

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКОЙ СТОЧНЫХ ВОД С УЧЕТОМ ЯВЛЕНИЯ САМООРГАНИЗАЦИИ ИЛА

Н.С. Попов, О.В. Пещерова (ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»),

Л.Н. Чуксина (ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина»)

Рассматривается система управления биологической очисткой сточных вод с координатором процессов самоорганизации и саморегулирования активного ила. Процесс биологической очистки предложено трактовать как результат работы «диффузного» регулятора (ДР). Дано формальное описание ДР и поставлена задача координации действий его «активных точек». Сформулирована постановка задачи централизованного управления биологической очисткой и предложена двухконтурная адаптивная система управления с моделью.

Ключевые слова: аэротенк – отстойник, «диффузный регулятор» биосистемы, координатор «активных точек», биологическая очистка.

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.

Система «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 систему А — О, и концентрации содержащихся в них веществ могут меняться 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.

Описание системы «аэротенк-отстойник»

Центральной частью очистных сооружений является относительно самостоятельная система аэро-

тенк — отстойник (А — О), одна из конфигураций которой изображена на рис. 1. Сущностью биологической очистки сточных вод является биоокисление загрязняющих органических веществ в процессе метаболизма микроорганизмов, с частичной трансформацией органики в прирощенную биомассу.

Как объект управления система А — О является динамической, инерционной, многомерной, нелинейной и стохастической (из-за неопределенностей поведения колоний микроорганизмов, их физиологического состояния, времени пребывания частиц воды в аэротенке и пр.). Эти особенности должны быть отражены в математической модели системы.

В аэротенке, представляющем собой проточный биоинженерный реактор значительных размеров, происходят процессы биоокисления органических веществ и рост колоний микроорганизмов в форме частиц активного ила. Для поддержания их во взвешенном состоянии и насыщения воды кислородом воздуха используют пневмоаэрацию. В отстойнике биомасса ила осаждается, уплотняется в придонной области и частично возвращается в аэротенк, а избыточное количество ила удаляется из системы. Осветленная вода, образуемая в верхней части отстойника, отводится в водоем-приемник. К наблюдаемым входным переменным системы А — О относятся: расход F и температура воды t , оперативно контролируемые концентрации органических веществ, мутность, рН среды. К управляемым — расход воздуха на аэрацию, расход ила в рецикле $p \cdot F$, отвод избыточного ила из системы F_{ω} .

В системе А — О функционирует адаптивный экстремальный биорегулятор, «разнообразие поведения которого, вызванное процессом непрерывной конкуренции видов за пищевой ресурс, подавляет разнообразие условий внешней среды» [1]. Данный биорегулятор рассредоточен по всему объему воды в аэротенке частицами активного ила (активными точками), в связи с чем может быть назван

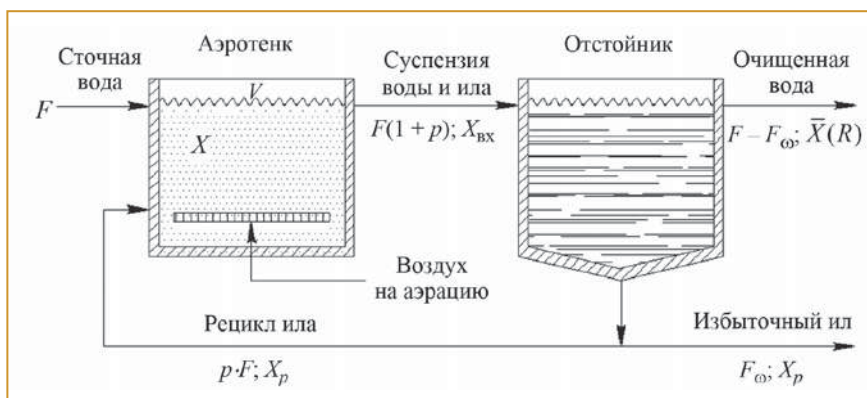


Рис. 1. Система: аэротенк – отстойник

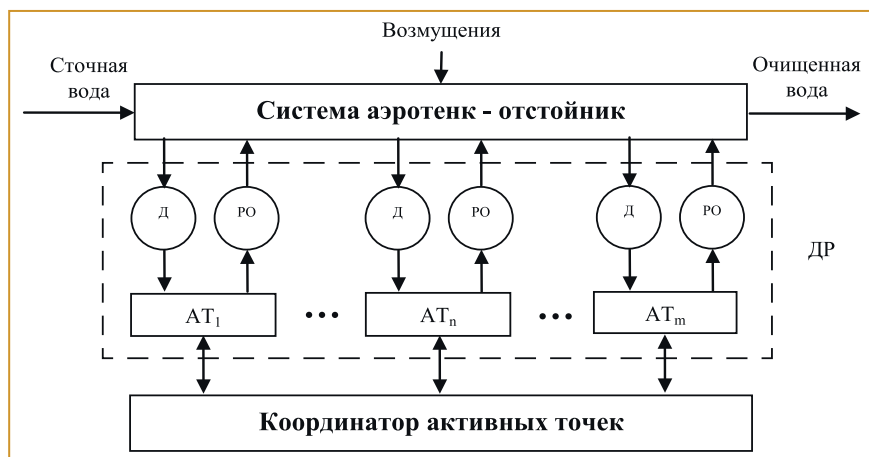


Рис. 2. Система децентрализованного управления с координатором активных точек (АТ) диффузного регулятора (ДР), Д – датчик, РО – регулирующий орган

Параметры τ и θ оказываются ключевыми в обеспечении стабильности процессов биоокисления и осаждения. В частности величина $1/\tau$ — именуемая скоростью разбавления, влияет на скорость прироста ила, а определяет его биологическую активность и способность к отстаиванию [2]. В работе [3] θ отнесен к наиболее важному параметру в проектировании и управлении системой А — О, объясняя это тем, что питательная среда обеспечивает потенциал для роста микроорганизмов, а θ определяет возможность его реализации.

«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 его активных точек (АТ) всегда индивидуальны, спонтанны, рассогласованы и зависимы от состава органических веществ в локальной для них зоне.

Описание «диффузного регулятора»

Пусть взаимодействия популяций в биосообществе ила носят симбиозный характер. Символом $M = \bigcup_{i=1}^n \mu_i$

обозначим множество состояний популяций, характеризуемых удельными скоростями роста $\mu_i, i = \overline{1, n}$. Символом $R = C \times \Phi \times \Xi$ — множество состояний внешней среды, оказывающих влияние на M , где C, F 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 закону прямой 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:

$$ДР: R \times U \times [0, T] \rightarrow M_0, \quad (1)$$

где M_0 — множество оптимальных состояний популяций, таких что

$$M_0 = \{\overline{\mu_0}\} = \max_{u \in U} \left[\bigcup_{i=1}^n \mu_i(u) \right], \quad (2)$$

где u — управления на микрошкале АТ, $\overline{\mu_0}$ — оптимальные варианты скоростей роста микроорганизмов в сообществе, \times — знак декартова произведения.

Система децентрализованного управления с координатором активных точек (АТ) диффузного регулятора представлена на рис. 2.

От постоянства возраста ила зависит качество очищенной воды, и в случае изменений концентраций загрязняющих веществ на входе в аэротенк их необходимо скомпенсировать приростом ила, то есть повышением его концентрации при сохранении постоянной нагрузки на ил [4]. При этом нужный возраст ила обеспечивается гидравлическим способом — удалением из системы определенной массы избыточного ила.

На примере одного из вариантов организации системы А — О в работе [4] показано, что концентрация активного ила $X_{В.Н.Т.}$ в аэротенке прямо связана с соотношением θ/τ :

$$X_{В.Н.Т.} = (\theta/\tau) \cdot \{Y(S_0 - S)\} (1 + b_H \cdot \theta), \quad (3)$$

где S_0, S — соответственно концентрации биоразлагаемых веществ во входном и выходном потоках воды; Y — прирост биомассы ила; b_H — коэффициент отмирания микроорганизмов.

С учетом (3) «правило координации» АТ в ДР выразим отношением

$$\theta/\tau = const, \quad (4)$$

при выполнении которого в условиях действия случайных возмущений обеспечивается эффективность работы ДР «в среднем», выбором надлежащих значений θ и τ . Возможность их коррекции и делает конструкцию координатора АТ практически реализуемой в системе управления А — О.

Условие (4) можно назвать «рабочей настройкой» или «заданием» проектируемого процесса биологической очистки в статике. Для системы А — О с рециклом $\theta/\tau \gg 1$, что свидетельствует о наличии в ней двух типов процессов — «быстрых», связанных с распространением внешних возмущений по каналу сточной воды и «медленных», перенастраивающих биологическую компоненту системы согласно удельным скоростям роста микроорганизмов. Такое обстоятельство указывает на необходимость разработки двухконтурной адаптивной системы управления процессом в А — О. В условиях постоянно действующей

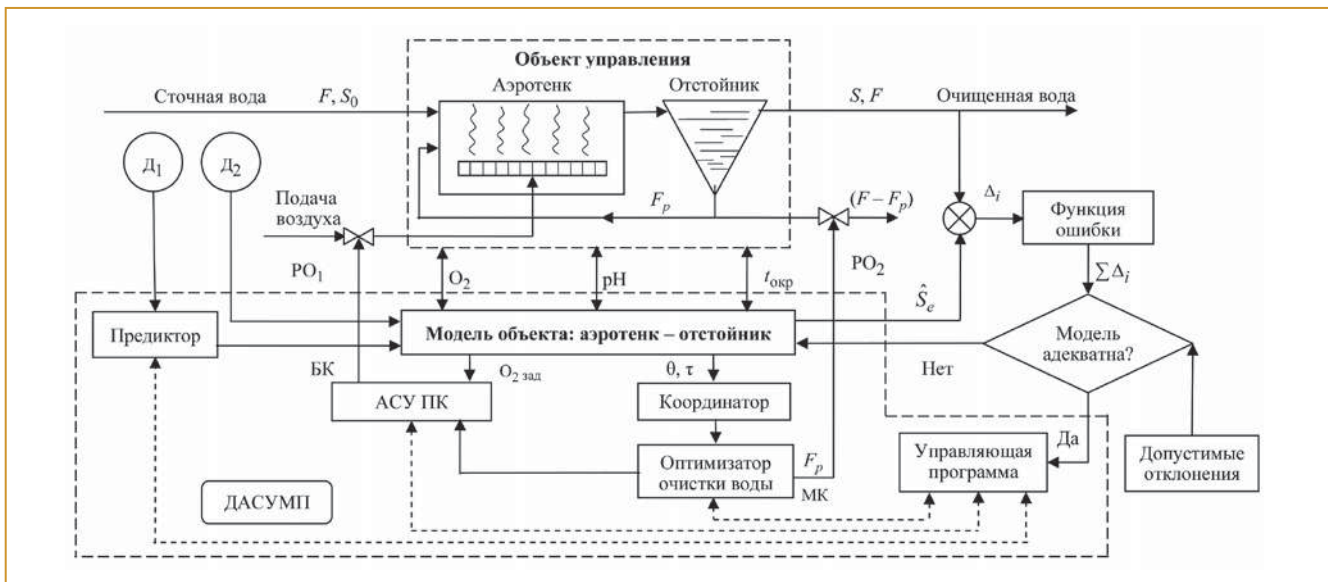


Рис. 3. Структура системы управления биологической очисткой, где АСУ ПК – адаптивная система управления подачей кислорода; БК, МК – быстрый и медленный контуры соответственно; $O_{2\text{зад}}$ – задание по кислороду; D_1 и D_2 – датчики дистанционного контроля токсичных для активных ила примесей и расхода сточных вод; PO_1 , PO_2 – регулирующие органы; --- – сигналы централизованного управления подсистемами; \hat{S}_e – концентрация примесей в очищенном потоке воды; S_0 , S – концентрации кислорода на входе и на выходе из системы А – О; $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды

щих возмущений строгое выполнение (4) не реально, а имеет смысл условие:

$$k_n \leq \theta/\tau \leq k_a, \quad (5)$$

где k_n и k_a – нижнее и верхнее значения отношения θ/τ .

Поскольку для расчета θ требуется математическая модель процесса биоокисления, 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).

Необходимость включения в систему управления прогнозирующего звена (предиктора), объясняется следующими обстоятельствами. Коллектор сбора сточных вод является не только гидравлической системой сбора жидких отходов с городской территории, но и своего рода трубчатым биохимическим реактором, в котором происходит процессы смешения, окисления органики, растворения и осаждения твердых частиц. От состояния сточной воды в нем зависит стабильность работы А – О. Поэтому расположение части датчиков в коллекторе не только позволяет получать информацию заблаговременно, но и прогнозировать концентрации примесей и расход воды с опережением, что дает возможность своевременно подстраивать систему управления инерционным объектом.

Построение предиктора базируется на анализе временных рядов часовых расходов сточных вод и концентраций содержащихся в них токсичных примесей, а также значений биохимического потребления кислорода (БПК), с последующим описанием их

уравнениями авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего Бокса-Дженкинса [5]. Для однородного нестационарного процесса модель, описывающая его, имеет следующий вид:

$$\phi(B)z_t = \theta(B)(1-B)^d z_t = \theta(B) \cdot a_t, \quad (6)$$

где $\phi(B)$ – обобщенный оператор авторегрессии, $\theta(B)$ – стационарный оператор, d – порядок операции взятия разностей, a_t – случайные импульсы, именуемые белым шумом, преобразуемые во временной ряд наблюдаемых переменных z_t с помощью функции $\psi(B)$ [5].

Описанный процесс (6) является универсальной моделью, подходящей для описания стационарных и нестационарных временных рядов. В результате итерационного процесса создания модели, заложенного в основу методологии Бокса-Дженкинса, определяются структура модели, коэффициенты, подтверждается ее адекватность, что дает возможность перейти к процессу прогнозирования будущих значений временного ряда z_{t+1}, z_{t+2} . В общем виде для модели авторегрессии – скользящего среднего АРСС (p, q) функция прогноза или предиктор имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{z}_{t+1} &= \bar{\phi}_1 z_t + \bar{\phi}_2 z_{t-1} + \dots + \bar{\phi}_p z_{t-p+1} - \\ &- \bar{\theta}_1 \bar{a}_t - \bar{\theta}_2 \bar{a}_{t-1} - \dots - \bar{\theta}_q \bar{a}_{t-q+1}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\bar{\theta}$, $\bar{\phi}$ и \bar{a}_t – оценки параметров θ , ϕ , a_t .

Фактически в рассматриваемой системе управления использовано два типа моделей. Первый из них базируется на дифференциальных уравнениях, описывающих процесс биоокисления органических соединений микроорганизмами, а второй основывается

ся на модели вида (7). Вопрос о применении модели смешанной авторегрессии в работе не рассматривался из-за отсутствия таких дополнительных переменных, которые могли бы предвещать изменения интересующих переменных состояния воды в коллекторе.

По имеющимся пилотным квартальным записям расходов сточных вод и БПК строились модели предиктора с использованием методологии Бокса-Дженкинса, применением принципа «экономии параметров» (parsimony), теста белого шума для остатков временных рядов и доверительной вероятностью прогнозов в 95%.

Имитационные исследования систем управления с предиктором на 24-часовом интервале работы А — О показали снижение дисперсии БПК на выходе из аэротенка примерно на 5...8% в сравнении с результатами управления без предиктора, что свидетельствует о его целесообразности.

В общем виде структура системы управления процессом биологической очистки представлена на рис. 3.

Обозначим \hat{X}_H и \hat{X} — множества оценок начальных и текущих состояний системы 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 закону прямой и обратной связи от \hat{R} и \hat{X} , а Δ_i — интересующий интервал времени работы системы управления. Тогда с учетом принятых обозначений функцию централизованной системы управления, обозначенную как CS, выразим в операторном виде:

$$CS: \hat{X}_H \times \hat{R} \times \hat{\Xi} \times U \times [0, T] \rightarrow \hat{X}_0, \quad (8)$$

$$\text{где } \hat{X}_0 = \{\hat{x}_{0i}\} = \max_{u \in U} P[(\hat{x}_{i3} - \hat{x}_i) > \Delta_i]. \quad (9)$$

В (9) \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 (5).

Сопоставление операторов ДР (1) и CS (8) указывает на их сходство в плане максимизации показателей эф-

фективности. Координация АТ диффузного регулятора на рассмотренном примере системы А — О 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.

Заключение

Разработка эффективных систем управления биологической очисткой городских сточных вод является одной из важнейших задач в проблеме социально-экономического и экологического развития регионов.

К особенностям системы управления рассмотренной в настоящей работе относится:

- контроль явления самоорганизации микроорганизмов активного ила посредством координации соотношения средних значений по ансамблю времен пребывания частиц жидкости и возраста или в аэротенке;
- включение на вход системы А — О предиктора значений расхода воды и состава стоков в коллекторе;
- использование управляемого электропривода турбовоздуходувки в целях адаптивной подачи кислорода в аэротенк под меняющуюся нагрузку.

Предложенные решения позволяют улучшить стабильность работы системы А — О и повысить ее энергоэффективность.

Список литературы

1. Эшби У.Р. Введение в кибернетику. Пер. с англ. М.: ИЛ. 1959. 432 с.
2. Хенце М. и др. Очистка сточных вод. Пер. с англ. Т.П. Мосолова; ред. С. В. Калужный. М.: Мир. 2004. 480 с.
3. С.Р. Leslie Grady et al. Biological Wastewater Treatment. IWA Publ. CRC Press, 2011. XXIX, 991 p.
4. Яковлев С.В., Карюхина Т.А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. М.: Стройиздат. 1980. с. 164.
5. Попов Н.С., Пещерова О.В., Чан Минь Тинь. Статистическое моделирование и прогнозирование изменений входной нагрузки на городских очистных сооружениях//Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2015. № 4 (58). С. 130-137.

*Попов Николай Сергеевич — д-р техн. наук, проф.,
Пещерова Ольга Викторовна — старший преподаватель
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
Чуксина Людмила Николаевна — канд. педагог. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина».
E-mail: eco@nnn.tstu.ru praktika_tstu@mail.ru lchuksina@inbox.ru*

Hitachi Vantara представила пакет решений Lumada Manufacturing Insights

Компания Hitachi Vantara объявила о выпуске Lumada Manufacturing Insights - пакета решений для промышленного Internet вещей (IIoT), позволяющего оптимизировать работу оборудования и улучшить производственные процессы за счет использования искусственного интеллекта, машинного обучения и методологии DataOps.

Пакет решений поддерживает интеграцию с существующими приложениями и генерирует аналитические данные, на основе которых можно предпринять конкретные действия. При этом у заказчика нет необходимости полностью менять дорогостоящее оборудование или уже работающие приложения. Lumada Manufacturing Insights поддерживает различные варианты развертывания: использовать пакет решений можно как во внутренней инфраструктуре, так и в облачной среде.

Функциональные возможности Lumada Manufacturing Insights:

- использовать интеллектуальную модель оценки зрелости производства;
- интегрировать разрозненные хранилища данных, незадействованные ресурсы и данные, поступающие с видеокамер, лазерных локаторов (лидаров) и других датчиков;
- поддерживать корреляции типа 4М (машина, человек, материал и методы) для реализации анализа в требуемом масштабе;
- оценить общую эффективность оборудования (ОЕЕ) и выработать рекомендации по ее улучшению с использованием технологий искусственного интеллекта и машинного обучения;
- оценить эффективность планирования и оптимизации в части варьирования рабочих нагрузок и скорости производства;
- мониторить и корректировать качество продукции за счет использования прогностической и предписывающей аналитики;
- повысить точность прогнозирования спроса и улучшить контроль за соблюдением производственных планов и достижением требуемых показателей.

www.hitachivantara.com