

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

НОВАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КОЛЛОИДНОГО ИНДЕКСА

© 2021 г. А. А. Пантелеев^{a, b}, А. А. Смирнов^{b, *}, В. Б. Смирнов^b, В. П. Коваленко^{b, **}

^aНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

^bНаучно-производственная компания “Медиана-Фильтр”, Ткацкая ул., д. 1, Москва, 105318 Россия

*e-mail: Smirnov_A@mediana-filter.ru

**e-mail: Kovalenko@mediana-filter.ru

Поступила в редакцию 12.10.2020 г.

После доработки 28.10.2020 г.

Принята к публикации 23.12.2020 г.

Коллоидный индекс (КИ) (Silt Density Index – SDI) является важным интегральным показателем качества воды, подготовленной для установок обратного осмоса (УОО). На сегодняшний день это единственный показатель, который позволяет оценить вероятность загрязнения мембранной установки коллоидами и взвешенными веществами, содержащимися в исходной воде. Показано, что новая методика измерения коллоидного индекса, в отличие от стандартной, дает возможность устранить вклад нелинейностей в описание качества воды и обладает меньшей погрешностью в широком диапазоне концентраций взвешенных частиц, что обеспечивает более точное прогнозирование потенциального загрязнения установок обратного осмоса. На основе дифференциальной формы КИ представлено обобщение стандартной методики измерения коллоидного индекса в линейной области уменьшения скорости потока воды с использованием более точных методов измерения и автоматизации. Для вод с низким содержанием взвешенных и коллоидных частиц расход воды через микрофильтр изменяется медленно, поэтому, чтобы заметить падение его производительности, нужно значительное время наблюдения (около 15 мин). Попытки провести измерения КИ на воде с высоким содержанием коллоидных частиц и взвешенных веществ показывают их практическую невозможность. Приведены данные экспериментальных исследований, подтверждающие корректность и преимущества продемонстрированной в статье методики измерения коллоидного индекса. Выполнено сравнение методик расчета представленного в статье обобщенного коллоидного индекса и модифицированного индекса загрязнения MFI (Modified Fouling Index). Показано, что коллоидный индекс пропорционален концентрации взвешенных частиц, а MFI дополнительно содержит нормировочный множитель, обратно пропорциональный скорости фильтрата. На практике результаты, представленные в статье, вероятно, позволят рассчитать нагрузку на установки обратного осмоса и выявить корреляцию частоты химических очисток. В процессе проведения экспериментов обнаружено явление начального резкого падения расхода фильтрата через фильтр, которое еще только ожидает своего объяснения.

Ключевые слова: коллоидные частицы, показатели качества воды, коллоидный индекс, установка обратного осмоса, мембранный фильтр, производительность микрофильтра

DOI: 10.1134/S0040363621080075

Контролирование концентрации примесей в воде, поступающей на установку обратного осмоса, является важной задачей для обеспечения ее стабильной работы и высокого качества получаемого пермеата [1]. Некоторые стандартные показатели качества воды (мутность, цветность, прозрачность) связаны с содержанием в ней взвешенных и коллоидных частиц и определяются оптическими методами. С помощью обычных фотометрических методов можно измерять концентрацию частиц размером не менее 1.5–2.0 мкм, при использовании одномодовых лазеров и оптики высокого разрешения – содержание частиц размером 0.5–

0.6 мкм. Недавние достижения в обработке рассеянного излучения позволяют достичь и преодолеть классический предел разрешения для размера частиц, равного $\lambda/2$ (здесь λ – длина волны рассеянного излучения). Эти методы измерения являются сложными и дорогостоящими и для воды с очень малой концентрацией взвешенных частиц не применимы. Для измерения концентрации взвешенных частиц размером более 1.5 мкм используют оптические методы при $\lambda = 0.4–0.8$ мкм, в которых учитывается ограничение разрешения человеческого глаза.

Измерение содержания частиц в воде, из которой удалены коагулирующие коллоидные частицы, является сложной задачей. Даже субмикронные частицы размером 1–10 мкм очень медленно оседают в воде, и поэтому их концентрация не может оцениваться методами, связанными с осаждением. Малая плотность взвешенных и коллоидных частиц в обработанной воде не позволяет применять методы осаждения для оценки их состава и количества.

В 60-х годах прошлого века в США начали активно внедряться обратноосмотические устройства для очистки воды – пермеаторы Permaser компании DuPont [2]. Основной проблемой при эксплуатации этих устройств стало засорение сепараторов между полволоконными обратноосмотическими мембранами, что приводило к неравномерному распределению потоков исходной воды внутри модуля, быстрому росту концентрационной поляризации и, в конечном итоге, забиванию модуля минеральными отложениями. Поэтому требовалось найти простой и эффективный метод оценки качества воды для подачи ее на УОО. Тогда инженеры компании DuPont предложили методику измерения коллоидного индекса, который характеризует возможность загрязнения обратноосмотической (наночелнофильтрационной) системы.

ИЗМЕРЕНИЕ КОЛЛОИДНОГО ИНДЕКСА И ЕГО СУЩНОСТЬ

В стандарте ASTM 4189 коллоидный индекс определяется как степень загрязнения воды механическими и коллоидными примесями, ее пригодности для подачи на дальнейшую очистку, чаще всего на обратноосмотическую установку [3]. Для определения КИ используется установка, схема которой представлена на рис. 1. Вода про-

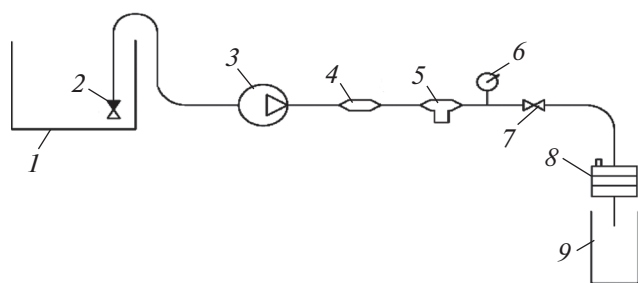


Рис. 1. Схема установки для определения коллоидного индекса.

1 – емкость с исследуемой водой; 2 – обратный клапан; 3 – насос; 4 – дроссель; 5 – редуктор; 6 – манометр; 7 – регулировочный вентиль; 8 – мембранный фильтр; 9 – мерная емкость для сбора фильтрата

качивается через мембранный фильтр с размером пор 0.45 мкм при давлении 0.21 МПа и температуре $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Коллоидный индекс вычисляют по формуле

$$\text{КИ}_\tau = \frac{100}{\tau} \left(1 - \frac{t_1}{t_2} \right), \quad (1)$$

где t_1, t_2 – длительность фильтрования пробы воды объемом $V_{\text{пр}} = 500 \text{ см}^3$ до начала и по окончании эксперимента; τ – длительность эксперимента.

При $\tau = 15$ мин это выражение имеет вид

$$\text{КИ}_{15} = \frac{100}{15} \left(1 - \frac{t_1}{t_2} \right) \approx 6.67 \left(1 - \frac{t_1}{t_2} \right). \quad (2)$$

Очевидно, что результат вычислений существенно зависит от времени τ , в течение которого производится моделирование процесса образования осадка. Стандартная длительность эксперимента составляет 15 мин, в этом случае индекс зачастую не указывается. Поскольку состав, размер, вид и природа взвешенных частиц (в том числе коллоидов) могут сильно варьироваться, вычисление осредненной характеристики (коллоидного индекса) позволяет проводить лишь качественную оценку общего содержания взвешенных частиц в пробе.

Из выражения (2) видно, что максимальное значение КИ_{15} составляет 6.67 и соответствует практически полному закупориванию микрофильтра, когда за разумное время не удается второй раз профильтровать тестовый объем пробы $V_{\text{пр}}$, т.е. $t_2 \rightarrow \infty$. Это означает, что КИ_{15} плохо подходит для характеристики недостаточно очищенной воды. В этом случае необходимо уменьшать время накопления загрязнения на фильтре τ до 10 или 5 мин и вычислять соответственно КИ_{10} или КИ_5 .

Для оценки качества исходной воды могут использоваться микрофильтры с размером пор (рейтингом) 1.0, 0.45, 0.22, 0.10 мкм и ультрафильтры рейтингом 0.05 мкм. Таким образом, следующее обобщение для понятия “коллоидного индекса” сводится к измерению показателя КИ_τ^ζ (здесь ζ – рейтинг).

Другое обобщение связано с физическим смыслом КИ_τ , который описывает изменение удельной производительности микрофильтра $\bar{Q}_{\text{мф}}$ за время τ . Одним из показателей качества воды является количество взвешенных и коллоидных частиц в единице объема, т.е. их концентрация $n_{\text{кол}}$. Она

определяет количество задержанных мембраной частиц $N_{\text{кол}}$ за время фильтрования $t_{\text{ф}}$:

$$N_{\text{кол}} = \theta n_{\text{кол}} \int_0^{t_{\text{ф}}} Q(t) dt, \quad (3)$$

где θ — доля задержанных частиц; Q — расход воды.

Расход воды вычисляют по выражению

$$Q = \bar{Q}_{\text{мф}} S = \Delta V / \Delta t, \quad (4)$$

где S — площадь микрофильтра; ΔV — объем отфильтрованной пробы воды за короткий промежуток времени Δt .

В соответствии с теоремой о среднем формула (3) может быть записана в виде

$$N_{\text{кол}} = \theta n_{\text{кол}} Q_{\text{ср}} t_{\text{ф}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{ср}}$ — средний расход воды в течение времени $t_{\text{ф}}$.

Однако очевидно, что уменьшение производительности микрофильтра ΔQ пропорционально числу задержанных частиц за время $t_{\text{ф}}$:

$$\Delta Q \propto N_{\text{кол}} \propto -\frac{d\bar{Q}_{\text{мф}}}{dt} S t_{\text{ф}}. \quad (6)$$

С учетом соотношения $\frac{d\bar{Q}_{\text{мф}}}{dt} S = \frac{dQ}{dt}$ и выражений (5), (6) можно получить

$$\text{КИ}_{\tau} = \frac{100}{\tau} \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (7)$$

Изменение характеристики фильтрационного процесса (скорость потока воды $\frac{dQ}{dt}$) пропорционально концентрации коллоидных и взвешенных частиц. При определении расхода воды Q через микрофильтр в описанной выше методике измерения коллоидного индекса за короткий промежуток времени в выражении (4) Δt принимает значение t_1 или t_2 , а $\Delta V = V_{\text{пр}}$. С учетом этого обстоятельства формулу (1) можно представить в виде

$$\text{КИ}_{\tau} = \frac{100}{\tau} \frac{t_2 - t_1}{t_2} = \frac{100}{\tau} \frac{\frac{V_{\text{пр}}}{Q_2} - \frac{V_{\text{пр}}}{Q_1}}{\frac{V_{\text{пр}}}{Q_2}} \quad (8)$$

или

$$\text{КИ}_{\tau} = \frac{100}{\tau} \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (9)$$

Это выражение объясняет физический смысл коллоидного индекса КИ_{τ} — он описывает относительное уменьшение производительности микрофильтра за время τ с нормировочным множителем $c = 100$. Переписав (9) следующим образом:

можно дать новую интерпретацию КИ_{τ} . В формуле (10) вторая дробь описывает аппроксимацию производной

$$\text{КИ}_{\tau} = \frac{c}{Q_1} \frac{Q_1 - Q_2}{\tau}, \quad (10)$$

можно дать новую интерпретацию КИ_{τ} . В формуле (10) вторая дробь описывает аппроксимацию производной

$$\frac{Q_1 - Q_2}{\tau} \approx -\frac{dQ}{dt}. \quad (11)$$

Для КИ_{τ} можно выполнить дифференциальное обобщение

$$\text{КИ}_{\tau} \approx -\frac{c}{Q_1} \frac{dQ}{dt}. \quad (12)$$

Таким образом, выражение (10) является аппроксимацией формулы (12). В предположении, что расход фильтрата мало изменяется в течение цикла, можно записать

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 \ll Q_1. \quad (13)$$

При $Q_1 \approx Q_{\text{ср}}$ выражение (12) выглядит следующим образом:

$$\text{MFI} = \text{КИ}_{\tau} / (Q^2 c). \quad (14)$$

Это соотношение доказывает, что параметр КИ является хорошим показателем для оценки наличия в воде коллоидных и взвешенных частиц. Он также позволяет понять достоинства и недостатки формулы (1). Для воды с низким содержанием взвешенных и коллоидных частиц расход воды через микрофильтр изменяется медленно и хорошо выполняется условие (13). Поэтому, чтобы измерить $\frac{dQ}{dt}$, экспериментальное дифференциальное время τ должно быть значительным, например 15 мин. Если вода содержит большое количество частиц, то расход быстро уменьшается и оценка при $\tau = 15$ мин перестает быть корректной. Соответственно условие (13) не выполняется, а $t_2 \gg t_1$. Это означает практическую невозможность определения КИ_{15} . Поэтому значение τ необходимо уменьшать и, соответственно, проводить дополнительные измерения. Таким образом, формула (1) является аппроксимацией выражения (12).

Далее приводятся результаты экспериментального исследования изменения расхода воды при измерении коллоидного индекса в целях определения области применимости классического КИ [3], выявления его физического смысла при разных интерпретациях [3, 4], а также возможных особенностей организации процедуры его измерения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ КОЛЛОИДНОГО ИНДЕКСА

Схема установки для измерения КИ (см. рис. 1) была усовершенствована. Фильтрат собирали в емкость 9, расположенную на весовой платформе с тензодатчиком балочного типа с верхним пределом измерения 20 кг и классом точности С3. Сигнал от тензодатчика поступал на цифровой преобразователь и автоматический регистратор данных, который определял зависимость $Q(t)$.

Результаты экспериментов, представленные на рис. 2, а также других измерений $Q(t)$ показали резкое снижение расхода воды в течение промежутка времени $t_0 < 100$ с. Для данного типа мембраны время t_1 не превышало 30 с в широком диа-

пазоне качества воды. Это означает наличие зависимости $КИ_{15}(t_0)$. Для хорошо подготовленной воды (см. рис. 2, а) $КИ_{15}^0 \approx 2.4$ при $t_1 \approx 22.5$ с, $КИ_{15}^{50} \approx 1.9$ при $t_1 \approx 25.5$ с и $КИ_{15}^{86} \approx 1.8$ при $t_1 \approx 26.0$ с. Для эксперимента, результаты которого представлены на рис. 2, б, $КИ_{15}^0 \approx 5.80$ при $t_1 \approx 24.0$ с, $КИ_{15}^{50} \approx 5.75$ при $t_1 \approx 28.5$ с, $КИ_{15}^{86} \approx 5.65$ при $t_1 \approx 29.0$ с.

Эти данные указывают на то, что измерения необходимо производить при стабилизации расхода воды. В данном случае этот момент наступает при $t_0 \geq 50$ с. Такой вывод имеет важное практическое значение, так как все существующие методики не учитывают это явление, которое вносит

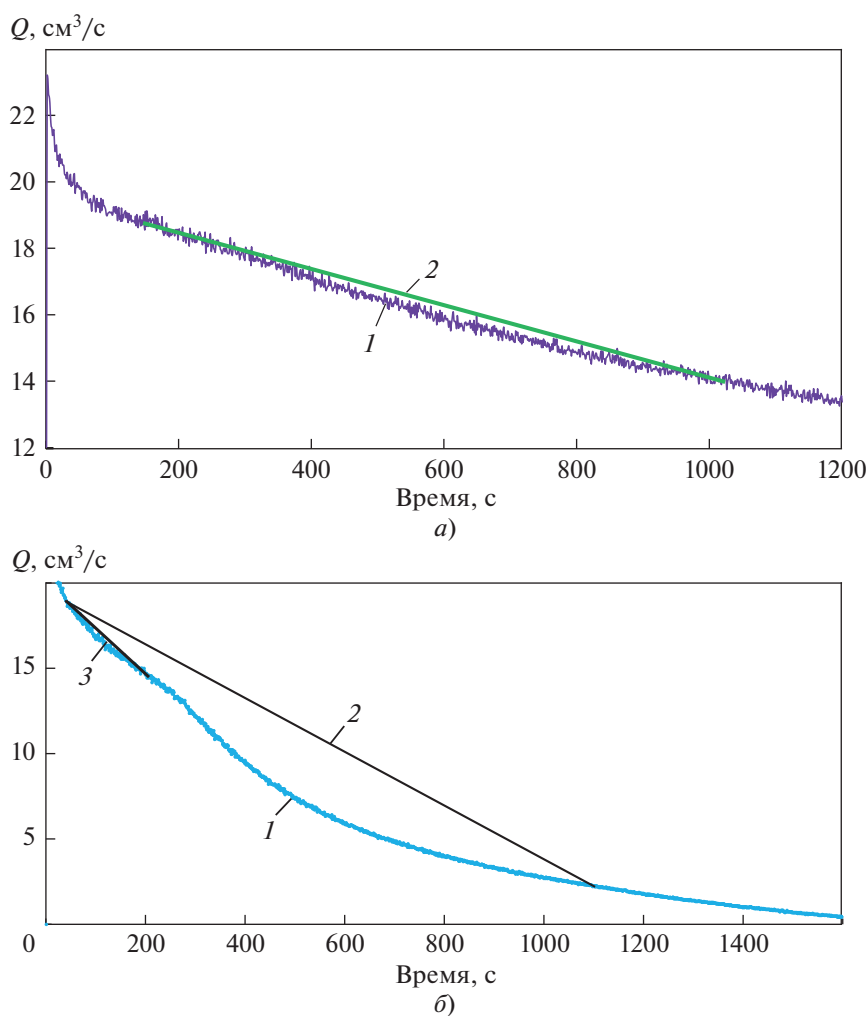


Рис. 2. Зависимость расхода воды от времени в эксперименте с хорошо очищенной (а) и недостаточно очищенной (б) водой.

1 – экспериментальная зависимость производительности тестовой мембраны от времени; 2 – линейная аппроксимация по стандартной методике; 3 – линейная аппроксимация по модифицированной методике.

t_0 , с: а – 86; б – 50; $КИ_{15}$: а – 1.8; б – 5.7

искажение в значении КИ, а следовательно, может влиять на прогнозы устойчивой работы установок обратного осмоса.

Следует указать, что измерение расхода воды с погрешностью 3–5% потребовалось проводить с достаточно большим тестовым объемом фильтра-та $\Delta V = V_{пр} = 500 \text{ см}^3$ в течение 20–200 с, а измерение производной (11) – в течение 900 с (15 мин). Это объясняет выбор данной методики для измерения коллоидного индекса. Более 50 лет назад, когда вводился показатель $КИ_{\tau}$, отсутствовали недорогие и достаточно точные приборы для измерения малых расходов воды (0.1–1.5 дм³/мин). Также отсутствовали необходимые средства автоматизации и регистрации данных.

Из рис. 2, а видно, что для хорошо подготовленной воды стандартная методика измерения $КИ_{15}$ обеспечивает неплохую аппроксимацию дифференциальной формулы (12). В эксперименте с менее очищенной водой (см. рис. 2, б) аппроксимация при $\tau = 15$ мин является довольно грубым приближением при формальном приемлемом значении коллоидного индекса $КИ_{15} \approx 5.7$. Зависимость $Q(t)$ является нелинейной и аппроксимация (10) или (1) становится очень грубой. Естественной, следующей из (14), оценкой описания содержания коллоидных частиц в воде является условие

$$n_{кол} \sim \frac{dQ}{dt} \approx \text{const.} \quad (15)$$

В эксперименте (см. рис. 2, б) для $КИ_{15}$ это условие не выполняется, но оно выполняется для $КИ_2 \approx 9.8 \pm 10\%$. Очевидно, это значение можно считать более удачным приближением. Но измерение $КИ_2$ для хорошо подготовленной воды дает слишком большую ошибку. К примеру, для воды (см. рис. 2, а) времена измерения расхода $t_1 = 26$ с и $t_2 = 27$ с при $\tau = 2$ мин почти совпадают при ошибке ± 0.5 с и формально значение $КИ_2$ соответствует диапазону 1.9–3.6. Поэтому для хорошо подготовленной воды стандартом был выбран объемный метод с $КИ_{15}$, который обеспечивал погрешность измерения расхода воды 3–5% и менее.

Нелинейные эффекты начинают проявляться при $t_2 > 100$ с, например при условиях, отвечающих эксперименту, результаты которого представлены на рис. 2, б. При $t_2 > 500$ с значение коллоидного индекса в пределах ошибки 3–5% близко к предельному значению $КИ_{15} = 20/3$. Необходимость использовать $КИ_{\tau}$ с подбором значения τ не более 15 мин является практическим неудобством и методологическим недостатком. Это побудило исследователей искать другие способы описания

содержания взвешенных и коллоидных частиц. Например, был предложен метод измерения модифицированного индекса загрязнения.

ОБОБЩЕНИЕ ПОНЯТИЯ КОЛЛОИДНОГО ИНДЕКСА

Ранее было показано, что для формул (1) и (10) можно сделать дифференциальное обобщение (12), которое допускает очевидное обобщение

$$\text{ОКИ}^{\zeta} = -c(\zeta) \frac{1}{Q} \frac{dQ}{dt}, \quad (16)$$

где ОКИ – обобщенный коллоидный индекс (дифференциальная форма коллоидного индекса); $c(\zeta)$ – нормировочная константа.

Далее принимается: $\zeta = 0.45$ мкм, $c(0.45) = c$, $\text{ОКИ}^{0.45} = \text{ОКИ}$, и функциональная зависимость от рейтинга фильтрования не рассматривается. На значения ΔQ и t_0 для мембраны влияет отклонение ее характеристик от номинала, присущего всей партии мембран при производстве. Начальный скачок ΔQ не связан или очень мало связан с засорением мембраны. Поэтому промежуток времени t_0 должен быть исключен из измерения, что является важным практическим наблюдением. Тогда коллоидный индекс определяется по выражению

$$\text{ОКИ} = -c \frac{1}{Q(t_0)} \frac{dQ(t_0)}{dt}. \quad (17)$$

При $c = 6000$, $\tau = 900$ с выражение для обобщенного коллоидного индекса $КИ_{15}$ имеет вид

$$\text{ОКИ} = -6000 \frac{1}{Q(t_0)} \frac{dQ(t_0)}{dt}. \quad (18)$$

При линейном приближении производная $\frac{dQ(t_0)}{dt}$ выглядит следующим образом:

$$\frac{dQ(t_0)}{dt} = -\Delta Q / \Delta t = -\text{tg } \alpha, \quad (19)$$

где $\Delta Q = Q(t_0) - Q(t_0 + \Delta t)$ – диапазон измерения; α – угол наклона линейной аппроксимации $Q(t)$ к оси времени.

С учетом (19) формула (18) преобразуется к виду

$$\text{ОКИ} = \text{КИ}_Q(t_0) = \frac{6000 \Delta Q}{Q(t_0) \Delta t}. \quad (20)$$

Рассчитанное по (20) для эксперимента, результаты которого представлены на рис. 2, б, при $t_0 = 50$ с значение коллоидного индекса составило $КИ_Q(50) = 9.4$ с погрешностью 10% (близко к $КИ_2 = 9.8$). Таким образом, измеренное значение

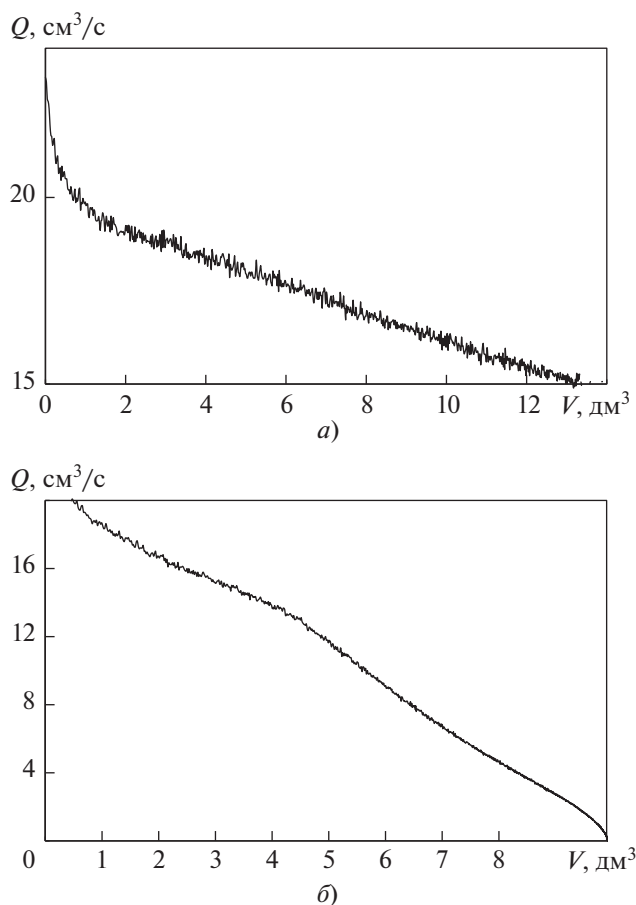


Рис. 3. Зависимость расхода воды от объема фильтра в эксперименте с хорошо очищенной (а) и недостаточно очищенной (б) водой.
 KI_{15} : а – 1.8; б – 5.7

коллоидного индекса по стандартной методике занижено на 3.7 ед., что имеет серьезное значение для принятия решения о возможности использования такой воды для питания установки обратного осмоса. Воду с $KI > 5$ не рекомендуется без предварительной подготовки направлять на установку.

Для хорошо подготовленной воды при $KI_{15} = 1.8$ (см. рис. 2, а) $Q(50) = 19.8 \text{ см}^3/\text{с}$, $\Delta Q = 1.0 \text{ см}^3/\text{с}$ при $\Delta t = 120 \text{ с}$. Из формулы (20) следует: $KI_Q(50) = 2.5$ при погрешности около 7%. При $t_0 = 86 \text{ с}$ и $\Delta t = 200 \text{ с}$ можно получить $\Delta Q = 1.7 \text{ см}^3/\text{с}$ и соответственно $KI_Q(86) = 1.9$. Это указывает на то, что время стабилизации расхода хорошо подготовленной воды выше, но его можно подобрать оптимальным для воды с широким диапазоном качества. Кроме того, $\tau = 900 \text{ с}$ в методике измерения KI_{15} выбирали после измерения t_1 . Таким образом, методика измерения ОКИ – более универсальная и точная, чем методика измерения KI_τ .

Формулы (16) и (18) допускают следующее обобщение:

$$\text{ОКИ} = -c \frac{1}{dV} \frac{dQ}{dt} = -c \frac{dQ(t_0)}{dV}. \quad (21)$$

В практическом использовании по аналогии с формулой (20) эта дифференциальная форма допускает простую линейную аппроксимацию

$$\text{ОКИ} \approx c \frac{\Delta Q}{\Delta V}, \quad (22)$$

где $\Delta Q = Q(t_0) - Q(t_0 + \Delta t) = Q(V_0) - Q(V_0 + \Delta V)$ – разность расходов воды (объемом ΔV) в начале и конце фильтрования;

$$\Delta V = \int dV = \int Q dt. \quad (23)$$

В аппроксимации (22) заложено предположение, что скорость фильтрования изменяется медленно ($\Delta Q \ll Q_0$). Значение нормировочного множителя c принимается равным 6000 для ΔV , см^3 , чтобы соответствовать общепринятой методике при $\tau = 15 \text{ мин}$ и выражениям (8), (9). Если выражать объем ΔV в дм^3 , то нормировочный множитель составит $c = 6$. Формулу для коллоидного индекса, измеренного объемным методом, можно представить в виде

$$KI_V(V_0) = 6 \frac{\Delta Q}{\Delta V}. \quad (24)$$

Она заменяет выражения (1) и (2) и имеет простую функциональную зависимость $KI_V = KI_V(\Delta V)$, так как $\Delta Q(\Delta V)$ является функцией объема отфильтрованной воды.

Коллоидный индекс можно измерить с помощью весового метода, точность которого заметно выше точности объемного метода. Кроме того, он допускает несложную автоматизацию процесса измерения. В стандартной методике характерный расход воды составляет 10–30 $\text{см}^3/\text{с}$, что соответствует массовому расходу 10–30 г/с. Тогда, например, для характерного времени $t = 1 \text{ с}$ точность измерения массы 1–2 г будет достаточной для $\Delta V_{\text{пр}} = 10\text{--}30 \text{ см}^3$. Весовой метод измерения коллоидного индекса становится универсальным для воды различного качества и не требует корректировки времени τ , в отличие от его измерения по стандартной методике.

Значение коллоидного индекса определяется линейной стадией фильтровального процесса. Для эксперимента при $KI_{15} = 1.8$ (см. рис. 2) на рис. 3, а представлена зависимость $Q(V)$. При $V_0 = 1 \text{ дм}^3$, $\Delta Q = 1.7 \text{ см}^3/\text{с}$ для $\Delta V = 4 \text{ дм}^3$ значение

коллоидного индекса, рассчитанное по формуле (24), составляет $KI_V(1) = 2.55$. Это значение почти совпадает со значением $KI_Q(50)$ для данного эксперимента. Для $V_0 = 1.6 \text{ дм}^3$ при $\Delta V = 4 \text{ дм}^3$ значение ΔQ составляет $\Delta Q \approx 1.4 \text{ см}^3/\text{с}$, значение $KI_V(1.6) \approx 2$. В пределах погрешности это соответствует $KI_Q(86)$. При выборе для этого эксперимента $V_0 \geq 2 \text{ дм}^3$ нелинейность уменьшается и значение KI_V стремится к 1.8.

Рассчитанное по формуле (24) для эксперимента с $KI_{15} = 5.7$ (см. рис. 3, б) значение коллоидного индекса составило $KI_V(1) \approx 9.4$ при $V_0 = 1 \text{ дм}^3$, $\Delta Q = 4.7 \text{ см}^3/\text{с}$, $\Delta V = 3 \text{ дм}^3$ и погрешности около 5%. Оно практически совпадает с $KI_Q(50)$. При $V_0 = 1 \text{ дм}^3$ значение коллоидного индекса составляет $KI_V(2) \approx 9.2$. Эти значения близки к KI_2 , рассчитанному по стандартной методике. При измерении KI по методике [3] пользователь получает заниженные значения по сравнению с фактическими, что может привести к необоснованно оптимистичному выводу относительно прогноза стабильности работы установки обратного осмоса.

СРАВНЕНИЕ КОЛЛОИДНОГО ИНДЕКСА С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ИНДЕКСОМ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Неудовлетворенность результатами описания наличия коллоидных частиц в воде с помощью методики SDI (KI_{15}) побудила авторов искать другие методы. Была предложена методика измерения модифицированного индекса загрязнения [4]. Она заключается в построении функции $F(t_{\text{пр}}/V_{\text{пр}}, V)$ (здесь $t_{\text{пр}}$ – продолжительность фильтрации пробы воды объемом $V_{\text{пр}}$). При этом шаг измерения $t_{\text{пр}}/V_{\text{пр}}$ составляет 30 с, а продолжительность измерения – 15 мин. Таким образом, MFI является методом более точной аппроксимации по сравнению с коллоидным индексом (1), так как измерения выполняются с более частым шагом. Из метода измерения MFI для линейной аппроксимации F следует, что этот индекс является простейшей аппроксимацией производной от $1/Q$:

$$MFI = \frac{d\left(\frac{1}{Q}\right)}{dV}. \quad (25)$$

Так как $dV = Qdt$, после дифференцирования можно записать

$$MFI = -\frac{1}{Q^2} \frac{dQ}{dV}. \quad (26)$$

Сравнивая (16), (12) с (25), (26), можно получить

$$MFI = KI_Q / (Q^2 c). \quad (27)$$

Из выражений (7) и (14) была установлена линейная связь между коллоидным индексом KI и концентрацией взвешенных частиц в воде. Если предположить, что для количества коллоидных частиц $n_{\text{кол}}$ выполняется соотношение (7), из формулы (22) следует, что $MFI \sim n_{\text{кол}} Q^{-2}$. Это означает, что измерение MFI, в отличие от $KI \sim n_{\text{кол}}$, не является универсальным методом, так как существенно зависит от абсолютного значения Q .

ВЫВОДЫ

1. Измерения, выполненные в линейной области уменьшения расхода отфильтрованной воды, хорошо описывают соответствие концентрации задержанных на мембране взвешенных частиц коллоидному индексу.

2. Обобщение стандартной методики на измерение коллоидного индекса в линейной области уменьшения расхода воды с использованием более точных методов измерения и автоматизации позволяет получать реальные значения обобщенного коллоидного индекса для более достоверного прогноза устойчивости работы установок обратного осмоса.

3. В начальной фазе измерения коллоидного индекса (фильтрация) обнаружен скачок в падении производительности, характерный для всех экспериментов независимо от качества исследуемой воды. Этот аппаратный эффект должен быть исключен из результатов измерения, а в методику расчета необходимо внести соответствующие корректировки.

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. **Schippers Jan C., Salinas-Rodriguez S.G., Kennedy M.D.** Why MFI is edging SDI as a fouling index. (TU Delft), UNESCO-IHE, and Siobhan Boerlage, Boerlage Consulting. Desalination & Water Reuse. May–June 2014. P. 28–32.
3. **ASTM D4189-07.** Standard Test Method for Silt Density Index (SDI) of Water. ASTM International, 2014. <https://www.astm.org/Standards/D4189.htm>
4. **ASTM D8002-15.** Standard Test Method for Modified Fouling Index (MFI-0.45) of Water. ASTM International, 2015. <https://www.astm.org/Standards/D8002.htm>

New Method for Measuring Colloidal Index

A. A. Panteleev^{a, b}, A. A. Smirnov^{b, *}, V. B. Smirnov^b, and V. P. Kovalenko^{b, **}

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

^b Research and Production Company Mediana-Filter, Moscow, 105318 Russia

*e-mail: Smirnov_A@mediana-filter.ru

**e-mail: Kovalenko@mediana-filter.ru

Abstract—The colloidal index (CI) (Silt Density Index—SDI) is an important integral indicator of the quality of water prepared for reverse osmosis plants (ROP). To date, this is the only indicator that allows us to assess the likelihood of the membrane unit's contamination with colloids and suspended solids contained in the source water. It is shown that the new method for measuring the colloidal index, in contrast to the standard one, makes it possible to eliminate the contribution of nonlinearities to the description of water quality and it has a smaller error in a wide range of concentrations of suspended particles, which provides a more accurate prediction of potential contamination of reverse osmosis plants. Based on the differential form of the CI, a generalization of the standard technique for measuring the colloidal index in the linear region of decreasing the water flow rate using more accurate measurement and automation methods is presented. For waters with a low content of suspended and colloidal particles, the water flow through the microfilter changes slowly; therefore, to notice a drop in its performance, a considerable observation time is required (approximately 15 min). Attempts to measure CI on water with a high content of colloidal particles and suspended solids show their practical impossibility. The data of experimental studies are presented, confirming the correctness and advantages of the methodology for measuring the colloidal index demonstrated in the article. Comparison of methods for calculating the generalized colloidal index presented in the article and the modified fouling index (MFI) is performed. It is shown that the colloidal index is proportional to the concentration of suspended particles, and the MFI additionally contains a normalization factor inversely proportional to the filtrate velocity. In practice, the results presented in the article are likely to make it possible to calculate the load on reverse osmosis plants and to reveal the correlation of the frequency of chemical purification. In the course of the experiments, the phenomenon of an initial sharp drop in the flow rate of the filtrate through the filter was discovered, which is still awaiting its explanation.

Keywords: colloidal particles, water quality indicators, colloidal index, reverse osmosis unit, membrane filter, microfilter performance