

Созник А.П., д-р физ.-мат. наук, проф., УГЗУ
Горносталь С.А., преп., УГЗУ

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ АЭРОБНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ

Рассмотрены основные математические модели, описывающие процессы, происходящие в аэробных сооружениях биологической очистки

Постановка проблемы. Бытовые и производственные сточные воды содержат значительные количества органических веществ, способных быстро гнить и служить питательной средой для различных, в том числе и патогенных, микроорганизмов; некоторые производственные сточные воды могут содержать также токсические примеси. Попадание сточных вод в водоемы без очистки или с недостаточной степенью очистки представляет серьезную угрозу для населения, то есть приводит к возникновению чрезвычайной ситуации. Такие чрезвычайные ситуации характеризуются наличием или угрозой гибели людей и животных, или значительным ухудшением условий их жизнедеятельности.

Проблема возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с нарушением технологических процессов сбора, передачи и очистки сточных вод в настоящее время уделяется повышенное внимание [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Для расчета параметров очистных сооружений, и, прежде всего их оптимального объема, используется математическое моделирование [2].

Метод биологической очистки сточных вод основан на способности микроорганизмов в качестве источника питания использовать органические вещества, растворенные в сточных водах. Таким образом, происходит переход загрязнений в биомассу микроорганизмов - активный ил, который затем удаляется из очищенной воды в процессе отстаивания. Метаболизм загрязнений в клетках микроорганизмов населяющих активный ил обеспечивает их энергетические потребности, прирост биомассы и синтез клеточного вещества. Процессы биологической очистки осуществляются в системе аэротенк - вторичный отстойник. Высокая концен-

трация активного ила в аэротенке создается за счет его рециркуляции. Для того чтобы скорость процессов в аэротенке не лимитировалась концентрацией растворенного кислорода, производится постоянная аэрация всего объема сточных вод.

В процессе очистки микроорганизмы активного ила могут пребывать либо в дисперсном состоянии, либо образовывать колонии (хлопья). Активность дисперсных частиц выше, чем у хлопьев, однако, они практически не оседают на дно вторичного отстойника. Если процесс очистки вести только дисперсными бактериями, то весь прирост биомассы будет уходить вместе с очищенной водой через верх отстойника.

Процесс, ведущий к ухудшению седиментации активного ила, называется процессом вспухания. «Вспухший» ил, содержащий в основном дисперсные частицы, плохо оседает во вторичных отстойниках и выносится вместе с очищенной водой из сооружения, вследствие чего снижается общий эффект очистки и уменьшается концентрация ила в аэротенке. В то же время «вспухший» ил, обладая очень развитой поверхностью, эффективно очищает воду, но работа системы аэротенк – вторичный отстойник с ним крайне неустойчива.

Причины «вспухания» ила обусловлены многими факторами: изменением рН среды; недостаточным количеством биогенных элементов, то есть питательной среды; высокой концентрацией кислорода в отсутствие достаточного перемешивания; концентрацией загрязняющих веществ в очищаемом стоке; длительностью аэрации; различными видами взаимоотношений между микроорганизмами (симбиоз, конкуренция за пищу, хищничество).

Постановка задачи и её решение. Чтобы рассчитать полную систему аэротенк – вторичный отстойник, необходимо выбрать уравнения, описывающие кинетику процессов жизнедеятельности микроорганизмов и потребления субстрата. Итальянским математиком В.Вольтерра была предложена и детально разработана математическая теория борьбы за существование, которая учитывает различные виды взаимоотношений между видами [3]. Эта теория в определенной мере послужила основой для создания первых моделей процессов биологической очистки.

Простейшая система уравнений, описывающая рост биомассы ила на ограниченном количестве субстрата, - модель Моно

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\mu \cdot XL}{K_L + L}, \quad (1)$$

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{\mu \cdot XL}{Y(K_L + L)}, \quad (2)$$

где X - концентрация активного ила; L - концентрация загрязнений (субстрата); μ - максимальная удельная скорость роста биомассы активного ила в результате потребления субстрата; K_L - константа полунасыщения, равная концентрации субстрата, при которой скорость процесса равна $\mu/2$; $Y = \left| \frac{dX}{dL} \right|$ - коэффициент трансформации субстрата в биомассу.

Эта модель была предложена для описания развития монокультуры и не отражает сложного видового состава биомассы активного ила, однако решение системы уравнений (1)-(2) достаточно хорошо на качественном уровне совпадает с экспериментальной кривой роста биомассы активного ила.

Развитием модели Моно явились модель Н.Д. Иерусалимского [4], в которой учтено влияние продуктов обмена на рост микроорганизмов, и модель Герберта [5], в которой рассматривается процесс отмирания микроорганизмов.

В модели Кенейла [5] сделана попытка уточнить видовую структуру активного ила. Модель учитывает два трофических уровня и субстрат, пищевая цепь выглядит следующим образом



где L - субстрат, X - бактерии, P - простейшие.

Система дифференциальных уравнений, описывающая эту схему, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -\frac{\mu \cdot XL}{Y(K_L + L)}, \\ \frac{dX}{dt} &= \frac{\mu \cdot XL}{K_L + L} - \frac{f \cdot XP}{g(K_X + X)}, \\ \frac{dP}{dt} &= \frac{f \cdot XP}{K_X + X}, \end{aligned} \quad (3)$$

где f - максимальная удельная скорость роста простейших; g - коэффициент трансформации бактерий в простейшие; K_X - константа полунасыщения бактерий; P - концентрация простейших.

Модель Кенейла лучше соответствует физической сущности процесса очистки и лучше, чем модели Герберта и Иерусалимского, описывает экспериментальную кривую роста биомассы активного ила.

Модификация модели Кенейла, предложенная в [6], учитывает наличие в культуре двух видов микроорганизмов, из которых один вид – простейшие – является хищником для другого – бактерий

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= \frac{\mu_m SX}{K_S + S} - \frac{N}{W} \frac{X(Z - K_a X)}{L + K_a X}, \\ \frac{dZ}{dt} &= \frac{K_a \mu_m SX}{K_S + S} + \left(N - \frac{N}{W} \right) \frac{K_a X(Z - K_a X)}{L + K_a X}, \\ \frac{dS}{dt} &= -y \frac{K_a \mu_m SX}{K_S + S},\end{aligned}\quad (4)$$

где Z - концентрация ила по сухому веществу; N - максимальная удельная скорость роста простейших; K_a - коэффициент пропорциональности между дегидрогеназной активностью и весом сухих бактерий; W - отношение количества образовавшихся простейших к количеству поглощенных ими бактерий; L - коэффициент, численно равный концентрации бактерий, при которой скорость роста простейших равна $N/2$.

Отметим, что модели (3) и (4) были предложены для описания процессов очистки в аэротенках периодического действия.

В работе [7] была предложена обобщенная модель аэробной биологической очистки, в основе которой лежало утверждение о том, что состав микроорганизмов в сооружениях, осуществляющих процесс очистки, зависит от спектра «обрабатываемых» загрязнений. Этот спектр определяется не только типом сточных вод, но и зависит от режима функционирования сооружения.

Общий вид модели запишется в виде

$$\begin{aligned}dX_i^{(n)} / dt &= (\mu_i - b_i) X_i^{(n)}, \\dL_i / dt &= -k_i X_i^{(n)}, \\d\tilde{X}_i / dt &= \alpha_i b_i X_i^{(n)},\end{aligned}\tag{5}$$

где $\tilde{X}_i^{(n)}$ - концентрация инертной биомассы, образующейся при отмирании i -го вида, b_i - константа скорости отмирания и самоокисления, α_i - коэффициент трансформации активной биомассы в инертную, $k_i = \mu_i / Y_i$ (Y_i - коэффициент трансформации).

Эта модель адаптации активного ила к многокомпонентному загрязнителю показывает зависимость видового состава микрофлоры активного ила от величины нагрузки на ил, а также преимущества многоступенчатой очистки, при которой на каждой ступени формируется свой видовой состав микроорганизмов. С её помощью можно изучать распределение видов микроорганизмов в активном иле при различных технологических режимах.

Рассмотренные модели дают только приближенное описание реальных процессов биохимического окисления многокомпонентных сточных вод. При этом константы моделей не являются строго постоянными и существенным образом зависят от режима проведения и начальных условий процесса очистки. Основная проблема в использовании указанных моделей заключается в следующем. Во-первых, каждая из них является более-менее удовлетворительной только при определенных строго ограниченных условиях очистки. Во-вторых, большинство из них применимы для многоступенчатых процессов очистки в сооружениях типа аэротенк – аэротенк - вторичный отстойник. Такие модели не в достаточной степени отражают процессы очистки сточных вод, которые на большинстве очистных сооружений Украины осуществляются по схеме аэротенк – вторичный отстойник в режиме непрерывного действия.

Выводы. Существующие в Украине сооружения биологической очистки запроектованы в основном без учета особенностей взаимодействия активный ил – субстрат, а при расчетах основных параметров строящихся сооружений руководствуются эмпирическими соображениями и опытом действующих.

Поэтому на большинстве таких сооружений, и в частности, в Харькове и Харьковской области, ежегодно (чаще в летний период) возникают чрезвычайные ситуации, связанные со сбросом в ес-

тественные водоемы либо недостаточно очищенной воды, либо практически не очищенной.

Для решения сложных задач управления процессами, происходящими в очистных сооружениях и борьбы с такими явлениями как вспухание и вынос ила, необходимо провести детальные расчеты существующих систем аэротенк – вторичный отстойник. Модель, описывающая процесс биологической очистки в такой системе должна учитывать следующие основные факторы:

1. многокомпонентность состава сточных вод и многовидовой состав активного ила;
2. взаимодействие между основными видами микроорганизмов (симбиоз, конкуренцию и взаимное хищничество);
3. возможность параллельного и последовательного изъятия активным илом компонентов, находящихся в сточной жидкости;
4. зависимость свойств активного ила от условий проведения процесса очистки (скорости подачи сточных вод и кислорода в аэротенк);
5. механизмы образования и распада хлопьев активного ила;

Влиять на реальный процесс очистки возможно путем изменения времени и интенсивности аэрирования, нагрузки на сооружения и времени нахождения смеси сточной жидкости с активным илом в системе аэротенк – вторичный отстойник. Поэтому математическая модель, описывающая систему аэротенк – вторичный отстойник должна быть в состоянии описывать указанные величины, а применение результатов расчетов по такой модели позволит провести практические мероприятия по предотвращению возникновения чрезвычайных ситуаций.

Нами предполагается при проведении расчетов усовершенствовать рассмотренные выше модели с учетом указанных в пунктах 1÷5 факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таварткіладзе І. М., Федорець М. В., Чібіряков В. К. Розрахунок балансового рівняння для визначення віку біоценозу. Зб. наук. пр. “Науково-практичні проблеми моделювання та прогнозування надзвичайних ситуацій”. – Київ. - №5, 2002. – С.115 – 118.
2. Вавилин В.А. Нелинейные модели биологической очистки и процессов самоочищения в реках. М.: Наука, 1983. – 158 с.

3. Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование. М.: Наука, 1976. - 288 с.
4. Иерусалимский Н.Д. Основы физиологии микробов. М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 244 с.
5. Вавилин В.А. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. М.: Наука, 1976. – 119 с.
6. Гюнтер Л.И., Запрудский Б.С. К выбору математической модели процесса биохимической очистки сточных вод. – Микробиологическая промышленность, 1971, №5 – С.14 - 18.
7. Вавилин В.А. Обобщенная модель и механизм аэробной биологической очистки – ДАН СССР, 1981, т.258, №5, С.1269 – 1273.

УДК 331.101

*Стрелец В.М., канд. техн. наук, доц., УГЗУ,
Ковалев П.А., канд. техн. наук, зам. нач. каф., УГЗУ,
Нередков Р.А., зам. нач. уч. центра ГУМНСУ в Луганской обл.*

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

(представлено д-ром техн. наук Лариным А.Н.)

Впервые показано, что распределения времен проведения работ с использованием специализированной аварийно-спасательной техники характеризуются нормальным законом, если при рассмотрении технологических процессов исключить результаты, существенно отличающиеся от остальных в выборке. При этом отмечена целесообразность их учета, когда необходимо получить прогнозные оценки

Постановка проблемы. Проведение аварийно-спасательных работ требует использования личным составом пожарно-спасательных и специальных подразделений достаточно специфического оборудования, которое существенно отличается от стандартного набора пожарно-технического вооружения. Вследствие этого закономерности выполнения работ с его помощью имеют ряд особенностей, которые надо учитывать как при планировании