

84-31  
Форм 84,31

УДК 502

БГП  
2



МОДЕЛЬ ОДНОМЕРНОЙ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ И ОДНОКОМПОНЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ В БИОПЛЕНКАХ БИОФИЛЬТРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Доктор техн. наук, профессор **Дозовенский В.В.**,  
(Московский государственный университет леса),  
кандидат техн. наук, доцент **Лебедев В.В.**,  
(Российский государственный университет туризма и сервиса),  
кандидат техн. наук, доцент **Черкина В.М.**,  
(Московский государственный строительный университет),  
**Дутин Г.С.**

(Винити РАН, зам. Зав. отделом транспорта)

Рус.  
Рез. англ.

MODEL OF ONE-DIMENSIONAL TWO-COMPONENTAL AND UNICOMPONENTAL DIFFUSION IN BIOFILMS OF BIOFILTERS FOR SEWAGE TREATMENT

Doctor (Tech.), Professor **Lozovetsky V.V.**,  
(Moscow State University of Forests),  
Ph.D (Tech.) **Lebedev V.V.**,  
(Moscow State University of Tourism and Service),  
Ph.D. (Tech.) **Cherkina V.M.**,  
(Moscow State building University),  
**Dugin G.S.**,  
(VINITI RAS)

Очистка, сточные воды, биофильтр, биопленка

*Clearing, sewage, the biofilter, a biofilm, diffusion, biochemical assimilation of pollution*

Предложена математическая модель однокомпонентной диффузии в биопленке, которая может быть эффективно использована при проектировании биофильтров. Математическая функция для определения потока вещества на границе биопленки хорошо адаптируется для описания экспериментальных данных по биофильтрации при любых, в том числе и переменных, значениях порядка реакции изъятия вещества биопленками.

*In article the mathematical model of unicomponent diffusion in a biofilm which can be effectively used at designing of biofilters is offered. Mathematical function for definition of a stream of substance on biofilm border well adapts for the description of experimental data on a biofiltration at any, including variables, values of an order of reaction of withdrawal of substance at bioplanks.*

Биофильтрация – один из самых широко распространенных в природе процессов очистки природных вод. В природных водных и почвенных экологических нишах развиваются различные сообщества микроорганизмов, формирующие плотные по физической организации структуры – гранулы, биопленки, маты, которые осуществляют изъятие из воды и ассимиляцию загрязнений в основном органической природы. Процессы переноса веществ в биопленку в совокупности с их ассимиляцией в целом составляют сущность процесса биофильтрации [1, 2].

В биофильтрах для очистки сточных вод создают условия для селективной способности иммобилизованных микроорганизмов, способных прикрепляться к подложке (носителю, загрузке и т.п.), формируя биопленку, которая впоследствии осуществляет очистку воды.

Процесс биофильтрации включает в себя ряд стадий, которые включают различные виды физико-биохимических процессов:

1. конвективный перенос веществ из потока жидкости к поверхности биопленки;
2. процессы осаждения нерастворимых частиц загрязнений на поверхности биопленки, которые можно охарактеризовать как сорбционный захват;
3. процесс гидродинамического разложения захваченных частиц;
4. перенос растворенных веществ внутрь биопленки;
5. ассимиляция веществ в процессах внутриклеточного метаболизма.

Перенос вещества внутрь биопленки происходит посредством диффузии.

Диффузионный перенос и кинетика внутриклеточной ассимиляции занимают в общей схеме процесса центральное место, определяя общую скорость процесса биофильтрации. Если диффузия определяет конечную скорость переноса вещества в биопленке, то допустимо в модели учитывать только диффузионный перенос. В большинстве случаев такое допущение, по-видимому, приемлемо. По-видимому, также допустимо одномерное приближение, учитывающее только диффузионный перенос поперек биопленки, поскольку толщина биопленки предстает, как правило, бесконечно малую величину по отношению к длине пути, проходного жидкостью в биофильтре.

На рис. 1 представлена расчётная схема, на основании которой формируется модель одномерной двухкомпонентной диффузии.

Модель одномерной диффузии в биопленке предопределяет направленность потока диффундирующего компонента перпендикулярно стенке подложки – в направлении оси  $x$ . Соответственно, в противоположном направлении – от стенки возникает градиент концентрации: концентрация компонентов убывает от поверхности биопленки к стенке ( $s_0 > s_w$  и  $O_{0w} > O_{sw}$ ). Перенос вещества компонентов вдоль поверхности биопленки осуществляется лишь конвективно в потоке жидкости. В качестве условий однозначности при решении задачи определяют следующие краевые условия. На поверхности подложки определяют условие равенства нулю потоков диффундирующих компонентов (граничное условие второго рода), поскольку стенка непроницаема для диффундирующих веществ. На внешней поверхности биопленки можно определить либо значенные концентрации диффундирующих компонентов (граничное условие первого рода), либо значение потока компонента, используя уравнение конвективной массоотдачи из ядра потока к поверхности биопленки (граничное условие третьего рода).

Клетки микробного консорциума биопленки функционируют, потребляя растворённые органические вещества и кислород (при аэробном метаболизме) из окружающей водной среды. Изъятие растворенных веществ осуществляется, в основном, посредством активного транспорта их через клеточные мембраны внутрь клеток, где и происходит их ассимиляция. Транспорт веществ во внешней по отношению к клеткам водной среде осуществляется посредством молекулярной диффузии в направлении убыли концентрации компонента. Таким образом, процесс клеточной ассимиляции определённых веществ, способствуя снижению их концентрации во внешней среде, обеспечивает необходимый для поддержания внешней диффузии градиент концентрации.

Предлагается рассмотреть адаптацию предлагаемой модели в виде:

$$N_j(s) = A \cdot \sqrt{s - B \cdot \ln \left( \frac{B + s}{B} \right)}$$

к описанию экспериментальных данных (11), имея в виду равенство  $N_j = r_n$ .

Подбор коэффициентов  $A$  и  $B$  методом минимизации суммы квадратов отклонений между значениями функций в указанном диапазоне изменения переменных дает значения:  $A = 0,187 \text{ г}^2/(\text{М}^2 \cdot \text{ч})$ ;  $B = 6,68 \text{ г/М}^2$ . При указанных значениях коэффициентов среднеквадратичное отклонение между сравниваемыми функциями

не превышает  $0,018 \text{ г/}(\text{М}^2 \cdot \text{ч})$ , причем подбор коэффициентов с большей точностью ведет к непрерывному снижению величины отклонения. На рис. 2 представлена графическая иллюстрация результатов сравнения моделей в указанном диапазоне концентраций при выбранных значениях коэффициентов. Результаты показывают, что предложенная модель хорошо адаптируется к описанию процессов с любыми порядками реакции изъятия веществ из жидкости в биопленку.

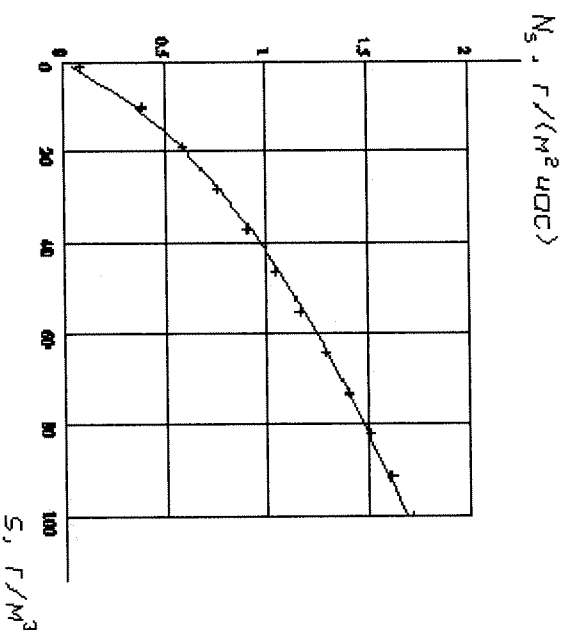


Рис. 2. Результаты адаптационного моделирования. Графики зависимости потока нитратов через границу денитрифицирующей биопленки от их концентрации в воде у внешней границы биопленки;

— функция  $N_s = 0,187 \cdot \sqrt{s - 6,68 \cdot \ln \left( 1 + \frac{s}{6,68} \right)}$ ;  
 + + + + — точки функции  $N_s = 0,09 \cdot s^{0,64}$ .

Представленные для сравнения модели имеют ряд общих недостатков. Например, сравниваемые модели не учитывают динамических процессов пространственно-временной успешности в биопленке.

Несомненно, требуется тщательная экспериментальная проверка применимости модели в различных биофильтрационных системах.

По нашему мнению эта модель может быть востребована специалистами в области биофильтрации, например, при обработке экспериментальных данных по кинетике процессов биофильтрации, например, для описания процессов в биофильтрах с затопленной загрузки.

### Выводы

- Предложенная модель обладает рядом отличительных черт, которые могут заслужить внимание специалистов:
- последовательно с теоретической точки зрения описывает процессы ассимиляции в диффузионной биопленке;
  - меняет представление о физической достижимости "нулевых" концентраций в ограниченных по толщине биопленках;
  - позволяет построить непрерывную функцию диффузионного потока вещества через границу биопленки во всем диапазоне концентраций;
  - позволяет моделировать непрерывные процессы в биопленках при перемешанных порядках реакций ассимиляции и изъятия компонентов;
  - хорошо адаптируется к имеющимся экспериментальным данным.

### Литература

1. Заваззин Г. А. Лекции по природоведческой микробиологии. — М.: Наука, 2004. — 348 с.
2. Хенце М., Армозе П., Дя-Кур-Янсен Й., Арван Э. «Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы». — М.: «Мир», 2006. — 480 с.