

DOI 10.5862/JEST.243.18

УДК 532.5: 621.6

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

## **ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СЕТОК В НАПОРНЫХ ВОДОВОДАХ**

*A.I. Latuhina, E.A. Loktionova, J.R. Polupanova*

### **HYDRODYNAMICAL GRID RESISTANCE IN PRESSURE CONDUITS**

Область применения сеток и решеток чрезвычайно широка. Однако их использование приводит к дополнительным сопротивлениям и потерям энергии при обтекании. Выбор типа и конструкции сетки определяется ее назначением и условиями эксплуатации. В статье представлены результаты исследования пластиковых перфорированных сеток разной степени проницаемости на выходе из трубопровода. Экспериментально определено влияние сеток на коэффициенты расхода напорного трубопровода. Значения коэффициентов расхода установлены двумя способами: при постоянном и при переменном напоре. Показана тождественность обоих способов определения коэффициентов расхода. Вычислены коэффициенты сопротивления сеток. Изучено влияние пористости сеток на численные значения этих коэффициентов. Расчетные величины аппроксимированы степенными зависимостями, связывающими коэффициенты сопротивления сеток с поверхностной и линейной пористостью. Приведено сравнение предложенных зависимостей с данными публикаций. Даны рекомендации по назначению величин коэффициентов сопротивления устройств.

**ПЕРФОРИРОВАННЫЕ СЕТКИ; КОЭФФИЦИЕНТ РАСХОДА; КОЭФФИЦИЕНТЫ СО-  
ПРОТИВЛЕНИЯ; ПОВЕРХНОСТНАЯ ПОРИСТОСТЬ; ЛИНЕЙНАЯ ПОРИСТОСТЬ.**

The practical application of grids and lattices is extremely wide. However, their use results in additional resistance and energy losses in the flow. Selecting the type and mesh design is determined by its purpose and conditions of use. The article investigates a perforated plastic grid with varying degrees of permeability at the outlet of the conduit. We have experimentally determined the effect of mesh on the flow rates of the pressure pipe. Flow coefficient values were set in two ways: with constant and variable pressure. It is shown that the two methods for determining the rate coefficients are identical. We have calculated the drag coefficients of the grid. The influence of grid porosity on the numerical values of these coefficients has been studied. The calculated values are approximated by the degree of the dependence linking the drag coefficients to surface grids and linear porosity. The proposed dependencies have been compared with the data presented in the literature. The recommendations for setting the values of drag coefficients of the devices are given.

**PERFORATED GRIDS; FLOW COEFFICIENT; DRAG COEFFICIENT; SURFACE POROSITY;  
LINEAR POROSITY.**

#### **Введение**

Сетки и решетки в потоках жидкости или газа встречаются в самых разных сферах практической деятельности. Они используются в строительстве зданий и дорог, трубопроводном транспорте, водоснабжении, экологии, металлургии, машиностроении и других областях.

В зависимости от назначения и условий эксплуатации сетки могут различаться по материалу, конфигурации, геометрии ячеек и технологии их изготовления.

Основной задачей при расчете систем и конструкций, оборудованных сетками, является определение коэффициентов сопротивления



этих устройств. Природа сопротивления и течения жидкости или газа через сетки определяется многими факторами, поэтому точный гидромеханический расчет коэффициентов сопротивления не представляется возможным. Их значения устанавливаются, как правило, опытным путем. Зависимость коэффициентов сопротивления сеток и решеток от геометрических особенностей и условий течения исследовалась, например, в [1, 3, 6–12, 14–19, 21]. Как показывает обзор приведенной литературы, применительно к некоторым практическим задачам разными авторами независимо друг от друга получены результаты, дающие хорошее совпадение данных экспериментов и расчетов по рекомендуемым эмпирическим зависимостям [1, 3, 8, 10, 12, 13, 16]. Однако из анализа литературы также следует, что вопрос о сопротивлении решеток и сеток в настоящее время не менее актуален, чем несколько десятилетий назад [9, 10]. Это связано не только с появлением новых практических задач, но и с использованием новых материалов и внедрением современных технологий в производстве. При этом вклад каждого нового фактора в суммарное сопротивление сетки может быть установлен специальными экспериментальными исследованиями.

Целями данной работы были: определение влияния плоских пластиковых сеток на коэффициент расхода трубопровода; установление численных значений коэффициентов сопротивления сеток и их зависимости от числа Рейнольдса; определение влияния поверхностной и линейной пористости сеток на величины коэффициентов сопротивления.

### Методика эксперимента

Исследовался горизонтальный трубопровод постоянного сечения с отношением длины к диаметру  $I/D = 20$ , на выходе из которого при свободном истечении воды устанавливались плоские сетки разной степени перфорации (рис. 1).

Коэффициент расхода трубопровода  $\mu$  определялся экспериментально двумя способами: по расходу  $Q$  при различных фиксированных напорах ( $\mu_{H=\text{const}}$ ) и по времени опорожнения напорного бака при различных начальных и конечных напорах ( $\mu_{\text{опор}}$ ).

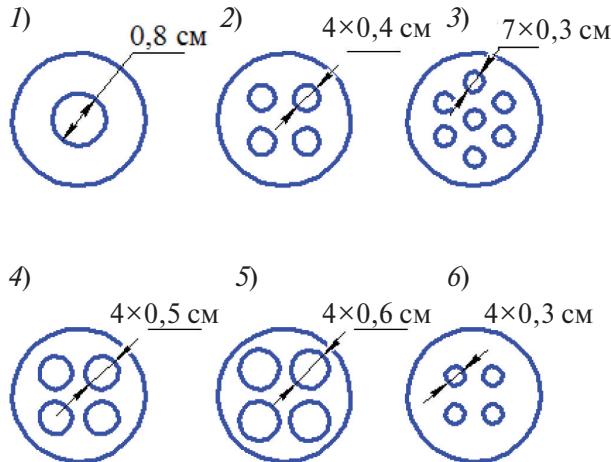


Рис. 1. Виды исследуемых сопротивлений (1 – диафрагма  $d = 0,8$  см; 2 – сетка с 4-мя отверстиями  $d = 0,4$  см; 3 – сетка с 7-ю отверстиями  $d = 0,3$  см; 4 – сетка с 4-мя отверстиями  $d = 0,5$  см; 5 – сетка с 4-мя отверстиями  $d = 0,6$  см; 6 – сетка с 4-мя отверстиями  $d = 0,3$  см)

Обе серии опытов проводились для устройств, представленных на рис. 1: для трех сеток одинаковой поверхностной пористости  $n_{\omega} = 0,1$  с разным числом отверстий (сетки 1–3) и 4-х сеток разной поверхностной пористости с одинаковым числом отверстий (сетки 2–6). Пористость определяется как

$$\Pi_{\omega} = \frac{\omega_{\Pi}}{\omega_0},$$

где  $\omega_{\Pi}$  – суммарная площадь отверстий сетки (площадь просвета);  $\omega_0$  – площадь сечения трубы.

### Результаты и обсуждение

Результаты измерений и вычислений  $\mu$  представлены на рис. 2. Коэффициенты расхода трубопровода  $\mu_{H=\text{const}}$ , найденные при фиксированных напорах, представлены как функции относительного напора  $H/H_0$  ( $H_0$  – максимально возможный на используемой экспериментальной установке напор), а коэффициенты расхода  $\mu_{\text{опор}}$ , установленные в опытах по опорожнению бака, – как функции относительного напора  $\Delta H/H_1$ , где  $\Delta H$  – падение напора при опорожнении;  $H_1$  – начальный напор при опорожнении.

Расхождение значений  $\mu_{H=\text{const}}$  и  $\mu_{\text{опор}}$  согласно данным расчетов составило не более 10 %, что является хорошим совпадением, если иметь

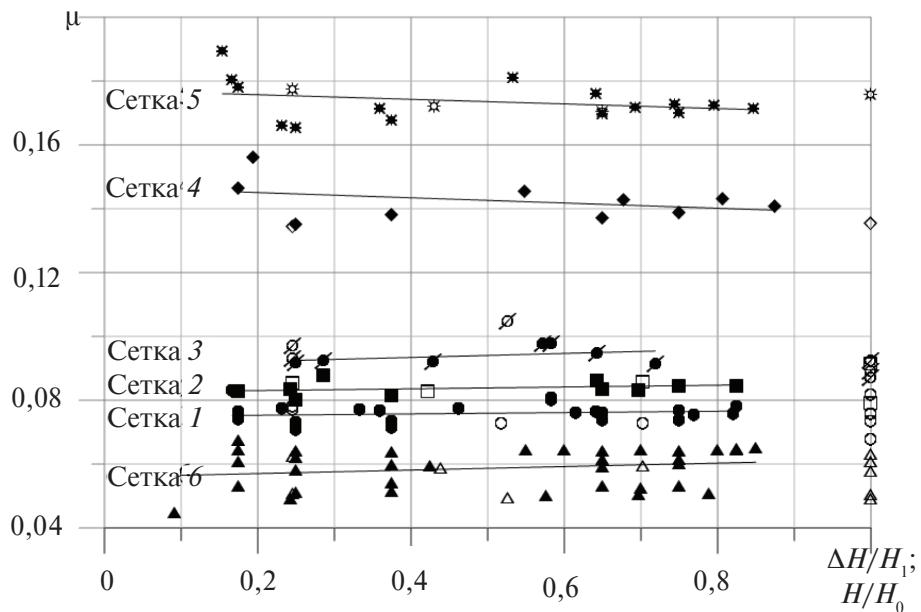


Рис. 2. Сопоставление коэффициентов расхода трубопровода  $\mu_{H=\text{const}}$  (маркеры без заливки) и  $\mu_{\text{опор}}$  (маркеры с заливкой)

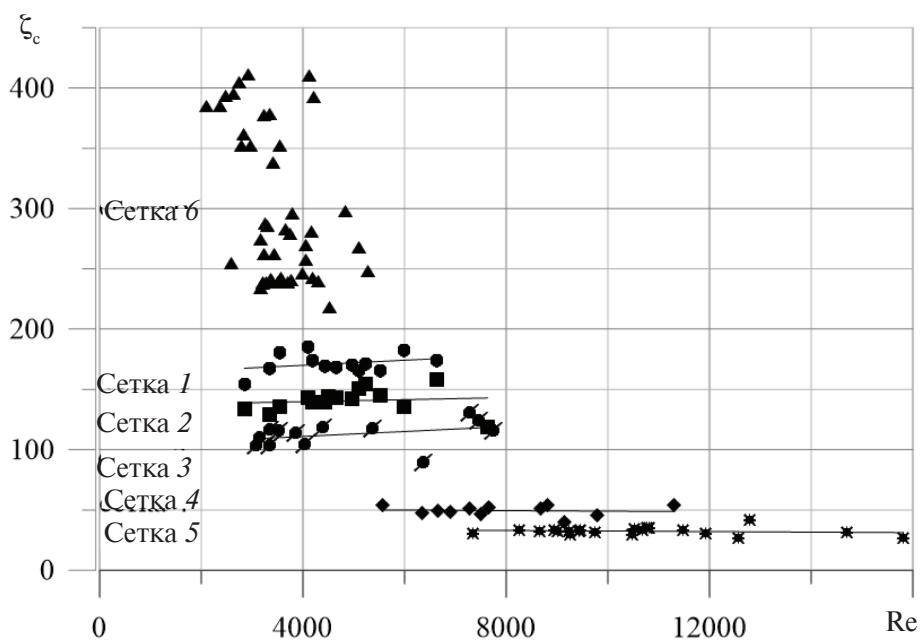


Рис. 3. График зависимости  $\zeta_c = f(Re)$

в виду точность проведенных измерений. Это также свидетельствует, что  $\mu$  не зависит от напора над центром выходного сечения трубопровода.

По значениям коэффициентов расхода  $\mu$  для всех опытов определялись полные коэффициенты сопротивления  $\zeta_f$  трубопровода. При истечении в атмосферу  $\zeta_f = (1/\mu^2) - 1$ . Коэффици-

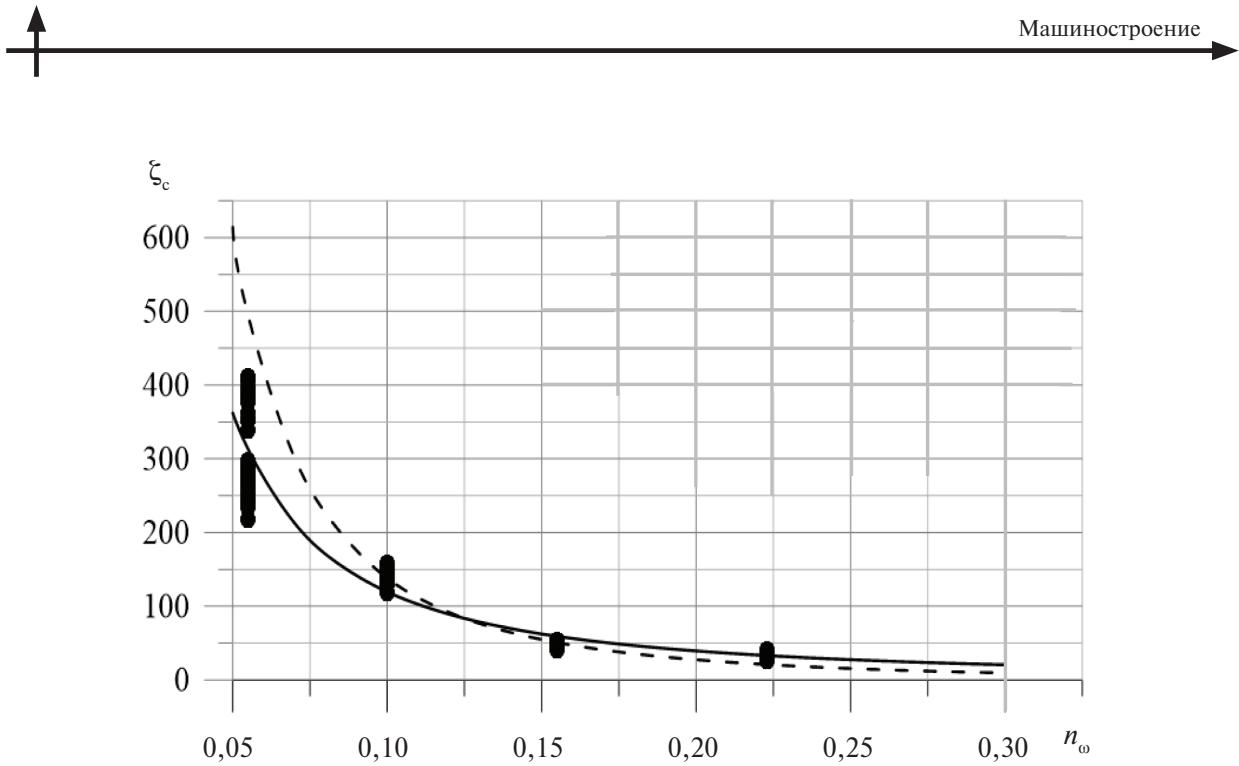


Рис. 4. График зависимости  $\zeta_c = f(1/n_\omega)$  (сетки 2, 4–6):  
 — —  $\zeta_c = 3(1/n_\omega)^{1.6}$ ; - - -  $\zeta_c = 0.85(0.31 + 2(1/n_\omega - 1)^2)$ ; • • • — опыт

ент сопротивления непосредственно сетки устанавливался как

$$\zeta_c = \zeta_f - \zeta'_f,$$

где  $\zeta'_f$  — полный коэффициент сопротивления трубы без сетки, предварительно установленный экспериментально аналогичным образом.

Данные по коэффициентам сопротивления  $\zeta_c$  для всех исследованных сеток приведены на рис. 3 как функции чисел Рейнольдса  $Re$ , которые вычислены по средней скорости воды в трубе  $v$ .

Как видно из рис. 3, в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса ( $2 \cdot 10^3 < Re < 2 \cdot 10^4$ ) коэффициенты сопротивления практически не зависят от  $Re$ , что соответствует данным литературы, например [2, 4, 5, 8–12, 14–18].

Однако сравнение численных значений  $\zeta_c$  с приводимыми в литературе довольно приближенно, поскольку перфорированные сетки, исследованные детально рядом авторов, отличаются по конструкции, условиям обтекания и другим факторам.

В то же время исследованиями установлено, что основной параметр, определяющий сопротивление сетки, — это ее пористость [1, 3, 9, 13, 20]. В этой связи проводились опыты с сетками 2, 4–6 по выявлению зависимости коэффици-

ентов сопротивления  $\zeta_c$  от поверхностной пористости  $n_\omega$ . Результаты этих исследований представлены на рис. 4.

Имея в виду характер изменения  $\zeta_c$  как функции  $n_\omega$ , связь между  $\zeta_c$  и  $n_\omega$  можно представить в виде

$$\zeta_c = C \left( \frac{1}{n_\omega} \right)^m,$$

где  $C$  — константа, а  $m > 0$  — показатель степени.

Логарифмируя последнее выражение

$$\log \zeta_c = m \log \frac{1}{n_\omega} + \log C,$$

легко видеть (рис. 5), что  $m$  — тангенс угла наклона прямой, связывающей  $\log \zeta_c$  и  $\log \left( \frac{1}{n_\omega} \right)$ .

Согласно аппроксимации рис. 5 с достаточной степенью точности можно принять  $m = 1.6$ , что соответствует значению константы  $C = 3$ . Тогда зависимость для  $\zeta_c$  примет вид

$$\zeta_c = 3 \left( \frac{1}{n_\omega} \right)^{1.6}.$$

Как видно из рис. 4, расчеты по аппроксимирующей зависимости дают хорошее совпадение с результатами экспериментов.

Для иллюстрации влияния разных факторов на значения коэффициентов сопротивления на

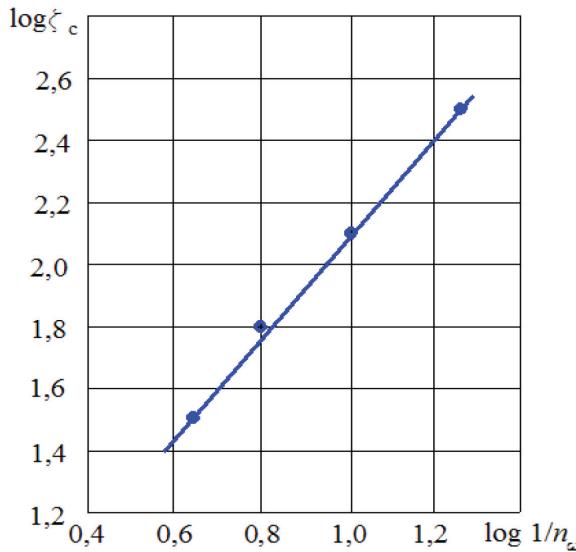


Рис. 5. График зависимости  $\log \zeta_c = f\left(\log \frac{1}{n_\omega}\right)$  (сетки 2, 4–6)

рис. 4 нанесена кривая связи  $\zeta_c = f(1/n_\omega)$ , рассчитанная по формуле

$$\zeta_c = 0,85 \left( 0,31 + 2 \left( \frac{1-n_\omega}{n_\omega} \right)^2 \right),$$

которая рекомендована в [9] для перфорированных сеток, исследованных в других условиях. Как видно, расчеты по предлагаемым зависимостям дают приемлемое совпадение в довольно узком диапазоне поверхностной пористости ( $0,1 < n_\omega < 0,2$ ).

Кроме того, в опытах было установлено, что для сеток малой поверхностной пористости ( $n_\omega < 0,1$ ) значения  $\zeta_c$  существенно зависят от взаимного расположения отверстий (см. рис. 3, сетку 6 – две группы точек для двух вариантов расположения отверстий).

В случае сеток одинаковой поверхностной пористости ( $n_\omega = 0,1 = \text{const}$ ) с разным числом отверстий (сетки 1, 2, 3) опыты показали различие в численных значениях  $\zeta_c$  до 20 % (см. рис. 3).

Чтобы установить влияние числа отверстий на значения коэффициентов сопротивления, целесообразно ввести гидравлический диаметр сетки  $d_r$  по определению [1]

$$d_r = N \frac{\omega_i}{\chi_i} = N \frac{d_i}{4},$$

где  $\omega_i, X_i$  – соответственно площадь и смоченный периметр одного отверстия диаметром  $d_i$ ;  $N$  –

число отверстий. С другой стороны, если определить коэффициент линейной пористости как

$$n_d = \frac{\sum d_i}{D_0} = N \frac{d_i}{D_0},$$

где  $D_0$  – диаметр трубы, то очевидно соотношение

$$\frac{d_r}{D_0} = \frac{n_d}{4}.$$

На рис. 6 в координатах  $\zeta_c = f(n_d)$  представлены результаты опытов для сеток 1–3 ( $N = 1; 4; 7$ ) со значениями  $n_d = 0,32; 0,64; 0,84$  соответственно.

При аппроксимации осредненных данных опытов зависимостью

$$\zeta_c = 220 (1 - 0,57 n_d)$$

на рис. 6 нанесены также расчетные точки (треугольные маркеры) для пористостей  $n_d = 0,44; 0,7; 1,0$ , соответствующих сеткам с промежуточной перфорацией по сравнению с исследованными ( $N = 2; 5; 10; n_\omega = 0,1 = \text{const}$ ).

Следует отметить, кроме того, что для сетки 1, представляющей собой диафрагму и являющейся наиболее исследованным устройством, значения  $\zeta_c$ , найденные в опытах авторов данной статьи, оказались заниженными по сравнению с рекомендациями [1, 3, 4] на 28 % для случая, когда диафрагма установлена внутри трубы, и на 37 % для случая, когда диафрагма – в конце тру-

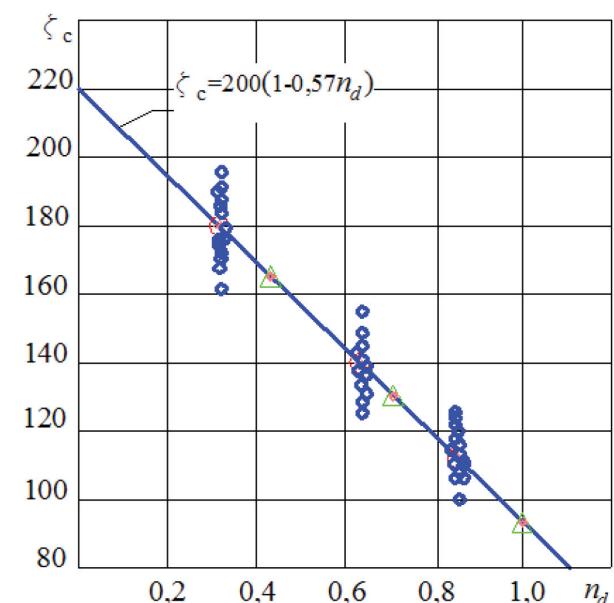


Рис. 6. График зависимости  $\zeta_c = f(n_d)$  (сетки 1–3)



бы при истечении под уровень. Различия в значениях коэффициентов сопротивления связаны, очевидно, не только с точностью измерений, но и с особенностями растекания потока внутри трубы и в конце ее при истечении под уровень или при истечении в атмосферу.

### Выводы

Основываясь на данных литературных источников и результатах проведенных опытов,

можно констатировать, что для назначения коэффициентов сопротивления перфорированных сеток необходимы:

экспериментальная проверка численных значений коэффициентов;

уточнение влияния места установки устройства (вход, выход, внутри канала), величины пористости (поверхностная или линейная), взаимного расположения отверстий, степени загрязнения и других параметров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
2. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П.Г. Киселева. М.: Энергия, 1972. 312 с.
3. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1982. 224 с.
4. Альтшуль А.Д., Калицун В.И. Гидравлическое сопротивление трубопроводов. М.: Стройиздат, 1975. 285 с.
5. Альтшуль А.Д., Калицун В.И., Майрановский Ф.Г., Пальгунов П.П. Примеры расчетов по гидравлике/ Под ред. А.Д. Альтшуля. М.: Стройиздат, 1976. 256 с.
6. Идельчик И.Е. Учет влияния вязкости на гидравлическое сопротивление диафрагм и решеток // Теплоэнергетика. 1960. № 9 С. 75–80.
7. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. Л.: Стройиздат, 1973. 408 с.
8. Дербунович Г.И., Земская А.С., Репик Е.Ю., Соседко Ю.П. К вопросу о гидравлическом сопротивлении сеток // Ученые записки ЦАГИ. 1980. Том XI, № 2. С. 133–136.
9. Дербунович Г.И., Земская А.С., Репик Е.Ю., Соседко Ю.П. Гидравлическое сопротивление перфорированных решеток // Ученые записки ЦАГИ. 1984. Том XV, № 2. С. 114–118.
10. Великанов Н.Л., Корягин С.И., Наумов В.А. Гидродинамическое сопротивление решеток и сеток в прямом трубопроводе // Вестник машиностроения. 2014. № 6. С. 44–47.
11. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Примак Л.В. Гидродинамическое сопротивление сеток // Механизация строительства. 2014. № 11 (845). С. 28–31.
12. Schlichting H. Ergebnisse und Probleme von Gitteruntersuchungen // ZFW. 1953. № 1, S. 109–122.
13. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. М.-Л.: Машиностроение, 1974. 479 с.
14. Ханжонков В.И. Сопротивление сеток // Промышленная аэродинамика. 1944. № 3. С. 210–214.
15. Таганов Г.И. Выравнивающее действие сеток в потоках жидкостей и газов // Труды ЦАГИ. 1947. № 604. 14 с.
16. Loehrke R.L., Nagib H.M. Experiments on management of free-stream turbulence. 1972. AGARD Rep. 598.
17. Tan-Atichat J., Nagib H.M., Loehrke R.I. Interaction of free-stream turbulence scales // J. Fluid Mech. Vol. 114.
18. Baines W.D., Peterson E.G. An investigation of flow through screens // Transactions of the ASME, VII. 1951. 1982. Vol. 73, № 5.
19. Идельчик И.Е. Аэродинамика промышленных аппаратов // М.: Машиностроение. 1983. 351 с.
20. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. М.: Госстройиздат, 1975. 323 с.
21. Бредов В.И. Об определении величины местных гидравлических сопротивлений в трубопроводах. Гидравлика однородных и неоднородных жидкостей // Тр. МИСИ. 1972. Вып. № 89. С. 44–51.

### REFERENCES

1. Idelchik I.Ye. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam. [Hydraulic resistance textbook] M.: Mashinostroyeniye, 1992. 672 s. (rus)
2. Spravochnik po gidravlicheskim raschetam [Hydraulic solutions textbook] / Pod red .P.G. Kiseleva. M.: Energiya, 1972. 312 s. (rus)
3. Altshul A.D. Gidravlicheskiye soprotivleniya. [Hydraulic resistance] M.: Nedra, 1982. 224 s. (rus)
4. Altshul A.D., Kalitsun V.I. Gidravlicheskoye soprotivleniye truboprovodov. [Hydraulic resistance of the pipeline] M.: Stroyizdat, 1975. 285 s. (rus)
5. Altshul A.D., Kalitsun V.I., Mayranovskiy F.G., Palgunov P.P. Primery raschetov po gidravlike / Pod red. A.D. Altshulya. M.: Stroyizdat, 1976. 256 s. (rus)
6. Idelchik I.Ye. Uchetvliyaniiayavzakostinagidravlicheskoye soprotivleniye diafragm i reshetok. [Accounting viscosity effect

- on the flow resistance of the diaphragms and grids]. *Teploenergetika*. 1960. № 9. S. 75–80. (rus)
7. **Kurganov A.M., Fedorov N.F.** Spravochnik po gidravlicheskim raschetam sistem vodosnabzheniya i kanalizatsii. [Hydraulic textbook: Water supply and sewerage] L.:Stroyizdat, 1973. 408 s. (rus)
8. **Derbunovich G.I., Zemskaya A.S., Repik Ye.Yu., Sosedko Yu.P.** K voprosu o gidravlicheskom soprotivlenii setok. *Uchenyye zapiski TsAGI*. 1980. T. XI, № 2. S. 133–136. (rus)
9. **Derbunovich G.I., Zemskaya A.S., Repik Ye.Yu., Sosedko Yu.P.** Gidravlicheskoje soprotivleniye perforirovannykh reshetok. [Hydraulic resistance of the perforationally grids] // *Uchenyye zapiski TsAGI*. 1984. T. XV, № 2. S. 114–118. (rus)
10. **Velikanov N.L., Koryagin S.I., Naumov V.A.** Gidrodinamicheskoye soprotivleniye reshetok i setok v pryamom truboprovode. [Hydraulic resistance of grids and networks in the lineare pipelines] // *Vestnik mashinostroyeniya*. 2014. № 6. S. 44–47. (rus)
11. **Velikanov N.L., Naumov V.A., Primak L.V.** Gidrodinamicheskoye soprotivleniye setok. [Hydraulic resistance of the grids] // *Mekhanizatsiya stroitelstva*. 2014. № 11 (845). C. 28–31. (rus)
12. **Schlichting H.** Ergebnisse und Probleme von Gitteruntersuchungen. [Results and problems of grid research]. // *ZFW 1*, 1953. S. 109–122. (ger)
13. **Povkh I.L.** Aerodinamicheskiy eksperiment v mashinostroyenii. [Aerodynamic experiment in engineering] // M.-L.: Mashinostroyeniye, 1974. 479 s. (rus)
14. **Khanzhonkov V.I.** Soprotivleniye setok. [The grids resistens] // *Promyshlennaya aerodinamika*. 1944. № 3. S. 210–214. (rus)
15. **Taganov G.I.** Vyravnivayushcheye deystviye setok v potokakh zhidkostey i gazov. [The aligning action of the grids in the flow of liquids and gases] // *Trudy TsAGI*. 1947. № 604. 14 c. (rus)
16. **Loehrke R.L., Nagib H.M.** Experiments on management of free-stream turbulence. 1972. *AGARD Rep.* 598.
17. **Tan-Atichat J., Nagib H.M., Loehrke R.I.** Interaction of free-stream turbulence scales. 1982. *J. Fluid Mech.* Vol. 114.
18. **Baines W. D., Peterson E.G.** An investigation of flow through screens. *Transactions of the ASME*, VII, 1951, Vol. 73, № 5.
19. **Idelchik I.Ye.** Aerodinamika promyshlennykh apparatov. [Aerodynamics industrial vehicles] // M.: Mashinostroyeniye. 1983. 351 s. (rus)
20. **Altshul A.D., Kiselev P.G.** Gidravlika i aerodinamika. [Hydraulic and Aerodynamic] // M.: Gosstroyizdat, 1975. 323 s. (rus)
21. **Bredov V.I.** Ob opredelenii velichiny mestnykh gidravlicheskikh soprotivleniy v truboprovodakh. Gidravlika odnorodnykh i neodnorodnykh zhidkostey. *MISI. Tr.*, 1972. Vyp. № 89. C. 44–51. (rus)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**ЛАТУХИНА Анастасия Игоревна** – студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: lai-03@mail.ru

**LATUHINA Anastasiia I.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
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

**LOKTIONOVA Elena A.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: elena.lokt@yandex.ru

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

**POLUPANOVA Julia R.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: julypolup@mail.com