

ния» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, Б. Академическая

ул., д.44; тел.: +7(499)976-33-44; +7(499)976-0030; +7(499)976-0428; e-mail: a_omar@mail.ru

D.T. BAUTDINOV, U.I. ATABIEV

Federal state budget educational institution of higher education
«Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev»

STRESS STATE OF THE TRANSVERSELY ISOTROPIC ROCKS NEAR A PRESSURE HYDRO-TECHNICAL TUNNEL OF A RECTANGULAR CROSS SECTION FORM

The parametric analysis is fulfilled of the stress state of a transversely isotropic rock near the pressurized hydraulic tunnel of a rectangular cross-section from the internal water pressure which are prevalent in the field of hydraulic engineering construction and are one of the most complex, labor-intensive and expensive types of facilities being a part of main structures of waterworks, irrigation and drainage systems and water supply systems. There are determined tangential stresses on the contour of working out a hydro-technical tunnel at different ratios of modulus of deformations and Poisson's ratios allowing estimating the strength of the soil mass under various depths of the tunnel location. Calculation of a long hydro-technical tunnel built in hard, transversely isotropic rocks is reduced to the task of plain deformation of the theory of elasticity for the transverse-isotropic medium containing the tunnel output. The solution of this problem is not possible by analytical methods, thus the analysis of the stressed state was fulfilled by a method of finite element using the software system ANSYS. Preliminarily there were determined sizes and type of the element suitable for the calculation on the basis of the test task solution.

Transversally isotropic medium, theory of elasticity, plane deformation, modulus of deformation, Poisson's ratio.

References

1. SNiP 2.06.09–84. Tunneli gidrotehnicheskie. – М.: Gosstroj SSSR, 1985.
2. SNiP 2.02.02–85. Osnovaniya gidrotehnicheskikh sooruzhenij. – М.: Gosstroj SSSR, 1985.
3. Lekhnitsky S.G. Teoriya uprugosti anizotropnogo tela. – М.: Nauka, 1977. 416 s.

The material was received at the editorial office
31.03.2016.

Information about the authors

Bautdinov Damir Takhirovich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair «Technical and structural mechanics» FSBEI HE RGAU-MTAA, 127550, Moscow, Pryanishnikova street, 19. Tel.: +7(499)976-33-44. E-Mail: damir.tt1@mail.ru.

Atabiev Umar Iskhakovich, engineer, postgraduate student of the chair «Hydro-technical structures». FSBEI HE RGAU-MTAA, 127550, Moscow, B. Academicheskaya ul., d. 44, Tel.: +7(499)976-33-44; +7(499)976-0030; +7(499)976-0428. E-mail: a_omar@mail.ru

УДК 502/504: 532.621

М.С. ПАЛИИВЕЦ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

К ВОПРОСУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ В НАПОРНЫХ ВОДОВОДАХ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

В настоящее время известно более двух тысяч научных работ, посвященных гидравлическим сопротивлениям напорных потоков. Исследования гидравлического коэффициента трения в круглых и прямоугольных трубах производились отечественными и зарубежными исследователями достаточно давно и проблема определения

гидравлического коэффициента трения, что составляет одну из сложнейших проблем механики жидкости, не получившую до сих пор полного теоретического решения. В статье представлены результаты экспериментальных исследований кинематической структуры потока и гидравлического коэффициента трения напорных водоводов квадратного поперечного сечения. Экспериментально гидравлический коэффициент трения определялся по известной методике на эквивалентной длине участка водовода, а после регрессионного анализа значений коэффициента Дарси, полученные данные автора сравнивались с данными других известных исследователей по бетонным водоводам.

Напорный водовод, скорость потока, расход, гидравлический коэффициент трения (Дарси), потери напора по длине, смоченный периметр, эквивалентный диаметр по площади, гидравлический диаметр, относительная шероховатость.

Введение. При определении потерь напора в напорных водоводах, таких как гидротехнические водоводы, водовыпуски плотинных гидроузлов или трубопроводы систем водоснабжения необходимо экспериментально находить значения гидравлического коэффициента трения по известной зависимости Дарси-Вейсбаха, что составляет одну из сложнейших проблем механики жидкости, не получившую до сих пор полного теоретического решения.

В настоящее время известно более двух тысяч научных работ, посвященных гидравлическим сопротивлениям напорных потоков. Исследования гидравлического коэффициента трения в круглых и прямоугольных трубах производились отечественными и зарубежными исследователями достаточно давно. В силу широкого промышленного применения большая часть работ содержит экспериментальные данные по трубам круглого сечения, в частности в промышленной аэродинамике этому вопросу посвящена целая серия трудов Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ). В России широко используются графики Никурадзе, номограммы Кольбрука-Уайта для определения значений коэффициента гидравлического трения.

Материал и методы. Универсальная формула для определения λ была предложена А.Д. Альтшулем [1]:

$$\lambda = 0,1(1,46 \Delta / d + 100/\text{Re})^{0,25}, \quad (1)$$

где $\frac{\Delta}{d}$ – относительная шероховатость, Re – число Рейнольдса.

Согласно исследованиям А.Д. Альтшуля возможные расхождения при расчете по различным формулам незначительны, по сравнению с теми ошибками, которые обычно имеют место вследствие неопределенности в выборе значения шероховатости [1].

Зависимость коэффициента λ от различных факторов связана с областями, которые наблюдаются в потоках: область гидравлически гладких труб (область ламинарного режима); переходная область и область квадратичного сопротивления. В области гидравлически гладких труб коэффициент λ зависит от числа Рейнольдса, $\lambda = f(\text{Re})$. В переходной области коэффициент λ зависит от числа Рейнольдса и относительной шероховатости, $\lambda = f(\text{Re}; \Delta / d)$. В области квадратичного сопротивления коэффициент λ зависит только от относительной шероховатости, $\lambda = f(\Delta / d)$ [1].

Для нахождения коэффициента гидравлического трения (Дарси) λ при расчете трубопроводов из других материалов или трубопроводов, предназначенных для транспортирования жидкостей, отличающихся от воды, применяют другие эмпирические формулы.

На практике часто приходится иметь дело с турбулентным течением в некруглых трубах, применяемых, например, в различных охлаждающих устройствах [2,3], а также это могут быть многоярусные водопропускные сооружения, гидродинамические стабилизаторы расхода водовыпусков низконапорных гидроузлов, гидродинамические регуляторы расхода на перепадах каналов оросительной сети.

Рассмотрим расчет потерь на трение при турбулентном течении в трубе с прямоугольным поперечным сечением.

Для количественной оценки влияния формы сечения на потерю напора вводится в расчет гидравлический диаметр d_r . В технической литературе гидравлический диаметр называют также эквивалентным диаметром и обозначают d_e [2,3].

Для трубы прямоугольного сечения со сторонами a и b :

$$d_e = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{4S}{\Pi},$$

Для квадрата со стороной a :

$$d_e = a = \frac{4S}{\Pi}, \quad (2)$$

где Π – смоченный периметр сечения, S – площадь сечения.

Если подставить в формулу Дарси-Вейсбаха (3) вместо диаметра трубопровода гидравлический диаметр, то получим более общее выражение закона потерь, поскольку оно справедливо для труб не только круглых, но и любых иных сечений [2]. При этом коэффициент λ подсчитывается по любой из перечисленных выше формул, а Re выражается через d_e :

$$Re = \frac{V \cdot d_e}{\nu},$$

$$h_l = \lambda \frac{lV^2}{dg^2}, \quad (3)$$

где V – средняя скорость потока, h_l – потери напора по длине, l – длина водовода, d_e – гидравлический диаметр, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Так как коэффициент местного сопротивления характеризует потери напора движущейся жидкости, вызванные действием, как сил трения, так и нормальных напряжений на длине местного сопротивления, то при экспериментальном определении коэффициента местного сопротивления выделяют потери по длине водовода, но уже без местного сопротивления. По существу же при вычислении потерь напора по длине h_l делается допущение о постоянстве коэффициента гидравлического трения λ на протяжении расчетного участка водовода независимо от формы последней [4]. Действительно, при таком подходе искусственно удваиваются потери напора на трение в пределах длины местного сопротивления. Фактически же из-за деформации потока в пределах местного сопротивления величина коэффициента гидравлического трения λ будет отличаться от таковой, имеющей место на прямых участках трубопровода, где режимы движения жидкости стабилизировались – профиль скоростей потока приобрел нормальный вид, характерный для турбулентного режима [4].

Опыты показывают, что нарушение режима движения жидкости из-за наличия местных сопротивлений не ограничивается длиной этого сопротивления, а распространяется по обе стороны его [5].

Следовательно, в пределах длин подходного к выходного участков водовода величина коэффициента гидравлического трения λ отлична от имеющей место в стабилизированном потоке жидкости при турбулентном режиме ее течения. Это обстоятельство при производстве расчетов, как правило, не учитывается; принимается $\lambda = \text{const}$ по всей длине расчетной магистрали, независимо от количества и расположения местных сопротивлений в водоводе.

Результаты и обсуждение. Экспериментально коэффициент гидравлического трения λ (Дарси) определялся на прямом участке водовода длиной $l = 17 \cdot d_e = 19,2 \cdot d_e$ (рис. 1). В качестве характерного линейного поперечного размера квадратного водовода выбирался эквивалентный диаметр по площади $D_9 = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = 1,128 \cdot d_e$ [5,6].



Рис. 1. Экспериментальная установка

Значения коэффициента λ были вычислены по формуле:

$$\lambda = \frac{2 \cdot g \cdot d_9 \cdot h_l \cdot \omega^2}{l \cdot Q^2}. \quad (4)$$

Перед проведением основной серии опытов по принятой методике была оценена шероховатость экспериментального участка водовода.

Для определения относительной шероховатости $e = \frac{\Delta}{d_9}$ замерялась фактическая потеря давления на трение по длине трубы h_l при определенной скорости воды V в ней, средняя скорость течения воды на модели изменялась в пределах $V = (2 \dots 4) \text{ м/с}$ при расходах на модели $Q = (103 \dots 0) \text{ л/с}$ и температуре воды $t = 15^\circ \dots 17^\circ \text{ С}$.

Подставляя в формулу (4) значение λ , найденное из опыта, определяли значение $\frac{\Delta}{d_э}$, а так как диаметр трубы известен, то вычисляли величину абсолютной шероховатости водовода Δ . Абсолютная шероховатость квадратного водовода по эквивалентному диаметру $d_э = 96 \text{ мм} = 9,6 \text{ см}$ при значении относительной шероховатости $e = \frac{\Delta}{d_э} = 0,0003$ равняется $\Delta = 0,03 \text{ мм}$, где $\lambda = 0,0149$, $Re = 261256$.

В.В. Казеннов и А.В. Мишуев [7] обработали опытные данные по гидравлическим коэффициентам трения отечественных и зарубежных исследований (268 серий) стальных и бетонных водоводов, а также данные натуральных исследований напорных облицованных и необлицованных туннелей. Опытные данные охватывали диапазон чисел Рейнольдса от $1,2 \cdot 10^3$ до $5,2 \cdot 10^7$ (диаметр труб изменялся от 0,10 до 0,30 м). Точки наносились на графики в системе координат $\lambda = f(\lg Re)$ и сравнивались с расчетными кривыми по известным формулам Кольбрука, А.Д. Альтшуля и Прандля-Никурадзе. На основании сопоставления расчетных кривых с опытными точками устанавливалась степень их согласования и находились значения эквивалентной равномерно зернистой шероховатости $\Delta_э$. Исследователи пришли к выводам, что стальные и бетонные напорные водоводы работают, как правило, в переходной области сопротивления, поэтому для их расчета нельзя рекомендовать формулы квадратичной области сопротивления и использование кривых Никурадзе. Кривые сопротивления стальных напорных водоводов больших и малых диаметров вполне согласуются с кривыми, построенными по степенной формуле (1) [7].

Достаточно известны работы И.Е. Идельчика и А.Г. Адамова [5,6]. В научных отчетах этих авторов был экспериментально определен гидравлический коэффициент трения для фанерных труб (различного сорта березы) квадратного поперечного сечения в напорном турбулентном потоке. Г.А. Адамовым предложены формулы для трех областей сопротивления [5]:

а) для гладких труб:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \frac{3,0}{Re \sqrt{\lambda}},$$

б) для шероховатых труб в зоне полной турбулентности:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \frac{e}{1,95},$$

в) для шероховатых труб в переходной зоне:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{e}{1,95} + \frac{3,0}{Re \sqrt{\lambda}} \right), \quad (5)$$

где e – относительная шероховатость стенок трубопровода.

Последняя формула (5) является общей формулой сопротивления трения прямых труб квадратного сечения при турбулентном потоке [5,6].

Выводы

Получена эмпирическая формула для расчета гидравлического коэффициента трения:

$$\lambda = 0,0198 \cdot Re^{-0,1616}. \quad (6)$$

Эмпирическое уравнение (6) имеет хорошие статистические оценки и может быть использовано в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = (1,5 \dots 2,7) \cdot 10^5$. За характерный линейный размер в числе Re принимался учетверенный гидравлический радиус (гидравлический диаметр).

Значения коэффициента гидравлического трения, полученные по эмпирической зависимости (6) хорошо согласуются с данными экспериментов, полученных И.Е. Идельчиком и А.Г. Адамовым для квадратных труб из березовой фанеры (рис. 2 и 3) и с натурными данными по бетонным водоводам других исследователей [7].

Натурное моделирование напорных бетонных водоводов по критерию Рейнольдса в переходной (начало квадратичной) области сопротивления (квазиквадратичная область сопротивлений) можно производить с учетом относительной шероховатости Δ , которая получена в экспериментах автора для напорного водовода прямоугольного сечения в пределах чисел $Re = (1,5 \dots 2,6) \cdot 10^5$ для гидротехнического бетона (с отделкой) со значениями относительной шероховатости стенок на модели (оргстекло) – $\Delta = 0,01 \dots 0,03 \text{ мм}$ и $\Delta = 0,1 \dots 0,3 \text{ мм}$ на натуре с учетом масштаба моделирования.

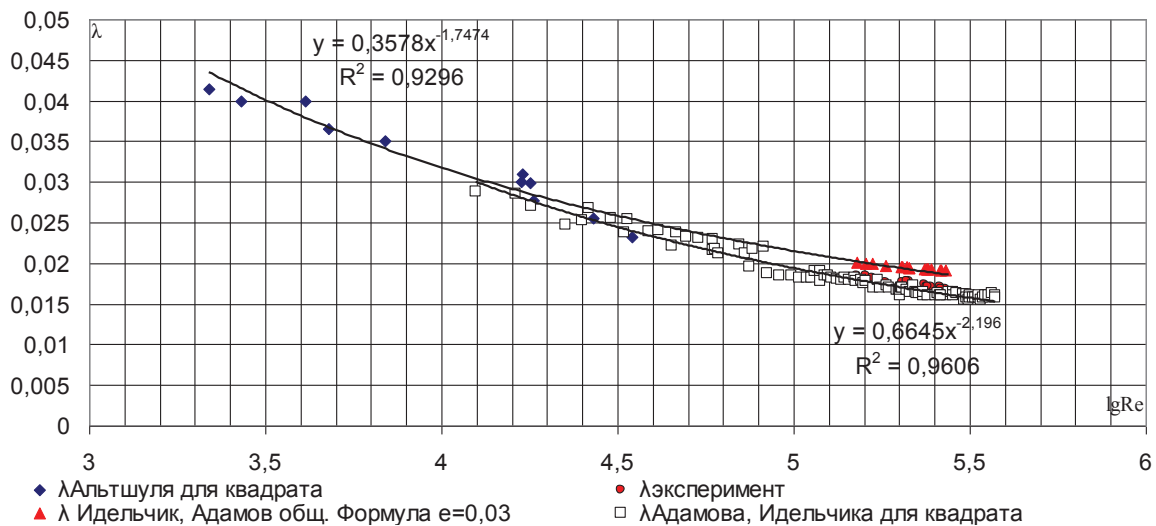


Рис. 2. График зависимости $\lambda = f(\lg Re)$ экспериментальных данных автора и данных И.Е. Идельчика и А.Г. Адамова для квадратных труб

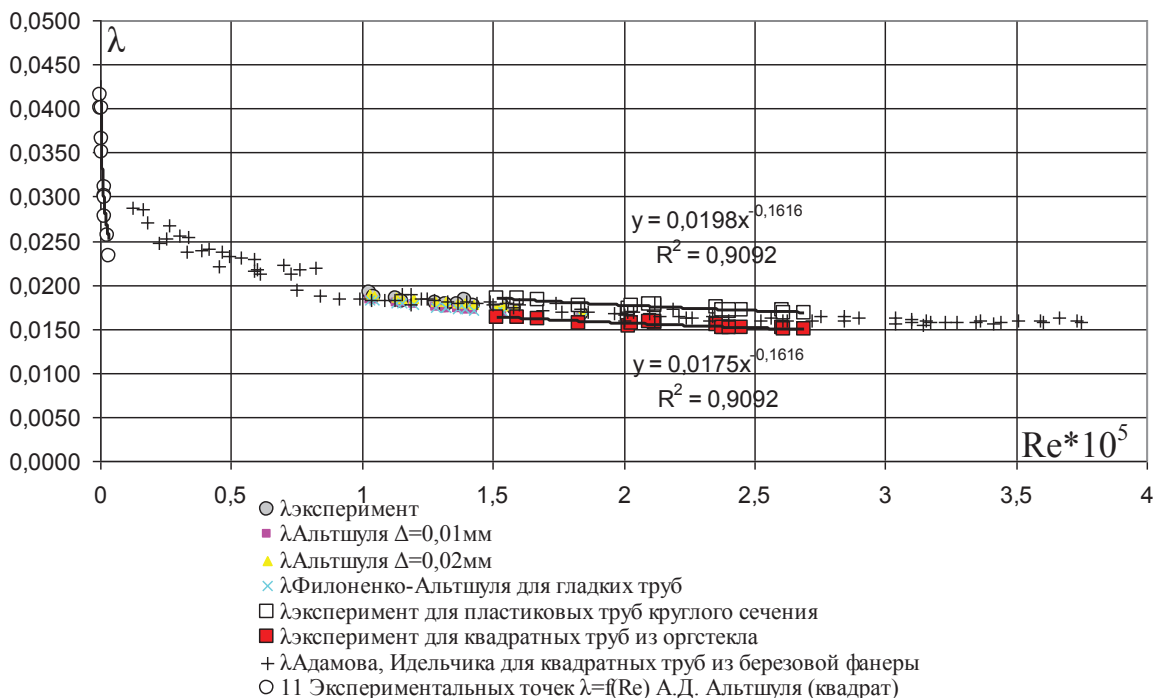


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных коэффициентов гидравлического трения с данными других авторов, при расходе на модели $d_3 \times d_3 = 9,6 \times 9,6$ см

Библиографический список

1. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления: учебник: 2-е изд., перераб. и доп. / А.Д. Альтшуль. – М.: Недра, 1982. – 224 с.

2. Жабо В.В., Уваров В.В. Гидравлика и насосы: учеб. для энерг. и энергостроит. техникумов: 2-е изд., перераб. / В.В. Жабо, В.В. Уваров. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 327 с.

3. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / И.Г. Грачев, В.М. Низовцев, С.Ю. Пирогов, Н.П. Савищенко, А.С. Юрьев. – СПб.: АНО НПО «Мир и семья», 2001. – 1154 с.

4. Ковалев-Кривонос П.А. Рекомендации по компоновке отводов и арматуры в составе блоков и агрегатов судовых систем / П.А. Ковалев-Кривонос, В.А. Зюбан, М.-Р.А. Умбрасас // Сб. НТО им. А.Н. Крылова. – Вып. 285. – Л.: Судостроение, 1979.

5. Адамов Г.А., Идельчик И.Е. Экспериментальное исследование сопротивления фанерных труб круглого и квадратного сечений при вполне развитом турбулентном течении: Труды МАП № 670 / Г.А. Адамов, И.Е. Идельчик. – М., 1948. – 27 с.

6. Адамов Г.А., Идельчик И.Е. Экспериментальное исследование турбулен-

тного течения в начальных участках прямых труб круглого и квадратного сечений: Технические отчеты МАП № 124 / Г.А. Адамов, И.Е. Идельчик. – М., 1948. – 14 с.

7. **Казеннов В.В., Мишуев А.В.** Гидравлические сопротивления напорных водоводов электростанций / В.В. Казеннов, А.В. Мишуев // Научно-технический журнал Вестник МГСУ. – 2008. – № 1. – С. 210–215 с.

Материал поступил в редакцию 22.06.2016.

M.S. PALIIVETS

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy», Moscow

ON THE QUESTION OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF HYDRAULIC COEFFICIENT OF FRICTION IN PRESSURE CONDUITS OF SQUARE SECTION

Now more than two thousand scientific works devoted to hydraulic resistances of pressure flows are known. Researches of hydraulic friction coefficient in round and rectangular pipes were made by domestic and foreign researchers long ago, and the problem of determination of hydraulic friction coefficient that is one of the most difficult problems of fluid mechanics which hasn't been solved theoretically yet. The article presents the results of experimental researches of the kinematic flow structure and hydraulic friction coefficient of pressure conduits of a square cross-section. Experimentally the hydraulic coefficient of friction was defined according to the known method on the equivalent length of the conduit, and after the regression analysis of values of the Darcy coefficient the obtained data of the author were compared with the data of other famous researchers on concrete conduits.

Pressure conduit, flow speed, consumption, hydraulic coefficient of friction (Darcy coefficient), head loss along the length, wetted perimeter, equivalent diameter on the square, hydraulic diameter, relative roughness.

References

1. **Aljtshulj A.D.** Gydravlichrskiye soprotivleniya: uchebnik: 2-e izd., pererab. I dop. / A.D. Aljtshulj. – M.: Nedra, 1982. – 224 s.

2. **Zhabo V.V., Uvarov V.V.** Gydravlika i nasosy: ucheb. Dlya energy. i energostroit. tehnikumov: 2-e izd., pererab. / V.V. Zhabo, V.V. Uvarov. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 327 s.

3. Spravochnik po raschetam gidravlicheskih i ventilyatsionnyh sistem / I.G. Grachev, V.M. Nizovtsev, S. Yu. Pirogov, N.P. Savishchenko, A.S. Yurjev. – SPb.: ANO NPO «Mir i semja», 2001. – 1154 s.

4. **Kovalev-Krivososov P.A.** Rekomendatsii po komponovke otvodov I armatury v sostave blokov I agregatov sudovyh system / P.A. Kovalev-Krivososov, V.A. Zyuban, M.-R.A. Umbrasas // Sb. NTO im. A.N. Krylova. – Vyp. 285. – L.: Sudostrojenije, 1979.

5. **Adamov G.A., Ideljchik I.E.** Experimentalnoje issledovaniye soprotivleniya

Сведения об авторе
Палиивец Максим Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий в строительстве, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», 127550, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44, Тел.: 8(499)53-97-66, e-mail: maxim6663@mail.ru.

fanernyh trub kruglogo i kvadratnogo sechenij pri vpolne razvivshemsya turbuletnom techenii: Trudy MAP № 670 / G.A. Adamov, I.E. Ideljchik. – M., 1948. – 27 s.

6. **Adamov G.A., Ideljchik I.E.** Experimentalnoje issledovaniye turbuletного techenia v nachal'nyh uchastkah pryamyh trub kruglogo i kvadratnogo sechenij: Tehnicheskie otchety MAP № 124 / G.A. Adamov, I.E. Ideljchik. – M., 1948. – 14 s.

7. **Kazennov V.V., Mishuev A.V.** Gydravlichrskiye soprotivleniya napornyh vodovodov electrostantsij / V.V. Kazennov, A.V. Mishuev // Nauchno-tehnicheskij zhurnal Vestnik MGSU. – 2008. – № 1. – S. 210–215 s.

The material was received at the editorial office
22.06.2016.

Information about the author

Paliivets Maxim Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, the associate professor of the chair of information

technologies in construction, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev

Agricultural Academy», 127550, Moscow, st. Boljshaya Akademicheskaya, 44, Phone number: 8(499)153-97-66, e-mail: maxim6663@mail.ru.

УДК 502/504:628.16

И.М. САВКОВ, С.Л. ЗАХАРОВ

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева

МЕТОД ПОДГОТОВКИ ВОДЫ ПРИ ПОМОЩИ УЛЬТРА- И МИКРОФИЛЬТРАЦИИ

Проблемы очистки водных сред имеют место в настоящее время практически во всех областях человеческой деятельности. Наиболее остро они встают в энергетике, пищевой промышленности, биотехнологии, химической промышленности и хозяйственно-питьевом водоснабжении. Надежность и стабильность работы мембранных установок по получению, в частности, питающей воды котлов высокого давления в энергетике во многом зависят от качества предподготовки воды перед стадией обратного осмоса (ОО). Микрофильтрация (МФ) и ультрафильтрация (УФ) позволяют снизить потребность в мембранах для ОО установки на 20% (иногда и выше), а также упростить процесс предварительной очистки, в результате чего снижаются эксплуатационные расходы на установки. Как установлено, непрерывная МФ и УФ более экономичны в сравнении с традиционными методами предварительной очистки на весь срок службы, особенно в тех случаях, когда исходная вода в высокой степени загрязнена взвешенными твердыми веществами и коллоидами [1].

Обратный осмос, нанофильтрации, ультрафильтрации, микрофильтрация, нанопористые мембраны.

Введение. В последние годы в мировой практике в некоторых крупных установках применяются интегрированные мембранные системы (IMS), сочетающие микрофильтрацию (МФ) или ультрафильтрацию (УФ) с обратным осмосом (ОО) или нанофильтрацией (НФ) для достижения более высокого качества для ОО/НФ с точки зрения мутности, показателя плотности ила (SDI) и биологического контроля, обеспечивая получение воды с пониженным потенциалом загрязнения для ОО/НФ мембран [2].

Таким образом создается возможность работы с более совершенными установками и сниженными удельными издержками.

На сегодняшний день существуют следующие варианты:

- традиционная предварительная очистка и ОО или НФ;
- IMS: непрерывная МФ или УФ в сочетании с ОО или НФ.

Использование УФ и МФ мембран обуславливается их химической и физической стойкостью, но размеры пор велики для использования в качестве заключительной стадии очистки, поэтому измерение их селективности возможно по малому количеству

характеристик воды. При этом возможность их очистки и вторичное использование, ставят их на ряд выше традиционной предварительной очистки. Замена классической схемы предочистки на предлагаемую позволяет исключить использование химических реагентов, автоматизировать процесс, снизить капитальные и эксплуатационные затраты, повышение качества подаваемой на нанофильтрационный или обратноосмотический модуль воды, для повышения эксплуатационного срока службы [2].

Материалы и методы исследования. Наиболее распространенными типами мембран, следующими за МФ и УФ, являются традиционные ОО элементы, НФ и ОО элементы с низкой энергоемкостью.

Данная тенденция для интегральных мембранных систем обусловлена, главным образом, осуществимостью процесса, надежностью процесса, наличием работающих установок, модульностью и низкими эксплуатационными расходами. Непрерывная МФ и УФ позволяют осуществлять более высокий контроль за качеством исходной воды для ОО, в результате интервалы чистки ОО мембран сокращаются [2].