

## ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

### ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВОК УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ

© 2021 г. А. А. Пантелеев<sup>a, b</sup>, Ан. А. Пантелеев<sup>c</sup>, В. В. Бобинкин<sup>b</sup>,  
С. Е. Лысенко<sup>d</sup>, В. Б. Смирнов<sup>b, \*</sup>

<sup>a</sup>Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,  
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

<sup>b</sup>Научно-производственная компания “Медиана-Фильтр”, Лужнецкая наб., д. 2/4, стр. 17, Москва, 119270 Россия

<sup>c</sup>Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет),  
Институтский пер., д. 9, г. Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия

<sup>d</sup>Всероссийский теплотехнический институт, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия

\*e-mail: smirnov@mediana-filter.ru

Поступила в редакцию 20.01.2021 г.

После доработки 11.02.2021 г.

Принята к публикации 17.02.2021 г.

Рассмотрены параметры, влияющие на эффективность очистки ультрафильтрационных мембран. Предложена простая гидравлическая модель режима обратной промывки. Полученные для расчета времени обратной промывки формулы позволили оптимизировать этот процесс. Представлены результаты исследования режимов работы установок ультрафильтрации. Для эффективного подбора режимов фильтрования, прямой и обратной промывок авторы предлагают применять лабораторные ультрафильтрационные модули и разработанную ими методику расчета. Проиллюстрированы гидравлическая модель режима обратной промывки и феноменологическая модель образования отложений внутри волокна. Приведены формулы для расчета времени обратной промывки, с помощью которых возможно оптимизировать этот процесс и снизить эксплуатационные затраты. Показано, что для анализа распределения отложений внутри волокна мембран могут быть использованы простые модели процесса фильтрования, одна из которых представлена в данной работе. Продемонстрировано, что при тупиковом режиме фильтрования значительная часть отложений собирается в центральной части волокна. Естественным способом борьбы с этими отложениями является организация тангенциального режима фильтрования. Предложено удобное для применения на практике математическое выражение для расчета индекса Ланжелье через измеряемые параметры качества воды. Индекс Ланжелье полезен для обоснования необходимости кислотных промывок или отсутствия такой необходимости. Показано, что при существенно нестабильной исходной воде использование перед установкой ультрафильтрации предварительного фильтрования на зернистой загрузке приводит к стабилизации качества и деаэрации обрабатываемой воды. Также показано, что при применении кислотных и щелочных очисток на основе комплексонсодержащих реагентов с периодичностью применения 2 раза в год можно существенно повысить стабильность работы ультрафильтрационной установки. Даны практические рекомендации для организации режима ультрафильтрации, которые были реализованы на водоподготовительной установке Новочеркасской ГРЭС.

*Ключевые слова:* ультрафильтрация, режим работы ультрафильтрационной установки, очистка ультрафильтрационной установки, оптимизация очистки ультрафильтрационной установки, гидравлическая модель режима обратной промывки, формулы расчета времени обратной промывки

DOI: 10.1134/S0040363621090058

Ультрафильтрация является оптимальным методом предварительной подготовки поверхностных вод для их очистки на установках обратного осмоса [1–5]. Она обеспечивает эффективное удаление из воды органических соединений с отсечкой 100–150 кДа, общей степенью очистки 25–60% и коллоидным индексом в фильтрате  $KI_{15} = 1–3$ . При рейтинге фильтрации 20–50 нм

возможно удалять из воды все взвешенные частицы и большую часть коллоидных частиц. Благодаря высокому качеству фильтрата установок ультрафильтрации (ультрафильтрационных установок – УФУ) обеспечиваются минимальные эксплуатационные затраты для установок обратного осмоса: снижаются степень загрязнения мембранного блока, перепады давления на нем и, соответственно,

энергозатраты, уменьшаются расходы на реагенты для химической очистки. Существенно увеличивается срок службы обратноосмотических мембранных элементов. Пятилетний срок их эксплуатации в схемах с использованием УФУ в настоящее время является стандартом. Известны случаи, когда мембранные элементы в составе установок с непрерывным циклом производства служат уже более 10 лет. Такие результаты могут быть достигнуты при надежной и стабильной работе УФУ. Оптимизация режимов работы УФУ является важной и актуальной задачей.

### ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ УСТАНОВОК УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ

Принципиальная схема УФУ представлена на рис. 1. Характерными особенностями ее работы являются:

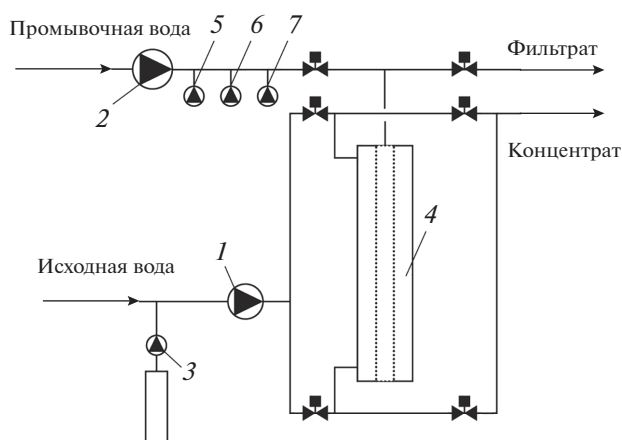
большое число переходных процессов, высокая нагрузка на запорно-регулирующую арматуру;

малая длительность фильтрационного цикла (20–60 мин в зависимости от качества исходной воды);

тангенциальный и тупиковый режимы фильтрации с рециркуляцией и без нее;

различные режимы промывок мембран: прямая, обратная, водовоздушная, обратная;

химические очистки мембран: непродолжительная химическая очистка в сочетании с обратной и прямой промывками (СЕВ – Chemical Enhanced Backwash), продолжительная химическая очистка при сервисном обслуживании установки (CIP – Clean in Place);



**Рис. 1.** Принципиальная схема установки ультрафильтрации.

1, 2, 3 – насосы подачи исходной воды, воды при обратной промывке и раствора коагулянта; 4 – мембранный блок; 5–7 – насосы подачи растворов HCl, NaOH и NaOCl

сочетание режима фильтрации с коагуляцией; низкая прочность фильтрующего материала, что вызывает необходимость проверки наличия механических повреждений;

длительность промывок сравнима с временем выхода насоса промывочной воды на рабочий режим;

большое количество рабочих операций (фильтрация, промывки, химические очистки, контроль повреждений фильтрующей мембраны).

Эти особенности делают технологию ультрафильтрации одной из самых сложных среди применяемых в водоподготовительных системах. Обеспечение оптимальных режимов работы УФУ является залогом надежности, технологической и экономической эффективности. В России более половины промышленных УФУ размещено на ТЭС. Почти во всех этих установках используются ультрафильтрационные модули с волокнами на основе полиэфирсульфона.

### МЕХАНИЧЕСКОЕ УДАЛЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ С ПОВЕРХНОСТИ МЕМБРАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В процессе работы на поверхности мембраны и внутри ее пор формируются отложения (рис. 2). Для удаления поверхностных отложений используется прямая промывка, эффективность которой обеспечивается значительным градиентом скоростей промывочной воды или турбулентным режимом. Мерой турбулентности принято считать число Рейнольдса  $Re = \rho v d / \mu$  (здесь  $v$  – средняя скорость потока воды;  $d$  – гидравлический диаметр;  $\rho$ ,  $\mu$  – плотность и динамический коэффициент вязкости воды).

Скорость потока воды при прямой промывке  $v_{п.п}$  рассчитывают по формуле

$$v_{п.п} = Q_{п.п} / S, \quad (1)$$

где  $Q_{п.п}$  – расход промывочной воды;  $S = N_b S_b$  – суммарная площадь поперечного сечения волокон (здесь  $N_b$  – число волокон;  $S_b = \pi d_b^2 / 4$  – площадь поперечного сечения волокна;  $d_b$  – внутренний диаметр волокна).

Информацию о числе волокон мембранного модуля можно запросить у его производителя, посчитать на спиле корпуса мембраны или рассчитать по формуле

$$N_b = \frac{S_\phi}{\pi d_b l_b},$$

где  $S_\phi$  – площадь фильтрующей поверхности;  $l_b$  – рабочая длина волокна.

Выражение для расчета площади поперечного сечения волокон выглядит следующим образом:

$$S = \frac{d_B}{4l_B} S_\Phi.$$

При оптимизации режима прямой промывки необходимо использовать ее продолжительность  $\tau_{п.п}$  и расход промывочной воды. Полное время прямой промывки  $T_{п.п}$  вычисляются по формуле

$$T_{п.п} = \tau_{п.п} + \tau_{н.п.п},$$

где  $\tau_{н.п.п}$  – время выхода насоса подачи промывочной воды на режим прямой промывки.

Для удаления загрязнений из пор проводится обратная промывка. Форма зависимости расхода промывочной воды  $Q_{о.п}$  от продолжительности процесса (рис. 3) обусловлена особенностью работы насоса с частотно-регулируемым приводом, которому требуется время на разгон для достижения номинальной производительности и торможение при отключении.

Расход воды при обратной промывке определяется по формуле

$$Q_{о.п} = J_{о.п} S_\Phi, \quad (2)$$

где  $J_{о.п}$  – удельный расход воды при обратной промывке.

Удельный расход преобразуется в линейную скорость  $v_{о.п}$  по выражению

$$v_{о.п} = \theta_{Jv} J_{о.п}, \quad (3)$$

где  $\theta_{Jv}$  – коэффициент перевода единиц измерения.

При часто рекомендуемом удельном расходе обратной промывки  $J_{о.п} = 250 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  линейная скорость составляет  $v_{о.п} \approx 70 \text{ мкм/с}$ . Скорость воды в порах волокна  $v_n$  определяется соотношением  $v_n = v_{о.п}/\varepsilon$  (здесь  $\varepsilon$  – пористость мембраны, обычно  $\varepsilon = 0.3-0.4$ ) и равна примерно  $200 \text{ мкм/с}$ . Это означает, что время прохождения воды через стенку волокна (по поре) толщиной  $\delta \approx 200 \text{ мкм}$  составляет примерно  $1 \text{ с}$ , а через плотный фильтрующий слой – около  $0.1 \text{ с}$ .

Для выделенного цилиндрического объема в волокне характерно выражение

$$dQ_{\text{вх.в}} = \pi d_B v_{о.п} dz, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{вх.в}}$  – расход воды, входящей в канал волокна через его боковую поверхность;  $z$  – длина цилиндра.

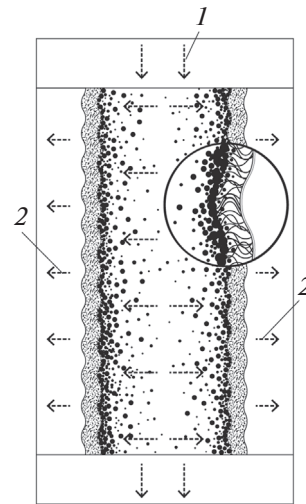


Рис. 2. Распределение отложений на мембране в процессе работы. 1 – исходная вода; 2 – фильтрат

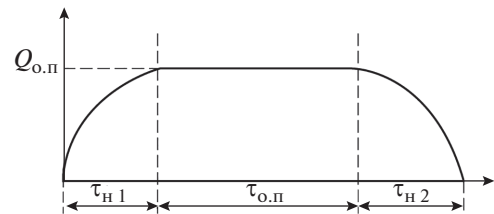


Рис. 3. Зависимость расхода воды от времени при обратной промывке.  $\tau_{н1}$  – время достижения номинального расхода воды на промывку;  $\tau_{н2}$  – время снижения расхода воды до прекращения промывки;  $\tau_{о.п}$  – продолжительность обратной промывки при номинальном расходе воды

Расход воды, выходящей из канала волокна,  $Q_{\text{вых.в}}$  является дифференциальной разностью между расходами воды с торцов цилиндра

$$dQ_{\text{вых.в}} = Q(z + dz) - Q(z) = 0.25\pi d_B^2 \times [v_B(z + dz) - v_B(z)] \approx 0.25\pi d_B^2 \frac{dv_B}{dz} dz. \quad (5)$$

После приравнивания выражений (4) и (5) можно получить

$$\frac{dv_B}{dz} = 4v_{о.п}/d_B. \quad (6)$$

Интегрирование (6) при условии  $v_B(0) = 0$  дает выражение

$$v_B(z) = 4v_{о.п}z/d_B. \quad (7)$$

Формула для расчета времени вытеснения воды из волокна  $\tau_B$  выглядит следующим образом:

$$\tau_B \approx \int_{d_B}^{l_B} dz/v_B(z) = \frac{d_B}{4v_{o.п}} \ln(l_B/d_B). \quad (8)$$

Для практического применения можно использовать формулу

$$\tau_B \approx d_B \ln(l_B/d_B)/(4\theta_{Jv} J_{o.п}). \quad (9)$$

При  $d_B = 0.9$  мм,  $l_B = 1.5$  м скорость потока воды на выходе из торца мембранного модуля составляет  $v_B = 4v_{o.п} l_B/d_B \approx 6.7 \times 10^3 v_{o.п}$  и при  $v_{o.п} = 70$  мкм/с равна  $v_B \approx 0.47$  м/с, необходимое время вытеснения воды  $\tau_B \approx 24$  с.

Полное время обратной промывки  $T_{o.п}$  определяется суммой

$$\begin{aligned} T_{o.п} &= \tau_{п} + \tau_B + \tau_{п.оч} + \tau_{н1} + \tau_{н2} = \\ &= \tau_{o.п} + \tau_{н1} + \tau_{н2}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\tau_{п.оч}$  – время удаления загрязнения из поры;  $\tau_{o.п}$  – время обратной промывки с постоянным расходом воды  $Q_{o.п}$ .

Для промышленных установок большой производительности (более 50 м<sup>3</sup>/ч) требуется значительное время для разгона насосных агрегатов  $\tau_{н1}$ ,  $\tau_{н2} = 10$ –20 с. Эффективность процесса удаления загрязнений из поры зависит от многих параметров. Наиболее существенное влияние на нее оказывает удельный расход воды при обратной промывке  $J_{o.п}$  (или  $v_{o.п}$ ). Длительность промывки не может компенсировать уменьшение расхода  $Q_{o.п}$  (или  $J_{o.п}$ ), значение которого зависит от вида загрязнений и перепада трансмембранного давления  $\Delta p_{тм}$ . При экспериментальных исследованиях было установлено, что  $\tau_{п.оч} < 4$  с.

С увеличением  $\Delta p_{тм}$  растет и необходимое значение  $J_{o.п}$  для осуществления эффективной очистки.

Соотношение между ними должно определяться в ходе пусконаладочных работ либо длительных опытно-промышленных испытаний. При наличии технических возможностей (необходимые параметры насосной станции обратной промывки) изменения могут вноситься в процессе промышленной эксплуатации. Корректное определение значений  $Q_{o.п}$  и  $T_{o.п}$  способствует долгосрочной эксплуатации ультрафильтрационных мембранных модулей.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫВКИ С ПОМОЩЬЮ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

На промышленных объектах параметры, при которых производится промывка, подбирают при пусконаладочных работах или устанавливают их по проектным данным. Возможно определять их на пилотной установке с мембранным модулем, однако на промышленных объектах это дорогостоящее оборудование отсутствует, а стоимость услуг сторонних организаций высока. Более доступная установка для этих целей – лабораторный ультрафильтрационный модуль (ЛУМ) с прозрачной внешней трубкой, который подключается к источнику исходной воды и позволяет моделировать различные режимы работы (рис. 4). Техническими параметрами ЛУМ являются материал, проницаемость и геометрическая форма волокон, их число в мембране и длина. Динамику загрязнения волокна можно исследовать с помощью набора ЛУМ, имеющих мембраны с волокнами различной длины. Для классификации лабораторных модулей можно ввести обозначение  $[l_B]/[S_{ф}]$  (здесь  $[l_B]$  – целая часть длины волокна  $l_B$ , см;  $[S_{ф}]$  – целая часть до десятков площади фильтрующей поверхности, см<sup>2</sup>). Например, в модуле ЛУМ-80/250  $l_B = 0.8$  м,  $N_B = 11$ ,  $d_B = 0.9$  мм.

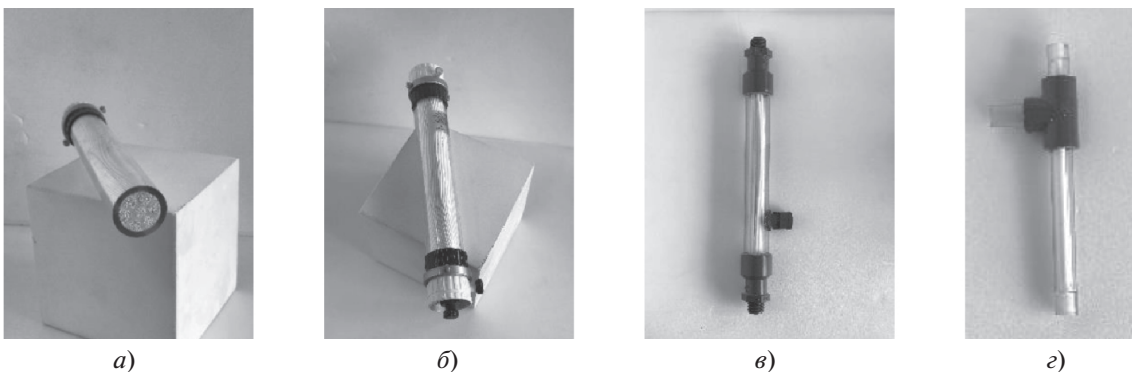


Рис. 4. Лабораторный ультрафильтрационный модуль. а, б – ЛУМ-24/1610; в – ЛУМ-25/640; г – ЛУМ-12/24

Производительность ЛУМ  $Q_y$  вычисляют по формуле

$$Q_y = J_{\text{пр}} S_{\text{ф}}, \quad (11)$$

где

$$J_{\text{пр}} = I(\tau) \Delta p_{\text{тм}}(\tau) \quad (12)$$

— удельная производительность;  $I(\tau)$  — проницаемость мембраны;  $\tau$  — время.

При снижении проницаемости мембраны производительность установки поддерживается примерно постоянной путем увеличения перепада трансмембранного давления. Удельная производительность — проектный показатель, значение которого принимается равным  $60 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Настройка  $\Delta p_{\text{тм}}(\tau)$  осуществляется регулировочным вентилем, измерение расхода воды — весовым методом,  $\Delta p_{\text{тм}}$  измеряется с помощью датчиков давления.

Фильтрация воды на промышленных установках происходит в соответствии со стандартным алгоритмом в течение заданного времени  $\tau_{\text{ф}}$ , после чего выполняются обратная промывка мембран и их химическая очистка. При этом должно быть выполнено условие  $\Delta p_{\text{тм}}(\tau_{\text{ф}}) < \Delta p_{\text{тм}}^{\text{к}}$  (здесь  $\Delta p_{\text{тм}}^{\text{к}}$  — критическое значение перепада трансмембранного давления, которое выбирается на основе рекомендаций производителя мембран). При достижении этого значения проводится продолжительная химическая очистка.

Цель исследований, осуществляемых на ЛУМ, — определение оптимальных параметров при работе установки вблизи максимально допустимого загрязнения, т.е. вблизи  $\Delta p_{\text{тм}}^{\text{к}}$ . Для этого фиксируется начальный перепад давления  $\Delta p_{\text{тм}}^0$ , который должен совпадать с перепадом давления на промышленной установке при проектном значении  $Q_y$ . Далее производится фильтрация до достижения  $\Delta p_{\text{тм}}^{\text{к}}$ . В процессе фильтрации при  $\Delta p_{\text{тм}}(\tau) < \Delta p_{\text{тм}}^{\text{к}}$  фактическое значение  $Q_y$  может быть и больше рассчитанного по формуле (11) на 20–50%. Такое отклонение допустимо и связано с трудностью контроля условия  $Q_y \approx \text{const}$ .

Прямая промывка выполняется с расходом промывочной воды  $\bar{Q}_{\text{п.п}}$ , при котором загрязнения заведомо удаляются с поверхности мембраны и перепад давления на ней  $\Delta p_{\text{тм}}^{\text{п.п}}$  не изменяется. Для определения оптимального значения  $\bar{Q}_{\text{п.п}}$  и скорости потока воды  $v_{\text{п.п}}$  его расход при обратной промывке начинают уменьшать от  $\bar{Q}_{\text{п.п}}$  до тех пор, пока значение  $\Delta p_{\text{тм}}^{\text{п.п}}$  не начнет увеличиваться.

На примере Новочеркасской ГРЭС было установлено, что при  $v_{\text{п.п}} = 0.7\text{--}0.8 \text{ м/с}$  более 80% отложений удаляется с поверхности мембраны за время  $3l_{\text{в}}/v_{\text{п.п}}$ . Оптимальное время было экспериментально определено как  $T_{\text{п.п}} \approx 10l_{\text{в}}/v_{\text{п.п}}$ . С помощью ЛУМ можно проверять эффективность и других очисток на действующих установках ультрафильтрации прежде, чем менять настройки промышленной УФУ.

## ХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА МЕМБРАННЫХ МОДУЛЕЙ

Большая площадь поверхности, низкая линейная скорость фильтрования (14–20 мкм/с), малый размер пор (0.02–0.05 мкм) обеспечивают высокое качество очистки воды при ультрафильтрации. Обратной стороной этого является подверженность мембраны сильному загрязнению. Прямая и обратная промывки не обеспечивают полного удаления загрязнений. Кроме того, доля неудаленных загрязнений растет от промывки к промывке. Поэтому на практике применяют химические очистки мембран, которые осуществляются регулярно во время механических промывок (в поток воды добавляют реагенты) и периодически (с прекращением работы установки). Для обеспечения минимальных затрат используют базовые химические реагенты (щелочь, соляную кислоту, гипохлорит натрия).

*Кислотные промывки* предназначены для удаления из мембран отложений, состоящих из солей жесткости. При ультрафильтрации солевой состав воды не изменяется, поэтому не следует ожидать заметных отложений солей жесткости. Однако при предварительной обработке, подогреве и коагуляции воды изменяются ее температура и pH. Как правило, pH сдвигается в кислую сторону и не провоцирует отложение солей жесткости. Кислотные промывки реализуются с применением соляной кислоты и являются самыми неудобными из химических очисток, особенно СЕВ по рекомендации производителей мембранных модулей и оборудования (1–2 раза в день).

Работы по оптимизации режимов эксплуатации установки ультрафильтрации проводили на Новочеркасской ГРЭС, на которой вода на нужды химического цеха поступает из водоотводного канала. Она используется для прямого охлаждения, и в течение большей части года ее температура составляет 20–30°C. Химический состав воды подвержен существенным колебаниям: общее солесодержание  $\text{ОСС} \approx 350\text{--}750 \text{ мг/дм}^3$ ,  $\text{pH} \approx 7.5\text{--}8.4$ , щелочность  $\text{Щ} \approx 2.2\text{--}4.2 \text{ мг-экв/дм}^3$ , жесткость  $\text{Ж} \approx 4.5\text{--}9.2 \text{ мг-экв/дм}^3$ , концентрация

кальция  $C_{Ca} \approx 2.2$  ммоль/дм<sup>3</sup>. Доля кальция в солях жесткости равна 60–67%. Средние значения показателей составляют: температура 25°C, ОСС = 600 мг/дм<sup>3</sup>, рН = 7.9, Щ = 2.6 мг-экв/дм<sup>3</sup>, Ж = 5.8 мг-экв/дм<sup>3</sup>.

Для оценки возможности образования карбонатных отложений используется индекс стабильности Ланжелье (LSI – Langelier Saturation Index) [6]

$$LSI = pH_{и} - pH_{p},$$

где  $pH_{и}$ ,  $pH_{p}$  – измеренное и расчетное значение рН.

При отрицательном значении LSI вода считается стабильной и карбонатные отложения не образуются.

Значение  $pH_{p}$  вычисляют по формуле

$$pH_{p} = 9.3 + A + B - C - D, \quad (13)$$

где  $A = (\lg \text{ОСС} - 1)/10$ ;  $B = 34.55 - 13.12 \lg(t + 273)$ ;  $C = \lg C_{Ca} - 0.4$ ;  $D = \lg \text{Щ}$ ;  $t$  – температура.

Формула (13) основана на стандартах США, ОСС при расчете по ней и концентрацию  $C_{Ca}$  по  $\text{CaCO}_3$  получают в мг/дм<sup>3</sup>.

Формулу (13) можно преобразовать в выражение, принятое в производственной практике водоподготовки:

$$pH_{p} = 8.2 + 0.11 \lg \text{ОСС} - \lg C_{Ca} - \lg \text{Щ} - 13.12 \lg \left( 1 + \frac{t}{273} \right), \quad (14)$$

где  $C_{Ca}$ , Щ выражаются в моль/м<sup>3</sup>.

С учетом  $\frac{t}{273} \ll 1$  для линейного разложения  $13.12 \lg \left( 1 + \frac{t}{273} \right) \approx 0.02t$  и формула (14) упрощается:

$$pH_{p} = 8.2 + 0.11 \lg \text{ОСС} - \lg(C_{Ca} \times \text{Щ}) - 0.02t. \quad (15)$$

Среднее значение индекса Ланжелье, рассчитанное по показателям качества воды на Новочеркасской ГРЭС, составило 0.32 и приблизилось к пороговому значению 0.5, при котором начинаются образование отложений солей жесткости и их осаждение на поверхности ультрафильтрационной мембраны. Для того чтобы уменьшить значение LSI, следовало снизить концентрацию кальция в воде. С этой целью после подогрева воду фильтровали через крупнодисперсную фильтрующую загрузку, находящуюся в контактных емкостях. При этом осаждалась нестабильная составляющая солей жесткости, снижалась более чем на 0.7 ммоль/дм<sup>3</sup> концентрация кальция, уменьшалась щелочность. Это привело к снижению значения индекса Ланжелье на 0.3. Применение коагулянта способствовало также снижению рН на 0.2

и дополнительному уменьшению щелочности. Значение индекса Ланжелье становилось близким к нулю, вследствие чего интенсивность процессов отложения солей жесткости на поверхности мембран УФУ существенно уменьшалась. Благодаря этому стало возможным отказаться от кислотных СЕВ.

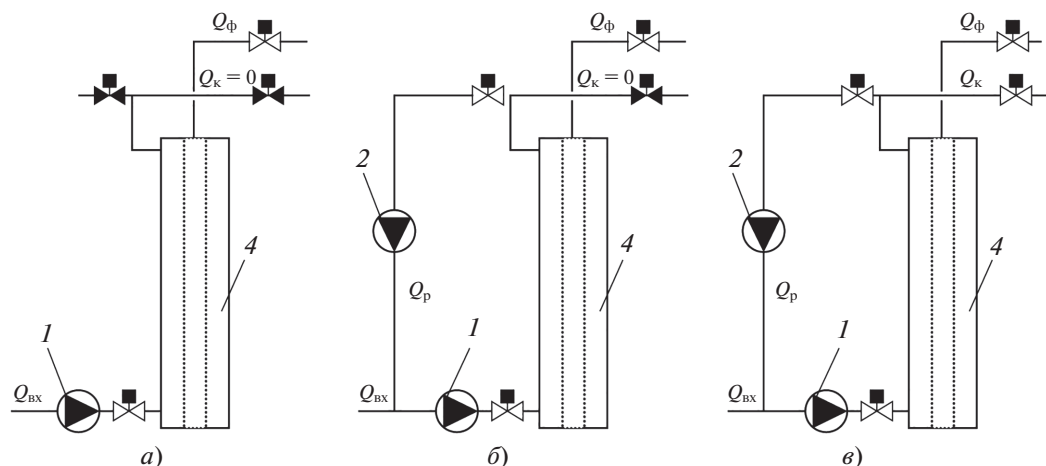
Эффективность такой технологии подтверждается стабильной многолетней работой УФУ на Новочеркасской ГРЭС. При этом длительность рабочего фильтроцикла была больше, чем его длительность с применением СЕВ без фильтрования воды через фильтрующую загрузку. Срок службы мембранных элементов существенно превысил расчетные 7 лет.

*Щелочные промывки* являются неотъемлемой частью работы УФУ. Они позволяют удалять из мембраны органические отложения, которые не удаляются при обратных промывках. Использование щелочи также является обязательным при проведении СР.

Для очистки установок обратного осмоса используют кислотные и щелочные растворы на базе комплексонов. Их применение для УФУ ограничено высокой стоимостью и довольно большим количеством реагента на единицу площади обрабатываемой поверхности. На Новочеркасской ГРЭС в конце 2006–начале 2007 г. были введены в эксплуатацию три УФУ с мембранными модулями Dizzer 5000. В течение 2014–2016 гг. на двух из этих установок были проведены исследования эффективности применения реагентов, содержащих комплексоны, для очистки мембран. Установки, на которых применяли такие реагенты, эксплуатируются до сих пор без замены мембранных модулей, а на третьей была произведена их замена.

В испытаниях были использованы кислотный раствор MF-CRO-220 и щелочной раствор MF-CRO-218 производства НПК “Медиана-Фильтр”, разработанные специально для установок ультрафильтрации в целях снижения затрат при проведении СР. В результате исследований было установлено, что применение этих реагентов снижает  $\Delta p_{TM}$  на 10–20% в зависимости от степени загрязнения мембраны. Эффективность очисток с помощью комплексонов довольно высока. Значение усредненного по времени перепада трансмембранного давления  $\Delta \hat{p}_{TM}(\tau)$ , который обеспечивает необходимую производительность установки, определяется по выражению

$$\Delta \hat{p}_{TM} = \frac{1}{T} \int_{\tau_p}^{\tau_p + \hat{T}} \Delta p_{TM}(\tau) d\tau, \quad (16)$$



**Рис. 5.** Режимы фильтрации: тупиковый (а), тангенциальный без сброса концентрата (б) и со сбросом концентрата (в).  $Q_{вх}$ ,  $Q_к$ ,  $Q_p$  – расход воды на входе в установку, концентрата и рециркуляции; 2 – насос рециркуляции; остальные обозначения см. рис. 1

где  $\tau_p$  – время работы установки;  $\hat{T} = \sum \tau = \hat{N} \tau$  – среднее время между СІР-очистками;  $\hat{N}$  – число фильтроциклов между очистками.

Применять реагенты следует после проведения базовой щелочной или кислотной очистки. Использование реагентов увеличивает время между последовательными СІР-очистками в среднем на 15%. Следует ожидать, что в целом увеличится срок службы мембранных модулей благодаря уменьшению суммарного времени воздействия на мембрану агрессивных очищающих растворов.

Применение реагентов на основе комплексонов для СІР-очистки УФУ позволяет значительно снизить перепад трансмембранного давления, уменьшить естественную деградацию мембраны в течение эксплуатации. При их использовании можно восстановить рабочие характеристики мембранных модулей, если не помогают стандартные СІР-очистки. Рекомендуется производить СІР-очистки с применением реагентов на базе комплексонов 2 раза в год. Частота выполнения очисток будет ограничиваться стоимостью реагентов.

Были проведены промышленные испытания щелочного раствора, содержащего детергент MF-CRO-326 для очистки мембранных элементов от нефтепродуктов. Содержание нефтепродуктов в воде, поступающей на УФУ, было незначительным (0.1 мг/дм<sup>3</sup>). Применение реагента MF-CRO-326 привело к снижению  $\Delta \hat{p}_{тм}$  на 4%. Это значение находится в пределах погрешности измерения и расчета  $\Delta \hat{p}_{тм}$ . Таким образом, надежный положительный эффект не был зарегистрирован, что связано с низким содержанием нефтепродуктов в исходной воде. Применение реагента

MF-CRO-326 возможно на установках ультрафильтрации, где в исходной воде содержится значительное количество нефтепродуктов, либо для очистки установки, которая подвергалась воздействию залповых выбросов нефтепродуктов.

### РАБОЧИЙ РЕЖИМ ФИЛЬТРОВАНИЯ

Расход фильтрата  $Q_φ$  в ультрафильтрационной установке описывается уравнением

$$Q_φ = N_v \int \frac{\partial J_φ}{\partial p}(z, \tau_φ) \Delta p_{тм}(\tau_φ) dS_φ, \tag{17}$$

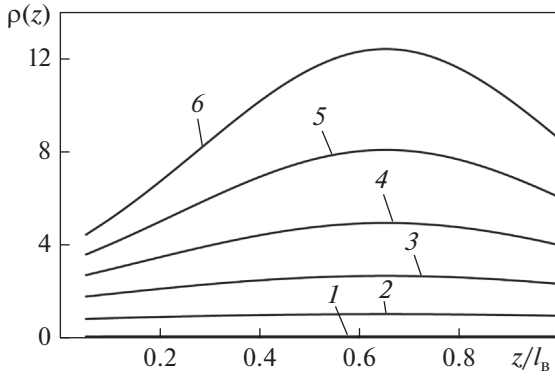
где  $J_φ$  – удельный расход фильтрата;  $dS_φ = dzdrdφ$ ;  $z, r, φ$  – цилиндрические координаты волокна;  $p$  – давление;  $\tau_φ$  – время фильтрации.

В этой формуле учитывается зависимость проницаемости мембраны  $I(z, \tau_φ) = \frac{\partial J_φ}{\partial p}$  от неоднородности загрязнения и времени, которая в процессе фильтрации уменьшается. Для обеспечения постоянной производительности УФУ увеличивают трансмембранное давление согласно выражению

$$Q_φ = S_φ I(\tau_φ) \Delta p_{тм}(\tau_φ). \tag{18}$$

Технология ультрафильтрации предусматривает тупиковый и тангенциальный режимы фильтрации (рис. 5). Тангенциальный режим предполагает фильтрацию со сбросом части исходной воды (см. рис. 5, в) и без него (см. рис. 5, б). В первом случае

$$Q_{вх} = Q_φ + Q_к + Q_p. \tag{19}$$



**Рис. 6.** Зависимость плотности отложений внутри волокна от  $z/l_B$  при  $u_{\text{вх}} = 0.1$  м/с,  $\alpha = 0.1$ ,  $\beta = 0.2$ ,  $\gamma = 0.2$ ,  $\delta = 0.5$ .  
 $\tau$ , с: 1 – 10; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 300; 5 – 400; 6 – 500

Во втором случае  $Q_k = 0$ .

Тангенциальная скорость  $u(z)$ , т.е. линейная скорость потока воды над мембраной, определяется выражением

$$u(z) = \tilde{Q}(z)/S, \quad (20)$$

где

$$\tilde{Q}(z) = (1 - z/l_B)Q_\phi + Q_k + Q_p \quad (21)$$

– расход воды над мембраной в точке с координатой  $z$ .

В формуле (21) множитель  $z/l_B$  учитывает уменьшение расхода воды вследствие отбора фильтрата. Это предполагает, что удельная производительность мембраны постоянна, что не всегда обосновано из-за ее неоднородного загрязнения. При граничных условиях  $\tilde{Q}(0) = Q_{\text{вх}}$ ,  $u(0) = u_{\text{вх}}$ ,  $\tilde{Q}(l_B) = Q_p + Q_k$ ,  $u(l_B) = u_{\text{вых}}$  расходы рециркуляции и сбрасываемого концентрата составляют  $Q_p = \xi_p Q_\phi$ ,  $Q_k = \xi_k Q_\phi$  (здесь  $\xi_p$  – коэффициент рециркуляции;  $\xi_k$  – коэффициент сброса концентрата).

Расчет скоростей удобно выполнить через базовую проектную удельную производительность  $J_\phi$  и площадь фильтрующей поверхности мембранного элемента  $S_\phi$ :

$$u_{\text{вх}} = \theta_{J_v} J_\phi (1 + \xi_p + \xi_k) \frac{4l_B}{d_B}; \quad (22)$$

$$u(z) = \frac{4l_B}{d_B} \theta_{J_v} J_\phi \left( 1 - \frac{z}{l_B} + \xi_p + \xi_k \right). \quad (23)$$

Данная модель позволяет описать и режим тупикового фильтрования. При  $\tilde{Q}(0) = Q_{\text{вх}} = Q_\phi$ ,  $\tilde{Q}(l_B) = 0$ ,  $u(l_B) = u_{\text{вх}}$ ,  $u(l_B) = 0$  этот режим не явля-

ется чисто тупиковым, так как значение продольной компоненты довольно велико

$$u(z) = u_{\text{вх}} \left( 1 - \frac{z}{l_B} \right). \quad (24)$$

При удельном расходе фильтрата  $J_\phi \approx 60$  дм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> · ч) линейная скорость потока воды на входе в УФУ  $u_{\text{вх}} \approx 0.1$  м/с является существенной. На значительной части волокна этот поток приводит к взрыхлению легких прилегающих к поверхности веществ, препятствуя снижению удельной производительности мембраны. При этом происходит унос загрязнений и повышение их концентрации в следующих по ходу движения потока областях. Очевидно, это приводит к неравномерному загрязнению поверхности мембраны. Динамику образования отложений в волокне можно отобразить выражением

$$\frac{d}{dt} \rho(z) = \alpha - \beta \rho(z) u(z) + \theta \int_0^z \rho(z') u(z') dz', \quad (25)$$

где  $\alpha$  характеризует образование отложений при фильтровании через волокно;  $\beta$  – безразмерный коэффициент;  $\rho(z)$  – плотность отложений;  $z'$  – параметр неоднородности отложений.

Значение  $\alpha$  пропорционально концентрации взвешенных частиц. Второй член в уравнении (25) описывает унос отложений, третий – их поступление вследствие уноса из других областей. С учетом (24) для качественного описания процессов интеграл в уравнении (25) можно аппроксимировать в первом приближении

$$\frac{d}{dt} \rho(z) = \alpha - \beta u_{\text{вх}} \rho(z) (l_B - z)/l_B + u_{\text{вх}} \rho(z) (\gamma z - \delta z^2), \quad (26)$$

где  $\gamma$ ,  $\delta$  – безразмерные коэффициенты.

При начальном условии  $\rho(z, 0) = 0$  решение уравнения (26) выглядит следующим образом:

$$\rho(z, \tau_\phi) = \frac{\alpha}{\omega(z)} \left[ e^{\omega(z)\tau_\phi} - 1 \right], \quad (27)$$

где  $\omega(z) = u_{\text{вх}} \left[ -\beta + (\beta/l_B + \gamma)z - \delta z^2 \right]$ .

На первоначальном этапе фильтрования  $\omega(z) \ll 1$  и происходит простое линейное однородное отложение загрязнений на поверхности волокна, после которого начинается нелинейный режим в динамике отложений (рис. 6). Он сопровождается образованием неоднородности с максимумом  $z_{\text{max}} = (\beta/l_B + \gamma)/(2\delta)$ . Фильтрование на взвешенном слое осадка дополнительно увеличивает неоднородность отложений. При этом снижается эффективность фильтрования, проис-



ходит быстрый рост перепада трансмембранного давления, увеличивается вероятность разрыва волокон, что ограничивает применение технологии ультрафильтрации при увеличении концентрации взвешенных и коллоидных частиц.

Решение этой проблемы – применение тангенциального режима фильтрования при  $\xi_p \neq 0$ , что позволяет оставлять загрязняющие вещества во взвешенном слое и снижать количество отложений на мембране. Использование тангенциального режима обеспечивает на выходе из волокна скорость  $u(l_b) = \frac{4l_b}{d_b} \theta_{j,v} J_\phi \xi_p$ , которая при достаточном значении  $\xi_p$  предотвращает образование неоднородностей внутри волокна и способствует стабильному режиму фильтрования. Проводимые на пилотных установках исследования показали, что вплоть до концентраций взвешенных частиц 200 мг/дм<sup>3</sup> коэффициент рециркуляции должен составлять  $\xi_p = 0.5–0.7$ . Эти режимы работы УФУ были реализованы на Новочеркасской ГРЭС при концентрации взвешенных частиц 15–180 мг/дм<sup>3</sup>. Для высоких значений (более 30 мг/дм<sup>3</sup>) средний перепад трансмембранного давления в тангенциальном режиме при  $\xi_p = 0.5$  ниже, чем в тупиковом. В тангенциальном режиме эксплуатации УФУ увеличивается продолжительность фильтрования  $\tau_\phi$ , уменьшается число химических промывок, снижается вероятность разрывов волокон. Срок службы ультрафильтрационных мембранных элементов на Новочеркасской ГРЭС оказался больше, чем на водоподготовительных установках других ТЭС с использованием технологии ультрафильтрации в тупиковом режиме.

## ВЫВОДЫ

1. Для эффективного подбора режимов фильтрования, прямой и обратной промывок могут применяться лабораторные ультрафильтрационные модули.
2. При оптимизации кислотных промывок рекомендуется рассчитывать индекс стабильности карбоната кальция (индекс Ланжелье).
3. Для снижения интенсивности отложений в установке ультрафильтрации при существенно нестабильной исходной воде может быть использовано предварительное фильтрование воды через зернистую загрузку.
4. Оптимизация режимов работы ультрафильтрационных установок и предварительная обработка воды во многих случаях позволяют отка-

заться от непродолжительных кислотных очисток и ограничиться продолжительными кислотными очистками, что существенно упрощает эксплуатацию установки.

5. Качество работы ультрафильтрационных установок может быть повышено благодаря применению продолжительных кислотных и щелочных очисток на основе комплексонов с периодичностью применения 2 раза в год.

6. При тупиковом режиме фильтрования значительная часть отложений собирается в центральной части волокна. Естественным способом борьбы с этими отложениями является организация тангенциального режима фильтрования.

7. При нестабильном качестве исходной воды и повышенном содержании взвешенных и коллоидных частиц (более 30 мг/дм<sup>3</sup>) эффективным режимом является тангенциальное фильтрование, которое применяется при очистке стоков.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность Б.Е. Рябчикову, С.Ю. Ларионову, А.Р. Сидорову за полезные обсуждения результатов работы, а также Ю.Е. Корзиной за помощь в работе над статьей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Технологии** мембранного разделения в промышленной водоподготовке / А.А. Пантелеев, Б.Е. Рябчиков, О.В. Хоружий, С.Л. Громов, А.Р. Сидоров. М.: ДеЛи плюс, 2012.
2. **Ho Jia Shin, Ma Zhun.** Inline coagulation-ultrafiltration as the pretreatment for reverse osmosis brine treatment and recovery // *Desalination*. 2015. V. 365. P. 242–249.
3. **Guillem Gilabert Oriol.** Optimization of ultrafiltration membrane cleaning processes. Pretreatment for reverse osmosis in seawater desalination plants. Tarragona: Universitat i virgili, 2013. [https://www.researchgate.net/publication/268514675\\_Optimization\\_of\\_ultrafiltration\\_membrane\\_cleaning\\_processes\\_Pretreatment\\_for\\_reverse\\_osmosis\\_in\\_seawater\\_desalination\\_plants](https://www.researchgate.net/publication/268514675_Optimization_of_ultrafiltration_membrane_cleaning_processes_Pretreatment_for_reverse_osmosis_in_seawater_desalination_plants)
4. **Pearce G.K.** The case for UF/MF pretreatment to RO in seawater applications // *Desalination*. 2007. V. 203. № 1–3. P. 286–295.
5. **Wolf P.H., Siverns S, Monti S.** UF membranes for RO desalination pretreatment // *Desalination*. 2005. V. 182. № 1–3. P. 293–300.
6. **Langelier W.F.** The analytical control of anti-corrosion water treatment // *J. American Water Works Association*. 1936. V. 28. № 10. P. 1500–1521.

## Optimization of Operating Conditions for Ultrafiltration Units

A. A. Panteleev<sup>a, b</sup>, An. A. Panteleev<sup>c</sup>, V. V. Bobinkin<sup>b</sup>, S. E. Lysenko<sup>d</sup>, and V. B. Smirnov<sup>b, \*</sup>

<sup>a</sup> National Research University "Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

<sup>b</sup> Research and Production Company Mediana-Filter, Moscow, 119270 Russia

<sup>c</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, 141701 Russia

<sup>d</sup> All-Russia Thermal Engineering Institute, Moscow, 115280 Russia

\*e-mail: smirnov@mediana-filter.ru

**Abstract**—Parameters affecting the effectiveness of cleaning ultrafiltration membranes are considered. A simple hydraulic model of the backwashing regime is proposed. The formulas obtained for calculating the backwashing time enabled optimization of this process. Results are presented of studying the operating condition in ultrafiltration units. To effectively select the regimes of filtration and of direct and backwashing, the authors propose to employ laboratory ultrafiltration modules and the calculation procedure developed by them. A hydraulic model of the backwashing process and a phenomenological model of deposit formation within the fiber are illustrated. The formulas are presented for calculating backwash time, which can help us to optimize the backwashing process and reduce the associated operating costs. It is demonstrated that the distribution of deposits in a membrane fiber can be analyzed using simple filtration models, one of which is presented in this study. It has been demonstrated that most deposits are accumulated at the center of the fiber with the dead-end filtration mode. Hence, it would be reasonable to use cross-flow filtration to control this process. An engineering correlation convenient for practical application is proposed for calculating the Langelier index using the measured water quality indicators. The Langelier index is useful to substantiate whether acid washings are required or not required. It has been demonstrated that, with considerably unstable source water, prefiltration in a filter with a granular bed upstream the ultrafiltration unit stabilizes the quality and deaeration of the treated water. Acid or alkaline cleaning operations based on chemicals containing chelating agents to be performed twice a year have also been demonstrated to significantly increase the stability of the ultrafiltration unit. Practical recommendations are given for introducing the ultrafiltration regime, which were implemented at the water treatment plant of the Novocherkassk District Power Plant (GRES).

*Keywords:* ultrafiltration, ultrafiltration unit regime, ultrafiltration unit cleaning, optimization of ultrafiltration unit cleaning, hydraulic model of backwashing, formulas for calculating backwashing time