УДК 66.098+628.35+57.04

А.Е.Кузнецов, С.В.Каленов

Российский химико-технологический университет им. Д.И.Менделеева, г. Москва

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ МАЛОСТОЧНЫХ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ПОТОКОВ ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛЛЮТАНТОВ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Исследованы возможные подходы к разработке высокоинтенсивных малосточных процессов биодеструкции органических поллютантов на основе гибридных технологий с одновременным воздействием агрессивных химических и фотохимических агентов и микроорганизмов, устойчивых к окислительному стрессу. Такие процессы, в принципе, могут быть ориентированы на разработку экологически чистых технологий обезвреживания шламов нефтехимических предприятий, низкорадиоактивных целлюлозо- и полимеросодержащих отходов АЭС и др.

The possible approaches to development of high intensive low-waste processes of biodestruction of organic pollutants based on hybrid technologies under simultaneous exposure of aggressive chemical or photochemical agents and microorganisms resistant to oxidative stress were investigated. Such processes could be oriented to the development of cleaner technologies for neutralization of high concentrated sludges of petrochemical plants, low-radioactive cellulose and polymer containing wastes of atomic power stations etc.

Общепринятым биологическим методам очистки загрязненных техногенных потоков, обезвреживания и переработки отходов присущ ряд недостатков, среди которых следует выделить следующие:

- необходимость зачастую избыточного внесения макро- и микроэлементов в биологическую систему, которые, в свою очередь, также могут быть составляющими загрязнений;
- образование вторичных контаминантов – избыточных илов и биологических пленок в сооружениях биологической очистки, захоронение которых ведет к дополнительному загрязнению почвенных и водных сред;
- необходимость разбавления потоков с высокой концентрацией загрязнений для устранения негативного влияния токсикантов на биологические агенты очистных систем, что неизбежно увеличивает объем транспортируемых и обрабатываемых сточных вод и затраты на биологическую очистку;
- снижение эффективности очистки из-за высокой биостойкости ряда органических поллютантов.

Очевидно, что экологически чистый биологический процесс должен быть высокопродуктивным, низкозатратным и свободен от указанных недостатков. Как элемент разработки таких экологически чистых технологий авторами исследованы пути интегрирования элементов абиогенных процессов самоочищения в техногенные системы биологической очистки и возможности использования гибридных процессов и гибридных биореакторов с одновременным воздействием микроорганизмов и агрессивных химических или фотохимических агентов на поллютант для повышения его биодоступности, увеличения скорости биодеструкции, снижения вторичных отходов и остаточных загрязнений и уменьшения стоимости очистки и обезвреживания в целом.

В качестве абиотических агентов гибридных процессов были апробированы системы с участием перекиси водорода (реактив Фентона) по реакции $Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + + OH^- + OH$ и мягкого УФА- и УФБ-излучения с длиной волны 330-380 нм.

В качестве биотических компонентов и как модельные объекты в гибридных процессах исследовались микроорганизмы-фенолдеструкторы, дрожжи рода *Candida* и микроорганизмы-азотфиксаторы р. *Azotobacter* (для замены неорганического азота на биологически фиксированный в системах биодеструкции и очистки).

Для исследования совмещенных процессов был разработан лабораторный комплекс, включающий биореактор, компьютерную систему регистрации данных и соответствующее программное обеспечение на базе программной оболочки LabView (*фирма National Instruments*), блок фотохимического облучения культивируемых в биореакторе микроорганизмов источниками немонохроматического УФА- и УФБ-излучения (ртутные лампы) и лазерного излучения видимого диапазона.

Препятствием на пути использования гибридных систем служит сложность подбора условий, необходимых для функционирования биологических процессов, в которых скорости протекания абиотической и биотической составляющих процесса были бы сопоставимы, а также агрессивность химических и фотохимических агентов по отношению к биологическим структурам. Поэтому в качестве необходимого этапа исследований и разработки гибридных процессов изучались условия преадаптации микроорганизмов к перекиси водорода и ультрафиолету, определялись предельные дозы этих окислителей, их влияние на физиолого-биохимическое состояние микробных культур и на характеристики биологического процесса окисления модельных субстратов (фенол, сахароза) при воздействии H_2O_2 и ультрафиолета.

Установлено, что результат действия H_2O_2 и ультрафиолета зависит от плотности популяции микроорганизмов и их фазы роста. С увеличением концентрации микроорганизмов возрастает их устойчивость и к H_2O_2 и к ультрафиолету. В отличие от господствующих представлений оказалось, что наибольшей резистентностью обладают популяции, находящиеся в наиболее активной (экспоненциальной) фазе роста. В наиболее оптимальных условиях (в режиме периодического культивирования и биологической очистки с дробным внесением концентрированного субстрата-загрязнителя) микроорганизмы-фенолдеструкторы устойчивы к разовому внесению 2 % по массе H_2O_2, дрожжи, растущие на сахарозе, – к разовому внесению 16,5 % H_2O_2. Они, кроме того, выдерживают постоянную подачу перекиси со скоростью 15 г H_2O_2/(л·ч). При непрерывной и дозированной подаче перекись водорода может использоваться в качестве источника кислорода, при этом скорость разложения субстрата при лимитировании процесса *окисления кислородом воздуха увеличивается* в 2 раза. Одновременно резко возрастают суммарные количества субстратов, которые можно порционно внести в систему без замедления скорости окисления: для фенола – не менее 100 г/л, для сахарозы – не менее 1 кг/л. Максимальные скорости биологического окисления в оптимальных условиях выше в 3-5 раз. Уменьшаются остаточные содержания субстратов и секретируемых метаболитов в ферментационной среде (в очищаемой воде). Внесение H_2O_2 в зону биологического окисления также приводит к ускорению роста микробных популяций с азотобактером на среде без азота при окислении фенола.

Особенности действия ультрафиолета на микробные популяции изучены на примере модельной системы роста дрожжей на сахарозе. В диапазоне доз от 100 до 1000 Дж/м^2 (0,1-1 Вт/л) наблюдается стимулирующее действие мягкого УФА- и УФВ-излучения на рост микроорганизмов. Скорость роста дрожжей увеличивается на 10-50 %. Обнаружено, что результат действия УФ-излучения зависит не только от физиологического состояния клеточной популяции, но и от действия на нее видимого света. Наилучшими условиями для ускорения роста является совместное облучение клеток ультрафиолетом и видимым светом, так как на фоне действия ультрафиолета биологически активным оказывается видимый свет даже незначительной интенсивности (40 мВт/л), что может быть объяснено действием механизма фоторепарации повреждений, запускаемого

видимым светом, как одного из механизмов противодействия микроорганизмов стрессу, индуцируемому УФ-излучением. Без видимого света ультрафиолет даже умеренной интенсивности (1 Вт/л) репрессирует рост дрожжей. Видимый свет без облучения ультрафиолетом не действует на рост дрожжей. Таким образом, комбинированное действие ультрафиолета и видимого света может выступать в качестве инструмента для управления ростом гетеротрофных микроорганизмов, не чувствительных в обычных условиях (без УФ-облучения) к видимому свету; при этом видимый свет на фоне действия ультрафиолета может выступать в качестве фактора, управляющего ростом клеток.

Исходя из обнаруженных эффектов и полученных закономерностей, найдены основные факторы, управляющие активностью микроорганизмов в условиях окислительного стресса, индуцированного действием активных химических и фотохимических окислителей, и разработаны гибридные процессы деструкции органических соединений, включающие совместную обработку токсичных высококонцентрированных отходов микроорганизмами-деструкторами органических соединений и реактивом Фентона и биологическое окисление органических субстратов при одновременном действии мягкого ультрафиолета умеренной интенсивности и видимого света.