

Таблица 2 - Изменение состава сточной воды в результате анаэробной обработки

Основные показатели	Сильно загрязненный сток		Слабо загрязненный сток	
	до очистки	после очистки	до очистки	после очистки
pH	7,0	6,3	7,6	6,3
ХПК, мг/л	5800	600	1800	400
Общ. азот, мг/л	540	290	230	110
Общ. фосфор, мг/л	54	32	21	15
Взвещ. в-ва, мг/л	1850	35	980	21

Таким образом, результаты выполненных исследований свидетельствуют о высокой эффективности анаэробной очистки сточной воды молокоперерабатывающего производства и пригодности этого метода для предварительной очистки стока.

## Литература

- 1 Radwan K.H., Ramanujam T.K. Treatment of dairy waste water using modified RBC / *Appl. Waste Manag. Technol. Dev. Countries: Techn. Pap. Present 3rd Int. Conf. Nagpur, Febr. 25-26, 1995. Vol.1. – С. 301-306.*
- 2 Горбань Н.С., Школьник Е.М. Использование иммобилизованных микроорганизмов для увеличения эффективности очистки сточных вод. / *Химия и технология воды. – 1995, № 4 – С. 444-449.*
- 3 Лурье Ю.Ю., Рыбникова А.И. Химический анализ производственных сточных вод – М.: Химия. 1974. – 336 с

## БАКТЕРИАЛЬНЫЕ ДЕГАЛОГЕНАЗЫ

И.М. Бурак, И.В. Лайковская

*Научный руководитель - В.Н. Леонтьев  
Белорусский государственный технологический университет*

Галогенсодержащие органические соединения составляют одну из наиболее широких групп загрязнителей окружающей среды. Они широко используются в сельском хозяйстве в качестве пестицидов, в химической промышленности в качестве растворителей и мономеров для органического синтеза, а также при производстве некоторых лекарственных препаратов. Высокая токсичность, устойчивость к химическому и биологическому разложению галогенсодержащих органических соединений позволяет назвать проблему загрязнения ими биосферы одной из важнейших экологических проблем современности.

Основная роль в детоксикации попавших в окружающую среду галогенированных ксенобиотиков принадлежит микроорганизмам, в частности бактериям. В большинстве случаев элиминирование атома галогена из молекулы субстрата обусловлено наличием у бактерий специфических ферментов – дегалогеназ, и лишь иногда реакция дегалогенирования протекает спонтанно, в случае образования неустойчивого интермедиата по одному из основных метаболических путей.

В настоящее время известно семь путей ферментативного дегалогенирования ксенобиотиков [1]

“Тиопитическое” дегалогенирование У бактерий, утилизирующих дихлорметан, дегалогенирование катализирует глутатион-S-трансфераза с образованием S-хлорметилглутатиона и с последующим его дехлорированием. Способность утилизировать дихлорметан с образованием формальдегида отмечена для многих штаммов *Pseudomonas*, *Nuphomicrobium*, *Methylobacterium*. Дегалогеназа *Nuphomicrobium* sp. DM2 характеризуется как 195-кДа гомомерный белок с молекулярной массой субъединицы 33 кДа, требующий для своей работы присутствия глутатиона [2]. В дальнейшем при исследовании структуры и кинетических свойств глутатион-S-трансфераз различных штаммов бактерий было обнаружено 2 группы этих фермен-

тов имеющих различия в  $\alpha$ -структурах. Использование металлов или других кофакторов для дихлорметандегалогеназ не обнаружено.

**Восстановительное дегалогенирование** В этом случае атом галогена замещается водородом. Реакция такого типа могут протекать как в аэробных, так и в анаэробных условиях, причем в аэробных условиях возрастает способность к деградации полигалогенированных соединений. Для галогенированных алифатических соединений этот процесс протекает только в анаэробных условиях. Восстановительное дегалогенирование отмечено для многих соединений: галогенированных бензолов, толуолов, бензоатов, бром- и хлорфенолов, полихлорированных бифенилов, в разной степени замещенных хлорэтана и хлорэтилена. Процесс может быть одностадийным, когда донором электронов и протона является молекулярный водород, или двухстадийным, когда сначала происходит восстановление органическим соединением, а затем присоединение протона, происходящего из растворителя. Дегалогеназы такого типа часто являются глутатион-зависимыми ферментами. Многие дегалогеназы галогенированных алифатических соединений используют в качестве кофакторов порфирины и коррины.

**Окислительное дегалогенирование.** Реакции такого типа катализируются монооксигеназами или диоксигеназами, которые внедряют соответственно один или два атома молекулярного кислорода в молекулу субстрата. Реакции этого пути являются наиболее изученными. Они приводят к введению гидроксильных групп в молекулу субстрата, что является одной из первых стадий утилизации гидрофобных соединений. Оксигеназные системы включают комплекс ферментов, ключевым из которых является цитохром P-450. Реакции гидроксилирования сопряжены с элиминацией галогенводорода.

**Гидролитическое дегалогенирование.** Реакция катализируется гидролазами, при этом атом галогена замещается гидроксильной группой, происходящей из молекулы воды. Протекание реакций данного типа установлено в клетках многих бактерий. Это *Xanthobacter autotrophicus* GJ10, *Corynebacterium* sp. m15-3, *Rhodococcus erythropolis* Y2, *Rhodococcus* sp. HA1, *Pseudomonas paucimobilis* UT26 и др. Обнаруженные у них дегалогеназы имеют молекулярные массы в интервале от 28 до 36 кДа и используют в качестве субстрата широкий круг соединений: C<sub>1</sub>-C<sub>12</sub>-1-галоген-*n*-алканы, C<sub>2</sub>-C<sub>10</sub>- $\alpha,\omega$ -дихлор(дибром)-*n*-алканы, C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub> галогенированные спирты.

**Внутримолекулярное замещение.** Внутримолекулярное нуклеофильное замещение идет с образованием эпоксидов. По этому пути в реакцию дегалогенирования вовлекаются вицинальные галогенсодержащие спирты. Способность к деградации дигалогенированных спиртов и кетонов была обнаружена для *Pseudomonas* sp. AD1, *Athrobacter* sp. AD2, AD3. Дегалогеназа штамма AD2 конвертирует C<sub>2</sub>- и C<sub>3</sub>- бром- и хлоргидрины и обладает активностью по отношению к хлорацетону и 1,3-дихлорацетону, образуя эпоксиды в качестве продуктов и не требуя кофакторов и кислорода. Нативный белок имеет димерную структуру и субъединицы по 29 кДа [2].

**Дегидрогалогенирование.** При дегидрогалогенировании галогенводород элиминируется из молекулы субстрата с образованием двойной связи. Примером соединения, деградируемого по этому пути, является пестицид линдан ( $\gamma$ -гексахлорциклогексан), из молекулы которого на первых стадиях последовательно ферментативно элиминируются две молекулы хлороводорода, а третья элиминируется спонтанно, приводя к образованию 1,2,4-трихлорбензола. Ответственный за дегидрохлорирование белок выделен из клеток *Pseudomonas paucimobilis* UT26, состоит из четырех идентичных субъединиц по 16,5 кДа и не требует кофакторов.

**Гидратация** Гидратаза катализирует присоединение воды к двойной связи, а дегалогенирование происходит в результате распада образующегося неустойчивого интермедиата. Этот процесс протекает без участия дегалогеназ.

Таким образом можно отметить уникальность и многообразие бактериальных дегалогеназ. Участие в деградации того или иного типа дегалогеназ обусловлено видовой и родовой принадлежностью микроорганизмов, а также химической структурой деградируемого соединения. Участие в осуществлении наиболее ранних и трудно протекающих стадий разложения субстрата определяет ключевую роль этих ферментов в метаболизме ксенобиотиков.

#### Литература.

1. Fetzner S., Lingens F. Bacterial dehalogenase. *Biochemistry, Genetics, and Biotechnological Applications* // *Microbiol. Rev.*-1994.-V.58.-N.4 -P 641-685.
2. Kohler-Staub D., Leisinger T. Dichloromethane dehalogenases of *Hyphomicrobium* sp. strain DM2 // *J Bacteriol.*-1985.-V. 152.-P.676-681.
3. Xun L., Topp E., Orser C. S. Glutathione is the reducing agent for the reductive dehalogenation of tetrachloro-*p*-hydroquinone by extracts from a *Flavobacterium* sp. // *Biochem. Biophys. Res Commun.*-1992.-V 182.-P.361-366