

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-138-148

## ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ К БИОДЕСТРУКЦИИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

### Часть 1. Разрушение полимерных материалов в природных средах, выбор штаммов бактерий, питательные среды и условия культивирования

В.Ю. Ермишев<sup>1</sup>, А.Б. Лаптев<sup>1</sup>, В.О. Старцев<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** *Описаны этапы биодеструкции в окружающей среде синтетических углеводородов, имеющих полимерную структуру. Отдельное внимание уделено подбору бактериальных штаммов и питательных сред для проведения испытаний соответствующих материалов в лаборатории. Показана роль микроорганизмов в получении ферментных препаратов с указанием классов ферментов, функционально значимых в процессах разрушения материалов. Представлены сведения о параметрах и условиях лабораторных экспериментов с участием бактериальных штаммов, у которых предполагается наличие фенотипа биодеструктора.*

**Ключевые слова:** биодеструкция, бактериальные штаммы, питательные среды, синтетические полимерные материалы, ферментные препараты, биотехнологии

**Для цитирования:** Ермишев В.Ю., Лаптев А.Б., Старцев В.О. Особенности оценки стойкости полимерных материалов к биодеструкции в лабораторных условиях. Часть 1. Разрушение полимерных материалов в природных средах, выбор штаммов бактерий, питательные среды и условия культивирования // Труды ВИАМ. 2023. № 7 (125). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-138-148.

Scientific article

## PECULIARITIES OF ASSESSING THE RESISTANCE OF POLYMERIC MATERIALS TO BIODEGRADATION IN LABORATORY CONDITIONS

### Part 1. Degradation of polymeric materials in natural environments, selection of bacterial strains, nutrient media and cultivation conditions

V.Yu. Ermishev<sup>1</sup>, A.B. Laptev<sup>1</sup>, V.O. Startsev<sup>1</sup>

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

**Abstract.** *Describes the stages of biodegradation in the environment of synthetic hydrocarbons having a polymeric structure. Special attention is paid to the selection of bacterial strains and nutrient media for testing the relevant materials in the laboratory. The role of microorganisms in the production of enzyme preparations is shown, indicating the classes of enzymes that are functionally significant in the processes of destruction of materials. Information about the parameters and conditions of laboratory experiments involving bacterial strains, which are assumed to have a biodestructor phenotype, is presented.*

**Keywords:** biodegradation, bacterial strains, nutrient media, synthetic polymeric materials, enzyme preparations, biotechnologies

**For citation:** Ermishev V.Yu., Laptev A.B., Startsev V.O. Peculiarities of assessing the resistance of polymeric materials to biodegradation in laboratory conditions. Part 1. Degradation of polymeric materials in natural environments, selection of bacterial strains, nutrient media and cultivation conditions. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-138-148.

### Введение

В настоящее время во всех областях деятельности – в промышленности, на транспорте, в быту и сельском хозяйстве [1] – заметно постоянное движение современной цивилизации «из века железного в век пластиковый» [2]. Разработаны и внедрены в производство материалы на полимерной основе, индифферентные к воздействию природных, индустриальных и химически активных сред. Высокая стойкость полимерных материалов к воздействию окружающей среды создает сложности при их переработке и утилизации. Основными загрязнителями окружающей среды являются упаковочные полимерные материалы, такие как полиэтилентерефталат (ПЭТ) и полистирол.

Среди всего многообразия микроорганизмов найдена единственная бактерия *Ideonella sakaiensis*, которая напрямую разлагает ПЭТ на терефталевую кислоту и этиленгликоль [3]. Данные штаммы микроорганизмов-биодеструкторов могут эффективно применяться при переработке и утилизации ПЭТ на основе экологически чистой эффективной биотехнологии [4–6].

Процесс биодеструкции имеет достаточно сложный механизм, который во многом определяется видами микроорганизмов, условиями окружающей среды и собственно составом материала. Бактерии создают на поверхности биопленки, которые обеспечивают защиту клеток от внешнего воздействия ультрафиолета (УФ), радиации, высокой минерализации, ядов и антибиотиков [5, 6].

Для разработки методов оценки биодеструкции различных материалов ускоренными лабораторными методами необходимо обеспечить условия экспонирования образцов в питательных средах, наиболее приближенных по составу к природным, но значительно ускоряющим рост микроорганизмов [6–8].

Цель первой части обзора – определение подходов к разработке составов питательных сред и условий экспонирования образцов полимерных материалов для лабораторного исследования процесса биологической деструкции.

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

### Фазы разрушения полимерных материалов в природных средах

Разрушение синтетических полимеров представляет собой необратимый процесс, приводящий к значительному изменению структуры материала. Обычно этому предшествует изменение также и свойств материала – например, его механической прочности и целостности, молекулярной массы и т. д. [9].

Степень деградации материала зависит от условий окружающей среды и продолжительности воздействия. Когда совокупная энергия воздействий внешней среды на участок поверхности материала начинает соответствовать энергии химических связей полимерных молекул материала, происходит их разрыв и, как следствие, начало процесса деструкции [10].

В общем виде длительный процесс разрушения материалов в окружающей среде можно описать и другими смысловыми терминами – дезинтеграция и минерализация [9].

Начальная фаза процесса дезинтеграции в значительной степени связана с ухудшением физических и/или химических свойств материала – например, таких как обесцвечивание, охрупчивание, и как результат – начало фрагментации с появлением

частей материала размером не более 20 мкм. Минерализация – это окончательное преобразование пластиковых фрагментов в молекулярные формы, которые уже могут утилизироваться микроорганизмами с получением конечных продуктов метаболизма в виде диоксида углерода, воды и метана (рис. 1) [11].



Рис. 1. Фазы дезинтеграции, фрагментации, минерализации и ассимиляции при биоразрушении полимерных материалов в окружающей среде

### Скорость деструкции полимеров

Как упоминалось ранее, при деструкции одним из ключевых факторов является длительность процесса разрушения материала. Скорость деструкции полимера во многом определяется молекулярным составом и кристаллической структурой органических молекул, из которых состоит материал. В данном случае подразумевается именно основа полимер-органического материала без учета защитных покрытий. Вторым условием, влияющим на скорость разрушения, является интенсивность и частота воздействия определенных внешних факторов [12].

Этап, определяющий время, за которое в процессе деградации происходят первые необратимые изменения физико-химических свойств материала, именуют начальной

фазой, также известной как лаг-фаза. Это справедливо как для традиционных полимеров с высокой степенью кристалличности, так и для биоразлагаемых полимеров (БРП). Поэтому основным условием при разработке БРП является ускорение процесса деградации, а именно – в его начальной фазе [13].

Для БРП скорость деградации может значительно увеличиваться благодаря присутствию в его составе легко разлагаемых компонентов, таких как крахмал или гидролизующие группы – например, сложные полиэферы, полиангидриды или полиамиды. Эти соединения поглощают влагу из среды и способствуют гидролитическому расщеплению полимерных цепей под действием химических агентов или ферментов [11]. Другой подход – добавление активных компонентов, например использование светочувствительных добавок. Под воздействием УФ-излучения у этих добавок высвобождаются свободные радикалы, которые случайным образом атакуют и разрушают полимерные связи, что приводит к образованию продуктов с более низкой молекулярной массой [14]. В случае биодegradации разрыв полимерных связей обусловлен действием ферментов, живых организмов и/или продуктов их секреции. Биодеструкция может происходить как вне клеток – экзобиодegradация, так и внутри клеток – эндобиодegradация или, в конечном счете, посредством комбинации этих двух механизмов. На скорость процесса сильно влияет количество и разнообразие доступных микроорганизмов и их микробная активность, которая может зависеть от температуры, влажности, pH, соотношения C/N-атомов в полимере и присутствия доступного кислорода в среде [15]. Например, продолжительность полного разрушения БРП при захоронении в компосте обычно составляет 6 мес. У полимерных материалов, которые разработаны без учета возможности биоразложения, частичная деструкция в окружающей среде может занимать годы или даже десятки лет [10]. В соответствии с большим количеством проведенных исследований установлено, что основным агентом биодеструкции являются ферменты. Данный тип белков синтезируется в бактериальных и грибных клетках в соответствии с типом субстрата.

#### **Биодegradация полимерных материалов в лабораторных условиях**

Максимальная скорость деградации БРП с участием микроорганизмов может быть достигнута только путем создания условий, при которых жизнеспособные клетки смогут максимально быстро начать использовать материал в качестве питательного субстрата или источника углерода. Такие условия наилучшим образом можно воспроизвести в лаборатории с применением специализированных питательных сред и оборудования. Как упоминалось ранее, отличительной особенностью БРП является способность к гидратации, в результате чего достигается высокий уровень биодеструкции в водных средах. Например, высокая скорость биодеструкции порошкового крахмала в модельных экспериментах (~40 % массы образца за 7 дней) обусловлена образованием коллоидного раствора в воде, за счет чего активнее проходит гидролиз гликозидных связей ферментными системами бактерий с высвобождением декстринов и быстро метаболизируемой глюкозы [16]. При этом нерастворимые в воде БРП (такие как некоторые полиэферы) обладают в десятки раз меньшим уровнем биодеструкции в тех же условиях – например, поликапролактон, несмотря на высокую гигроскопичность, теряет лишь 2,39 % массы за те же 7 дней [17]. Это существенно влияет на физические размеры материала, плотность упаковки молекул полимера и возможность формирования водородных связей в водной среде за счет свободных гидрофильных групп. По этой причине гидрофобные БРП перед измерением скорости биодеструкции предварительно обрабатывают органическими растворителями (например, хлороформом) для снижения плотности материала и увеличения гидратации полимерного матрикса [18].

Выбор бактериальных культур для проведения испытаний биоразлагаемости полимерных материалов проводят, основываясь на ранее проведенных исследованиях, либо предварительным изучением фенотипа выбранных штаммов бактерий с целью установления потенциальной возможности штамма микроорганизма использовать тот или иной полимер-органический материал в качестве питательного субстрата. Причем, выбор может не ограничиваться каким-то конкретным бактериальным штаммом. Например, можно использовать консорциум штаммов микроорганизмов, получаемый из естественных природных сообществ, таких как почва, морская вода, промышленные стоки и др. Как показывают многочисленные исследования, связанные с поиском и идентификацией бактериальных штаммов-биодеструкторов в окружающей среде, большая часть таких микроорганизмов относится к родам *Pseudomonas* и *Bacillus* [12, 19].

Для подтверждения этого тезиса авторами данной статьи проведен анализ штаммов Всероссийской коллекции микроорганизмов с выборкой по штаммам, способным использовать в качестве источника углерода различные продукты нефтепереработки или их производные, накапливающиеся в окружающей среде (рис. 2).

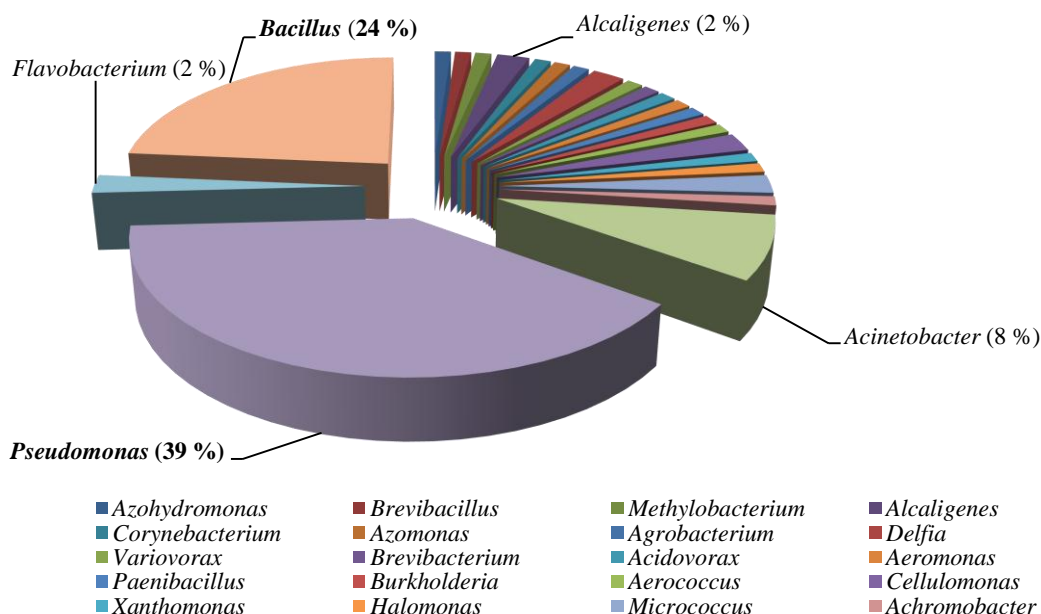


Рис. 2. Анализ Всероссийской коллекции микроорганизмов штаммов-деструкторов (<http://www.vkm.ru/strains>)

### Особенности питательных сред для культивирования микроорганизмов

Для строительства клеток и реализации всех процессов жизнедеятельности живые организмы нуждаются в макро- (Н, О, С, К, N, Ca, P, Mg, S, Fe) и микроэлементах (Na, B, Si, Cl, Mn, Mo, Se, Zn, Cu, Co, Ni, V, W).

Наличие приведенных химических элементов позволяет обеспечить основные биохимические реакции в клетке, в том числе и выработку белков, многие из которых обладают ферментативной активностью. В результате при минерализации материала клетки выделяют различные ферменты (белки) необходимые для перевода полимерной основы материала в метаболически значимые субстраты [15].

Методы культивирования на твердых и жидких питательных средах с точки зрения исследования биодеструкции полимерных материалов имеют ряд недостатков, так как лабораторные среды существенно отличаются по составу от природных. Наиболее

важным отличием является высокая концентрация органических компонентов, которые, во-первых, могут разрушать полимерные материалы даже без воздействия микроорганизмов, во-вторых – это более доступный источник углерода, чем исследуемый полимер. Для устранения эффекта влияния питательной среды на результаты теста, среда должна иметь минимальное, но достаточное количество питательных веществ.

Для выделения штаммов бактерий, способных к биодеструкции тех или иных полимер-органических материалов, применяют питательные среды, учитывающие физиологические особенности соответствующих микроорганизмов. В основе такой среды – буферная система, минеральные соли, источник аминокислот, дополнительно может использоваться также источник неорганического азота и набор микроэлементов. В таблице приведены примеры питательных сред, применяемых для испытаний БРП-материалов в присутствии соответствующих микроорганизмов [17, 20, 21].

**Питательные среды для культивирования микроорганизмов**

Полимер	Компоненты питательной среды	Культура микроорганизмов
Хитозан	[ $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , $\text{MgSO}_4$ , $\text{NaCl}$ , $\text{CaCl}_2$ , дрожжевой экстракт]; pH = 6,6	<i>Bacillus alvei</i> [20]
Поливиниловый спирт	[ $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , $\text{MgSO}_4$ , $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , $\text{NaCl}$ , $\text{FeSO}_4$ , дрожжевой экстракт, $\text{MnSO}_4$ , $\text{CuCl}_2$ , $\text{H}_3\text{BO}_3$ , $\text{CoCl}_2$ , $\text{ZnCl}_2$ ]; pH = 7,1	<i>Pseudomonas</i> , <i>Sphingomonas</i> , <i>Alcaligenes</i> , <i>Bacillus</i> [21]
Поликапролактон, полипропиленкарбонат, полилактат	[ $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , $\text{MgSO}_4$ , $\text{CaCl}_2$ , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , $\text{NaCl}$ , $\text{FeSO}_4$ , дрожжевой экстракт, $\text{MnSO}_4$ , $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ , $\text{Na}_2\text{WO}_4$ ]; pH = 7,1	Лабораторная культура микроорганизмов из почвы [17]

**Пример имитации условий естественной почвы.** Образцы материалов помещают в плодородную почву – типа чернозема, суглинка. Почву в процессе экспозиции образцов термостатируют и поддерживают постоянное значение влажности. Интенсивность биодеструкции образцов в виде пластин или пленок может быть оценена визуально, по изменению массы или по различным физико-химическим характеристикам образца и поверхности. Можно также оценить изменение состава почвы, содержания и видов микроорганизмов и др.

### Использование микроорганизмов в биопроцессах

Микроорганизмы с началом научно-технической революции перестали быть объектом только фундаментальных исследований, не имеющих какого-либо прикладного значения. При этом задолго до осознания способности микроорганизмов к ферментации, бактерии использовались при получении из молока разнообразных молочнокислых продуктов. В настоящее время известно, что в основе процессов сквашивания молока находятся многочисленные виды и штаммы бактерий родов *Lactococcus* и *Lactobacillus*, которые используются в виде готовых заквасок для пищевой промышленности [22]. В таком биопроцессе (ферментации) питательной средой и одновременно материалом для молочнокислых бактерий является собственно молоко. Это хороший пример биодеструкции, основанной на эволюции штаммов бифидобактерий в результате развития живодноводства.

Другой тип биопроцессов предполагает использование микроорганизмов в качестве биофабрики при производстве субстанций. К таким субстанциям могут быть отнесены белки, в том числе ферменты, биологически активные соединения (аминокислоты, гормоны, витамины и др.) и компоненты синтетических топлив, например, спирты.

Существенным отличием такого рода биопроцессов является использование продуктов ферментации отдельно, т. е. после проведения соответствующей хроматографической очистки полученных соединений от компонентов питательной среды и бактериальных продуцентов.

Для получения таким способом экономически значимых количеств нужных субстанций необходимо создать оптимальные условия для культивирования микробиальных продуцентов. Для решения этой задачи и разработаны биореакторы или ферментеры. В общем виде типичный биореактор состоит из металлического или стеклянного сосуда определенного объема для размещения питательной среды с культурой микроорганизмов, имеющий места для установки лопастных перемешивателей, трубок для подачи питательных веществ и отвода среды с наработанными продуктами, кислорода и углекислого газа, а также места установки датчиков рН-среды, температуры и концентрации  $\text{CO}_2$ . В XXI веке ферментеры превратились в сложные компьютеризированные системы, позволяющие в автоматическом режиме поддерживать жизнедеятельность культуры микроорганизмов неограниченно долгое время при наличии бесперебойной подачи электроэнергии и свежей питательной среды [23].

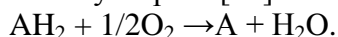
В качестве культуры продуцентов могут использоваться природные штаммы, обладающие уникальной способностью к избыточному синтезу конкретных органических соединений, либо лабораторные штаммы, полученные генно-инженерным способом.

Применительно к биодеструкции может представлять интерес, например, экологически нейтральная утилизация полимерных материалов с помощью ферментных препаратов, полученных в результате ферментации микроорганизмов.

Одними из наиболее перспективных ферментов, способных разлагать ксенобиотики, являются оксигеназы, представляющие собой обширный класс ферментов, в котором можно выделить два основных подкласса – монооксигеназы и диоксигеназы.

Монооксигеназы включают один атом кислорода в субстрат и восстанавливают другой атом кислорода до воды, тогда как диоксигеназы включают в субстрат оба атома молекулярного кислорода. Диоксигеназы участвуют преимущественно в деградации ароматических соединений [24].

Другой класс ферментов – оксидоредуктазы, напротив, используют молекулярный кислород для переноса атомов с субстрата [25]:



В качестве примера ферментного препарата оксидоредуктазы, полученного путем ферментации, можно отметить лакказы. Лакказа (кислород оксидоредуктаза (ЕС 1.10.3.2)) представляет значительный биотехнологический интерес, поскольку этот фермент можно нарабатывать в биопроцессе и использовать во многих экологических целях [25, 26]. Для наработки препарата лакказы в биореакторе используют, например, культуру гриба белой гнили *Trametes hirsuta* с выходом конечного продукта до 20 ед. активности/г глюкозы или до 19 000 ед. активности/л культуры [26]. В качестве продуцентов лакказы могут выступать также филаментные грибы, такие как *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae*, *Trichoderma reesei* и др. [26]. Лакказа является коммерчески доступным ферментом, один из патентов принадлежит компании Novozymes ([www.novozymes.com](http://www.novozymes.com)).

### Заключения

При осуществлении экспериментов по биодеструкции полимерных материалов необходимо учитывать такие факторы, как изменчивость состава питательной среды во времени, рН и окислительно-восстановительный потенциал, а также влияние искусственной среды на материал и минимизацию этого влияния. При составлении набора

питательных веществ необходимо учитывать состав и потребности не столько живой клетки бактерии (гриба), сколько потребности организмов для синтеза целевых ферментов.

Наиболее оптимальной питательной средой для исследования биодеструкции может являться обедненная по содержанию углерода жидкая среда с постоянным дозированием дополнительных компонентов.

При исследовании биодеструкции полимеров визуальными методами материалы лучше изучать в виде тонких пленок или нитей, размеры которых по толщине сравнимы с глубиной поражения: 0,1–0,5 мм.

Для постоянного притока питательных веществ к микроорганизмам, расположенным на поверхности материала, необходимо постоянное перемешивание среды либо магнитной мешалкой, либо аэрацией (воздухом – для оценки воздействия аэробных бактерий и инертным газом – для оценки действия анаэробных бактерий).

Для воздействия на материалы с целью кратного увеличения скорости их разрушения или модификации можно использовать ферментные препараты, получаемые в результате длительного наращивания в биореакторах культур микроорганизмов соответствующих ферментов.

#### Список источников

1. Birbilis N., Cavanaugh M., Buchheit R. Electrochemical behavior and localized corrosion associated with Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe particles in aluminum alloy 7075-T651 // *Corrosion Science*. 2006. Vol. 48. P. 4202–4215. DOI: 10.1016/j.corsci.2006.02.007.
2. Zhang B., Patlolla V.R., Chiao D. Galvanic corrosion of Al/Cu meshes with carbon fibers and graphene and ITO-based nanocomposite coatings as alternative approaches for lightning strikes // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 67. P. 1317–1323. DOI: 10.1007/s00170-012-4568-3.
3. Yoshida S., Hiraga K., Takehana T. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate) // *Science*. 2016. Vol. 353. P. 759–759. DOI: 10.1126/science.aad6359.
4. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным воздействием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.03.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
5. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
6. 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.
7. Кривушина А.А., Терехов И.В., Москвитина К.Н., Малышева С.Ф., Куимов В.А. Исследование эффективности новых фунгицидных соединений на основе модифицированного полисепта для защиты полимерных материалов от микробиологических повреждений // *Труды ВИАМ*. 2021. № 12 (106). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.03.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-107-116.
8. Otake Y., Kobayashi T., Asabe H. et al. Biodegradation of low-density polyethylene, polystyrene, polyvinyl chloride, and urea formaldehyde resin buried under soil for over 32 years // *Journal Applied Polymer Science*. 1995. Vol. 56. P. 1789–1796. DOI: 10.1002/app.1995.070561309.
9. Mohanan N., Montazer Z., Sharma P.K., Levin D.B. Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics // *Frontiers in Microbiology*. 2020. Vol. 11. P. 1–22. DOI: 10.3389/fmicb.2020.580709.
10. 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> (дата обращения: 16.02.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-132-146.

11. Ahmed T., Shahid M., Azeem F. Biodegradation of plastics: current scenario and prospects for environmental safety // *Environmental Science and Pollution Research (ESPR)*. 2018. Vol. 25. P. 7287–7298. DOI: 10.1007/s11356-018-1234-9.
12. 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.
13. Sinha V., Patel M.R., Patel J.V. Pet Waste Management by Chemical Recycling: A Review // *Journal Polymer Environment*. 2010. Vol. 18. P. 8–25. DOI: 10.1007/s10924-008-0106-7.
14. Sorensen L., Groven A.S., Hovsbakken I.A. et al. UV degradation of natural and synthetic microfibers causes fragmentation and release of polymer degradation products and chemical additives // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 755. P. 1–17. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143170.
15. Eskander S., Saleh H. Biodegradation: Process Mechanism // *Environmental Science and Engineering*. 2017. Vol. 8. P. 1–31. DOI: 10.1007/978-3-030-83783-9\_73-1.
16. Gamage A., Liyanapathirana A., Manamperi A. et al. Applications of Starch Biopolymers for a Sustainable Modern Agriculture // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. P. 60–85. DOI: 10.3390/su14106085.
17. Nishida H., Tokiwa Y. Distribution of poly(3-hydroxybutyrate) and polycaprolactone aerobic degrading microorganisms in different environments // *Journal of Environment Polymer Degradation*. 1993. Vol. 1. P. 227–233. DOI: 10.1007/BF01458031.
18. Caballero K.P., Karel S.F., Register R.A. Biosynthesis, and characterization of hydroxybutyrate-hydroxycaproate copolymers // *International journal of biological macromolecules*. 1995. Vol. 17. P. 86–92. DOI: 10.1016/0141-8130(95)93522-y.
19. Mohn W.W., Wilson A.E., Bicho P., Moore E.B. Physiological and Phylogenetic Diversity of Bacteria Growing on Resin Acids // *Systematic and Applied Microbiology*. 1999. Vol. 22. P. 68–78. DOI: 10.1016/S0723-2020(99)80029-0.
20. Shadia M., Abdel A. Production and some properties of two chitosanases from *Bacillus alvei* // *Journal Basic Microbiology*. 1999. Vol. 39. P. 79–87. DOI: 10.1002/(SICI)1521-4028(199905)39:2.
21. Corti A., Solaro R., Chiellini E. Biodegradation of poly(vinyl alcohol) in selected mixed microbial culture and relevant culture filtrate // *Polymer Degradation and Stability*. 2002. Vol. 75. P. 447–458. DOI: 10.1016/S0079-6700(02)00149-1.
22. Stiles M., Holzapfel W. Lactic acid bacteria of foods and their current taxonomy // *International Journal of Food Microbiology*. 1997. Vol. 36. P. 1–29. DOI: 10.1016/S0168-1605(96)01233-0.
23. Decker E.L., Reski R. Current achievements in the production of complex biopharmaceuticals with moss bioreactors // *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2008. Vol. 31. P. 3–9. DOI: 10.1007/s00449-007-0151-y.
24. Schocken M.J., Gibson D.T. Bacterial oxidation of the polycyclic aromatic hydrocarbons acenaphthene and acenaphthylene // *Applied Environmental Microbiology*. 1984. Vol. 48. P. 10–16. DOI: 10.1128/aem.48.1.10-16.1984.
25. Morozova O.V., Shumakovich G.P., Shleev S.V. Laccase–Mediator Systems and Their Applications: A Review // *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2007. Vol. 43. P. 523–535. DOI: 10.1134/S0003683807050055.
26. Rosales E., Rodríguez Couto S., Sanromán A. New uses of food waste: application to laccase production by *Trametes hirsute* // *Biotechnology Letters*. 2002. Vol. 24. P. 701–704. DOI: 10.1023/A:1015234100459.

### References

1. Birbilis N., Cavanaugh M., Buchheit R. Electrochemical behavior and localized corrosion associated with Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe particles in aluminum alloy 7075-T651. *Corrosion Science*, 2006, vol. 48, pp. 4202–4215. DOI: 10.1016/j.corsci.2006.02.007.
2. Zhang B., Patlolla V.R., Chiao D. Galvanic corrosion of Al/Cu meshes with carbon fibers and graphene and ITO-based nanocomposite coatings as alternative approaches for lightning strikes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 67, pp. 1317–1323. DOI: 10.1007/s00170-012-4568-3.

3. Yoshida S., Hiraga K., Takehana T. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 2016, vol. 353, pp. 759–759. DOI: 10.1126/science.aad6359.
4. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 29, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-4-70-80.
5. Kablov E.N. Materials of a new generation and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, no. 331–334.
6. 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.
7. Krivushina A.A., Terekhov I.V., Moskvitina K.N., Malysheva S.F., Kuimov V.A. Efficiency of new fungicide compounds based on modified polysept for protection of polymer materials against biodeterioration. *Trudy VIAM*, 2021, no. 12 (106), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 13, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-107-116.
8. Otake Y., Kobayashi T., Asabe H. et al. Biodegradation of low-density polyethylene, polystyrene, polyvinyl chloride, and urea formaldehyde resin buried under soil for over 32 years. *Journal Applied Polymer Science*, 1995, vol. 56, pp. 1789–1796. DOI: 10.1002/app.1995.070561309.
9. Mohanan N., Montazer Z., Sharma P.K., Levin D.B. Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics. *Frontiers in Microbiology*, 2020, vol. 11, pp. 1–22. DOI: 10.3389/fmicb.2020.580709.
10. Ermishev V.Yu. Metabolic possibilities of bacteria with respect to synthetic hydro-carbons 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> (accessed: February, 16 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-132-146.
11. Ahmed T., Shahid M., Azeem F. Biodegradation of plastics: current scenario and prospects for environmental safety. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 25, pp. 7287–7298. DOI: 10.1007/s11356-018-1234-9.
12. 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.
13. Sinha V., Patel M.R., Patel J.V. Pet Waste Management by Chemical Recycling: A Review. *Journal Polymer Environment*, 2010, vol. 18, pp. 8–25. DOI: 10.1007/s10924-008-0106-7.
14. Sorensen L., Groven A.S., Hovsbakken I.A. et al. UV degradation of natural and synthetic microfibers causes fragmentation and release of polymer degradation products and chemical additives. *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 755, pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143170.
15. Eskander S., Saleh H. Biodegradation: Process Mechanism. *Environmental Science and Engineering*, 2017, vol. 8, pp. 1–31. DOI: 10.1007/978-3-030-83783-9\_73-1.
16. Gamage A., Liyanapathirana A., Manamperi A. et al. Applications of Starch Biopolymers for a Sustainable Modern Agriculture. *Sustainability*, 2022, vol. 14, pp. 60–85. DOI: 10.3390/su14106085.
17. Nishida H., Tokiwa Y. Distribution of poly(3-hydroxybutyrate) and polycaprolactone aerobic degrading microorganisms in different environments. *Journal of Environment Polymer Degradation*, 1993, vol. 1, pp. 227–233. DOI: 10.1007/BF01458031.
18. Caballero K.P., Karel S.F., Register R.A. Biosynthesis, and characterization of hydroxybutyrate-hydroxycaproate copolymers. *International journal of biological macromolecules*, 1995, vol. 17, pp. 86–92. DOI: 10.1016/0141-8130(95)93522-y.
19. Mohn W.W., Wilson A.E., Bicho P., Moore E.B. Physiological and Phylogenetic Diversity of Bacteria Growing on Resin Acids. *Systematic and Applied Microbiology*, 1999, vol. 22, pp. 68–78. DOI: 10.1016/S0723-2020(99)80029-0.
20. Shadia M., Abdel A. Production and some properties of two chitosanases from *Bacillus alvei*. *Journal Basic Microbiology*, 1999, vol. 39, pp. 79–87. DOI: 10.1002/(SICI)1521-4028(199905)39:2.

21. Corti A., Solaro R., Chiellini E. Biodegradation of poly(vinyl alcohol) in selected mixed microbial culture and relevant culture filtrate. *Polymer Degradation and Stability*, 2002, vol. 75, pp. 447–458. DOI: 10.1016/S0079-6700(02)00149-1.
22. Stiles M., Holzapfel W. Lactic acid bacteria of foods and their current taxonomy. *International Journal of Food Microbiology*, 1997, vol. 36, pp. 1–29. DOI: 10.1016/S0168-1605(96)01233-0.
23. Decker E.L., Reski R. Current achievements in the production of complex biopharmaceuticals with moss bioreactors. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2008, vol. 31, pp. 3–9. DOI: 10.1007/s00449-007-0151-y.
24. Schocken M.J., Gibson D.T. Bacterial oxidation of the polycyclic aromatic hydrocarbons acenaphthene and acenaphthylene. *Applied Environmental Microbiology*, 1984, vol. 48, pp. 10–16. DOI: 10.1128/aem.48.1.10-16.1984.
25. Morozova O.V., Shumakovich G.P., Shleev S.V. Laccase–Mediator Systems and Their Applications: A Review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2007, vol. 43, pp. 523–535. DOI: 10.1134/S0003683807050055.
26. Rosales E., Rodríguez Couto S., Sanromán A. New uses of food waste: application to laccase production by *Trametes hirsute*. *Biotechnology Letters*, 2002, vol. 24, pp. 701–704. DOI: 10.1023/A:1015234100459.

**Информация об авторах**

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

**Лаптев Анатолий Борисович**, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Старцев Валерий Олегович**, начальник лаборатории, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Information about the authors**

**Vladimir Yu. Ermishev**, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Bio.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Anatoly B. Laptev**, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Valery O. Startsev**, Head of Laboratory, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 26.04.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.05.2023.  
The article was submitted 26.04.2023; approved and accepted for publication after reviewing 17.05.2023.