

УДК 628.16

Эпоян С. М., д.т.н, профессор, Карагяур А. С., к.т.н., доцент,  
Голубка А. Э., аспирант (Харьковский национальный университет  
строительства и архитектуры)

## **О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРЕДОЧИСТКИ ПЕРЕД УСТРОЙСТВАМИ МИКРО- И УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ**

**Проанализировано влияние дисперсного состава взвеси на эффективность применения предочистки перед устройствами микро- и ультрафильтрации.**

**Ключевые слова:** устройства микро- и ультрафильтрации, предочистка, рейтинг фильтрации, гамма-распределение, коэффициент асимметрии.

**В последнее время** для очистки вод различных категорий от взвеси все большее распространение получают устройства микро- и ультрафильтрации [1]. К ним, прежде всего, относятся дисковые фильтры и ультрафильтрационные мембранные модули. Принцип работы этих устройств основан на процеживании очищаемой воды через фильтрующую перегородку, представляющую собой поверхность с отверстиями определенных размеров (рейтингом фильтрации).

К преимуществам данного оборудования относятся компактность, обеспечение необходимой степени удаления взвеси, возможность очистки воды без применения реагентов. Недостатками устройств, работающих по принципу процеживания, являются резкая зависимость потерь напора и расхода очищаемой воды от ее качества. Даже при небольшом содержании взвеси в исходной воде на фильтрующей поверхности быстро образуется слой осадка, который создает дополнительное сопротивление, его значение быстро растет во времени. В результате потери напора в течение короткого периода достигают предельных значений, требуется регенерация. Необходимость частых промывок препятствует более широкому применению устройств микро- и ультрафильтрации на очистных сооружениях большой производительности.

Таким образом, актуальными являются исследования, направленные на обоснование конструктивных и технологических усовершенствований, позволяющих увеличить длительность фильтроцикла при очистке воды процеживанием и, соответственно, сократить эксплуатационные затраты.

**Для предотвращения** быстрого роста потерь напора при осветлении воды с помощью устройств микро- и ультрафильтрации применяют следующие решения.

При удалении грубодисперсной взвеси на дисковых фильтрах применяют гидроциклонный эффект [2, 3]. На входе в рабочее пространство дискового фильтра устанавливаются специальные устройства для закручивания жидкости, поступающей на очистку. В результате создаются центробежные силы, благодаря которым пространство между корпусом и дисковыми элементами работает как гидроциклон, обеспечивая предочистку. Однако, подобное решение приводит к дополнительному увеличению потерь напора, кроме того, оно неэффективно при задержании примеси с плотностью мало отличающейся от плотности воды.

В устройствах ультрафильтрации для замедления накопления на поверхности мембран загрязнений применяют «тангенциальную» фильтрацию [4, 5]. При этом через мембраны фильтруется только часть потока, другая, меньшая часть, циркулирует между входным и выходным отверстиями устройства. Двигаясь вдоль мембран, за счет касательных напряжений поток отрывает прилипшие загрязнения с фильтрующей поверхности. Если циркуляционный поток не подвергается очистке, то в теле мембранного модуля происходит накопление взвешенных веществ, увеличивается их концентрация. Процесс образования слоя осадка идет более интенсивно, для его удаления необходимо увеличивать циркуляционный расход, что при определенных значениях становится нецелесообразным. Кроме этого применяют различные устройства, обеспечивающие турбулизацию или пульсацию потока, что также требует дополнительных затрат.

**Применение предочистки** на устройствах с более низким рейтингом фильтрации позволит дополнить или заменить существующие способы по уменьшению эксплуатационных затрат при очистке воды от взвеси с помощью микро- и ультрафильтрации. Обоснование данного решения проводилось с помощью математического моделирования процесса процеживания с учетом дисперсного состава взвешенных частиц.

**Целью исследований** является изучение влияния дисперсного состава взвеси на эффективность предочистки воды на устройствах с более низким рейтингом фильтрации с последующей доочисткой на устройстве с более высоким рейтингом фильтрации.

**Рассмотрим процесс фильтрования** с образованием слоя несжимаемого осадка на несжимаемой перегородке. Уравнение фильтрации,

записанное для данных условий, имеет вид [6]:

$$\frac{1}{S} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu(R_{oc} + R_{\phi})}, \quad (1)$$

где  $V$  – объем очищенной воды;  $S$  – площадь поверхности фильтрации;  $\Delta p$  – разность давлений;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $R_{oc}$  – сопротивление слоя осадка;  $R_{\phi}$  – сопротивление фильтрующей перегородки.

Сопротивление слоя осадка  $R_{oc}$  считается пропорциональным толщине слоя

$$R_{oc} = h_{oc} \cdot r_{oc} = \frac{V}{S} \cdot \frac{E_1(d_p) \cdot C}{\rho_{oc}} \cdot r_{oc}, \quad (2)$$

где  $E_1(d_p)$  – доля задержанных взвешенных веществ;  $C$  – концентрация взвешенных веществ в исходной воде;  $\rho_{oc}$  – плотность осадка;  $r_{oc}$  – удельное объемное сопротивление осадка;  $d_p$  – рейтинг фильтрации;  $h_{oc}$  – толщина слоя осадка.

Удельное сопротивление осадка  $r_{oc}$  можно оценить с помощью уравнения Козени-Кармана [6]:

$$r_{oc} = k_I \cdot S_0^2 \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3}, \quad (3)$$

где  $n$  – пористость осадка;  $S_0$  – удельная поверхность твердых частиц осадка;  $k_I$  – отношение длины пор к толщине слоя осадка.

Сопротивление фильтрующей перегородки  $R_{\phi}$  можно определить по данным, предоставляемым производителем устройств микро-, ультрафильтрации (обычно в виде графиков):

$$\Delta h = f(d_p, Q), \quad (4)$$

где  $\Delta h$  – потери напора,  $Q$  – расход очищаемой воды.

Рассмотрим два варианта применения фильтрующих устройств:

- 1) вода фильтруется через два фильтра с более высоким рейтингом фильтрации, подобранным с учетом требований к качеству очищенной воды, фильтры работают параллельно;
- 2) вода последовательно фильтруется через фильтр с более низким рейтингом фильтрации, далее через фильтр с более высоким рейтингом фильтрации, площади фильтрации в обоих фильтрах одинаковые.

Для 1-го варианта с учетом зависимостей (2) и (3) уравнение (1) имеет решение (5):

$$t = \frac{V^2(t)}{2} \frac{\mu C}{4 \Delta p S^2 \rho_{oc}} E_1(d_{p2}) r_{02} + V(t) \frac{\mu}{2 \Delta p S} R_{\phi2}. \quad (5)$$

Для 2-го варианта уравнение (1) имеет решение:

$$t = \frac{V^2(t)}{2} \frac{\mu C}{\Delta p S^2 \rho_{oc}} \left( E_1(d_{p1}) r_{01} + [1 - E_1(d_{p1})] E_2(d_{p2}) r_{02} \right) + V(t) \frac{\mu}{\Delta p S} (R_{\phi1} + R_{\phi2}), \quad (6)$$

где  $E_2(d_p)$  – доля задержанных взвешенных веществ на 2-ой ступени очистки.

После предочистки дисперсный состав взвеси изменяется, так как часть частиц размером равным и больше рейтинга фильтрации 1-ой ступени  $d_{p1}$  удаляются. Интегральное распределение частиц взвеси по размерам (эквивалентному диаметру) в воде после предочистки на 1-ой ступени равно

$$E_2(d) = \frac{E_1(d) - E_1(d_{p1})}{1 - E_1(d_{p1})}, \quad (7)$$

где  $E_1(d)$  – интегральное распределение частиц взвеси по эквивалентному диаметру в исходной воде.

Интегральное распределение  $E(d)$  связано с плотностью вероятности  $e(d)$  соотношением:

$$E(d) = \int_0^d e(d) dd. \quad (8)$$

Анализ размеров частиц взвеси показывает, что обычно их распределение имеет правую асимметрию. Таким образом, плотность вероятности  $e(d)$  можно описать зависимостью вида гамма-распределение (8) (рис. 1) [7]:

$$e(d) = \frac{d^{\alpha-1} e^{-\frac{d}{\beta}}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}, \quad (9)$$

где  $\alpha$  – параметр формы;  $\beta$  – параметр масштаба;  $\Gamma(\alpha)$  – гамма-функция Эйлера.

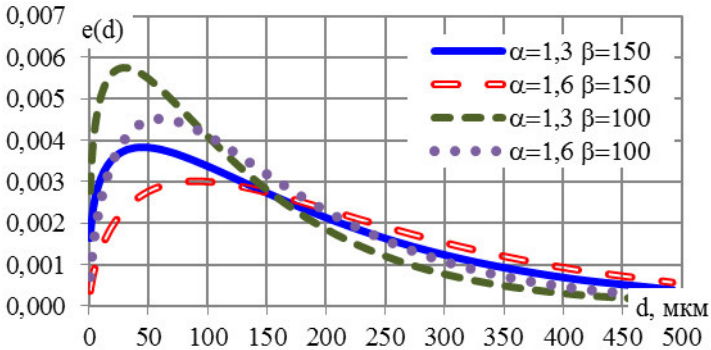


Рис. 1. Влияние параметров  $\alpha$  и  $\beta$  на гамма-распределение

Использование зависимостей (8) и (9) позволяет изучить влияние дисперсного состава примеси на эффективность очистки процеживанием по двухступенчатой схеме, а также обосновать ее рациональные параметры. Важными характеристиками дисперсного состава являются: среднее значение эквивалентного диаметра  $d_{cp}$  (математическое ожидание), значение эквивалентного диаметра, соответствующее максимальному значению вероятности  $d_m$  (мода), дисперсность, которая характеризуется коэффициентом вариации  $C_v$ , степень асимметрии – характеризуется коэффициентом асимметрии  $C_s$ .

Характеристики дисперсного состава взвеси связаны с параметрами гамма-распределения  $\alpha$  и  $\beta$  следующими зависимостями:

$$d_{cp} = \alpha \cdot \beta; d_m = (\alpha - 1) \cdot \beta;$$

$$C_v = \frac{1}{\sqrt{\alpha}}; C_s = \frac{2}{\sqrt{\alpha}}. \quad (10)$$

С помощью зависимостей (5)-(10) было изучено влияние параметров  $\alpha$  и  $\beta$  на эффективность удаления взвеси микро-, ультрафильтрацией с предочисткой. Под эффективностью подразумевается отношение объема воды, последовательно профильтровавшейся через два фильтра с разным рейтингом фильтрации  $V_{I,2}$  (2-й вариант) к объему воды, прошедшей через два фильтра, работающих параллельно  $V_{I+2}$  (1-й вариант) за одинаковое со 2-м вариантом время. Результаты исследований представлены на рис. 2.

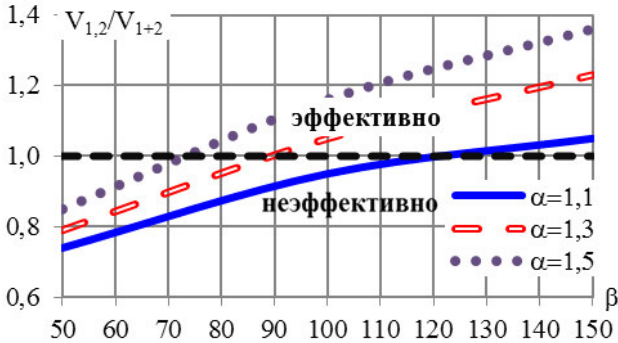


Рис. 2. Зависимость эффективности предочистки от параметров  $\alpha$  и  $\beta$

Было исследовано влияние дисперсного состава взвешенных частиц на выбор рациональных параметров фильтрующих устройств, а именно рейтингов фильтрации 1-ой и 2-ой ступеней. На рис. 3 представлены зависимости, описывающие влияние параметров  $\alpha$  и  $\beta$  на выбор значений рейтингов фильтрации 1-ой и 2-ой ступеней, при которых эффективность предочистки для данных условий максимальна. Рейтинг фильтрации 2-ой ступени для каждого варианта подбирался из условия обеспечения одинакового качества очистки воды.

Дисперсный состав взвеси при подборе фильтров из условия одинакового качества очистки согласно данным рис. 3 практически не оказывает влияния на отношение рейтингов фильтрации 1-ой и 2-ой ступеней. Это соотношение немного уменьшается при очистке более крупной и полидисперсной взвеси.

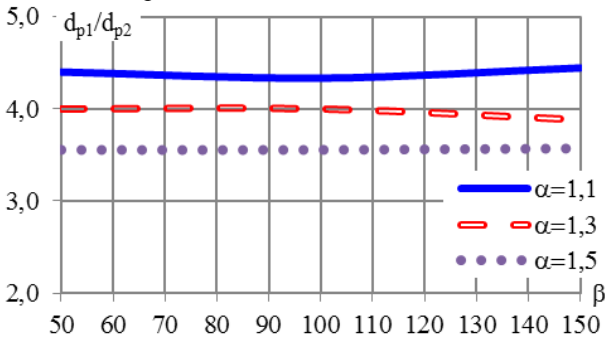


Рис. 3. Влияние параметров  $\alpha$  и  $\beta$  на рациональные значения параметров фильтрации

На рис. 4 для тех же условий, по которым получены зависимости,

представленные на рис. 3, показан результат расчета эффективности предочистки.

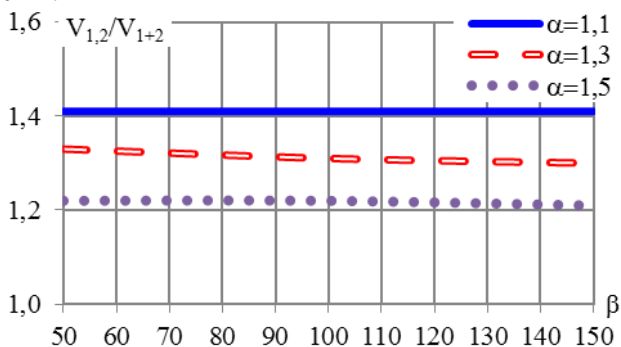


Рис. 4. Влияние параметров  $\alpha$  и  $\beta$  на рациональные значения параметров фильтрации

По данным рис. 4 можно сделать вывод о том, что эффективность предочистки не зависит от параметра  $\beta$  и увеличивается при необходимости удаления более мелких частиц взвеси. В этом случае для обеспечения того же качества очистки необходимо применять фильтр с более высоким рейтингом фильтрации.

Был проведен расчет эффективности предочистки при различной степени осветления воды, которая зависит от рейтинга фильтрации фильтра 2-ой ступени. Пример расчета показан на рис. 5.

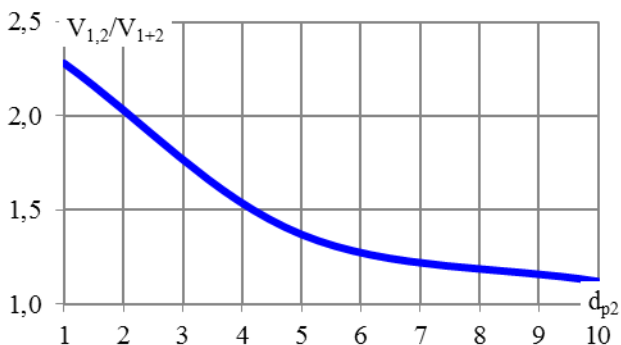


Рис. 5. Зависимость эффективности двухступенчатой схемы от рейтинга фильтрации 2-ой ступени

Данные, представленные на рис. 5 показывают, что при более тонкой очистке, эффективность применения двухступенчатой схемы значительно возрастает.

Следует отметить, что расчеты по 1-ому и 2-ому варианту применению устройств микро- и ультрафильтрации проводились для равной пористости. Однако, при очистке по двухступенчатой схеме на поверхности фильтров образуется более однородный осадок, т.к. происходит своего рода сепарация частиц взвеси по размерам. Пористость среды с более однородными частицами больше, чем при разнородном дисперсном составе. В этом случае более мелкие частицы будут располагаться в порах, образованных крупными частицами, значение пористости такой среды будет ниже, а сопротивление, соответственно, больше. Данное обстоятельство усиливает преимущества предпочистки.

При образовании на фильтрующей поверхности сжимаемого осадка, что более вероятно для устройств ультрафильтрации, на эффективность предпочистки влияет не только дисперсный состав взвеси, но и зависимость удельного сопротивления от разности давлений  $r_{oc}=f(\Delta p)$ , которая определяется с помощью экспериментальных исследований [8].

**По результатам** проведенных расчетов можно сделать следующие выводы: очистку по предлагаемой двухступенчатой схеме целесообразно применять при значительном содержании в воде более крупных агрегатов, когда мода  $d_m$  имеет большую величину, а также при большей полидисперсности взвеси со значительной правой асимметрией в распределении частиц по размерам. При необходимости более глубокого удаления взвешенных веществ с помощью фильтров с более высоким рейтингом фильтрации эффект предпочистки увеличивается.

**1.** Eroyan S., Karagiaur A., Babenko S. Researching the work of membrane ultrafiltration module / MOTROL // Motoryzacja i energetyka rolnictwa. Motorization and power industry in agriculture. – Lublin, 2012. – V. 14, № 5 – P. 53–56. **2.** Системы полива ТК «Барвинок-Восток»: референс-лист. [Электронный ресурс] – Режим доступа к информации: <http://barvinok-vostok.uaprom.net/p1139320-filtr-diskovyj-gidrotsiklonom.html>. **3.** Карагяур А. С., Ушкварок А. Э. Проблемы очистки воды на дисковых фильтрах и пути их решения // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ. – 2013. – Вип. 72. – С. 453–456. **4.** Hadzismajlovic D. E., Bertram C. D. Flux enhancement in turbulent crossflow microfiltration of yeast using a collapsible-tube pulsation generator // J. Membr. Sci., 1999. – V. 163. – P. 123–134. **5.** Лизогуб Г. Г., Белан В. В., Прошкин В. С. Очистка природных вод, дренажных и промывных вод водопроводных станций с применением систем микро-, ультрафильтрации ARIA международной корпорации PALL // Матер. Міжнар. наук. – практ. конф. «Сучасні проблеми охорони довкілля, раціонального використання водних ресурсів та очистки природних і стічних вод» (6-10.04.2009, м. Миргород), К. : Т-во «Знання» України. – 2009. – Т1. – С. 66–70. **6.** Жужиков В. А. Филт-



рование. – М. : Химия, 1980. – 400 с. 7. Вадзинский Р. Статистические вычисления в среде Excel. Библиотека пользователя. – СПб. : Питер, 2008. – 608 с. 8. Wang Z, Wang S., Zhang X. Experimental study of permeation flux prediction of hollow fiber microfiltration device under static state operation. // J. Membr. Sci. Tech. China. – 2002. – Vol. 22(5). – P. 29–31.

Рецензент: д.т.н., професор Ковальчук В. А. (НУВГП, м. Рівне)

---

**Епоян С. М., д.т.н., професор, Карагяур А. С., к.т.н., доцент, Голубка А. Е., аспірант** (Харківський національний університет будівництва та архітектури)

### **ПРО ДОЦІЛЬНІСТЬ ПЕРЕДОЧИЩЕННЯ ПЕРЕД ПРИБОРАМИ МІКРО- ТА УЛЬТРАФІЛЬТРАЦІЇ**

**Проаналізовано вплив дисперсного складу зависі на ефективність застосування передочищення перед пристроями мікро– та ультрафільтрації.**

**Ключові слова:** пристрої мікро- та ультрафільтрації, передочищення, рейтинг фільтрації, гамма-розподіл, коефіцієнт асиметрії.

---

**Epyan S. M., Doctor of Engineering, Prof., Karagiaur A. S., Candidate of Engineering, Associate Professor, Golubka A. E., Post-graduate Student** (Kharkiv National University of Construction and Architecture)

### **ABOUT THE ADVISABILITY OF PRETREATMENT BEFORE DEVICES TO MICRO- AND ULTRAFILTRATION**

**The influence of disperse composition of suspended solids on the effectiveness of pretreatment before devices to micro- and ultrafiltration are analyzed.**

**Ключевые слова:** devices to micro- and ultrafiltration, pretreatment, filtration rating, gamma distribution, skewness.

---