

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА МЕМБРАННОЙ МИКРО-,
УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ С ПОПЕРЕЧНЫМ ПОТОКОМ**

Введение. Перспективными и получающими широкое внедрение в США, странах ЕС и Российской Федерации при подготовке питьевой воды являются мембранные микро-, ультрафильтрационные аппараты [1, 2]. В этих устройствах полностью задерживаются взвешенные и коллоидные вещества, планктон, бактерии, частично органоминеральные комплексы и вирусы. Преимуществами установок микро-, ультрафильтрации над традиционными сооружениями являются значительно меньшие размеры, небольшой объем потребляемых химических реагентов, высокая степень автоматизации, простота монтажа, более простое обслуживание [3].

Высокие эксплуатационные затраты, связанные с необходимостью частых промывок мембранных установок ограничивают внедрение этих методов на Украине. Даже при небольшом содержании взвешенных веществ в исходной воде в микро-, ультрафильтрационном аппарате резко возрастают потери напора, и падает его производительность. Это происходит вследствие образования на поверхности мембран слоя осадка и закупоривания пор. В результате значительно сокращается фильтроцикл, требуются частые промывки.

Частично проблему роста потерь напора и падения производительности решает применение устройств с поперечным потоком или так называемой «тангенциальной» фильтрацией, когда часть потока циркулирует между входным и выходным отверстиями, смывая с поверхности мембран задержанные загрязнения [4]. Однако борьба с образованием осадка приводит к усложнению конструкции и росту энергопотребления.

Поэтому исследования, направленные на обоснование наиболее рациональных энергосберегающих режимов, являются актуальными.

Цель и задачи. Целью исследований является получение зависимостей для расчета влияния основных параметров «тангенциальной» фильтрации на эффективность работы мембранных аппаратов микро-, ультрафильтрации с поперечным потоком.

Результаты исследований

Рассмотрим микро-, ультрафильтрационный мембранный модуль, расположенный горизонтально, в котором мембранные элементы представлены пучком полых полимерных волокон, а фильтрация происходит в направлении «изнутри – наружу». Часть потока (циркуляционный расход) транзитом проходит через внутреннее пространство мембраны, смывая с ее поверхности загрязнения.

На частицу взвеси, задержанную на поверхности мембраны, действуют следующие силы (рис. 1) [5]:

- сила адгезии $A = k_A \cdot d$;
 - сила стокового сопротивления, обусловленная действием циркуляционного потока $P_{\psi} = 3\pi\mu V_{d/2} d$;
 - сила стокового сопротивления, обусловленная действием фильтрационного потока $P_{\phi} = 3\pi\mu V_{\phi} d$;
 - сила тяжести $G = \frac{\pi d^3}{6} \Delta\rho g$;
 - подъемная сила $W = \alpha \cdot P_{\psi}$;
 - сила трения $F = f \cdot (A + P_{\phi} - W \pm G)$,
- где k_A – коэффициент адгезии, Н/м; f – коэффициент трения; α – коэффициент пропорциональности; d – диаметр частицы взвеси, м; μ – динамическая вязкость, Па·с; $\Delta\rho$ – разность плотностей частицы и жидкости, кг/м³; V_{ϕ} – скорость фильтрационного потока, м/с; $V_{d/2}$ – скорость потока на расстоянии $d/2$ от поверхности осаждения, м/с.

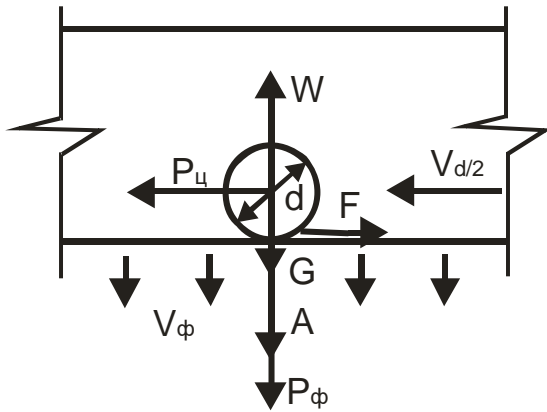


Рис. 1. Силы, действующие на частицу взвеси на поверхности мембраны

Скорость $V_{d/2}$ можно определить из предположения о ламинарном режиме течения (параболическое распределение скорости), зная среднюю скорость циркуляционного потока V_{cp} [6].

$$V_{d/2} = \frac{2V_{cp} \cdot \left(R_m^2 - \left(R_m - \frac{d}{2} \right)^2 \right)}{R_m^2}, \quad (1)$$

где R_m – внутренний радиус мембранного волокна, м.

Отрыв частицы от поверхности мембраны происходит при условии

$$f \cdot (A + P_{\phi} - W \pm G) = P_{\psi}. \quad (2)$$

Рассмотрим влияние дисперсного состава взвеси и величины циркуляционного расхода на параметры эффективности очистки воды микро- и ультрафильтрацией:

- 1) отношение производительности устройства в момент времени T к начальной производительности Q_T/Q_0 ;
- 2) количество воды, профильтровавшееся через мембрану за время T

$$\mathcal{E}_w = \frac{W_T}{S} R_{\phi.n.0} \cdot 10^{-8},$$

где W_T – объем воды, профильтровавшейся за время T , м³; $R_{\phi.n.0}$ – сопротивление фильтрующей перегородки (мембраны) в начальный момент времени, м⁻¹;

- 3) удельная средняя мощность, затрачиваемая на очистку объема воды W_T за время T , рассчитанная из условия одинаковой средней производительности

$$N_{yo}^m = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta p(t) (Q_{\phi}(t) + Q_{\psi}) dt}{\bar{Q}},$$

где \bar{Q} – средняя производительность установки при данных параметрах, л/с.

Для этого вначале выведем зависимость наименьшего диаметра смываемых частиц $d_{смыв}$ от величины циркуляционного расхода Q_{ψ} . Из уравнения баланса (2), если пренебречь влиянием сил тяжести, получим зависимость для скорости у поверхности осаждения $V_{d/2}$

$$V_{d/2} = a_{v1}(a_{v2} + V_{\phi}), \quad (3)$$

где $a_{v1} = \frac{f}{1 + f\alpha}$; $a_{v2} = \frac{k_A}{3\pi\mu}$.

Из выражения (1) получим зависимость

$$d_{смыв} = 2R_m \left(1 - \sqrt{1 - \frac{V_{d/2}}{2V_{cp}}} \right). \quad (4)$$

Средняя скорость циркуляционного потока равна

$$V_{cp} = \frac{Q_{\psi}}{\pi R_m^2 N_m} = \frac{2L_m Q_{\psi}}{R_m S}, \quad (5)$$

где N_m – количество мембран в модуле; L_m – рабочая длина модуля, м; S – площадь поверхности фильтрации, м².

Примем, что величина циркуляционного расхода не меняется на протяжении всего времени работы установки в режиме фильтрации. Самое большое значение скорости потока, фильтрующегося через мембрану, принимает в начальный период, когда производительность установки максимальна. Соответственно, «прижимающее» действие фильтрационного потока в данный момент времени также максимально, поэтому примем это значение скорости V_{ϕ} в качестве расчетного

$$V_{\phi} = \frac{Q_0}{S}. \quad (6)$$

Зависимость наименьшего диаметра смываемых частиц от величины циркуляционного расхода с учетом выражений (3)–(6) будет иметь вид

$$d_{смыв} = 2R_m \left(1 - \sqrt{1 - \frac{a_{v1}(a_{v2}S + Q_0)R_m}{4L_m Q_{\psi}}} \right). \quad (7)$$

Рассмотрим случай, когда циркуляционный расход без очистки снова подается в мембранный модуль. При этом концентрация взвешенных веществ, которые

в дальнейшем смываются циркуляционным потоком, на входе в установку будет равна

$$C_{ex}(t) = \frac{E(d_{смыв})C_1Q_{\phi}(t) + C_{цир}(t)Q_{цир}}{Q_{\phi}(t) + Q_{цир}}, \quad (8)$$

где $E(d_{смыв})$ – доля частиц взвеси, смываемых циркуляционным потоком с поверхности мембран; $C_{цир}(t)$ – концентрация взвешенных веществ в циркуляционном потоке на выходе из мембранного модуля, кг/м³:

$$C_{цир}(t) = \frac{C_{ex}(t - t_{цир})[Q_{\phi}(t - t_{цир}) + Q_{цир}]}{Q_{цир}}, \quad (9)$$

где $t_{цир}$ – время, за которое циркуляционный расход совершает один цикл, с.

С определенной степенью точности можно принять, что

$$t_{цир} = \frac{L_m}{V_{цир}} = \frac{SR_m}{2Q_{цир}}. \quad (10)$$

Таким образом, значения основных критериев эффективности очистки в микро-, ультрафильтрационной установке с «тангенциальной» фильтрацией можно вычислить с помощью численного решения известного уравнения фильтрации через пористую перегородку (11) [7, 8], дополненного зависимостями (7)-(10).

$$\frac{1}{S} \frac{dW(t)}{dt} = \frac{\Delta p(t)}{\mu(R_{oc}(t) + R_{ф.п.}(t))}, \quad (11)$$

где $W(t)$ – объем очищенной воды, м³; Δp – разность давлений, Па; $R_{oc}(t)$ – сопротивление слоя осадка, м⁻¹; $R_{ф.п.}(t)$ – сопротивление фильтрующей перегородки, м⁻¹.

На рис. 2-4 представлены примеры расчета зависимостей параметров Q_T/Q_0 , \mathcal{E}_w , $N_{уд}^M$ от величины циркуляционного расхода $Q_{цир}/Q_0$, и соотношения рейтинга фильтрации и модального значения эквивалентного диаметра частиц (соответствующего максимальному значению плотности вероятности $e(d)$) $\frac{d_p}{d_m}$.

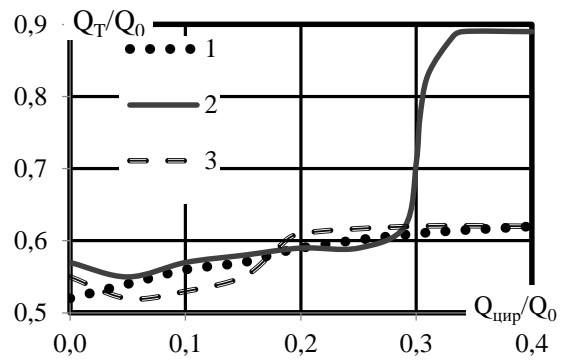


Рис. 2. Зависимость производительности установки от величины циркуляционного расхода и рейтинга фильтрации:

$$1 - \frac{d_p}{d_m} = 0,1; \quad 2 - \frac{d_p}{d_m} = 0,5; \quad 3 - \frac{d_p}{d_m} = 1$$

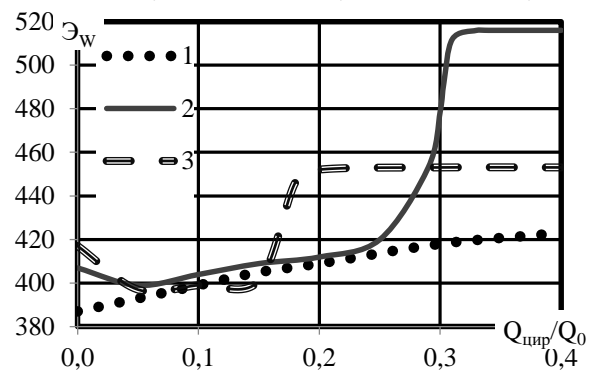


Рис. 3. Зависимость объема профильтрованной воды от величины циркуляционного расхода и рейтинга фильтрации: 1, 2, 3 – см. рис. 2

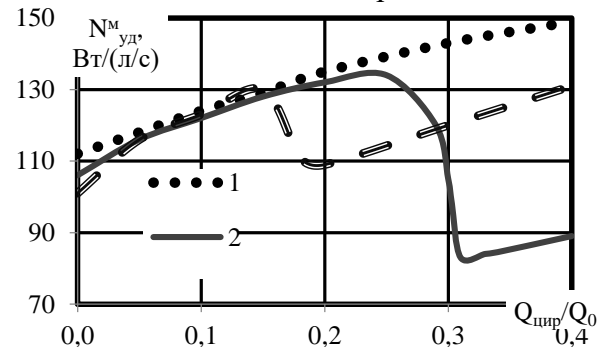


Рис. 4. Зависимость удельной мощности от величины циркуляционного расхода и рейтинга фильтрации: 1, 2, 3 – см. рис. 2

Когда наименьший диаметр смываемых с поверхности мембран частиц $d_{смыв}$ меньше рейтинга фильтрации, происходит неполный смыв осадка. За счет того, что циркуляционный поток не очищается, происходит быстрый рост концентрации взвеси в теле мембранного модуля. Это приводит к быстрому росту слоя осадка,

несмотря на его частичное удаление поперечным потоком. Данное обстоятельство приводит к ухудшению эффективности ультрафильтрации при $d_{\text{смыв}} > d_p$. С увеличением циркуляционного расхода увеличивается значение параметра $d_{\text{смыв}}$, которое приближается к рейтингу фильтрации, эффективность очистки постепенно увеличивается. Резкое увеличение эффективности происходит, когда $d_{\text{смыв}} \rightarrow d_p$. Дальнейшее увеличение циркуляционного расхода не оказывает влияние на относительную производительность установки Q_T/Q_0 , (рис. 2) и приведенный объем профильтрованной воды \mathcal{E}_w (рис. 3). Однако, при этом растет удельная мощность за счет увеличения доли циркуляционного расхода в общем потоке (рис. 4).

Если рейтинг фильтрации имеет невысокое значение, а материал фильтрующей перегородки обеспечивает повышение доли загрязнений, которые задерживаются не на поверхности, а в порах мембраны, то эффект «тангенциальной» фильтрации снижается (график 3 на рис. 2-4). Следует отметить, что в этом случае эффективный смыв реализуется при меньшем значении циркуляционного расхода.

Если, наоборот рейтинг фильтрации имеет высокое значение, то для обеспечения эффективного смыва необходимы значения циркуляционного расхода, превышающие расход фильтрата (график 1 на рис. 2-4). Меньшие значения $Q_{\text{цир}}$ не обеспечивают эффективной очистки. Объем профильтрованной воды практически не увеличивается, зато интенсивно возрастает удельная мощность. Это подтверждает неэффективность «тангенциальной» фильтрации для устройств тонкой очистки [5].

Повышение эффективности очистки происходит резко, когда поперечный поток обеспечивает смыв с поверхности мембран практически всех загрязнений. Если циркуляционный расход меньше даже на незначительную величину, эффект резко ухудшается и зачастую становится меньше, чем в случае, когда поперечный поток отсутствует. Точно рассчитать критическую величину циркуляционного

расхода в производственных условиях, когда качественный и количественный состав взвеси меняется, не представляется возможным. Поэтому значение $Q_{\text{цир}}$ необходимо принимать с запасом, что приводит к завышенным энергетическим затратам.

Кроме того, при применении «тангенциальной» фильтрации без очистки циркуляционного потока в результате накопления загрязнений быстро происходит рост концентрации взвешенных веществ на входе в установку, что увеличивает вероятность их прилипания к поверхности мембраны.

Если начинается процесс образования слоя осадка, то в результате высоких концентраций взвеси, будет быстро происходить падение производительности. Установку, несмотря на применение «тангенциальной» фильтрации, необходимо останавливать на промывку.

Эффективность работы осветляющих центрифуг гораздо менее зависима от влияния задержанного осадка. Для повышения эффективности работы мембранных микро-, ультрафильтрационных установок с поперечным потоком также как и для аппаратов с «тупиковой» фильтрацией (когда весь поток фильтруется через мембраны) следует предпочитать воду в поле центробежных сил центрифугирующих устройств, на эффективность которых менее влияет задержанный осадок.

Выводы. Получена зависимость между наименьшим диаметром частиц, которые отрываются поперечным потоком, и величиной циркуляционного расхода. Изучено влияние дисперсного состава взвеси и величины циркуляционного расхода на параметры эффективности очистки воды микро-, ультрафильтрацией с поперечным потоком. Данные исследования позволили обосновать область рационального применения данного режима фильтрации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Первов А.Г., Андрианов А.П. Современное состояние вопроса очистки поверхностных вод с помощью ультрафильтрации – Вестник МГСУ. – 2010. – № 4. – С. 9-16.

2. Светлейшая Е.М., Митченко Т.Е., Стендер П.В. Особенности применения ультрафильтрации для очистки вод поверхностных источников // *Водоподготовка и очистка сточных вод населенных мест в XXI веке: Технологии. Проектные решения. Эксплуатация станций (IWA)*, 2-4 июня 2010 г., г. Москва: сб. докл. [электронный ресурс]. – М., ЗАО «Фирма СИБИКО Интернешнл», 2010.
3. Парилова О.Ф. Ультрафильтрация в сравнении с традиционной технологией предочистки // *Водоочистка*. – 2012. – № 9. – С. 27-30.
4. Пат. 2282489 РФ, МПК В01D 63/04. Очистка фильтра на основе полых волокон с фронтальным режимом работы. – № 2003120087/26; заявл. 04.12.2001; опубл. 13.06.2002, 2002.
5. Эпоян С.М. Изучение направлений снижения эксплуатационных затрат при применении мембранной ультрафильтрации / С.М. Эпоян, А.С. Карагяур, И.Ю. Штонда // *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: VIII міжнар. наук.-практ. конф., 10-14 вересня 2012 р., м. Алушта, АР Крим: зб. наук. статей в 2 т. – УкрНДІЕП. – Харьков: Райдер, 2012. – Т.1. – С. 302-306.*
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 711 с.
7. Жужиков В.А. Фильтрация [4-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Химия, 1980. – 400с.
8. Эпоян С.М., Карагяур А.С., Штонда И.Ю. Изучение направлений снижения эксплуатационных затрат при применении мембранной ультрафильтрации // *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: VIII міжнар. наук.-практ. конф., 10-14 вересня 2012 р., м. Алушта, АР Крим: зб. наук. статей в 2 т. – УкрНДІЕП. – Харьков: Райдер, 2012. – Т.1. – С. 302-306.*

УДК 628.16

Волков В.Н.

Коммунальное предприятие «Харьковводоканал»

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Введение. Качество поверхностных вод на Украине, которые являются источниками водоснабжения многих населенных пунктов, в последнее время интенсивно ухудшается. Это связано с изменением климата, зарегулированностью водоемов, сбросом недостаточно очищенных сточных вод, поступлением загрязнений с ливневыми стоками. С другой стороны, ужесточаются требования к питьевой воде, остро стоит вопрос о сокращении эксплуатационных затрат, в результате – технологические схемы и сооружения водоподготовки требуют усовершенствования.

На большинстве станций очистки для получения воды высокого качества применяются фильтровальные сооружения [1,2]. Фильтры являются наиболее дорогими и сложными в эксплуатации сооружениями, поэтому повышение эффективности их работы с помощью конструктивных и технологических усовершенствований оказы-

вает значительное влияние на стоимость подготовки воды в целом. Это обуславливает актуальность проблемы и необходимость повышения эффективности очистки воды с помощью фильтровальных сооружений.

В процессе фильтрации количество осадка, задерживаемого в порах фильтрующей загрузки, постепенно возрастает. В результате растут потери напора, увеличивается вероятность прорыва загрязнений в фильтрат. Фильтрующую загрузку необходимо регенерировать. Обычно регенерацию загрузки осуществляют периодически путем ее промывки водой или водовоздушной смесью [3]. В результате образуется значительное количество промывных вод, с подготовкой, подачей и обработкой которых связаны основные затраты при эксплуатации фильтровальных сооружений.

Отключение фильтра на регенерацию происходит при выполнении одного из