

УДК 681.51:628.355

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКОЙ СТОЧНЫХ ВОД С УЧЕТОМ ЯВЛЕНИЯ САМООРГАНИЗАЦИИ ИЛА

Н.С. Попов

Тамбовский государственный технический университет
Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106
E-mail: eco@nnn.tstu.ru

О.В. Пещерова

Тамбовский государственный технический университет
Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106
E-mail: praktika_tstu@mail.ru

Л.Н. Чуксина

Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина
Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33
E-mail: ecologij@mail.ru

Ключевые слова: биологическая очистка; активные точки; «диффузный» регулятор; двухуровневая система управления.

Аннотация: Совершенствование систем экологической безопасности относится к важнейшим направлениям развития науки и техники. В работе рассматривается система управления биологической очисткой сточных вод с координатором процессов самоорганизации и саморегулирования активного ила.

1. Введение

Среди объектов жилищно-коммунального хозяйства крупных городов очистные сооружения выполняют функцию особой важности – защиты природы и общества от действия вредных и токсичных примесей, содержащихся в сточных водах.

Подсистема «аэротенк-отстойник» (А - О) является наиболее сложной и уязвимой частью очистных сооружений из-за наличия в ней микроорганизмов активного ила, чувствительных к разного рода внешним и внутренним факторам. Расход сточных вод, поступающих в подсистему А - О, и концентрации содержащихся в них веществ могут меняться в несколько раз в течение суток, месяца или сезона, при этом возможны внезапные появления ливневых стоков, аварийные сбросы с промышленных предприятий, случайные проскоки токсичных примесей, вызывающих шоковое состояние микрофлоры и ухудшение качества очистки в целом.

Целью данной работы является усовершенствование системы управления биологической очисткой за счет координации работы «диффузного» регулятора, представляющего собой самоорганизующую систему активного ила.

2. Описание подсистемы «аэротенк-отстойник»

Структура подсистемы «аэротенк-отстойник» (далее А - О) показана на рис. 1.

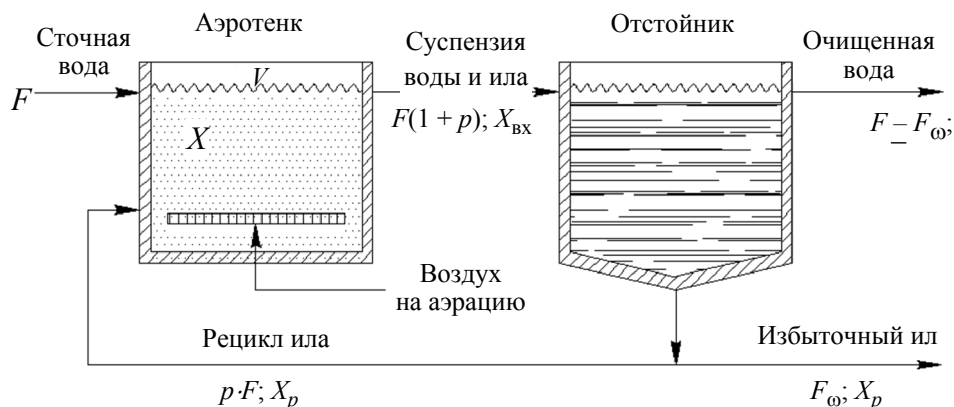


Рис. 1. Подсистема «аэротенк-отстойник»: F – расход; t – температура воды; $p \cdot F$ – расход ила в рецикле; F_{ω} – расход избыточного ила.

Важнейшую функцию по стабилизации работы системы А – О выполняет самоорганизующаяся и саморегулируемая биосистема активного ила, представляющая собой сложное сообщество микроорганизмов разных систематических групп: бактерий, актиномицетов, простейших, грибов, водорослей, вирусов, членистоногих и некоторых других. Динамическое постоянство состава и свойств внутренней среды ила, его устойчивость к изменению внешних условий (концентраций, pH среды, температуры и др.), достигается за счет механизма гомеостаза, в котором решающее значение имеет конкуренция различных форм микроорганизмов за пищевые ресурсы.

Например, удельная скорость роста микроорганизмов μ в условиях ингибирования по субстрату может быть описана моделью:

$$\mu = k \cdot S \cdot \exp(-S/K),$$

где S – концентрация субстрата; K – константа ингибирования; k – параметр модели.

При ежесуточных колебаниях расхода сточной воды и содержания в ней органических примесей значение μ меняется, достигая максимума при $S = K$ и асимптотически стремится к нулю при $S \gg K$. Изменения μ , в свою очередь, вызывают изменения состава конкурирующих групп микроорганизмов и порождают запаздывания в процессах биоокисления, отчего возможны проскоки недоочищенных порций воды через систему. Для устранения негативных явлений, связанных с нестационарностью входного потока используют усреднители, системы распределенной подачи воды в аэротенк, подбирают наилучшие гидродинамические режимы работы оборудования. Вместе с тем аппаратно-технологические способы борьбы с нестационарностью недостаточно эффективны в кинетической области протекания процессов биоокисления, где необходимо обеспечить оптимальное время контакта частиц ила с органическими примесями.

В сообществе микроорганизмов в первую очередь выживают те, которые способны усваивать доступные питательные вещества с большей, чем у других, скоростью и при значительно низких концентрациях. Бóльшей устойчивости активного ила внешним изменениям способствует и симбиоз отдельных групп микроорганизмов в некое единое целое – «микрокосм», с общей оболочкой. Такой более сложный вариант существова-

ния популяций благоприятен для роста всех участников микрокосма и в нем сильнее проявляется тенденция к устойчивости как независимости от внешних воздействий.

На рис. 2 показана концептуальная схема саморегуляции активного ила, основанная на механизме гомеостаза.

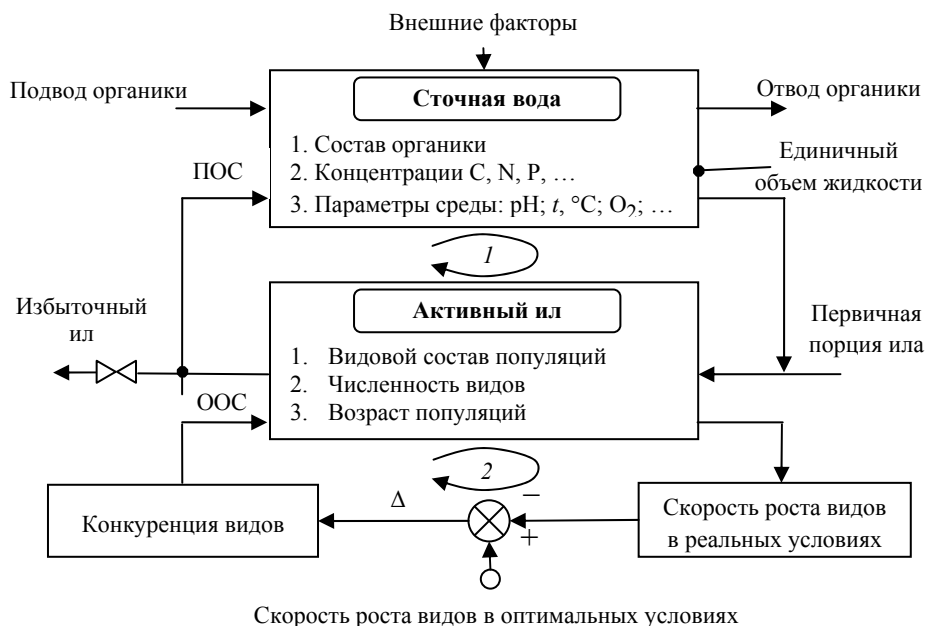


Рис. 2. Гомеостатический механизм двухфазной системы: активный ил – сточная вода; Δ – разница скоростей роста.

В ней различимы два контура обратных связей: 1 – положительной (ПОС) и 2 – отрицательной (ООС). Контур 1 действует при увеличении концентрации питательных веществ в системе, что приводит к активному росту популяций. Контур 2 включается при появлении отклонений условий внешней среды от оптимальных для любого вида микроорганизмов в сообществе и запускает механизм «конкурентного исключения видов», снижающий скорость роста популяций.

Из анализа рис. 2 следует вывод о том, что в подсистеме А–О функционирует адаптивный экстремальный биорегулятор, «разнообразие поведения которого, вызванное процессом непрерывной конкуренции видов за пищевой ресурс, преодолевает разнообразие условий внешней среды». Данный биорегулятор рассредоточен по всему объему воды в аэротенке частицами активного ила (активными точками (АТ)), в связи с чем он может быть назван «диффузным» регулятором (ДР) биосистемы. Его действия направлены на поддержание максимально возможной для сложившихся условий внешней среды скорости роста микроорганизмов. Однако достичь нужной степени очистки воды в аэротенке при самостоятельной работе ДР проблематично, поскольку действия АТ всегда индивидуальны, спонтанны, рассогласованы и зависимы от состава органических веществ в локальной для них зоне.

3. Описание «диффузного» регулятора

Пусть взаимодействия популяций в биосообществе ила носят симбиозный характер. Символом $M = \bigcup_{i=1}^n \mu_i$ обозначим множество состояний популяций, характеризующих удельными скоростями роста μ_i , $i = \overline{1, n}$. Символом $R = C \times \Phi \times \Xi$ – множество состояний внешней среды, оказывающих влияние на M , где C , Φ и Ξ – соответственно множества значений концентраций органических веществ, параметров среды (рН, температура и др.) и случайных факторов. Символом $U = U(R, M)$ обозначим множество значений управляемых воздействий, зависящих по законам измерения «возмущения» и обратной связи соответственно от R и M , а $[0, T]$ – интервал времени существования АТ. Тогда с учетом принятых обозначений функцию диффузного регулятора выразим в следующей операторной форме:

$$\text{ДР: } R \times U \times [0, T] \rightarrow M_0,$$

где \times – знак декартова произведения; M_0 – множество оптимальных состояний популяций, таких что

$$M_0 = \{\bar{\mu}_0\} = \max_{u \in U} \left[\bigcup_{i=1}^n \mu_i(u) \right],$$

здесь u – управления на микрошкале АТ; $\bar{\mu}_0$ – оптимальные варианты скоростей роста микроорганизмов в сообществе.

Диффузный регулятор работает одновременно в двух фазах: жидкой (с растворенными органическими веществами) и твердой (с частицами активного ила), а значит, данное обстоятельство должно найти свое отражение в конструкции координатора времени контакта ила с органикой.

Бесконечное множество АТ, содержащихся в потоке аэрируемой воды, предполагает вероятностный механизм их поведения в ансамбле движений. При этом появляется возможность описания их состояний законами распределения случайных переменных. В данной работе воспользуемся средними значениями выборочных распределений вероятностей, а именно – средним временем гидравлического контакта частиц воды и ила в аэротенке τ , и средним временем пребывания частиц ила в системе θ (возрастом ила).

Параметры τ и θ оказываются ключевыми в обеспечении стабильности процессов биоокисления и осаждения. Величина $1/\tau$, именуемая скоростью разбавления, влияет на скорость прироста ила, а θ определяет возможность реализации потенциала питательной среды. «Правило координации» АТ в ДР выразим отношением

$$\theta/\tau = \text{const},$$

при выполнении которого в условиях действия случайных возмущений обеспечивается эффективность работы ДР «в среднем» выбором надлежащих значений θ и τ .

В реальной ситуации имеет смысл условие

$$(1) \quad k_n \leq \theta/\tau \leq k_b,$$

где k_n и k_b – значения «доверительного интервала».

Поскольку для расчета θ требуется математическая модель процесса, система управления А – О становится «двухконтурной адаптивной системой управления с моделью», а с учетом возможности удаленного (дистанционного) контроля за притоком сточной воды в аэротенк она является «двухконтурной адаптивной системой управления с моделью и предиктором» (ДАСУМП). Структура системы управления процессом биологической очистки представлена на рис. 3.

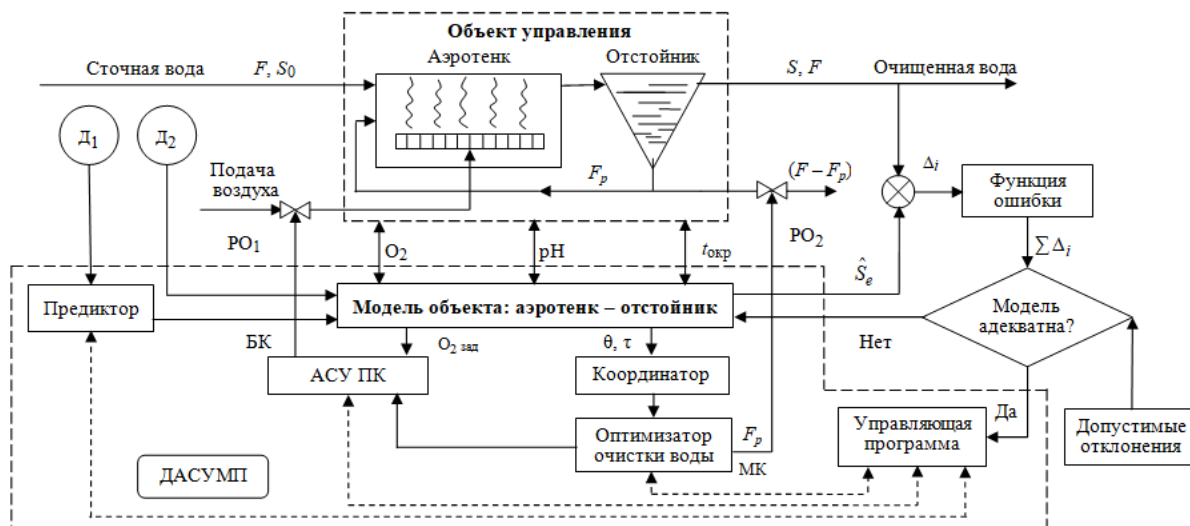


Рис. 3. Структура системы управления биологической очисткой: АСУ ПК – адаптивная система управления подачей кислорода; БК, МК – быстрый и медленный контуры соответственно; $O_2 \text{ зад}$ – задание по кислороду; D_1 – датчик дистанционного контроля сточных вод; D_2 – датчик дистанционного контроля расхода сточных вод; PO_1, PO_2 – регулирующие органы; $\text{---} \rightarrow$ – сигналы централизованного управления подсистемами; \hat{S}_e – концентрация примесей в очищенном потоке воды; S_0, S – концентрации БПК на входе и на выходе из системы А – О; $t_{окр}$ – температура окружающей среды.

Обозначим \hat{X}_n и \hat{X} – множества оценок начальных и текущих состояний подсистемы А – О; \hat{R} и $\hat{\Xi}$ – множества оценок наблюдаемых и случайных переменных; $U = U(\hat{R}, \hat{X})$ – множества значений управляющих воздействий, зависящих по законам измерения «возмущения» и обратной связи от \hat{R} и \hat{X} . С учетом принятых обозначений функцию централизованной системы управления, обозначенную как CS, выразим в операторном виде

$$CS: \hat{X}_n \times \hat{R} \times \hat{\Xi} \times U \times [0, T] \rightarrow \hat{X}_0,$$

где

$$\hat{X}_0 = \{\hat{x}_{0i}\} = \max_{u \in U} P[(\hat{x}_{i3} - \hat{x}_i) > \Delta_i].$$

Здесь \hat{x}_{i3} и \hat{x}_i – заданное и текущее значения концентраций примесей в очищенной воде соответственно, $i = \overline{1, n}$; Δ_i – «запас» надежности биологической очистки; P – символ вероятности; $u \in U(\hat{R}, \hat{X}) \subset \Psi$ – значения управлений из допустимого множества Ψ , согласованного с диапазоном (1).

4. Заключение

Сопоставление операторов ДР и CS указывает на их очевидное сходство в плане максимизации показателей эффективности. Координация АТ «диффузного» регулятора объективно приводит к построению системы централизованного управления процессом биологической очистки сточных вод, возможности которой заложены в ее сложности, а

поведение отдельных видов микроорганизмов в биоценозе ила, в таком случае, полностью определяются поведением системы.