

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГАЗА

А. К. Митин¹, Н. Е. Николайкина¹, Н. А. Загустина²

*Кафедра «Процессы и аппараты химических технологий»,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный
университет» (1); Институт биохимии им. А. Н. Баха РАН (2),
г. Москва; mitin.rus@gmail.com*

Ключевые слова: биодеструкция; биологическая очистка газа; биофильтр; дихлорметан; методика расчета; микроорганизмы; насадка.

Аннотация: Представлен механизм процесса биологической очистки газа, заключающийся в последовательном прохождении веществом пленок системы. На основании представленного механизма разработана математическая модель процесса биофильтрации на примере биодеструкции дихлорметана. По результатам численных экспериментов предложена обобщенная методика инженерного расчета, заключающаяся в сравнении количества вещества, прошедшего через насадочный слой с биопленкой и подвергшегося биодеструкции.

Введение

Биологическая очистка (биофильтрация) газа, содержащего низкие и средние концентрации загрязняющих веществ, в частности летучие органические соединения, до 5000 мг/м³, при сравнении с альтернативными газоочистными методами (абсорбция, адсорбция, термическое и каталитическое обезвреживания, озонирование) обладает меньшими на порядок капитальными и эксплуатационными затратами. При этом метод биологической очистки газа не продуцирует вторичные загрязнения и является экологически безопасным, поскольку микроорганизмы могут окислять органические загрязняющие вещества, используемые ими в качестве субстрата, вплоть до углекислого газа и паров воды [1].

Однако широкого распространения на предприятиях России в качестве газоочистной системы биофильтрация не получила. В основном это связано с тем, что имеющиеся научно-технические достижения в этой области используются в странах ЕС, отличающихся более мягким климатом, в виде насыпных биофильтров с загрузкой (насадкой) природного происхождения: торф, опилки, куски коры, компост и т.п. [2]. Использование таких биофильтров, отличающихся малой производительностью и устроенных чаще на улице в виде открытой площадки для возможности формирования активного микробного сообщества естественным путем, на предприятиях России трудноосуществимо. При этом насадки природного происхождения обладают рядом недостатков: слеживаются с течением времени, что приводит к повышению гидравлического сопротивления и проскокам неочищенного газа, а также в связи с собственной биоактивностью могут служить средой обитания для микроорганизмов, являющихся антагонистами к активной биомассе, что снижает эффективность процесса биофильтрации. Но в связи с раз-

витием способов и механизмов иммобилизации микроорганизмов на поверхность насадок из искусственных материалов, обладающих высокоразвитой поверхностью, например, пенополиуретан, полиамид, поддержание их жизнедеятельности способствовало развитию и появлению новых биофильтрационных насадочных аппаратов с орошаемым слоем и системой поддержания активности микроорганизмов [3].

Описание режимов работы, аппаратного оформления таких биофильтров встречается достаточно редко, при этом отсутствуют инженерные методики расчета насадочных биофильтров. По анализу литературных данных [1, 4], представляющих математическое описание процесса биофильтрации, выявлено отсутствие в моделях общего коэффициента массопередачи, позволяющего рассчитать количество переданного через поверхность контакта вещества и далее геометрические размеры оборудования. В основном это связано со сложностью определения толщины и поверхности биопленки, которая в реальных условиях не соответствует поверхности насадки, а также трудностью использования понятия равновесной концентрации применительно к растущему слою биопленки. Таким образом, проведены серии опытов [5], и анализ общедоступных литературных данных, на основании которых предложены уточненный механизм процесса биофильтрации, структура математической модели и методика расчета насадочного биофильтра.

Механизм процесса биофильтрации

В соответствии с работами [1, 6] механизм процесса биофильтрации описывается переносом загрязняющего вещества (ЗВ) из газовой в жидкую фазу, затем процессом адсорбции в клетку и/или поверхность насадки. Отдельно рассматривается процесс биодegradации. В целом такой подход может быть описан рядом последовательных процессов, происходящих с ЗВ в фазах, присутствующих в системе. Однако при использовании инертной насадки, не обладающей хемосорбционными свойствами, стадия адсорбции может не учитываться в процессе биофильтрации. Проведенные серии экспериментов по выявлению гидродинамических и массообменных характеристик процесса биофильтрации [5] позволили выделить две основные фазы: подвижную газовую; неподвижную – влажную биопленку. Отметим, что наличие пленки жидкости на насадке с биопленкой уменьшает эффективность процесса биофильтрации, поскольку пленка жидкости представляет собой дополнительный барьер, который необходимо преодолеть диффундирующему ЗВ из газовой фазы через жидкую к биопленке. При этом жидкость необходима для поддержания жизнедеятельности микроорганизмов. В этой связи механизм переноса ЗВ может быть описан методами массопереноса. Внутри биопленки главную роль играет диффузия или скорость биодegradации. На рисунке 1 представлена схема механизмов процесса биофильтрации в соответ-



Рис. 1. Иерархическая модель механизмов процесса биофильтрации

ствии с предложенными уточнениями: I – фаза прикрепления микроорганизмов к поверхности насадки; II – образование и фаза роста биопленки; 1 – диффузия ЗВ в газовой фазе (не лимитирует процесс); 2 – переход ЗВ из газовой фазы во влажную биопленку (может лимитироваться 2.1 – 2.4): 2.1 – диффузия ЗВ во влажной биопленке к клеткам; 2.2 – биодеструкция ЗВ клетками; 2.3 – вывод продуктов жизнедеятельности клеток во влажную биопленку; 2.4 – выход продуктов жизнедеятельности микроорганизмов в окружающую среду; 3 – адсорбция ЗВ на поверхности инертных насадок отсутствует или пренебрежимо мала.

На основании изложенного выше механизма процесса биофилтрации запишем уравнения для расчета количества ЗВ, прошедшего через насадочный слой и подвергнувшегося биодegradации, используя основное уравнение массопередачи и уравнение Михаэлиса–Ментен, соответственно. Количество ЗВ M , кг/с, переносимого из газовой фазы во влажную биопленку (к микроорганизмам), можно записать уравнением

$$M = K_{\Gamma} F \Delta C_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где K_{Γ} – коэффициент массопередачи, выраженный через концентрацию газовой фазы, м/с; F – поверхность контакта фаз, м²; $\Delta C_{\text{ср}}$ – движущая сила процесса массопереноса, г/м³.

Количество ЗВ, подвергнувшегося деструкции в биопленке со скоростью биодegradации

$$R = \frac{D_{\text{био}}}{W_{\Gamma}} W_{\text{био}} F; \quad (2)$$

$$W_{\text{био}} = k X_{\text{био}} \frac{C_{\text{био}}}{K_{\text{M}} + C_{\text{био}}} F, \quad (3)$$

где $D_{\text{био}}$ – коэффициент диффузии ЗВ в биопленке, м²/с; $W_{\text{био}}$ – скорость биодegradации ЗВ в биопленке, г/(м³·с); W_{Γ} – скорость газового потока, м/с; $C_{\text{био}}$ – концентрация ЗВ в биопленке, г/м³; K_{M} – константа Михаэлиса–Ментен, г/м³; k – константа скорости биодegradации, 1/с; $X_{\text{био}}$ – концентрация биомассы, г/м³.

В уравнении (1) коэффициент массопередачи при использовании положения аддитивности фазовых сопротивлений в соответствии со стадийностью процесса биофилтрации может быть записан уравнением

$$K_{\Gamma} = \frac{1}{\beta_{\Gamma}} + \frac{m}{\beta_{\text{ж}}} + \frac{1}{\beta_{\text{био}}}, \quad (4)$$

где $\frac{1}{\beta_{\Gamma}}$, $\frac{m}{\beta_{\text{ж}}}$, $\frac{1}{\beta_{\text{био}}}$ – сопротивление массоотдаче в газовой фазе (не лимитирует процесс биофилтрации), в жидкой фазе (считаем, что пленка жидкости в модели процесса биофилтрации отсутствует, поскольку биопленка полностью смачивается) и во влажной биопленке соответственно, м/с; m – коэффициент распределения.

Микроорганизмы находятся на границе раздела фаз, при этом равновесие в системе не достигается в связи с постоянным поглощением ЗВ микроорганизмами. Тем самым движущая сила процесса массоотдачи может быть определена средней концентрацией ЗВ в газовой фазе и процесс биофилтрации может быть описан как поглощение ЗВ влажной биопленкой с микроорганизмами, лимитируемое стадией биодegradации, то есть значением коэффициента массоотдачи во влажной биопленке $\beta_{\text{био}}$, м/с, которое может быть рассчитано следующим образом:

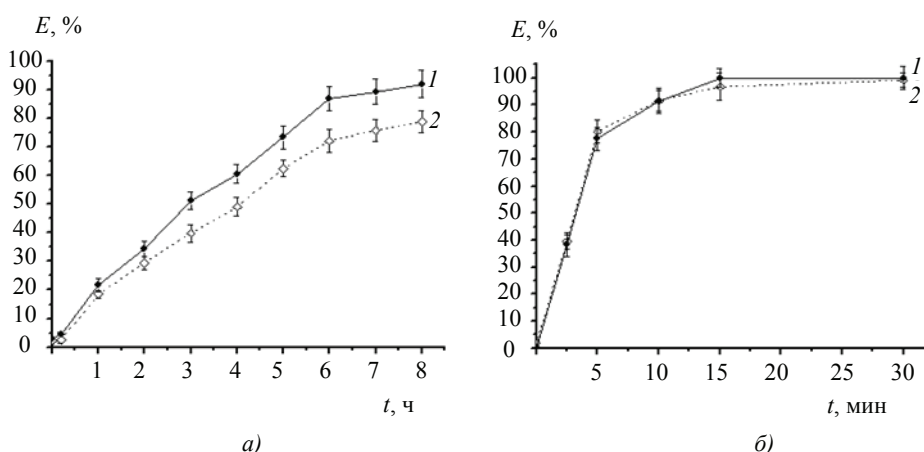


Рис. 2. Динамика потребления (1) и дегалогенирования (2) ДХМ при его деградации интактными клетками (а) и препаратом очищенной ДХМ-дегалогеназы *Mb. dichloromethanicum* DM4 (б)

– при лимитировании биodeградации скоростью реакции нулевой степени

$$\beta_{\text{био}} = \delta_{\text{био}} k_0 / C_{\text{био}}, \quad (5)$$

где k_0 – константа скорости нулевой степени – максимальная скорость биodeградации, г/(м³·с); $\delta_{\text{био}}$ – толщина биопленки, м;

– при лимитировании биodeградации скоростью реакции первой степени

$$\beta_{\text{био}} = \delta_{\text{био}} k_1, \quad (6)$$

где k_1 – кажущаяся кинетическая константа, 1/с;

– при лимитировании биodeградации диффузией ЗВ в биопленке

$$\beta_{\text{био}} = D_{\text{био}} / \delta_{\text{био}}. \quad (7)$$

Процесс лимитирован стадией биodeградации, поскольку коэффициенты массоотдачи в газовой и жидкой фазах на несколько порядков больше скорости биodeградации. Например, по работе [7] коэффициент абсорбции лежит в диапазоне 0,015...0,04 см/с, что соответствует времени сорбции 1...5 с. Проведенные в Институте биохимии им. А. Н. Баха опыты по потреблению микроорганизмами, находящимися в реакционной смеси в колбе, такого загрязнителя, как дихлорметан (ДХМ), показали время биodeградации от 5 минут. На рисунке 2 представлена динамика потребления и дегалогенирования ДХМ при его деградации интактными клетками и препаратом очищенной ДХМ-дегалогеназы *Mb. dichloromethanicum* DM4. При описании механизма биофильтрации через коэффициент массопередачи можно считать, что основное сопротивление массопередаче заключено в биопленке

$$\frac{1}{K_r} = \frac{1}{\beta_{\text{био}}}. \quad (8)$$

Модель процесса биофильтрации газовой смеси, содержащей дихлорметан

В соответствии с исследованиями, проведенными в Институте биохимии им. А. Н. Баха и др. [8], посредством моделирования в биопленке спроектирована внутриклеточная активность дегалогеназы для штаммов DM4 и DM11, биодеструкция и усвоение ДХМ, вывод продуктов биологической (ферментативной) реакции в окружающую среду.

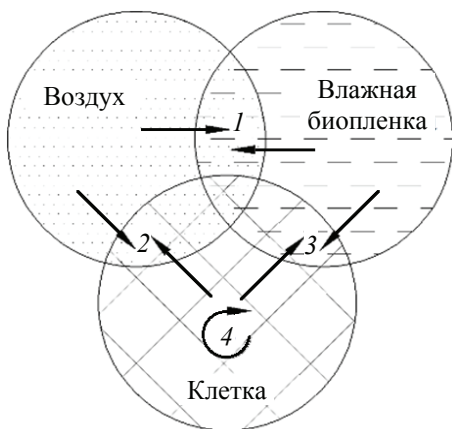


Рис. 3. Схема модели процесса биофильтрации при обмене веществами между:

1 – газовой фазой и влажной биопленкой; 2 – влажной биопленкой и клетками микроорганизмов; 3 – клетками и окружающей средой; 4 – реакция биодegradации в клетках

На рисунке 3 представлена схема процессов модели.

Структура модели процесса биофильтрации представлена системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dC_{\text{возд}}^{\text{ДХМ}}}{dt} = W_1 - \text{изменение концентрации ДХМ в очищаемом потоке воздуха;}$$

$$\frac{dC_{\text{био}}^{\text{ДХМ}}}{dt} = W_2 - \text{изменение концентрации ДХМ в клетках микроорганизмов-деструкторов (МД);}$$

$$\frac{dC_{\text{био}}^{\text{форм}}}{dt} = W_2 - W_3 - W_4 - \text{изменение концентрации формальдегида в клетках МД;}$$

$$\frac{dC_{\text{био}}^{\text{HCl}}}{dt} = 2W_2 - W_5 - \text{изменение концентрации соляной кислоты в клетках МД;}$$

$$\frac{dC_{\text{био}}^{\text{формиат}}}{dt} = W_3 - W_6 - \text{изменение концентрации формиата}$$

$$\text{в клетках МД; } \frac{dC_{\text{среда}}^{\text{HCl}}}{dt} = W_7 - \text{изменение концентрации соляной кислоты во влажной биопленке.}$$

Уравнения скоростей процессов составлены в соответствии с законом действующих масс: $W_1 = K_1 C_{\text{возд}}^{\text{ДХМ}}$ – скорость перехода количества ДХМ из воздуха во влажную биопленку; $W_2 = (W_{\text{max}}^{\text{форм}} C_{\text{био}}^{\text{ДХМ}}) / (K_M + C_{\text{био}}^{\text{ДХМ}}) F_{\text{pH}}$ – скорость работы фермента в соответствии с уравнением Михаэлиса–Ментен с учетом влияния pH-фактора; $W_3 = k_3 C_{\text{био}}^{\text{форм}}$ – скорость получения формиата из формальдегида; $W_4 = k_4 C_{\text{био}}^{\text{форм}}$ – скорость ассимиляции формальдегида; $W_5 = k_5 C_{\text{био}}^{\text{HCl}}$ – скорость вывода соляной кислоты из клетки; $W_6 = k_6 C_{\text{био}}^{\text{формиат}}$ – скорость ассимиляции формиата; $W_7 = W_5 - k_7 C_{\text{среда}}^{\text{HCl}}$ – скорость выводу соляной кислоты в окружающую

$$\text{среду; } F_{\text{pH}} = \frac{100}{W_{\text{max}} \text{pH}_{\text{max}}} 10^{\frac{\text{pK1}-\text{pH}}{(1+10^{(\text{pK1}-\text{pH})})+10^{(\text{pK1}+\text{pK2}-2\text{pH})}}}$$
 – расчет pH-фактора, где

$$W_{\text{max}} \text{pH}_{\text{max}} = 10^{\frac{0,5(\text{pK1}-\text{pK2})}{(2+10^{0,5(\text{pK1}-\text{pK2})})}}$$
 – максимально возможная скорость получения формальдегида при оптимальном значении pH по данным [9, 10], где pK1, pK2 – отрицательные десятичные логарифмы константы диссоциации протона от дегалогеназы; K_1 – константа скорости перехода ДХМ из воздуха во влажную биопленку, 1/с; k_3 – коэффициент получения формиата из формальдегида, 1/с; k_4 – коэффициент ассимиляции формальдегида, 1/с; k_5 – коэффициент вывода соляной кислоты из клетки во влажную биопленку, 1/с; k_6 – коэффициент ассимиляции формиата, 1/с; k_7 – коэффициент вывода соляной кислоты из влажной биопленки в окружающую среду, 1/с.

Количество переносимого вещества во влажную биопленку

$$M = W_1 V_{\text{возд}} t_{\text{д}};$$

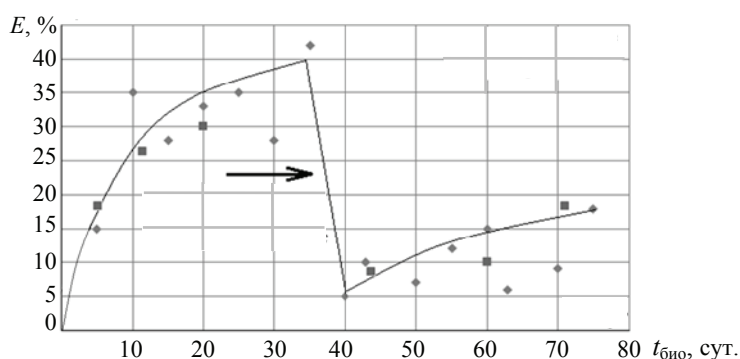


Рис. 4. Сравнение экспериментальных значений эффективности очистки с модельными при изменении скорости газового потока с 0,005 до 0,15 м/с:
 ◇ – экспериментальные точки; □ – моделирование

количество вещества, подвергнувшегося биодеструкции

$$R = W_2 V_{\text{био}} t_p,$$

где $V_{\text{возд}}$ – объем газовой фазы, м^3 ; $V_{\text{био}}$ – объем биопленки, м^3 ; t_p – расчетное время биодеградаци, с; t_d – необходимое время перехода вещества из газовой фазы к клеткам в биопленке (время диффузии), с.

В соответствии с [7] и экспериментами по динамике потребления ДХМ (см. рис. 2) можно заключить, что при $t_p > t_d$ скорость биофильтрации будет ограничена константой скорости ферментативной реакции в клетке, при $t_d > t_p$ скорость биофильтрации будет ограничена константой скорости перехода ЗВ из воздуха к клетке. Решение предлагаемой системы уравнений осуществлялось с помощью пакета компьютерных программ DBSolve Optium и Model Creator. Результаты численных экспериментов представлены на рис. 4 в виде зависимости эффективности очистки газовой смеси от ДХМ от времени работы биофильтра, а также при изменении скорости газового потока.

Методика расчета

Предлагаемая в данной работе по результатам анализа литературы и моделирования методика инженерного расчета (рис. 5) основана на сравнении количества вещества M , $\text{г}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$, прошедшего через насадочный слой биофильтра, и количества вещества R , $\text{г}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$, подвергнувшегося биодеструкции. Количество ЗВ, которое пройдет через насадочный слой при заданной эффективности очистки и производительности биофильтра M . Количество ЗВ из потока M , которое будет усвоено микроорганизмами посредством ферментативной реакции в клетках R . В таком случае, при $M = R$ производительность биофильтра при заданном времени пребывания загрязняющего вещества в насадочном слое соответствует биодеструкционной способности микроорганизмов, находящихся на поверхности насадки. При $M < R$ биодеструкционная способность микроорганизмов позволяет увеличивать количество загрязняющих веществ в газовом потоке без уменьшения эффективности очистки. Это означает, что можно уменьшить объем насадочного слоя и/или уменьшить время пребывания загрязняющих веществ в насадочном слое, тем самым уменьшить габариты биофильтра или увеличить производительность биофильтра. При $M > R$ количества микроорганизмов (фермента) не хватает для очистки газа при заданной эффективности. В этом случае необходимо увеличить удельную поверхность насадочного слоя, что в свою очередь увеличит количество образовавшейся биомассы и потенциально увеличит количество фермента, необхо-

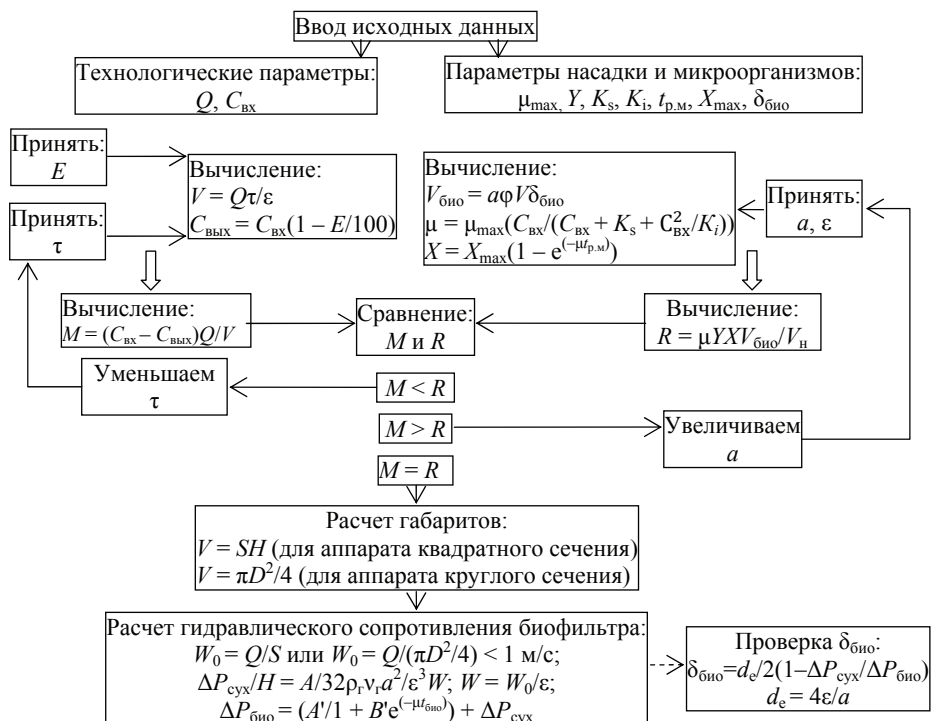


Рис. 5. Алгоритм инженерного расчета биофильтра

димого для осуществления реакции окисления ЗВ. Также возможно увеличить время пребывания, что приведет к снижению производительности, или увеличить габариты биофильтра.

Сопротивление насадочного биофильтра изменяется со временем, что связано с развитием биомассы и зарастанием свободных каналов насадочного слоя. Расчет гидравлического сопротивления биофильтра можно проводить по уравнениям, предложенным в алгоритме (см. рис. 5).

Обозначения к алгоритму расчета (см. рис. 5): Q – расход очищаемых выбросов, м³/ч; $C_{вх}$ – концентрация загрязнителя на входе в биофильтр, г/м³; $C_{вых}$ – концентрация загрязнителя на выходе из биофильтра, г/м³; μ_{max} – максимальная удельная скорость роста, ч⁻¹; Y – выход биомассы по субстрату, г/г; K_i – константа субстратного ингибирования, г/м³; K_s – константа полунасыщения, г/м³; $t_{p,m}$ – время роста микроорганизмов, ч; X_{max} – максимальная концентрация активной биомассы, кг/м³; E – эффективность очистки, %; a – удельная поверхность насадки, м²/м³; ϵ – порозность насадочного слоя, м³/м³; d_e – эквивалентный диаметр насадки, м; τ – время пребывания очищаемого воздуха в слое насадки биофильтра, с; V_n – объем биофильтра (насадочного слоя), м³; M – количество переданного вещества через слой насадки, г/(ч·м³); $V_{био}$ – объем биопленки, м³; ϕ – коэффициент обратращения насадки; $\delta_{био}$ – толщина биопленки, м; R – количество вещества подвергнутое биодеструкции, г/(ч·м³); X – концентрация биомассы, кг/м³; μ – удельная скорость роста микроорганизмов, ч⁻¹; S – сечение корпуса биофильтра, м²; D – диаметр биофильтра, м; H – высота насадочного слоя, м; $\Delta P_{сyx}$ – гидравлическое сопротивление сухого насадочного слоя, Па; $\Delta P_{био}$ – гидравлическое сопротивление насадки, обросшей биопленкой, Па; v_r – кинематическая вязкость газа, Па·с; ρ_r – плотность газа, кг/м³; W_0 – фиктивная скорость газа, м/с; A, B – коэффициенты; $t_{био}$ – время работы биофильтра, сут.

Заключение

Отметим, что на сегодняшний день ни одна математическая модель процесса биофильтрации не является универсальной и общепринятой. Микроорганизмы разных родов обладают различными свойствами и поведением, что затрудняет обобщение. В этой связи инженерные методики расчета биофильтра для очистки газов в литературе отсутствуют. Биофильтры рассчитываются эмпирически на базе проведения серии предпромышленных экспериментов, что удорожает проектирование. Поэтому моделирование процесса биофильтрации в целях получения достоверных методик расчета аппаратов является актуальной задачей, требующей внимания.

Список литературы

1. Deviny, J. S. Biofiltration for air pollution control / J. S. Deviny, M. A. Deshusses, T. S. Webster. – Boca Raton, FL : Lewis Publishers, 1999. – 318 p.
2. Zagorskis, A. Air Treatment Efficiency of Biofilter with Adsorbing Zeolite Layer / A. Zagorskis, P. Baltrenas // *Ekologija*. – 2010. – Vol. 56, No. 1–2. – P. 72 – 78.
3. Composition of Air Emission from Tobacco Factories and Development of the Biocatalyst for Odor Control / N. A. Zagustina [et al.] // *J. of Chemical Technology & Biotechnology*. – 2010. – Vol. 85, No. 3. – P. 320 – 327.
4. Mathematical Model for Gas-Liquid Two-Phase Flow and Biodegradation of a Low Concentration Volatile Organic (VOC) in a Trickle Biofilter / Q. Liao [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2008. – Vol. 51, No. 7/8. – P. 1780 – 1792.
5. Эффективность очистки газов от дихлорметана методом биофильтрации на различных насадках / А. К. Митин [и др.] // *Экология и пром-сть России*. – 2015. – № 5. – С. 20 – 25.
6. Govind, R. Bishop. Biofiltration for Treatment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Air. Chapter in *Biodegradation Technology Developments, Volume II* / R. Govind, F. Dolloff, eds. K. Sikdar Subhas and L. Irvine Robert. – Lancaster, PA. : Technomic Publishing Company, 1998.
7. Астарита, Дж. Массопередача с химической реакцией / Дж. Астарита, пер. с англ. М. И. Балашова; под ред. Л. А. Серафимова. – Л. : Химия, 1971. – 224 с.
8. Торгонская, М. Л. Биодegradация дихлорметана аэробными метиловыми бактериями : дис. ... канд. биол. наук : 03.00.07 / Мария Леонидовна Торгонская. – Пушкино, 2009. – 130 с.
9. Ian, R. Booth. Regulation of Cytoplasmic pH in Bacteria. *Microbiological Reviews*. American Society for Microbiology / R. Ian. – 1985. – Vol. 49, No. 4. – P. – 359 – 378.
10. Sequence Variation in Dichloromethane Dehalogenases / Glutathione S-Transferases / S. Vuilleumier [et al.] // *Microbiology*. – 2001. – Vol. 147. – P. 611 – 619.

Modeling of Biological Gas Purification

A. K. Mitin¹, N. E. Nikolaikina¹, N. A. Zagustina²

*Department “Processes and Devices of Chemical Technologies”,
Moscow University of Mechanical Engineering (1); The A. N. Bach Institute
of Biochemistry (2), Moscow; mitin.rus@gmail.com*

Keywords: biodegradation; biofilter; biological gas purification; dichloromethane; method of calculation; microorganisms; packing.

Abstract: The paper describes the process of biological gas purification, which consists in successively passing the pollutant across the films (phases) of the system.

Biofiltration process is the ability of microorganisms to oxidize organic compounds by enzymatic apparatus of microorganisms. During biofiltration pollutant from the gas phase passes into the wet biofilm by sorption. Biodegradation of the pollutants occurs in the biofilm. Biodegradation is the rate-limiting step of the biofiltration process.

In the paper, we propose to use the mass transfer coefficient, as well as the principle of additivity phase resistances. On the basis of the above mechanism we developed a mathematical model of the biofiltration process using the example biodegradation of dichloromethane. The system of differential equations describes the model, which consists of a series of chemical processes: absorption of dichloromethane by wet biofilm, diffusion of DCM to the cells, decomposition of DCM to formaldehyde, oxidation to carbon dioxide with the withdrawal of reaction products. According to the results of numerical experiments, we proposed a generalized method of engineering calculation.

The generalized method of engineering calculation is based on comparing the amount of a pollutant passing through a packed layer of biofilm and the amount of a pollutant subjected to biodegradation. Algorithm calculation methods consist of input parameters, definable parameters and equations linking these parameters. Also, in the method of calculation we used equations for the calculation of pressure drop of the packed bed and the time of its clogging.

References

1. Deviny J.S., Deshusses M.A., Webster T.S. *Biofiltration for air pollution control*, Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1999, 318 p.
2. Zagorskis A., Baltrenas P. Air treatment efficiency of biofilter with adsorbing zeolite layer, *Ekologija*, 2010, vol. 56, no. 1-2, pp. 72-78.
3. Zagustina N.A., Krikunova N.I., Kulikova A.K., Misharina T.A., Romanov M.E., Ruzhitsky A.O., Terenina M.V., Veprizky A.A., Zukov V.G., Popov V.O. Composition of air emission from tobacco factories and development of the biocatalyst for odor control. *J. of Chemical Technology & Biotechnology*, 2010, vol. 85, no. 3, pp. 320-327.
4. Liao Q., Tian X., Chen R., Zhu X. Mathematical model for gas-liquid two-phase flow and biodegradation of a low concentration volatile organic (VOC) in a trickling biofilter, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 51, no. 7/8, pp. 1780-1792.
5. Mitin A.K., Nikolaikina N.E., Zagustina N.A., Pushnov A.S. [The effectiveness of cleaning gases from dichloroethane by nanofiltration at different nozzles], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2015, no. 5, pp. 20-25. (In Russ.)
6. Govind R., Dolloff F. *Bishop. Biofiltration for Treatment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Air. Chapter in Biodegradation Technology Developments, Volume II*, Lancaster, PA.: Technomic Publishing Company, 1998.
7. Astarita Dzh., Balashova M.I. *Massoperedacha s khimicheskoi reaktsiei* [Mass transfer with chemical reaction], Leningrad: Khimiya, 1971, 224 p. (In Russ.)
8. Torgonskaya M.L. *PhD Dissertation (Biological)*, Pushchino, 2009, 130 p. (In Russ.)
9. Ian R. Booth. Regulation of Cytoplasmic pH in Bacteria. *Microbiological Reviews. American Society for Microbiology*, 1985, vol. 49, no. 4, pp. 359-378.

10. Vuilleumier S., Ivos N., Dean M. Leisinger T. Sequence variation in dichloromethane dehalogenases/glutathione S-transferases, *Microbiology*, 2001, vol. 147, pp. 611-619.

Modellierung des Prozesses der biologischen Reinigung des Gases

Zusammenfassung: Es ist der Mechanismus des Prozesses der biologischen Reinigung des Gases, der im konsequenten Durchgang vom Stoff der Folien des Systems besteht, angeführt. Aufgrund des dargelegten Mechanismus ist das mathematische Modell des Prozesses der Biofiltrierung am Beispiel der Biodestruktion des Dichlormethans entwickelt. Nach den Ergebnissen der zahlenmäßigen Experimente ist die verallgemeinerte Methodik der Ingenieurberechnung angeboten, die im Vergleich der Zahl des Stoffes besteht, der durch die Ansatzschicht mit der Biofolie durchgegangen ist und von der Biodestruktion untergezogen ist.

Modélage du processus de l'épuration biologique du gaz

Résumé: Est présenté le mécanisme du procédé de l'épuration biologique du gaz qui consiste dans le passage séquentiel par la substance des films du système. A la base du mécanisme présenté est élaboré un modèle mathématique du processus de bio-filtre à l'exemple de la biodéstruction de dichlorométhane. Selon les résultats des expériences numériques est proposée la méthodologie généralisée du calcul d'ingénierie qui consiste dans la comparaison de la quantité de la substance qui a traversé la couche d'emmenchement avec bio-film et qui est soumise à la biodéstruction.

Авторы: *Митин Александр Константинович* – аспирант кафедры «Процессы и аппараты химических технологий»; *Николайкина Наталья Евгеньевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических технологий», ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет»; *Загустина Наталья Алексеевна* – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института биохимии им. А. Н. Баха РАН, г. Москва.

Рецензент: *Елисов Лев Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасность полетов и жизнедеятельности», ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет гражданской авиации», г. Москва.
