).
18. **Chemezov D.** The character of the fluid flow in the pipelines with the local hydraulic resistances. *ISJ Theoretical & Applied Science*. 12 (44): 62–68.
19. **Polubarinova-Kochina P.Ja.** Teorija dvizhenija gruntovyh vod. [Theory of ground water motion]. Moscow; Nauka. Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoi literatury, 1977. 664 p. (rus.)
20. **Muskat M.** The flow of homogeneous fluid through porous media. Ann Arbor, Michigan, J.W. Edwards Inc. Publ., 1946, 753 p. [In Russian: Masket M. Techenie odnorodnykh zhidkostey v poristoi srede.

Moscow, Izhevsk, NIC «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika» Publ., 2004, 628 p.].

21. **Abdulaev D.A., Markelova E.A., Sabirzyanov A.R., Mironov N.Yu.** Gidravlicheskaja ustojchivost' teplovoj seti. [The hydraulic stability of the heating network]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017. № 1 (52). P. 67–85. (rus.)

22. **Brjanskaja Ju.V.** Utochnenie kinematicheskikh harakteristik turbulentnogo techenija. [Refinement of the kinematic characteristics of turbulent flow]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. № 6. P. 31–38.

23. **Mihalev A.D.** Gidravlicheskij raschet napornyh truboprovodov. [Hydraulic calculation of pressure pipelines]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. № 2. P. 20–28.

AUTHORS

LATUKHINA Anastasiia I. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: lai-03@mail.ru

LOKTIONOVA Elena A. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: elena.lokt@yandex.ru

MIFTAKHOVA Dinara R. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: dinara.miftakhova@gmail.com

POLUPANOVA Juliia R. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: julypolup@mail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 29.03.2017.