

Научная статья

УДК 579.017.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-132-146

МЕТАБОЛИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ БАКТЕРИЙ В ОТНОШЕНИИ СИНТЕТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)

В.Ю. Ермишев¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Современные тенденции в различных отраслях промышленности направлены на использование в составе изделий конструкционных элементов, их покрытий и связующих неметаллических материалов. Молекулярная структура этой группы компонентов в своей основе содержит органические, элементоорганические, прямые или разветвленные углеродсодержащие полимеры, получаемые химическим синтезом из производных нефтепродуктов. Повсеместное применение такого рода материалов увеличивает суммарную площадь их соприкосновения с внешней средой, что приводит к постепенному разрушению как самого материала, так и всех элементов конструкций в целом. Рассмотрены биохимические механизмы биоразрушения и метаболической ассимиляции полиэтилентерефталата, поливинилол и олигомеров нейлона.

Ключевые слова: биодеструкция, бактериальные штаммы, ферментативные реакции, синтетические полимерные материалы, полиэтилентерефталат, поливиниловый спирт, нейлон

Для цитирования: Ермишев В.Ю. Метаболические возможности бактерий в отношении синтетических углеводородов, используемых в производстве неметаллических материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 2 (120). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-132-146.

Scientific article

METABOLIC POSSIBILITIES OF BACTERIA WITH RESPECT TO SYNTHETIC HYDROCARBONS USED IN THE PRODUCTION OF NON-METALLIC MATERIALS (review)

V.Yu. Ermishev¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Current trends in various industries are aimed at the use of structural elements, their coatings and binders of non-metallic materials. The molecular structure of this group of components is basically contains organic, organoelement, straight or branched carbon-containing polymers obtained by chemical synthesis from derivatives of petroleum products. The widespread use of such materials increases the total area of their contact with the external environment, which leads to the gradual destruction of both the material itself and all structural elements as a whole. The issues of biodegradation and metabolic assimilation of polyethylene terephthalate, polyvinyls and nylon oligomers are considered.

Keywords: biodegradation, bacterial strains, enzymatic reactions, synthetic polymer materials, polyethylene terephthalate, polyvinyl alcohol, nylon

For citation: Ermishev V.Yu. Metabolic possibilities of bacteria with respect to synthetic hydrocarbons used in the production of non-metallic materials (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-132-146.

Введение

Многообразие процессов жизнедеятельности у бактерий (как одноклеточных организмов) обусловлено структурно-функциональной организацией клетки, эволюционирующей в соответствии с молекулярным составом окружающей среды и климатическими условиями, которые преобладают в местах их обитания.

Для материалов, взаимодействующих с внешней средой, наиболее значимыми факторами являются климатическое и биологическое воздействия – как по отдельности, так и в комплексе [1, 2]. В настоящее время последствия климатического воздействия для многих типов неметаллических материалов хорошо описаны [3–5], поэтому в данном случае особый интерес представляют микроорганизмы как катализаторы первичных повреждений и дефектов материалов, возникших в результате воздействия климата.

Так, химическая природа гетерополимерных молекул подразумевает достаточно большое разнообразие структур мономеров и радикалов, составляющих полимерные цепи. При разрушении материалов так или иначе происходит деструкция в результате разрыва химических связей внутри полимера – например, за счет появления внешних акцепторов электронов в месте дефекта. В качестве акцепторов электронов может выступать не только вода или атмосферный кислород, но и молекулы самого полимера или соседних слоев материала, имеющих другие химические свойства. В результате таких процессов в месте дефекта могут появляться углеводородные олигомеры и мономеры. Такого рода структуры могут продолжать окисляться или восстанавливаться до полного распада на более простые соединения углерода, кислорода и азота или же стать источником углерода и энергии для метаболизма микроорганизмов.

С учетом относительно недавнего (по эволюционным меркам) появления в окружающей среде повышенных или токсических концентраций искусственно синтезированных полимеров и вытеснения ими привычных субстратов природного происхождения, микроорганизмы вынуждены модифицировать уже существующие ферментные системы и/или детерминирующие их гены и опероны для получения преимущества при выживании в данных условиях внешней среды. За последние десятилетия с развитием методов молекулярной биологии исследовано множество штаммов бактерий, способных утилизировать токсичные органические соединения. Такого рода фенотипы начали появляться в процессе направленной эволюции уже существовавших ранее видов как результат адаптации к тем существенным изменениям, которые произошли за последние 100 лет в их привычной среде обитания [6].

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

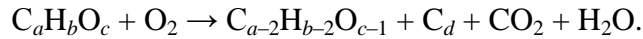
Биоразрушение материалов

Биоразрушению могут подвергаться различные металлические и неметаллические материалы. Биодеструкция – разрушение материала на молекулярном уровне под действием микроорганизмов, сопровождающееся уменьшением массы и объема физического объекта в целом [7, 8]. Микроорганизмы ответственны за разложение как природных, так и синтетических органических полимеров на составляющие их элементы с появлением в местах повреждений химических соединений, изначально не представленных в структуре материала [9]. В общем виде длительный процесс разрушения материалов в окружающей среде можно разделить на две фазы:

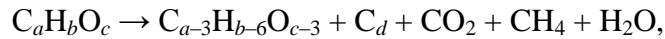
– абиотическое разрушение в результате воздействия факторов климата (механическое воздействие, температура, свет, химическая среда);

– биоразрушение как результат адгезии на материале, в том числе специфических микроорганизмов с особым типом метаболизма, способных использовать в качестве источника углерода и энергии органические молекулы из структуры материала или их производные (рис. 1) [8, 10, 11].

В зависимости от доступного акцептора электронов процесс утилизации органического соединения бактериями может иметь вид [10, 12]:



В том случае, если в окружающей атмосфере отсутствует кислород, формула принимает следующий вид [10, 12]:



где $C_aH_bO_c$ – формула органического соединения углерода; $C_{a-x}H_{b-x}O_{c-x}$ – формула остатка органического соединения углерода; C_d – биомасса (как форма углерода).

Предшествующее активному биоразрушению старение материала обусловлено факторами климата, важнейшими из которых являются температура и влажность [3, 13–15]. Нагрев изменяет физико-химические свойства составляющих полимерных композиций, увеличивая их реакционную способность [4], диффузию и сорбцию влаги [7, 16, 17], обеспечивая тем самым доступ окружающей биологической среды к молекулам материала. Протекание этих процессов в полимере начинается с поверхности и реализуется после проникновения в поверхностные слои материала окружающей его жидкой среды, представляющей собой растворы различных неорганических и органических веществ, с участием которой и происходит последующая биодеградация. Именно взаимодействие с окружающей средой является первой стадией комплекса химических, физико-химических и биологических воздействий, которым подвергается объект, вступающий в процесс биодеградации с участием бактерий [7, 16]. В зависимости от типа источника углерода, в материале или среде будут развиваться определенные сообщества микроорганизмов. Видовой состав такого микробного сообщества будет определяться, в том числе благодаря наличию у микроорганизмов ферментов с субстратной специфичностью, соответствующей представленному в среде (в материале) источнику углерода [11].

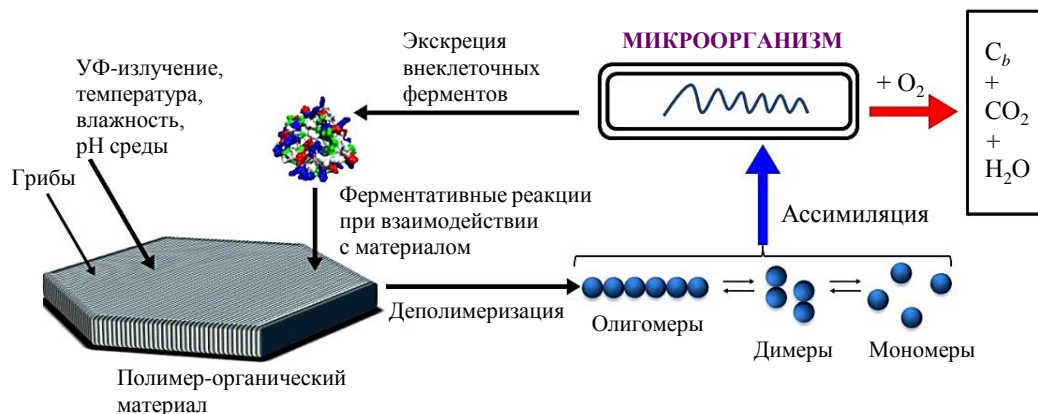


Рис. 1. Схема биоразрушения полимерных материалов

Биодеградация полиэтилентерефталата

Полиэтилентерефталат (ПЭТФ) – синтетический полиэфирный материал, изготовленный из мономеров диэтилтерефталата и получаемый, например, при одностадийном синтезе из этиленгликоля и терефталевой кислоты (рис. 2). Благодаря своим физико-химическим свойствам он находит весьма широкое применение в изделиях типа пленок, листов и волокон [8, 18].

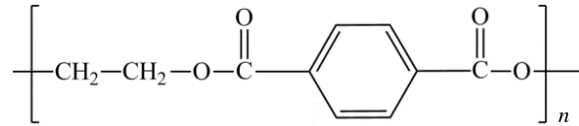


Рис. 2. Полиэтилентерефталат

Наличие ароматических компонентов с эфирными связями в составе мономера делает ПЭТФ, по сути, инертным полимером, устойчивым к биоразрушению [19].

Тем не менее накопление ПЭТФ в окружающей среде – за более чем сорокалетнюю историю его использования в составе различных материалов – привело к появлению микроорганизмов, способных к гидролизу ПЭТФ, и использованию его мономеров в качестве источника углерода. Анализ микробных сообществ различных географических локаций показал, что наибольшее количество штаммов, обладающих способностью к утилизации ПЭТФ, принадлежат к трем типам бактерий – *Gamma*proteobacteria, *Firmicutes* и *Actinobacteria*. Среди них можно отметить бактерии родов: *Pseudomonas*, *Psychrobacter*, *Acidovorax*, *Ideonella*, *Bacillus*, *Rhodococcus* и *Thermobifida* [19–23]. Наиболее изученным с точки зрения разрушения ПЭТФ является штамм *Ideonella sakaiensis* 201-F6, для которого установлен путь деградации ПЭТФ, включая структуру и активность ключевых ферментов, участвующих в этом процессе [24–26].

На рис. 3 показана деструкция ПЭТФ с помощью штамма *Ideonella sakaiensis* 201-F6 и один из возможных, по-видимому, общих для многих протеобактерий вариантов ассимиляции продуктов гидролиза ПЭТФ – терефталевой кислоты и этиленгликоля [24, 27–32].

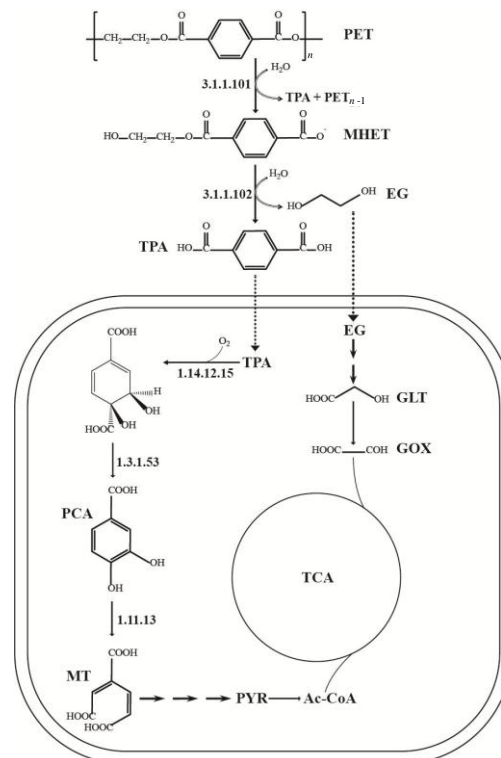


Рис. 3. Биоразрушение полиэтилентерефталата (PET – полиэтилентерефталат; МНЕТ – 4[(2-гидроксиэтокси)карбонил]бензоат; EG – этиленгликоль; ТРА – терефталевая кислота; РСА – протокатеховая кислота; МТ – 3-карбокси-цис-цис-муконат; GLT – гликолевая кислота; GOX – глиоксальная кислота; PYR – пируват; Ac-CoA – ацетилкоэнзим А; ТСА – цикл Кребса;▶транспорт через мембрану клетки)

После адгезии клеток *Ideonella sakaiensis* 201-F6 на ПЭТФ-пленке, помещенной в соответствующую питательную среду, происходит экскреция во внеклеточную среду фермента поли(этилентерефталат)гидролазы (ЕС 3.1.1.101), гидролизующего ПЭТФ до моно(2-гидроксиэтил)терефталевой и терефталевой кислот. Основной продукт – моно(2-гидроксиэтил)терефталевая кислота гидролизуется моно(этилентерефталат)гидролазой (ЕС 3.1.1.102) до терефталевой кислоты и этиленгликоля в качестве побочного продукта реакции. Терефталевая кислота доставляется в клетку специализированным белком-транспортером и последовательно катаболизируется двумя ферментами: терефталат-1,2-диоксигеназой (ЕС 1.14.12.15) и 1,2-дигидрокси-3,5-циклогексадиен-1,4-дикарбоксилатдегидрогеназой (ЕС 1.3.1.53) – в протокатеховую кислоту. Специфическая 3,4-диоксигеназа (ЕС 1.11.13) расщепляет ароматическое кольцо протокатеховой кислоты с получением метаболического интермедиата 3-карбокси-цис-цис-муконата [24, 25]. Близкие по структуре и химическому составу интермедиаты образуются у некоторых протеобактерий при метаболизме бензоата и 1,2-дигидроксибензоата в результате декарбоксилирования 3,4-протокатехуат декарбоксилазой (ЕС 4.1.1.63) с преобразованием в катехол [29, 30]. В случае орто-окисления раскрытие бензольного кольца катехола диоксигеназой формирует цис-цис-муконат [27–31].

Необходимо уточнить, что ПЭТФ-материал, использованный в эксперименте с культурой *Ideonella sakaiensis* 201-F6, имел очень низкую кристалличность (1,9 %), в то время как ПЭТФ, применяемый для изготовления, например, тары и упаковок, имеет кристалличность 30–40 %. Низкая кристалличность, очевидно, делает полимер гораздо более восприимчивым к биодеградации. Отметим, что основными сложностями при биоразложении бактериями синтетических полимеров, не подвергавшихся ранее длительному воздействию факторов климата, являются низкая биодоступность и нерастворимость полимера в воде, что ограничивает к нему доступ ферментов, участвующих в его разрушении [24, 33].

Биодеградация поливинилов

Начиная с 1920-х гг., полимеры на основе поливинила начали находить применение в производстве синтетических материалов, таких как волокна, пленки, связующие и клеи. Подобные материалы могут содержать в своей химической структуре один или несколько поливиниловых компонентов, среди которых поливинилацетат (ПВАц), поливиниловый спирт (ПВС) и поливинилбутират (ПВБ) [6, 34].

Поливинилацетат получают при полимеризации винилацетат-мономера, который образуется из уксусной кислоты и этилена в последовательном процессе окисления этилена кислородом до уксусной кислоты. В зависимости от способа полимеризации можно получить ПВАц различной молекулярной массы и степени разветвленности полимерной цепи, изменяя таким способом показатели растворимости ПВАц в воде. Последнее обстоятельство имеет весьма важное значение с точки зрения биодеструкции поливинилов. Дальнейшая трансэтерификация ПВАц с метанолом в щелочных условиях приводит к гидролизу эфирной связи в ПВАц с образованием поливинилового спирта (рис. 4) [34, 35].

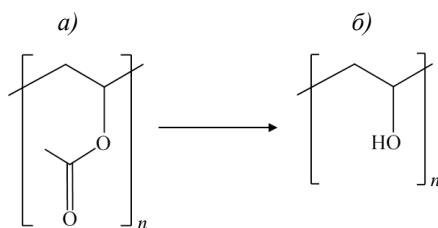


Рис. 4. Поливинилацетат (а) и поливиниловый спирт (б)

Поливиниловый спирт представляет собой водорастворимый синтетический полимер, который используется на целлюлозно-бумажных предприятиях, а также в сополимерах в качестве биоразлагаемого компонента. Это единственный ксенобиотик с полимерной углеродной цепью, который при высокой молекулярной массе может достаточно быстро поддаваться биологическому разложению без предварительного климатического воздействия [35, 36].

Хотя, с одной стороны, считается, что ПВС не токсичен для микроорганизмов, в окружающей среде достаточно сложно найти штаммы бактерий, ранее не контактировавшие с ПВС и при этом способные эффективно утилизировать ПВС в качестве единственного источника углерода. С другой стороны, поскольку водорастворимый ПВС не перерабатывается и не сжигается при попадании в окружающую среду, шанс выделить бактериальное сообщество или отдельные штаммы, утилизирующие ПВС в аэробных условиях, повышается (особенно в местах активного сброса в водные среды тех или иных поливинилсодержащих жидкостей и материалов) [36, 37].

Большинство штаммов протеобактерий, способных к утилизации ПВС, относятся к родам *Pseudomonas*, *Sphingomonas*, *Alcaligenes* и *Bacillus*. Наиболее изученными с точки зрения биохимии процессов биодеструкции и метаболизма ПВС являются штаммы *Pseudomonas* 113P3, *Alcaligenes faecalis* КК314 и *Pseudomonas putida* sp. VM15A. На рис. 5 представлен предполагаемый механизм деструкции ПВС, полученный в ходе изучения указанных штаммов бактерий [38–41].

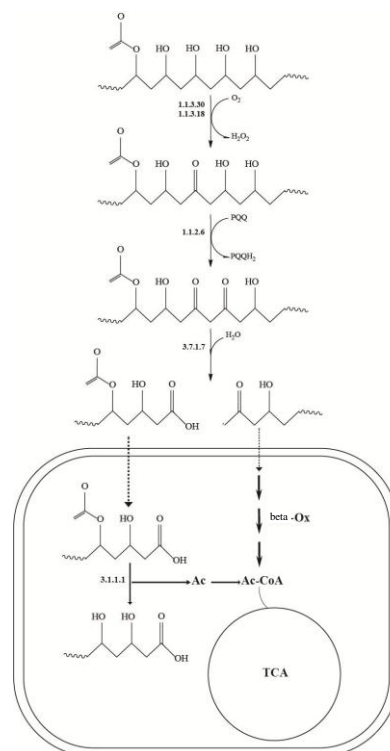


Рис. 5. Биодеструкция поливинилового спирта и предполагаемая ассимиляция продуктов гидролиза (PQQ – метоксантин; Ac – уксусная кислота; Ac-CoA – ацетилкоэнзим А; beta-Ox – β-окисление; TCA – цикл ди- и трикарбоновых кислот; ...► транспорт через мембрану клетки)

Деградация ПВС с помощью бактерий протекает в два этапа. На первом этапе происходит деполимеризация крупного полимера на более короткие олигомеры, которые могут транспортироваться через клеточные мембраны. На втором этапе полученные

олигомеры и побочные продукты гидролиза включаются в метаболические процессы внутри клетки.

В олигомеризации ПВС предположительно могут участвовать несколько внеклеточных ферментов: оксидаза ПВС (ЕС 1.1.3.30), оксидоредуктаза вторичного спирта (ЕС 1.1.3.18), ПВС дегидрогеназа (ЕС 1.1.2.6) и β -дикетон гидролаза (ЕС 3.7.1.7). Фрагменты в основной цепи ПВС сначала преобразуются во многих местах ПВС оксидазой (ЕС 1.1.3.30) и оксидоредуктазой вторичного спирта (ЕС 1.1.3.18) в гидроксикетонные и 1,3-дикетонные структуры, в этих реакциях также участвует феррицитохром-с оксидоредуктаза (ЕС 1.1.2.6), в которой в качестве одного из кофакторов используется метаксантин как акцептор электронов. Затем β -дикетон гидролаза (ЕС 3.7.1.7) раскрывает полученные 1,3-дикетонные участки с образованием в местах гидролиза ацетогрупп. Ацетильные группы, все еще присутствующие в олигомерах ПВС, удаляются внутриклеточными ацетилэстеразами (ЕС 3.1.1.1), доставляющими уксусную кислоту в процессы клеточного метаболизма [42].

Биодеградация олигомеров нейлона-6

Нейлоны – это синтетические полиамиды, используемые для производства различных волокон и пластмасс. Впервые нейлон (нейлон-66) был коммерциализован в 1938 г. американской компанией DuPont [43]. С того самого времени этот тип полимеров находит применение во многих материалах. Например, благодаря своей высокой прочности, эластичности, химической и термической стойкости нейлоны применяют в производстве различных полимерных композиционных материалов. В зависимости от характеристик полимерного композита полиамиды могут формировать состав матрицы, выступать в качестве связующего или использоваться в наполнителе [44].

Основной объем производства синтетических полиамидов составляют два типа нейлонов: поли- ϵ -капроамид (нейлон-6) и полигексаметиленадипинамид (нейлон-66). Нейлон-6 получают способом полимеризации с раскрытием кольца ϵ -капролактама и получением ϵ -аминогексановой кислоты. Оставшиеся молекулы капролактама затем реагируют с ϵ -аминогексаноатом, образуя полимеры, содержащие мономеры с шестью атомами углерода (рис. 6, а). Нейлон-66 синтезируют поликонденсацией гексаметилендиамина и адипиновой кислоты с получением мономеров с двенадцатью атомами углерода в составе полимера (рис. 6, б) [45].

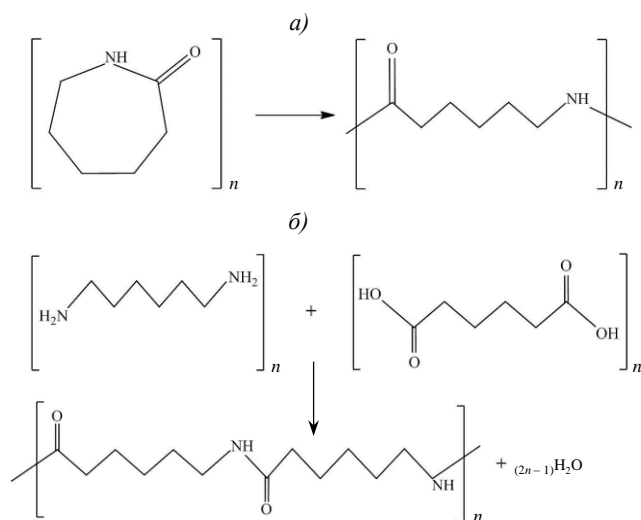


Рис. 6. Схема получения полимеров нейлона полимеризацией нейлона-6 (а) и нейлона-66 (б)

Основные предшественники промышленного синтеза нейлонов – 6-капролактама и адипиновая кислота – также являются синтетическими и образуют токсичные побочные продукты в процессе их производства. Кроме того, в процессе промышленной полимеризации 6-капролактама образуется несколько побочных продуктов, включая олигомеры 6-аминогексаноата, а также его линейные и циклические димерные формы.

Незаполимеризовавшийся 6-капролактама и упомянутые побочные продукты, имея хорошую растворимость в воде, зачастую, сбрасывались в окружающую среду в виде неочищенных промышленных стоков, быстро достигая там токсических концентраций. Например, микробная деградация 6-капролактама в активном иле была выявлена уже спустя 30 лет с момента начала промышленного производства нейлонов [45–47]. Несмотря на то что в последние годы активно разрабатываются способы экологичной переработки нейлонов, в том числе с использованием микроорганизмов, большинство нейлоновых отходов утилизируется путем сжигания или захоронения.

Полимерные формы нейлона-6 (в отличие, например, от нейлона-4) почти не подвержены разрушению микроорганизмами: известны лишь несколько штаммов грибов, способных относительно быстро (не менее нескольких недель) расти в минеральной среде с добавлением микроволокон нейлона [48]. Для бактерий более или менее достоверно установлен биохимический механизм деполимеризации олигомеров 6-аминогексановой кислоты, ее линейных и циклических димеров, а также утилизации исходных компонентов для синтеза нейлона – 6-капролактама и адипиновой кислоты (рис. 7) [49, 50].

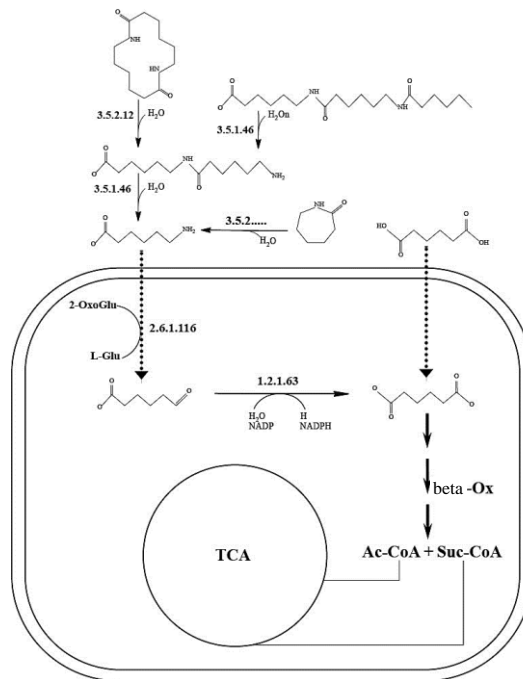


Рис. 7. Биодеструкция циклической и олигомерной формы нейлона-6 (2-OxoGlu – 2-оксоглутаровая кислота; L-Glu – глутаминовая кислота; NADP – никотинамиддинуклеотид фосфат; Ac-CoA – ацетилкоэнзим А; Suc-CoA – сукцинилкоэнзим А; beta-Ox – β-окисление; TCA – цикл ди- и трикарбоновых кислот; ...► транспорт через мембрану клетки)

Количество и видовое разнообразие штаммов, способных лучше утилизировать линейные мономеры, по-видимому, существенно больше тех, которые способны деградировать олигомерные, димерные и циклические формы 6-аминогексаноата. Этому обстоятельству также способствует возможность неферментативного гидролиза 6-капролактама с образованием мономера аминокaproновой кислоты.

Среди протеобактерий, способных в аэробных условиях ассимилировать продукты гидролиза 6-капролактама, следует отметить: *Alcaligenes faecalis*, *Arthrobacter citreus*, *Rhodococcus rhodochrous*, *Pseudomonas putida* [51]. В качестве модельных микроорганизмов, способных использовать олигомерные формы 6-аминогексановой кислоты как единственного источника углерода, известны штаммы *Arthrobacter sp.* KI72 и *Pseudomonas sp.* NK87 [52]. Микробная ассимиляция адипиновой кислоты была исследована при изучении *Acinetobacter baylyi* [53].

Деструкция циклических димеров и линейных олигомеров 6-аминогексановой кислоты происходит в две стадии с участием двух гидролаз. Внеклеточная 6-аминогексаноат гидролаза (ЕС 3.5.2.12) специфически гидролизует одну из двух амидных связей в циклическом димере 6-аминогексановой кислоты с образованием линейного димера. Далее с помощью сериновой экзогидролазы (ЕС 3.5.1.46) происходит гидролиз полученных на первой стадии димеров с образованием мономера 6-аминогексановой кислоты. Полученная таким образом аминокaproновая кислота (так же как и адипиновая кислота), вероятно, может транспортироваться внутрь клетки – например, с участием некоторых компонентов системы транспорта олигопептидов. Внутриклеточный метаболизм аминокaproновой кислоты происходит с участием трансаминазы (ЕС 2.6.1.116) и дегидрогеназы (ЕС 1.2.1.63) с получением адипиновой кислоты. Последняя, включаясь в последовательные реакции β -окисления, образует ключевые интермедиаты центрального метаболизма – сукцинил-коэнзим А и ацетил-коэнзим А [54].

Заключения

В обзоре относительно подробно рассмотрены лишь несколько примеров хорошо известных биохимических механизмов деструкции синтетических полимеров с участием бактерий. Большинство подобных экспериментов проводилось в лабораторных условиях на специально подобранных материалах с учетом их плотности, кристалличности, термостойкости и т. д., которые погружались в соответствующую питательную среду для обеспечения длительного выживания культуры вблизи материала и беспрепятственной адгезии на его поверхности. Задачей этих фундаментальных исследований было выяснение структуры и функции ферментов, задействованных в разрушении материала, а также установление взаимосвязей с уровнем экспрессии и регуляции соответствующих генов бактерий, обеспечивающим возможность использовать в качестве источника углерода и энергии молекулы материала.

Основная сложность не лабораторной биодеструкции или утилизации многих твердых синтетических полимеров с участием бактерий или ферментных препаратов, полученных с их помощью, заключается в высоком уровне кристалличности и термостойкости, исключающем возможность проникновения достаточного количества воды и минеральных веществ внутрь структуры полимера. Следует также учитывать возможность включения биоцидных компонентов в материалы покрытий, исключающих адгезию и рост микроорганизмов на поверхности таких покрытий.

В последние годы актуальным направлением при разработке материалов является установление сроков эксплуатации и способов последующей утилизации: в зависимости от назначения в изделиях с небольшим сроком службы все большее применение находят биоразлагаемые полимеры. В то же время, например, в авиации, где сроки эксплуатации изделий могут составлять десятки лет, большинство твердых полимерных материалов практически не подвержены биодеструкции (без учета длительных климатических воздействий) и, следовательно, не могут быть утилизированы как биоразлагаемые полимеры. Если же рассматривать биодеструкцию не как способ утилизации,

а как одну из причин сокращения срока службы материалов и конструкций, то в этой связи актуальным направлением исследований может быть оценка биостойкости материалов после ускоренных климатических испытаний, имитирующих воздействие комплекса климатических факторов, а также идентификация и молекулярно-генетические исследования бактериальных штаммов, участвующих в процессах биоразрушения.

Список источников

1. Кривушина А.А., Бобырева Т.В., Горяшник Ю.С., Бухарев Г.М. Изучение микроорганизмов-деструкторов функциональных полимерных материалов в условиях имитации тропического климата // Труды ВИАМ. 2019. № 7 (79). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-76-83.
2. Мовенко Д.А., Лаптев А.Б., Голубев А.В., Киреев Д.М. Анализ биодеструкции поверхности материалов в системе охлаждающей воды нефтехимического предприятия // Труды ВИАМ. 2019. № 7 (79). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-112-124.
3. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic aging of aviation polymer composite materials. II. Development of methods for studying the early stages of aging // Russian metallurgy (Metally). 2020. Vol. 2020. No. 10. P. 1088–1094. DOI: 10.1134/S0036029520100110.
4. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 1. С. 34–40.
5. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
6. Staudinger H. Über Polymerisation // Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft. 1920. No. 53. P. 1081.
7. Иорданский А.Л., Заиков Г.Е., Берлин А.А. Диффузионная кинетика и гидролиз биоразлагаемых полимеров. Потеря массы и контроль высвобождения низкомолекулярных веществ // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 2. С. 2–11.
8. Лаптев А.Б., Голубев А.В., Киреев Д.М., Николаев Е.В. К вопросу биодеструкции полимерных материалов в природных средах (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 9 (81). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-100-107.
9. Focht D.D. Biodegradation // AccessScience. 2020. Vol. 27. P. 57–72. DOI: 10.1036/1097-8542.422025.
10. Lucas N., Bienaime C., Belloy C. et al. Polymer biodegradation: mechanisms and estimation techniques // Chemosphere. 2008. No. 4. P. 429. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.06.064.
11. Cappitelli F., Sorlini C. Microorganisms attack synthetic polymers in items Representing our cultural heritage // Applied and Environmental Microbiology. 2008. Vol. 74. No. 3. P. 564–569. DOI: 10.1128/AEM.01768-07.
12. Eskander S., Saleh H. Biodegradation: Process Mechanism // Environmental Science and Engineering. 2017. Vol. 8. No. 1. P. 1–31.
13. Старцев О.В., Мелетов В.П., Перов Б.В., Машинская Г.П. Исследование механизма старения органотекстолита в субтропическом климате // Механика композитных материалов 1986. № 3. С. 462–467.
14. Startsev O.V., Krotov A., Mashinskaya G. Climatic Ageing of Organic Fiber Reinforced Plastics: Water Effect // Journal Polymeric Material. 1997. Vol. 37. P. 161–171.
15. Startsev O.V. Structural Heterogeneity and Physical Properties of Climatic Aged Polymeric Composite Materials // EUROMECH 350: Proc. Conf. Image Analysis, Porous Materials and Physical Properties. 1996. P. 114–117.
16. Frisch H.L. Diffusion in polymers // Journal of Applied Polymer Science. 1970. No. 14. P. 1657.

17. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагоднасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
18. Chetna S., Madhuri S. Studies on biodegradation of polyethylene terephthalate: A synthetic polymer // *Journal of Microbiology and Biotechnology Research*. 2012. No. 2. P. 248–257. URL: <https://www.researchgate.net/publication/306202944> (дата обращения: 24.02.2022).
19. Sinha V., Patel M.R., Patel J.V. Pet Waste Management by Chemical Recycling: A Review // *Journal of Polymers and the Environment*. 2010. No. 18. P. 8–25. DOI: 10.1007/s10924-008-0106-7.
20. Sharon M., Sharon C. Studies on biodegradation of polyethylene terephthalate: a synthetic polymer // *Journal Microbiology and Biotechnology Research*. 2012. Vol. 2. P. 248–257. URL: <https://www.researchgate.net/publication/306202944> (дата обращения: 24.02.2022).
21. Ghosh S., Pal S., Ray S. Study of microbes having potentiality for biodegradation of plastics // *Environmental Science and Pollution Research (ESPR)*. 2013. Vol. 20. P. 4339–4355. DOI: 10.1007/s11356-013-1706.
22. Danso D., Schmeisser C., Chow J. et al. New insights into the function and global distribution of polyethylene terephthalate PET-degrading bacteria and enzymes in marine and terrestrial metagenomes // *Applied and Environmental Microbiology*. 2018. Vol. 84. P. 3–17. DOI: 10.1128/AEM.02773-17.
23. Zheng Y., Yanful E.K., Bassi A.S. A Review of Plastic Waste Biodegradation // *Critical Reviews in Biotechnology*. 2005. Vol. 25. P. 243–250. DOI: 10.1080/07388550500346359.
24. Yoshida S., Hiraga K., Takehana T. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate) // *Science*. 2016. Vol. 353. P. 759–759.
25. Tourova T.P., Sokolova D.Sh., Nazina T.N. et al. Phylogenetic Diversity of Microbial Communities from the Surface of Polyethylene Terephthalate Materials Exposed to Different Water Environments // *Microbiology*. 2020. Vol. 89. No. 1. P. 96–106. DOI: 10.1134/S0026261720010154.
26. Liu C., Shi C., Zhu S. et al. Structural and functional characterization of polyethylene terephthalate hydrolase from *Ideonella sakaiensis* // *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2019. Vol. 508. P. 289–294. DOI: 10.1016/j.bbrc.2018.11.148.
27. Loh K., Chua S. Ortho pathway of benzoate degradation in *Pseudomonas putida*: induction of meta pathway at high substrate concentrations // *Enzyme and Microbial Technology*. 2002. Vol. 30. P. 620–626. DOI: 10.1016/S0141-0229(02)00016-9.
28. Banerjee A., Ghoshal A. Phenol degradation by *Bacillus cereus*: Pathway and kinetic modeling // *Bioresource Technology*. 2010. Vol. 101. P. 5501–5507. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.02.018.
29. Grant D.J., Patel J.C. The non-oxidative decarboxylation of p-hydroxybenzoic acid, gentisic acid, protocatechuic acid and gallic acid by *Klebsiella aerogenes* (*Aerobacter aerogenes*) // *Antonie van Leeuwenhoek*. 1969. No. 35. P. 325–343. DOI: 10.1007/BF02219153.
30. Mpfu E., Chakraborty J., Suzuki-Minakuchi C. et al. Biotransformation of Monocyclic Phenolic Compounds by *Bacillus licheniformis* TAB7 // *Microorganisms*. 2019. Vol. 8. P. 1–12. DOI: 10.3390/microorganisms8010026.
31. Wilkes R.A., Aristilde L. Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: capabilities and challenges // *Journal of Applied Microbiology*. 2017. Vol. 123. P. 582–593. DOI: 10.1111/jam.13472.
32. Revitt D.M., Worrall P. Low temperature biodegradation of airport de-icing fluids // *Water Science and Technology*. 2003. Vol. 48. No. 9. P. 103–111.
33. Narancic T., Kevin E. Plastic waste as a global challenge: are biodegradable plastics the answer to the plastic waste problem // *Microbiology*. 2019. Vol. 165. P. 129–137. DOI: 10.1099/mic.0.000749.
34. Kricheldorf H.R., Nuyken O., Swift G. Handbook of polymer synthesis. Second edition. CRC Press, 2004. P. 97–124.
35. Premraj R., Mukesh D. Biodegradation of polymers // *Indian Journal of Biotechnology*. 2005. Vol. 4. P. 186–193.

36. Hu X., Mamoto R., Shimomura Y. et al. Cell surface structure enhancing uptake of polyvinyl alcohol (PVA) is induced by PVA in the PVA-utilizing *Sphingopyxis* sp. strain 113P3 // *Archives of Microbiology*. 2007. No. 188. P. 235–241. DOI: 10.1007/s00203-007-0239-4.
37. Kim M., Yoon M. Isolation of strains degrading poly(Vinyl alcohol) at high temperatures and their biodegradation ability // *Polymer Degradation and Stability*. 2010. No. 95. P. 89–93. DOI: 10.1016/j.polyimdegradstab.2009.09.014.
38. Hatanaka T., Kawahara T., Asahi N., Tsuji M. Effects of the structure of poly(vinylalcohol) on the dehydrogenation reaction by poly(vinyl alcohol) dehydrogenase from *Pseudomonas* sp. 113P3 // *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*. 1995. No. 59. P. 1229–1231.
39. Matsumura S., Tomizawa N., Toki A. et al. Novel Poly(vinyl alcohol)-Degrading Enzyme and the Degradation Mechanism // *Macromolecules*. 1999. Vol. 32. No. 23. P. 7753–7761. DOI: 10.1021/ma990727b.
40. Klomklang W., Tani A., Kimbara K. et al. Biochemical and molecular characterization of a periplasmic hydrolase for oxidized polyvinyl alcohol from *Sphingomonas* sp. strain 113P3 // *Microbiology*. 2005. Vol. 151. P. 1255–1262. DOI: 10.1099/mic.0.27655-0.
41. Shima M., Onishi S., Kato N., Sakazawa C. Pyrroloquinoline Quinone-Dependent Cytochrome Reduction in Polyvinyl Alcohol-Degrading *Pseudomonas* sp. Strain VM15C // *Applied and Environmental Microbiology*. 1989. Vol. 55. No. 2. P. 275–278. DOI: 10.1128/aem.55.2.275-278.1989.
42. Hu X., Kawai F. Biochemistry of microbial polyvinyl alcohol degradation // *Applied and Environmental Microbiology*. 2009. Vol. 84. P. 227–237.
43. Welgos R.J. *Polyamides, Plastics*. 2nd ed. Allied Chemical Corporation in EPSE, 1975. Vol. 11. P. 445–476.
44. Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Современные полимерные композиционные материалы и их применение // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2018. № 5. Ч. 1. С. 245–256.
45. Palmer R.J. *Polyamides, Plastics* // *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. 2002. No. 3. P. 251. DOI: 10.1002/0471440264.pst251.
46. Iizuka H., Tanabe I., Fukumura T., Kato K. Taxonomic study on the ϵ -caprolactam-utilizing bacteria // *Journal of General Microbiology*, 1967. No. 13. P. 125–137.
47. Боронин А.М., Грищенко В.Г., Кулаков Л.А., Наумова Р.П. Характеристика плазмиды рBS271 контролирующей деградацию капролактама бактериями рода *Pseudomonas* // *Микробиология*. 1986. № 55 (2). С. 231.
48. Friedrich J., Zalar P., Mohorcic M. et al. Ability of fungi to degrade synthetic polymer nylon-6 // *Chemosphere*, 2007. No. 67. P. 2089–2095. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.09.038.
49. Kakudo S., Negoro S., Urabe I., Okada H. Nylon Oligomer Degradation Gene, nylC, on Plasmid pOAD2 from a *Flavobacterium* Strain Encodes Endo-Type 6-Aminohexanoate Oligomer Hydrolase: Purification and Characterization of the nylC Gene Product // *Applied and environmental microbiology*. 1993. Vol. 59. No. 11. P. 3978–3980. DOI: 10.1128/aem.59.11.3978-3980.1993.
50. Okada H., Negoro S., Kimura H., Nakamura S. Evolutionary adaptation of plasmid-encoded enzymes for degrading nylon oligomers // *Nature*. 1983. No. 306 (5939). P. 203–206. DOI: 10.1038/306203a0.
51. Baxi N., Shah A. Biological treatment of the components of solid oligomeric waste from a nylon-6 production plant // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2000. No. 16. P. 835–840. DOI: 10.1023/A:1008971216941.
52. Negoro S. Biodegradation of nylon Oligomers // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2000. No. 54. P. 461–466. DOI: 10.1007/s002530000434.
53. Parke D., Garcia M.A., Ornston L.N. Cloning and Genetic Characterization of dca Genes Required for Oxidation of Straight-Chain Dicarboxylic Acids in *Acinetobacter* sp. Strain ADP1 // *Applied and Environmental Microbiology*. 2001. Vol. 67. No. 10. DOI: 10.1128/AEM.67.10.4817-4827.2001.
54. Takehara I., Fujii T., Tanimoto Y. et al. Metabolic pathway of 6-aminohexanoate in the nylon oligomer-degrading bacterium *Arthrobacter* sp. KI72: identification of the enzymes responsible for the conversion of 6-aminohexanoate to adipate // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2018. No. 102. Vol. 2. P. 801–814. DOI: 10.1007/s00253-017-8657-y.

References

1. Krivushina A.A., Bobyрева T.V., Goryashnik Yu.S., Bukharev G.M. Study of microorganisms the destructors of functional polymeric materials exposed under conditions of tropical climate simulation. *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 24, 2022). DOI: 10.18577/2307-60460-2019-0-7-76-83.
2. Movenko D.A., Laptev A.B., Golubev A.V., Kireev D.M. The analysis of the material surface biodegradation in the petrochemical plant cooling water system. *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 12. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: September 24, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-112-124.
3. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic aging of aviation polymer composite materials. II. Development of methods for studying the early stages of aging. *Russian metallurgy (Metally)*, 2020, vol. 2020, no. 10, pp. 1088–1094. DOI: 10.1134/S0036029520100110.
4. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of aviation composite materials. III. Significant factors of aging. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2011, no. 1, pp. 34–40.
5. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
6. Staudinger H. Über Polymerisation. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 1920, no. 53, p. 1081.
7. Jordansky A.L., Zaikov G.E., Berlin A.A. Diffusion kinetics and hydrolysis biodegradable polymers. Mass loss and control of the release of low molecular weight substances. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 2–11.
8. Laptev A.B., Golubev A.V., Kireev D.M., Nikolaev E.V. To the question of biodegradation of polymeric materials in natural environments (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 9 (81), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 24, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-100-107.
9. Focht D.D. Biodegradation. *AccessScience*, 2020, vol. 27, pp. 57–72. DOI: 10.1036/1097-8542.422025.
10. Lucas N., Bienaime C., Belloy C. et al. Polymer biodegradation: mechanisms and estimation techniques. *Chemosphere*, 2008, no. 4, p. 429. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.06.064.
11. Cappitelli F., Sorlini C. Microorganisms attack synthetic polymers in items Representing our cultural heritage. *Applied and Environmental Microbiology*, 2008, vol. 74, no. 3, pp. 564–569. DOI: 10.1128/AEM.01768-07.
12. Eskander S., Saleh H. Biodegradation: Process Mechanism. *Environmental Science and Engineering*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 1–31.
13. Startsev O.V., Meletov V.P., Perov B.V., Mashinskaya G.P. Study of the mechanism of aging of organotextolite in a subtropical climate. *Mechanics of Composite Materials*, 1986, no. 3, pp. 462–467.
14. Startsev O.V., Krotov A., Mashinskaya G. Climatic Ageing of Organic Fiber Reinforced Plastics: Water Effect. *Journal Polymeric Material*, 1997, vol. 37, pp. 161–171.
15. Startsev O.V. Structural Heterogeneity and Physical Properties of Climatic Aged Polymeric Composite Materials. *EUROMECH 350: Proc. Conf. Image Analysis, Porous Materials and Physical Properties*, 1996, pp. 114–117.
16. Frisch H.L. Diffusion in polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 1970, no. 14, pp. 1657.
17. Kablov E.N., Startsev V.O., Inozemtsev A.A. The moisture absorption of structurally similar samples from polymer composite materials in open climatic conditions with application of thermal spikes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
18. Chetna S., Madhuri S. Studies on biodegradation of polyethylene terephthalate: A synthetic polymer. *Journal of Microbiology and Biotechnology Research*, 2012, no. 2, pp. 248–257. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/306202944> (accessed: September 24, 2022).

19. Sinha V., Patel M.R., Patel J.V. Pet Waste Management by Chemical Recycling: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*, 2010, no. 18, pp. 8–25. DOI: 10.1007/s10924-008-0106-7.
20. Sharon M., Sharon C. Studies on biodegradation of polyethylene terephthalate: a synthetic polymer. *Journal Microbiology and Biotechnology Research*, 2012, vol. 2, pp. 248–257. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/306202944> (accessed: September 24, 2022).
21. Ghosh S., Pal S., Ray S. Study of microbes having potentiality for biodegradation of plastics. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, vol. 20, pp. 4339–4355. DOI: 10.1007/s11356-013-1706.
22. Danso D., Schmeisser C., Chow J. et al. New insights into the function and global distribution of polyethylene terephthalate PET-degrading bacteria and enzymes in marine and terrestrial metagenomes. *Applied and Environmental Microbiology*, 2018, vol. 84, pp. 3–17. DOI: 10.1128/AEM.02773-17.
23. Zheng Y., Yanful E.K., Bassi A.S. A Review of Plastic Waste Biodegradation. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2005, vol. 25, pp. 243–250. DOI: 10.1080/07388550500346359.
24. Yoshida S., Hiraga K., Takehana T. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 2016, vol. 353, pp. 759–759.
25. Tourova T.P., Sokolova D.Sh., Nazina T.N. et al. Phylogenetic Diversity of Microbial Communities from the Surface of Polyethylene Terephthalate Materials Exposed to Different Water Environments. *Microbiology*, 2020, vol. 89, no. 1, pp. 96–106. DOI: 10.1134/S0026261720010154.
26. Liu C., Shi C., Zhu S. et al. Structural and functional characterization of polyethylene terephthalate hydrolase from *Ideonella sakaiensis*. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2019, vol. 508, pp. 289–294. DOI: 10.1016/j.bbrc.2018.11.148.
27. Loh K., Chua S. Ortho pathway of benzoate degradation in *Pseudomonas putida*: induction of meta pathway at high substrate concentrations. *Enzyme and Microbial Technology*, 2002, vol. 30, pp. 620–626. DOI: 10.1016/S0141-0229(02)00016-9.
28. Banerjee A., Ghoshal A. Phenol degradation by *Bacillus cereus*: Pathway and kinetic modeling. *Bioresource Technology*, 2010, vol. 101, pp. 5501–5507. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.02.018.
29. Grant D.J., Patel J.C. The non-oxidative decarboxylation of p-hydroxybenzoic acid, gentisic acid, protocatechuic acid and gallic acid by *Klebsiella aerogenes* (*Aerobacter aerogenes*). *Antonie van Leeuwenhoek*, 1969, no. 35, pp. 325–343. DOI: 10.1007/BF02219153.
30. Mpfu E., Chakraborty J., Suzuki-Minakuchi C. et al. Biotransformation of Monocyclic Phenolic Compounds by *Bacillus licheniformis* TAB7. *Microorganisms*, 2019, vol. 8, pp. 1–12. DOI: 10.3390/microorganisms8010026.
31. Wilkes R.A., Aristilde L. Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: capabilities and challenges. *Journal of Applied Microbiology*, 2017, vol. 123, pp. 582–593. DOI: 10.1111/jam.13472.
32. Revitt D.M., Worrall P. Low temperature biodegradation of airport deicing fluids. *Water Science and Technology*, 2003, vol. 48, no. 9, pp. 103–111.
33. Narancic T., Kevin E. Plastic waste as a global challenge: are biodegradable plastics the answer to the plastic waste problem. *Microbiology*, 2019, vol. 165, pp. 129–137. DOI: 10.1099/mic.0.000749.
34. Kricheldorf H.R., Nuyken O., Swift G. *Handbook of polymer synthesis*. Second edition. CRC Press, 2004, pp. 97–124.
35. Premraj R., Mukesh D. Biodegradation of polymers. *Indian Journal of Biotechnology*, 2005, vol. 4, pp. 186–193.
36. Hu X., Mamoto R., Shimomura Y. et al. Cell surface structure enhancing uptake of polyvinyl alcohol (PVA) is induced by PVA in the PVA-utilizing *Sphingopyxis* sp. strain 113P3. *Archives of Microbiology*, 2007, no. 188, pp. 235–241. DOI: 10.1007/s00203-007-0239-4.
37. Kim M., Yoon M. Isolation of strains degrading poly(Vinyl alcohol) at high temperatures and their biodegradation ability. *Polymer Degradation and Stability*, 2010, no. 95, pp. 89–93. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2009.09.014.
38. Hatanaka T., Kawahara T., Asahi N., Tsuji M. Effects of the structure of poly(vinylalcohol) on the dehydrogenation reaction by poly(vinyl alcohol) dehydrogenase from *Pseudomonas* sp. 113P3. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 1995, no. 59, pp. 1229–1231.

39. Matsumura S., Tomizawa N., Toki A. et al. Novel Poly(vinyl alcohol)-Degrading Enzyme and the Degradation Mechanism. *Macromolecules*, 1999, vol. 32, no. 23, pp. 7753–7761. DOI: 10.1021/ma990727b.
40. Klomklang W., Tani A., Kimbara K. et al. Biochemical and molecular characterization of a periplasmic hydrolase for oxidized polyvinyl alcohol from *Sphingomonas* sp. strain 113P3. *Microbiology*, 2005, vol. 151, pp. 1255–1262. DOI: 10.1099/mic.0.27655-0.
41. Shima M., Onishi S., Kato N., Sakazawa C. Pyrroloquinoline Quinone-Dependent Cytochrome Reduction in Polyvinyl Alcohol-Degrading *Pseudomonas* sp. Strain VM15C. *Applied and Environmental Microbiology*, 1989, vol. 55, no. 2, pp. 275–278. DOI: 10.1128/aem.55.2.275-278.1989.
42. Hu X., Kawai F. Biochemistry of microbial polyvinyl alcohol degradation. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, vol. 84, pp. 227–237.
43. Welgos R.J. *Polyamides, Plastics*. 2nd ed. Allied Chemical Corporation in EPSE, 1975, vol. 11, pp. 445–476.
44. Kolosova A.S., Sokolskaya M.K., Vitkalova I.A., Torlova A.S., Pikalov E.S. Modern polymer composite materials and their application. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*, 2018, no. 5, part 1, pp. 245–256.
45. Palmer R.J. *Polyamides, Plastics. Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, 2002, no. 3, p. 251. DOI: 10.1002/0471440264.pst251.
46. Iizuka H., Tanabe I., Fukumura T., Kato K. Taxonomic study on the ϵ -caprolactam-utilizing bacteria. *Journal of General Microbiology*, 1967, no. 13, pp. 125–137.
47. Boronin A.M., Grishchenkov V.G., Kulakov L.A., Naumova R.P. Characteristics of plasmid pBS271 controlling epsilon-caprolactam degradation by bacteria in the genus *Pseudomonas*. *Mikrobiologiya*, 1986, no. 55 (2), p. 231.
48. Friedrich J., Zalar P., Mohorcic M. et al. Ability of fungi to degrade synthetic polymer nylon-6. *Chemosphere*, 2007, no. 67, pp. 2089–2095. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.09.038.
49. Kakudo S., Negoro S., Urabe I., Okada H. Nylon Oligomer Degradation Gene, nylC, on Plasmid pOAD2 from a *Flavobacterium* Strain Encodes Endo-Type 6-Aminohexanoate Oligomer Hydrolase: Purification and Characterization of the nylC Gene Product. *Applied and environmental microbiology*, 1993, vol. 59, no. 11, pp. 3978–3980. DOI: 10.1128/aem.59.11.3978-3980.1993.
50. Okada H., Negoro S., Kimura H., Nakamura S. Evolutionary adaptation of plasmid-encoded enzymes for degrading nylon oligomers. *Nature*, 1983, no. 306 (5939), pp. 203–206. DOI: 10.1038/306203a0.
51. Baxi N., Shah A. Biological treatment of the components of solid oligomeric waste from a nylon-6 production plant. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2000, no. 16, pp. 835–840. DOI: 10.1023/A:1008971216941.
52. Negoro S. Biodegradation of nylon Oligomers. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2000, no. 54, pp. 461–466. DOI: 10.1007/s002530000434.
53. Parke D., Garcia M.A., Ornston L.N. Cloning and Genetic Characterization of dca Genes Required for Oxidation of Straight-Chain Dicarboxylic Acids in *Acinetobacter* sp. Strain ADP1. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, vol. 67, no. 10. DOI: 10.1128/AEM.67.10.4817-4827.2001.
54. Takehara I., Fujii T., Tanimoto Y. et al. Metabolic pathway of 6-aminohexanoate in the nylon oligomer-degrading bacterium *Arthrobacter* sp. KI72: identification of the enzymes responsible for the conversion of 6-aminohexanoate to adipate. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, no. 102, vol. 2, pp. 801–814. DOI: 10.1007/s00253-017-8657-y.

Информация об авторах

Ермишев Владимир Юрьевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladimir Yu. Ermishev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 16.08.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 26.08.2022.

The article was submitted 16.08.2022; approved and accepted for publication after reviewing 26.08.2022.