

3. Горелик, Л. Б., Соловьев, С. В. Биофизические основы мембранных технологий в водоочистке // Журнал прикладной биохимии и микробиологии. 2017. № 53(1).С. 40-49.
4. Жданов, С. П., Марков, А. В. Применение мембранных технологий в водоподготовке // Химическая техника и водоочистка. 2019.№ 82(5). С. 243-251.
5. Белов, А. В., Колесников, А. А. Использование мембранных методов для очистки воды от микроорганизмов // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 89(5). С 59-65.

УДК 628.16

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕМБРАННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ

*А. О. Сухова¹, И. В. Хорохорина², А. В. Нехорошева³, Ю. С. Савченкова⁴,
А. Н. Корнеев⁵*

¹ Доцент, Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ), Тамбов, Россия, apill@yandex.ru

² Доцент, ТГТУ, Тамбов, Россия, kotelnikovirina@yandex.ru

³ ТГТУ, Тамбов, Россия, nehorosheva126@gmail.com

⁴ ТГТУ, Тамбов, Россия, yulya_medvedeva_2015@inbox.ru

⁵ ТГТУ, Тамбов, Россия, artemspartaks@mail.ru

Аннотация

В данной статье рассмотрено мембранное моделирование, как оптимизация процесса фильтрации.

Ключевые слова: мембранные технологии, мембранное моделирование, фильтрация.

MODELING OF PROCESSES OF MEMBRANE SEPARATION OF WASTEWATER AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS

*A. O. Sukhova¹, I. V. Khorokhorina², A. V. Nekhorosheva³, Y. S. Savchenkova⁴,
A. N. Korneev⁵*

Abstract

This article discusses membrane modeling as an optimization of the filtration process.

Keywords: membrane technologies, membrane modeling, filtration.

Введение. Система моделирования позволит спрогнозировать производительность мембраны, но и также поможет оптимизировать процесс разделения. Точное моделирование прольет свет на механизмы разделения во время филь-

трации, которые могут предоставить существенные возможности для повышения производительности и экономии средств. Таким образом, моделирование является неотъемлемой частью мембранных исследований и становится все более необходимым инструментом и для промышленности.

Дефицит чистой воды является масштабной и растущей проблемой во всем мире; передовые технологии очистки воды станут незаменимой основой, необходимой для удовлетворения наших будущих потребностей. Благодаря инновационному изготовлению, методам обработки, выбору материалов и систематическим исследованиям для определения ключевых параметров (влияние мембранных структур, пор, шероховатости поверхности и заряда, а также понимание / прогнозирование взаимодействий между растворенными веществами и мембраной), исследования и разработки мембранных технологий обещают сыграть ключевую роль в решении этой глобальной проблемы воды.

В целом моделирование процессов фильтрации можно разделить на три уровня – молекулярное, мезомасштабное и макромасштабное моделирование. Макромасштабное моделирование, которое выходит за рамки данного обзора, касается проектирования и оптимизации технологических параметров мембранных фильтрующих модулей для применения, например, на установках очистки сточных вод [1].

Мезомасштабное моделирование (например, на уровне модуля с одним фильтром) обычно имеет дело с потоком, отбраковкой, потоком и жидкостным переносом. Как обсуждалось, мембраны с различными структурами могут быть изготовлены с использованием различных синтетических методов и материалов. В случае процессов UF и MF, когда мембрана пористая, а поток воды ламинарный (слои потока движутся по правильной траектории или плавно накладываются друг на друга см. турбулентное течение, в котором характер течения включает нерегулярные колебания и зависит от времени) простая гидродинамическая теория может быть применена и смоделирована с использованием эмпирических уравнений: закона Дарси, уравнения Хагена-Пуазейля и Кармана-Козени. Применение конкретного уравнения зависит от факторов структуры пор, таких как размер пор, форма, пористость, средняя длина капилляров, распределение пор по размерам, площадь поверхности и извитость.

Закон, управляющий потоком жидкости, создаваемым с помощью пористых пробок из песка между двумя резервуарами для жидкости, был разработан Дарси. Он заметил, что скорость потока прямо пропорциональна гидростатическому давлению по длине мембраны, состоящей из песка. Закон Гарри выражает, что средняя скорость u через пористую мембрану имеет следующие соотношения:

$$\bar{u} = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

где k – проницаемость пористой мембраны, а μ – вязкость жидкости. Единицей измерения k является Дарси (расход $1 \text{ см}^3/\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^2$ с градиентом давления 1

атм/см⁻¹ для вязкости жидкости 1 сР), и k зависит от факторов структуры пор, таких как пористость и извилистость.

Уравнение (1) представляет процесс, управляемый давлением через поры мембраны (поток, обусловленный диффузией, который используется в системах обратного осмоса, незначителен), и это приложенное давление является движущей силой для транспортировки жидкости через пористую мембрану [2].

В случае цилиндрической пористой структуры (рисунок 1) для характеристики расхода используется уравнение Хагена–Пуазейля, описывающее ламинарное течение в трубе:

$$v = \frac{\Delta p}{R} \quad (2)$$

где R – вязкостное сопротивление вдоль трубы, показанное на рисунке 1:

$$R = \frac{8\eta L}{\pi r^4} \quad (3)$$

где L , r и η – длина и радиус трубки и вязкость жидкости соответственно.

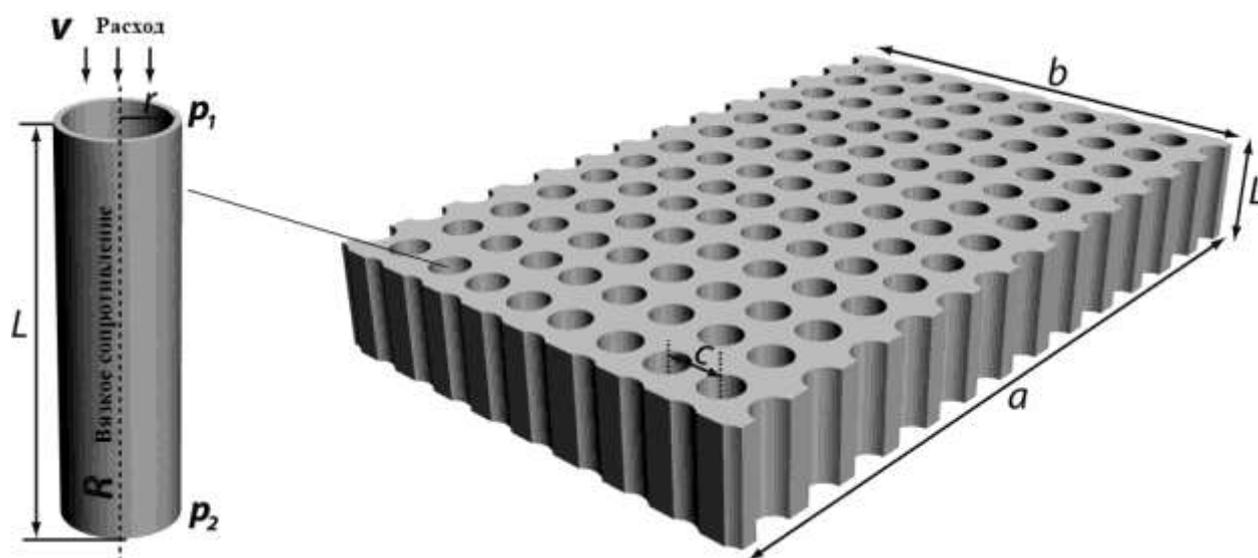


Рисунок 1 – Пористая мембрана, состоящая из цилиндрических капилляров

Уравнение (3) аналогично электрической цепи, в которой протекание тока пропорционально потенциалу на сопротивлении ($I = V/R$). Электрическая энергия рассеивается, когда электрический ток протекает через резистор; точно так же энергия рассеивается, когда жидкость течет по трубе. В электрической цепи это проявляется в падении потенциала на резисторе; в случае трубы поток вызывает перепад давления вдоль трубы. Расход на единицу площади (т. е. поток) представляет собой сумму всех потоков отдельных цилиндрических капилляров одинакового размера. Поэтому умножаем уравнение (2) на пористость поверхности, ε (объем пустот/общий объем):

$$v = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\eta L} \varepsilon \quad (4)$$

$\frac{\Delta p}{L}$ берется как градиент давления в капилляре, как видно из закона Дарси.

Следует отметить, что скорость потока чувствительна к радиусу капилляра. Например, типичный диаметр пор МФ-мембраны находится в диапазоне 0,1–5 мкм, что примерно в 100 раз больше, чем средний диаметр пор УФ-мембраны. Это означает, что проницаемость (поток на единицу давления разности) в МФ значительно выше, чем в УФ, поэтому требуются другие рабочие давления [3].

Для пористых сред с некруглым поперечным сечением Козени разработал гидродинамическое уравнение, основанное на предположении, что путь потока является случайным и извилистым. Используя понятие гидравлического радиуса, уравнение Кармана–Козени имеет вид:

$$u = \frac{\varepsilon^3}{K\mu(1-\varepsilon)^2 S_0} \frac{\Delta p}{L} \quad (5)$$

K называется константой Козени, а S_0 – удельной поверхностью пористой среды (площадь поверхности пористой среды/объем твердых частиц пористой среды). Уравнение (5) широко используется для мембраны, состоящей из плотно упакованных сфер. Наконец, проницаемость по Дарси k принимает вид:

$$k = \frac{\varepsilon^3}{K(1-\varepsilon)^2 S_0^2} \quad (6)$$

Как упоминалось ранее, k зависит от факторов пористой структуры, таких как пористость и извилистость, которые являются наиболее часто используемыми параметрами для характеристики пористых мембран. Пористость мембраны представляет собой объемную долю всей мембраны, а типичные значения пористости мембран УФ и МФ находятся в диапазоне от 0,3 до 0,7. Извилистость определяется как отношение средней длины извилистого пути, который должна пройти жидкость, чтобы пересечь мембрану до толщины мембраны [4].

На практике эти требования, предъявляемые к мембранной технологии очистки воды, являются агрессивными. Значительный прогресс был достигнут в разработке новых методов изготовления для адаптации структуры пор мембран, свойств поверхности и морфологии. Несмотря на недавние достижения в синтезе новых мембранных материалов, методах модификации поверхности/функционализации и оптимизации конструкции и условий эксплуатации, сохраняется настоятельная необходимость в производстве надежных мембран с заданными характеристиками, особенно для решения проблем загрязнения мембран (биообрастание, образование накипи, органическое и коллоидное загрязнение) [5]. Предотвращение загрязнения остается важной задачей. Нере-

шенная проблема в очистке воды приводит к высоким эксплуатационным затратам и низкой эффективности продукта.

Чтобы обеспечить прогресс следующего поколения в мембранной технологии, могут потребоваться инновационные методы проектирования поверхности и изготовления для создания многофункциональных мембран с исключительными противообрастающими, антимикробными и фотокаталитическими свойствами. В этом отношении композитные мембранные материалы являются многообещающими кандидатами, особенно те, которые включают функциональные наноматериалы в «умную» полимерную матрицу. Необходимо обеспечить глубокое понимание их физико-химических свойств и разработку контролируемых взаимодействий между наноматериалами и хозяевами, чтобы повысить воспроизводимость производства и эксплуатационные характеристики.

Глубокое понимание механизмов переноса воды и растворенных веществ в мембране, а также роли микроскопических свойств мембраны в макроскопических характеристиках все еще остается недостижимым. Кроме того, необходимо создать общие рамки для исследования/оценки/управления рисками. Необходимо оценить и смягчить воздействие этих наноматериалов на окружающую среду и токсикологию при длительном использовании[6].

Заключение. Дефицит чистой воды является масштабной и растущей проблемой во всем мире; передовые технологии очистки воды станут незаменимой основой, необходимой для удовлетворения наших будущих потребностей. Благодаря инновационному изготовлению, методам обработки, выбору материалов и систематическим исследованиям для определения ключевых параметров (влияние мембранных структур, пор, шероховатости поверхности и заряда, а также понимание/прогнозирование взаимодействий между растворенными веществами и мембраной), исследования и разработки мембранных технологий обещают сыграть ключевую роль в решении этой глобальной проблемы воды.

Список цитированных источников

1. Чередниченко, В. И., Серебренников, Д. А. Мембранные технологии в обработке воды: теория и практика// Водоснабжение и санитарная техника. 2021. № 86(6).С. 40-49.
2. Коновалов, Д. В., Соловьев, А. Н. Моделирование мембранных процессов в системах водоподготовки // Экологическая безопасность и ресурсосбережение. 2019. № 3(12). С. 18-25.
3. Петров, В. В., Зайцев, А. М. Моделирование мембранных процессов в обработке воды. СПб.: Научное издательство "Гидротерм", 2018. – 196 с.
4. Тимофеев, А. В., Ларионов, Д. С. Молекулярное моделирование мембранных процессов в очистке воды // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 87(10). С. 49-55.
5. Григорьев, В. И., Павлов, Д. С. Биофизические аспекты мембранных методов очистки воды // Водоочистка и водоснабжение.2020.№ 65(8). С. 32-40.
6. Сорокин, В. М., & Ковалев, Д. В. Использование мембранных технологий для очистки воды от бактерий и вирусов // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 88(3). С. 45-52.