

DOI: 10.25205/978-5-4437-1843-9-92

## СОВРЕМЕННЫЕ БИОТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕРЕФТАЛАТА

### MODERN BIOTECHNOLOGIES FOR TEREPHTHALATE RECYCLING

К. А. Кочукова, А. А. Кузьмицкая, С. В. Калёнов

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

K. A. Kochukova, A. A. Kuzmitskaya, S. V. Kalenov

*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow*

✉ kuzmichwolf@gmail.com

#### Аннотация

Мировое научное сообщество достигло значительного прогресса в области микробиологической переработки мономеров полиэтилентерефталата. В данной работе рассмотрены особенности метаболизма терефталата в клетках микроорганизмов, а также приведены примеры современных исследований в области технологий биоконверсии терефталата в продукты с добавленной себестоимостью.

#### Abstract

The global scientific community has made significant progress in the field of microbiological processing of polyethylene terephthalate monomers. This work examines the features of terephthalate metabolism in microorganism's cells and provides the examples of modern researches in the field of terephthalate bioconversion into value-added products.

В эпоху глобализации пластик стал неотъемлемой частью повседневной жизни человечества. Полиэтилентерефталат (ПЭТ) является одним из самых широко распространенных пластиковых материалов на планете, который используется в различных отраслях промышленности при изготовлении упаковочных материалов, нитей, контейнеров и емкостей для напитков. Увеличивающиеся масштабы производства полиэтилентерефталата приводят к образованию огромного количества бытовых пластиковых отходов, большая часть которых не перерабатывается в дальнейшем. В последние годы, с ростом экологического сознания, переработка полимерных отходов в продукты с добавленной себестоимостью стала одной из актуальных тем ведущих научных исследований [1, 2].

Одним из методов вторичной переработки полиэтилентерефталата является его химическая деполимеризация посредством гидролиза. В процессе гидролиза образуются ароматические мономеры (например, терефталевая кислота, динатриевый терефталат) и этиленгликоль, которые могут использоваться различными микроорганизмами в качестве источников углерода и энергии. Такие соединения обладают значительно большей биодоступностью, чем исходный пластиковый субстрат, поэтому, с целью достижения большей эффективности реализации концепций экономики замкнутого цикла, химическая деполимеризация может быть интегрирована в различные биологические системы для вторичной переработки пластиковых отходов [3].

Метаболические пути биodeградации терефталата достаточно хорошо изучены и описаны. Терефталевая кислота (ТФК) может превращаться в протокатехоат (ПКК) с помощью ферментов диоксигеназы TrpA1A2A3 и дегидрогеназы TrpB. Диоксигеназа катализирует превращение ТФК в 1,6-дигидроксициклогекса-2,4-диендикарбоксилат (ДКД), а дегидрогеназа обуславливает превращение ДКД в ПКК. В дальнейшем ПКК метаболизируется по одному из трех протокатехоатных путей (мета-, орто- или пара-расщепление), в результате чего образуются соединения, которые перерабатываются центральным клеточным метаболизмом либо по  $\beta$ -кетoadипатному пути, либо через цикл трикарбоновых кислот [4]. Также в процессе расщепления терефталата могут быть задействованы фталатный и бензоатный метаболические пути, которые приводят к образованию ПКК и катехола [5].

Современные биотехнологии переработки терефталатов основаны на сочетании инновационных подходов в области синтетической микробиологии и метаболической инженерии. В недавних исследованиях была описана технология получения биоразлагаемых полимеров полигидроксикапролатов (ПГА) из мономеров, образующихся при гидролизе ПЭТ-пленок. Синтез ПГА осуществляется в процессе культивирования генетически модифицированного штамма *Pseudomonas umsongensis* GO16 на гидролизате, содержащем терефталат и этиленгликоль в качестве источников углерода. Дополнительные модификации данного штамма позволили также получать секретируемые вещества, которые используются в качестве мономеров при химико-каталитическом синтезе полиамидоуретана [6].

Модифицированный штамм *Pseudomonas putida* KT2440 способен не только использовать ТФК и бисгидрокситерефталат (БГЭТ) в качестве единственных источников углерода, но и трансформировать БГЭТ в  $\beta$ -кетoadипиновую кислоту — мономер, который может быть полимеризован в аналог нейлона-6,6 с улучшенными эксплуатационными характеристиками [7].

Сочетание щелочного гидролиза ПЭТ и микробиологической системы культивирования генно-инженерного штамма *Rhodococcus jostii* стало основой гибридной стратегии конверсии ПЭТ-мономеров в ликопин — ценный каротиноид, обладающий антиоксидантными и противовоспалительными свойствами. При этом продукция ликопина увеличилась в 500 раз, по сравнению с исходным штаммом дикого типа [8].

Разработаны рекомбинантные штаммы *Escherichia coli*, обеспечивающие метаболические пути превращения ТФК в галловую кислоту, пирогаллол, катехол, муконовую кислоту и ванилиновую кислоту [9]. Также разработана полиферментная каскадная система для биоконверсии ТФК в ванилин в клетках *E. coli*. Для увеличения синтеза ванилина использовались методы метаболической инженерии, включающие ингибирование деградации ванилина и усиление поглощения ТФК с помощью модификаций мембранных белков для повышения проницаемости клеточных стенок бактерий [10].

Методы биоинженерии позволяют создавать микроорганизмы, способные к катаболизму терефталатов с образованием ценных химических соединений для промышленного применения.

### Литература

1. Ghosal K., Nayak C. Recent advances in chemical recycling of polyethylene terephthalate waste into value added products for sustainable coating solutions — hope vs. hype // *Materials Advances*. 2022. Vol. 3, No. 4. P. 1974–1992.
2. Chowdhury T. U., Mahi M. A., Haque K. A., Rahman M. M. A review on the use of polyethylene terephthalate (PET) as aggregates in concrete // *Malaysian Journal of Science*. 2018. Vol. 37, No. 2. P. 118–136.
3. Schaerer L. et al. Coexistence of specialist and generalist species within mixed plastic derivative-utilizing microbial communities // *Microbiome*. 2023. Vol. 11, No. 1.
4. Dissanayake L., Jayakody L. N. Engineering microbes to bio-upcycle polyethylene terephthalate // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021. Vol. 9.
5. Patrauchan M. A. et al. Catabolism of benzoate and phthalate in *Rhodococcus* sp. strain RHA1: redundancies and convergence // *Journal of Bacteriology*. 2005. Vol. 187, No. 12. P. 4050–4063.
6. Tiso T. et al. Towards bio-upcycling of polyethylene terephthalate // *Metabolic Engineering*. 2021. Vol. 66. P. 167–178.
7. Werner A. Z. et al. Tandem chemical deconstruction and biological upcycling of poly(ethylene terephthalate) to  $\beta$ -ketoadipic acid by *Pseudomonas putida* KT2440 // *Metabolic Engineering*. 2021. Vol. 67. P. 250–261.
8. Diao J. et al. Upcycling of poly(ethylene terephthalate) to produce high-value bio-products // *Cell Reports*. 2023. Vol. 42, No. 1.
9. Kim H. T. et al. Biological valorization of poly(ethylene terephthalate) monomers for upcycling waste PET // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2019. Vol. 7, No. 24. P. 19396–19406.
10. Li Y. et al. Metabolic engineering of *Escherichia coli* for upcycling of polyethylene terephthalate waste to vanillin // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 957. P. 177544.