Соловьева Е.А., Тарасов Д.С.

Мембранная технология в биологической очистке сточных вод

*Петербургский Государственный Университет Путей Сообщения имени
Императора Александра I
(Россия, Санкт-Петербург)*

doi: 10.18411/sr-10-12-2019-08

idsp: sciencerussia-10-12-2019-08

Аннотация

Мембранная фильтрация позволяет повысить дозу ила в блоке биологической очистки, благодаря чему повышается скорость окисления органических загрязнений. Является основным современным направлением в развитии способа очистки сточных вод. Для оперативного управления процессом и ликвидации негативных явлений необходимо формировать гибкие технологии очистки.

Ключевые слова: мембранный биореактор, МБР, нитрификация, денитрификация, очистка сточных вод, эффективность, очистные сооружения, биологическая очистка, городские сточные воды, технологии очистки.

В настоящее время наблюдается тенденция широкого внедрения МБР (мембранные биореакторы) в практику очистки сточных вод. Это требует всесторонних исследований теоретических и практических аспектов работы МБР.

Для целей глубокой очистки сточных вод применяют мембраны, действующие в режиме микрофильтрации [1,6]. Чаще всего мембраны изготавливают из керамических и пластмассовых материалов. Необходимо учитывать устойчивость используемого сырья к воздействию перепадов температур, pH, концентрации окислителей, а также кислот, щелочей, используемых при ее регенерации.

Течение ньютоновских жидкостей в слое пористых тел описывают зависимостями, базирующимися на законе Дарси для ламинарного режима. Появление признаков турбулентного течения относится к весьма крупным порам (более 4 мкм). Влияние повышенной вязкости жидкости проявляется только для концентрированных смесей типа осадков сточных вод при концентрации их 20-40 кг/м³.

Расход фильтрата q_s , отнесенный к площади фильтрующей поверхности, составит:

$$q_s = \frac{\Delta P}{\eta_T \cdot R_{\Pi}}, \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}, \quad (1)$$

где ΔP – разность давлений, Па; η_T – динамическая вязкость, Па·с (с учетом температуры воды); R_{Π} – полное сопротивление мембраны, 1/м.

В величину полного сопротивления входят сопротивление мембраны R_m и сопротивление слоя осадка на поверхности мембран R_{oc} .

$$R_{\Pi} = R_m + R_{oc}. \quad (2)$$

По мере накопления осадка сопротивление увеличивается, снижается расход фильтрата.

На рис. 1 [2,3,4] показаны кривые зависимости выхода фильтрата при фильтрации жидкости одинакового состава – кривая ABCD при давлении P и кривая $A_1B_1C_1D_1$ при давлении P_1 .

Участки АВ и A_1B_1 (в виде прямых линий) указывают диапазон действия закона Козени-Кармана. ($P=0,5$ бар).

$$R_{\Pi} = \frac{2 \cdot P \cdot S}{\eta_T \cdot c^{en}}, \quad (3)$$

где c^{en} – концентрация взвешенных веществ в поступающей жидкости, г/л, S – поверхность фильтрации, m^2 , α , α_1 – угол наклона прямой выхода фильтрата в ходе опыта на фильтруемость (на рис. 1 это $tg\ a$ и $tg\ a_1$).

Рисунок 1 – Процесс фильтрации при разных значениях давления

Вид линий выхода фильтрата с использованием чистой воды (дистиллята) и испытуемой жидкости показан на рис 2.

Сопротивление слоя осадка, отнесенное к весу твердой фазы:

$$\alpha_{oc} = R_{oc} \frac{S}{V \cdot c^{en}}, \text{ м/кг}, \quad (4)$$

где R_{oc} – сопротивление осадка, V – объем фильтрата.

Хронический опыт фильтрации (до полного забивания мембраны) показан на рис. 2. Кривая 1 выхода количества фильтрата обычно представляется в виде прямой 2, тангенс угла наклона которой используется для расчета удельного сопротивления осадка и определяется по времени выхода фильтрата $\frac{dt}{dV}$.

Рисунок 2 – Изменение расхода фильтрата (q_s) и полного сопротивления мембраны (R_n) в ходе хронического цикла фильтрации при ΔP и $T = \text{const}$, 1 – фактический объем фильтрата, 2 – линейная аппроксимация выхода объема фильтрата, 3 – изменение полного сопротивления фильтрации. Интервалы: $0-t_1$ – накопление осадка, t_1-t_2 – фильтрация через слой осадка, t_2-t_3 – затухание фильтрации.

Участок до t_1 – кривая разгона, участок t_1-t_2 – рабочий, результативный, а участок t_2-t_3 – затухание фильтрации вследствие полного забивания пор фильтра. На участке t_1-t_2 выход фильтрата изображается в виде прямой линии (линия 2). Результаты опытов оцениваются следующим образом [5,6]. Интенсивность потока фильтрата:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\eta_T \cdot R_m}{\Delta P \cdot S} + \frac{\eta_T \cdot \alpha_{oc} \cdot c^{en}}{\Delta P \cdot S^2} \cdot V, \quad (5)$$

где α_{oc} – сопротивление слоя осадка, отнесенное к весу твердой фазы, м/кг, V – объем фильтрата, м³.

Первое слагаемое является характеристикой мембраны (сопротивление R_m), а второе характеристикой слоя осадка на мембране. Получаем:

$$t = \frac{\eta_T \cdot R_m}{\Delta P \cdot S} V + \frac{\eta_T \cdot \alpha_{oc} \cdot c^{en}}{\Delta P \cdot S^2} \cdot \frac{V^2}{2}, \quad (6)$$

где R_m – сопротивления чистой мембраны.

Произведение $\alpha_{oc} \cdot c^{en}$ составляет сопротивление слоя твердой фазы R_ϕ .

$$R_\phi = \frac{d\left(\frac{t}{V}\right)}{dV} \cdot \frac{2\Delta P \cdot S^2}{\eta_T}. \quad (7)$$

Значение $d\left(\frac{t}{V}\right)$ определяются по линиям влагоотдачи:

$$\frac{t_2 V_n - t_1 V_{n-1}}{V_n - V_{n-1}} = \frac{\Delta\left(\frac{t}{V}\right)}{\Delta V}. \quad (8)$$

Среднее значение по n точкам опыта:

$$\frac{\sum \left[\Delta\left(\frac{t}{V}\right) \right]}{n}. \quad (9)$$

Методика хронического опыта положена в основу определения удельного сопротивления осадка фильтрации. Согласно действующей методике (при $P = 0,5$ бар и $T = 20$ °C):

$$\alpha_{oc} = R_{oc} \frac{S}{V \cdot c^{en}}, \frac{\text{м}}{\text{кг}}. \quad (10)$$

Удельное сопротивление осадков сточных вод колеблется в пределах от $(200-1000) \cdot 10^{10}$ до $(2000-5000) \cdot 10^{10}$ см/г. Для обезвоживания осадков фильтрацией необходимо снизить удельное сопротивление до $(20-50) \cdot 10^{10}$ см/г. Средняя величина проницаемости мембран с осадком, согласно рис. 3 составит:

$$q_s^{cp} = \frac{q_s^{t1} - q_s^{t2}}{2}, \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \text{с}}, \quad (11)$$

где q_s^{cp} – стандартная проницаемость, приводимая в паспортных данных при $\Delta P = 0,5$ бар и $T = 20$ °C. Изменение давления в диапазоне низких нагрузок по твердой фазе прямо пропорционально влияет на поток фильтрата:

$$q_{sp} = q_s^{cp} \frac{P_1}{P_2}. \quad (12)$$

При высокой нагрузке по взвешенным веществам и сжимаемому осадку прямая пропорция изменяется:

$$q_{sp} = q_s^{cp} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^x. \quad (13)$$

Хронический опыт предполагает постепенное накопление осадка на поверхности мембран без нарушения его структуры или удаления (частичного или полного). Для интенсификации процесса фильтрации применяют частичное накопление слоя осадка с циклическим его удалением.

Основной параметр для остановки фильтроцикла и проведения промывки мембраны – снижение проницаемости и потока фильтрата. В конкретных условиях низший предел снижения проницаемости определяют сравнительными опытами с

оценкой оптимальных условий фильтрации. Отмывку мембран от осадка обычно ведут с помощью механического воздействия – аэрацией, механическим перемешиванием. Чаще используют крупнопузырчатую аэрацию.

Сопротивление слоя осадка:

$$R_{oc} = \alpha_{oc} \cdot c^{en} \frac{V}{S}. \quad (14)$$

В ином виде, учитывая, что $c^{en} \cdot V = G_{oc}$ (количество загрязнений, принесенных потоком воды):

$$R_{oc} = \alpha_{oc} \frac{G_{oc}}{S}. \quad (15)$$

Множитель $\frac{G_{oc}}{S}$ представляет собой количество загрязнений (по весу твердой фазы), отложившихся на единице площади мембраны.

Хронический «тупиковый» опыт предполагает достижение интенсивного забивания мембраны с резким снижением ее пропускной способности (рис. 3).

Рисунок 3. Изменение q_s и R_{π} в ходе циклической фильтрации и отмывки мембран
1 – выход фильтрата, 2 – линейная аппроксимация выхода объема фильтрата, 3 – изменение полного сопротивления фильтрации. Интервалы: $0-t_1$ – фильтрация, t_1-t_2 – отмывка мембраны

Измерив снижение проницаемости в течение ряда опытов Δq_s , определяют единичную величину и аппроксимацией по n значений кривую снижения до минимально допустимой величины в пределах от 20 до 50%. Тем самым оценивается продолжительность цикла фильтрации с промежуточной очисткой мембран [5].

Хронический опыт применяют при определении влагоотдачи осадков сточных вод. Удельное сопротивление в режимах ультрафильтрации составляет $(100-200) \cdot 10^{12}$ см/г, для осадков сточных вод и активного ила $(200-1000) \cdot 10^{10}$ см/г.

Интегрируя уравнение (4) при постоянном давлении ΔP и температуре T , получаем

$$\frac{t}{V} = \frac{\eta_T \cdot R_m}{\Delta P \cdot S} + \frac{\eta_T \cdot \alpha_{oc} \cdot c^{en}}{2 \cdot \Delta P \cdot S^2} V, \quad (16)$$

Произведение $\alpha_{oc} \cdot c^{en}$ составляет сопротивление слоя твердой фазы R_{ϕ} :

$$R_{\phi} = \frac{d\left(\frac{t}{V}\right)}{dV} \cdot \frac{2\Delta P \cdot S^2}{\eta_T}. \quad (17)$$

Значение $d\left(\frac{t}{V}\right)$ определяются по линиям влагоотдачи:

$$R_{\phi} = \frac{t_2 V_n - t_1 V_{n-1}}{V_n - V_{n-1}} = \frac{\Delta \left(\frac{t}{V} \right)}{\Delta V}. \quad (18)$$

Среднее значение по n точкам опыта:

$$R_{\phi}^{\text{cp}} = \frac{\sum \left[\Delta \left(\frac{t}{V} \right) \right]}{n}. \quad (19)$$

Технология фильтрации циклического действия обычно применяется с использованием полуволоконных мембран.

Зачастую на практике из-за различных условий отведения и очистки сточных вод, состава активного ила и структуры мембран, выявляется несоответствие паспортных данных мембран и фактической пропускной способности модульных установок, построенной на их основе.

Необходимо разработать стандартную процедуру испытаний модулей, предлагаемых к установке, и в дальнейшем придерживаться этой процедуры, в условиях действующих очистных станций.

Вариантом стандартной процедуры испытания мембранных модулей могут быть лабораторные испытания на приборах и макетах, имитирующих фильтрацию иловой смеси, один из которых и был предложен в данной статье.

Согласно предложенной методике были успешно проведены лабораторные испытания на очистных сооружениях г. Санкт-Петербурга. Полученные результаты определили направление дальнейшей работы.

1. Б. Г. Мишуков. Мембранные биологические реакторы для глубокой очистки сточных вод: учеб. пособие / Б. Г. Мишуков, Е. А. Соловьева. - СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2017. - 64 с.
2. Технический справочник по обработке воды: в 2 т.: пер. с фр. - СПб.: Новый журнал, 2007. - Т.1. - 774 с.
3. Технический справочник по обработке воды: в 2 т.: пер. с фр. - СПб.: Новый журнал, 2007. - Т.2. - 1696 с.
4. Соловьева Е.А. Удаление азота и фосфора из городских сточных вод. Технологии удаления азота и фосфора в комплексе по очистке сточных вод и обработке осадка / Е.А. Соловьева. Изд. LAP LAMBERT Academic Publishing (ISBN-13:978-3-8465-0130-6). Германия, 2011. - 292 с.
5. Simon Judd. The MBR book: Principles and Application of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment. - ELSEVIER, 2006. - 310 с.
6. Kerry J. Howe, Mark M. Clark. Влияние коагуляционной предочистки воды на процесс мембранной фильтрации // Вода: технология и экология. - 2007. - № 2. - С. 18-44.

Шаламова О.А., Ядрошникова Г.Г., Самойлова Е.В., Юркова Е.О.
Имитационное моделирование ремонтно-сервисного производства в среде
AnyLogic

Сибирский государственный университет путей сообщения
(Россия, Новосибирск)

doi: 10.18411/sr-10-12-2019-09

idsp: sciencerrussia-10-12-2019-09

Аннотация

Анализ функционирования работы ремонтно-сервисного предприятия по оказанию услуг с целью дальнейшей оптимизации работы может быть выполнено методом построения имитационной модели данного предприятия. Модель определяется большим количеством факторов, имеющих вероятностный характер и в той или иной