

Е. К. ГРУДЯЕВА, С. Е. ДУШИН  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ПРОЦЕССОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ В РЕАКТОРЕ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ КЕЙПТАУНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

*Статья посвящена изучению управляемых процессов в биореакторе со структурной схемой Кейптаунского университета. Для исследования процессов очистки использовалась математическая модель ASM1. Определены рабочие значения расходов рецикла в зависимости от входного расхода, необходимые для эффективной очистки по аммонийному азоту, а также предложен способ расширения диапазона регулирования этих значений в совокупности с регулированием подачи кислорода в аэробную зону реактора. Показана специфическая роль аэробной зоны в UCT-реакторе, которая играет ключевую роль и влияет как на нитрификацию, так и на денитрификацию за счет нитратного рецикла.*

**Введение.** В работе изучаются технологические процессы биореактора со структурной схемой Кейптаунского университета (UCT-процесс, University of Cape Town). Хотя исследуемая схема преимущественно используется за рубежом, в России также можно найти примеры использования данной схемы на очистных сооружениях.

Сложность биохимических процессов, действия возмущений, связанных с нестабильностью концентраций поступающих загрязнений, изменением температуры воды и окружающей среды и т. п., приводит к необходимости разработки системы управления процессами биоочистки. Эффективность работы такой системы требует создания математической модели и анализа ее динамических свойств.

**Постановка задачи.** Эффективное управление сложными биохимическими процессами предполагает изучение динамики UCT биореактора с использованием математических моделей. Ставится задача разработки такой модели и проведения анализа поведения для последующего синтеза системы управления.

Математическое описание химико-биологических процессов в реакторе возможно с использованием модели ASM1 (Activated Sludge Model) [1]. Система уравнений представляет собой совокупность четырех подсистем дифференциальных уравнений для каждой зоны. Уравнения составлены для концентраций растворимых и взвешенных веществ. Модель включает 36 нелинейных дифференциальных уравнений. На основе модели ASM1 составлена компьютерная модель биореактора в программной среде MATLAB/Simulink.

Исследования поведения многозонной системы позволяют утверждать о наследовании динамических свойств однозонной модели нитри- и денитрификации [2].

**Анализ влияния расходов входного потока и потоков рециклов.** Результаты проведенных вычислительных экспериментов показали, что существует критическое значение входного расхода сточных вод, при котором происходит вымывание активного ила и, как следствие, прекращение очистки (рис. 1). Увеличение концентраций загрязнителей на входе ведет к увеличению критического расхода входного потока, при котором происходит вымывание активного ила в зонах 1 и 2. Однако максимальный расход для зон 3 и 4 сохраняется практически неизменным, так как аэробный рост ила определяется концентрацией растворенного кислорода.

Увеличение расхода аноксидного рецикла приводит к уменьшению концентрации бактерий-денитрификаторов в зоне 1 и к росту денитрификаторов в зоне 2. Причина такого поведения – в недостатке питания для бактерий первой зоны, в которую поступает поток из второй, с более высокой концентрацией бактерий и незначительной концентрацией нитратов. Рост аноксидного рецикла увеличивает общий поток через последующие зоны 3 и 4, что при сравнительно небольшом числе бактерий ведет к их вымыванию. Поэтому эффективная очистка может происходить при значениях расхода аноксидного рецикла в определенных ограниченных пределах.

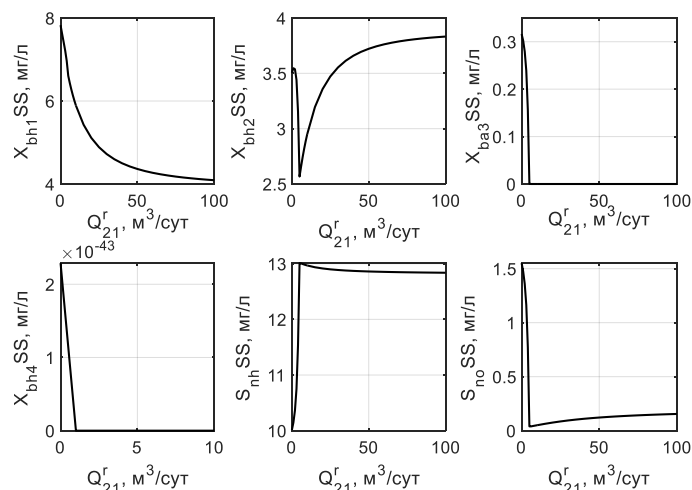


Рис. 1. Зависимости установившихся концентраций бактерий и загрязнителей на выходе от нитратного рецикла

В условиях взаимного влияния рециклов постепенное увеличение нитратного рецикла ведет к сужению диапазона допустимых рабочих значений аноксидного рецикла, причем сужение происходит быстрее, чем рост нитратного рецикла, при этом зона 4 практически теряет бактериальную составляющую.

При отключенном аноксидном рецикле эффективная очистка также возможна при значениях расхода нитратного рецикла, сравнимых со значением расхода исходной сточной воды. Специфика аэробной зоны УСТ-реактора в ее ключевой роли, связанной с влиянием как на нитрификацию, так и на денитрификацию за счет нитратного рецикла. Сохранение денитрифицирующих бактерий в первых двух зонах при вымывании нитрификаторов из зоны 3 ведет к ухудшению очистки по нитратам. Увеличение расхода аноксидного рецикла приводит к схожему характеру процесса.

Регулирование уровня концентраций аммонийного азота характеризуется узким диапазоном расходов рециклов – аноксидного и нитратного, превышение которого уже не ведет к эффективной очистке из-за вымывания культуры нитрифицирующих бактерий. Расширение этого диапазона возможно за счет увеличения подачи кислорода в аэробную зону.

Установлено оптимальное значение расхода потока нитратного рецикла для удаления аммонийного азота, рис. 2. Увеличение расхода сопровождается нежелательным перерегулированием. Можно говорить об оптимальном управлении нитратным рециклом по минимальной установившейся концентрации аммонийного азота в отсутствии перерегулирования.

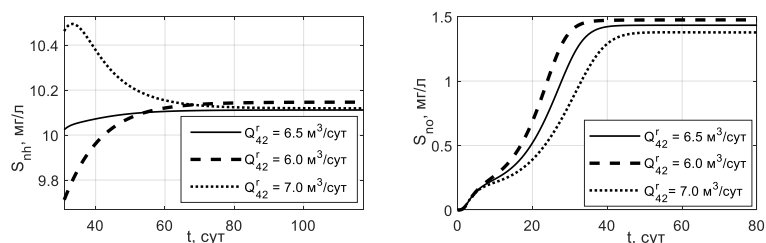


Рис. 2. Процессы изменения концентраций загрязнителей на выходе при различных значениях расходов нитратного рецикла

Процессы изменения концентраций загрязнителей на выходе при различных значениях расходов нитратного рецикла.

**Анализ влияния входных концентраций загрязнителей.** Вычислительные эксперименты с различными концентрациями аммонийного и нитратного азота на входе показали, что в отсутствии рециклов концентрации ила в первых двух зонах определяются содержанием питания в исходной воде, поэтому при нахождении зависимости роста бактерий от аммонийного азота в исходной воде установившиеся значения концентраций денитрификаторов в этих зонах не меняются. В аэробной зоне рост бактерий напрямую зависит

от содержания аммония в исходной воде. Рост бактерий отсутствует при содержании субстрата ниже минимальной критической точки и происходит вымывание культуры. Эта критическая минимальная концентрация влияет и на зону 4.

Включение отдельно аноксидного рецикла ведет к увеличению минимальной концентрации аммонийного азота, достаточной для роста бактерий в зоне 4. Включение только нитратного рецикла приводит к влиянию концентраций бактерий в зонах 3 и 4 на их концентрацию в зоне 2 в зависимости от содержания нитратов в рецикле. После роста бактерий в зоне 3 концентрация бактерий в зоне 2 также начинает расти.

Одновременное включение аноксидного и нитратного рециклов приводит к аналогичным процессам в первой зоне.

Нитратный рецикл оказывает более благоприятное влияние на удаление аммонийного азота, чем аноксидный.

Поскольку в зонах 1 и 2 точка минимальной входной концентрации нитратного азота отсутствует, для обеспечения работы УСТ-ректора достаточно только аммонийного азота. Эксперименты показывают, что реактор успешно справляется с загрязнениями при отсутствии или небольшом содержании нитратного азота в исходной воде и высоких значениях аммонийного азота, рост которых влияет практически только на рост денитрификаторов в зоне 1. Причина такого поведения в том, что аэробная зона способна производить субстрат (нитраты) для денитрификаторов.

Установлено, что с увеличением входной концентрации нитратов усиливается анаэробный рост бактерий-денитрификаторов в зонах 1 и 2. Однако это актуально только для небольших концентраций аммонийного азота в исходной воде. Рост расхода любого из рециклов ведет к тому, что увеличение аммонийного азота в исходной воде практически перестает влиять на нитраты в очищенной воде. В этом случае необходимо дополнительно усилить рост аэробных бактерий добавлением кислорода.

**Анализ влияния концентрации растворенного кислорода в зоне нитрификации.** Вычислительные эксперименты в отсутствии потоков рециклов позволили получить зависимости установившихся концентраций бактерий и загрязнителей от концентрации кислорода в зоне нитрификации. Из них следует, что существует точка минимальной концентрации растворенного кислорода необходимого для роста бактерий-нитрификаторов в зоне 3 и бактерий-денитрификаторов в зоне 4.

Включение рециклов приводит к увеличению минимальной концентрации кислорода в зоне 4. Благодаря наличию нитратного рецикла в зоне 2 наблюдается увеличение концентрации бактерий-денитрификаторов. Это связано с поступлением нитратов вместе с потоками рециклов.

**Заключение.** Проведенные исследования позволили установить зависимость расходов рециклов от расхода на входе и взаимное ограничивающее влияние рециклов друг на друга. Регулирование концентрации аммонийного азота имеет узкий диапазон расходов рециклов – аноксидного и нитратного, превышение которого уже не ведет к снижению концентрации загрязнений из-за вымывания культуры нитрифицирующих бактерий.

Установлено, что существует оптимальный расход потока нитратного рецикла для удаления аммонийного азота. Нитратный рецикл оказывает более благоприятное влияние на удаление аммонийного азота, чем аноксидный при тех же значениях расхода как при отдельной работе рециклов, так и при одновременной.

УСТ-ректор способен работать в отсутствие в исходной сточной воде нитратного азота либо при очень небольшом его содержании. Концентрация аммонийного азота при этом может и должна достигать достаточно больших значений.

Проведенные исследования положены в основу разрабатываемой системы управления биологическими процессами очистки сточных вод с логико-динамическим регулятором.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Хенце М.** Очистка сточных вод / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван. М.: Мир, 2009. 480 с.
2. **Грудяева Е.К., Душин С.Е.** Моделирование управляемых процессов биологической очистки сточных вод. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 222 с.

E.K. Grudyaeva, S.E. Dushin, (Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg)  
**Modeling of controlled biological treatment processes in a University of Cape Town process reactor**

The paper is devoted to the study of processes in the bioreactor with the structural scheme of the University of Cape Town. The ASM1 mathematical model is used to study purification processes. Operating values of recycle flow rates are determined depending on input flow rate required for effective purification of ammonium nitrogen, and a method is proposed to expand the range of control of these values in combination with regulation of oxygen supply to the aerobic zone of the reactor. The specific role of the aerobic zone in the UCT reactor having a key role and affects both nitrification and denitrification due to nitrate recycling is shown.