

УДК 620.1:678.8

А.Б. Лантев¹, А.В. Голубев², Д.М. Киреев², Е.В. Николаев¹

К ВОПРОСУ БИОДЕСТРУКЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИРОДНЫХ СРЕДАХ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-100-107

Одним из основных компонентов пластиковых отходов является полимер полиэтилентерефталат (ПЭТФ), который вызывает множество разнообразных экологических проблем, связанных с его накоплением, сорбцией и концентрированием органических загрязнителей, вызывающих опасные последствия для морской флоры и фауны, распространяющих потенциально инвазивные виды микроорганизмов. Исследование биоценозов, образующихся на поверхности ПЭТФ в различных регионах, производствах, водоемах и других локальных объектах, отличающихся условиями окружающей среды, позволит в значительной мере прогнозировать и предотвращать преждевременное разрушение объектов инфраструктуры под действием биологической деградации и деградации материалов.

Ключевые слова: биодеструкция, водные среды, полиэтилентерефталат, полистирол, бактерия *Ideonella sakaiensis* 201-F6.

A.B. Laptev¹, A.V. Golubev², D.M. Kireev², E.V. Nikolaev¹

TO THE QUESTION OF BIODEGRADATION OF POLYMERIC MATERIALS IN NATURAL ENVIRONMENTS (review)

One of the main components of plastic waste is the polymer polyethylene terephthalate (PET), which causes a variety of environmental problems associated with its accumulation, sorption and concentration of organic pollutants, causing dangerous consequences for marine life, spreading potentially invasive species of microorganisms. The study of biocenoses formed on the surface of PET in various regions, industries, water bodies and other local objects, different environmental conditions, will significantly predict and prevent premature destruction of infrastructure under the influence of biological degradation and destruction of materials.

Keywords: biodegradation, aquatic environment, polyethylene terephthalate, polystyrene, bacterium *Ideonella sakaiensis* 201-F6.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ) (Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state oil technical University»). E-mail: info@rusoil.net

Исследование деградации полимеров на территории РФ

Увеличение в последние годы в России штрафов и снижение порога допустимых сбросов химических соединений в открытые водоемы и атмосферу привели к более благоприятному развитию микро- и макрофлоры, а растущая химизация сельского хозяйства и развитие бытовой химии при повышении летних температур – к изменению видового состава организмов на новые, более агрессивные виды по отношению к химическим продуктам и материалам [1].

Наибольшее количество сточных вод очищается с использованием биологических методов на предприятиях химической и нефтехимической промышленности. На этих предприятиях на биологическую очистку стоков (БОС) подается агрессивная по отношению к бактериям, химически загрязненная вода, содержащая, например, диоксины, фенол, аммонийные соли, основания и т. п. В процессе естественного отбора микрофлора БОС постепенно адаптируется и начинает переваривать эти ядовитые для обычных организмов вещества. По мере роста объема илового осадка БОС и его утилизации данные активные штаммы микрофлоры попадают в окружающую среду и представляют собой наибольшую опасность для технических изделий с точки зрения биодеструкции лакокрасочных покрытий, пластиков и биокоррозии металлических материалов [2, 3].

При использовании «экологически чистого» способа биологической очистки сточных вод подвергается селекции большое количество штаммов, использующих в качестве источника углеводов сополимеры этилена и пропилена на очистных сооружениях этиленовых производств и тяжелые углеводороды (основы герметиков, смазочных масел и пр.) на предприятиях нефтепереработки. В сточных водах фармакологических и химических предприятий эволюционируют бактерии, которые индифферентны к антибиотикам и ядам.

Научно-техническая революция и прогресс в области создания новой техники способствуют разработке новых материалов не на основе металлов, а на основе композитов из органических смол [4]. Однако использование полимерных изделий с биоразлагаемыми добавками и БОС приводят к селекции бактерий [5], специализирующихся на биодеградации полимеров. В результате жизненный цикл полимерных и композиционных материалов без дополнительных средств защиты с каждым годом снижается [6].

Аналогичная картина наблюдается и в случае использования металлов. Так, скорость коррозии углеродистой стали в слабоминерализованной воде должна составлять 0,05–0,10 мм/год, но в присутствии бактерий она достигает 0,90–1,10 мм/год [7]. Наличие бактерий приводит к проявлению наиболее опасного вида коррозионного разрушения металла – локальной коррозии.

Постепенное улучшение экологической обстановки и увеличение средней температуры воздуха дают шанс большинству организмов увеличить свою популяцию. От того, какие организмы выигрывают в конкурентной борьбе и размножатся в большем и даже подавляющем количестве, зависит, в какой степени биологический фактор приведет к деградации и деструкции сложных технических систем, созданных человеком. Без учета микробиологических факторов в настоящее время нельзя с уверенностью прогнозировать сроки безопасной эксплуатации зданий и сооружений, городской и промышленной инфраструктуры, а также отдельных технических изделий.

В присутствии бентоса речь идет о сохранности крупных производственных объектов и сложных технических систем уже в масштабах страны, для чего требуется обеспечение нормами промышленной безопасности, учитывающими микробиологическое заражение.

Анализ нормативной документации показал, что основная часть российских национальных стандартов была создана в 1950–1980-х гг. Основные ГОСТы «Единой системы защиты от коррозии, старения и биоповреждения» не пересматривались уже более 20 лет. В то же время часть существующих нормативов невозможно осуществить по экономическим и политическим соображениям – как, например, ГОСТ 15150–69, который регламентирует определение климатического исполнения изделий на климатических площадках в определенных ГОСТ регионах. Но в настоящее время данные площадки отсутствуют, а некоторые регионы превратились в отдельные, зачастую закрытые для России государства [6].

Другая часть стандартов не учитывает изменения климатических факторов и экологической ситуации в стране – как, например, ГОСТ 9.039–81, который регламентирует определение коррозионной активности атмосферы методами индикации хлоридов и диоксида серы в воздухе. Однако на современном этапе развития промышленности и общества, при действии жестких экологических норм и серьезного снижения выбросов топочных и кислых газов в атмосферу, снижения концентрации вредных веществ в сточных водах, ужесточения норм по распространению загрязнений от захоронений отходов в земле на первый план выходит биокоррозия как основной фактор деградации материалов. Параллельно этому процессу идет процесс биodeградации неметаллических материалов. Данные процессы в упомянутом ГОСТ не регламентируются.

В этих условиях большое количество ученых занимается исследованием биологической деструкции материалов с применением вновь открытых штаммов [8–24]. Авторами приведенных статей дискутируются вопросы создания и модификации ферментативного механизма открытых штаммов бактерий. Однако никто не задумывается о последствиях повсеместного распространения подобного вида биодеструкторов, способных в течение короткого промежутка времени привести в негодность не только изделия из пластика в виде биев, перегородок, корпусов судов, но и привести к разрушению лакокрасочных покрытий, защищающих металлические конструкции.

Исследования биодеструкции полиэфирных материалов

Большое количество публикаций посвящено проблеме ремедиации отходов пластиковых изделий на основе полиэфиров – ПЭТФ, и других полимерных материалов. Накопление отходов пластических масс, особенно в Мировом океане, вызывает все большую экологическую озабоченность [25, 26]. Одним из основных компонентов пластиковых отходов является полиэтилентерефталат (ПЭТФ) – полимер, широко используемый для многих областей применения, включая текстильную и пищевую упаковки. Этот полимер обладает высокой устойчивостью к экологической биodeградации и таким образом вызывает множество разнообразных экологических проблем, связанных в том числе с его накоплением, сорбцией и концентрированием органических загрязнителей, что приводит к опасным последствиям для морской флоры и фауны и распространению потенциально инвазивных видов микроорганизмов в новых условиях окружающей среды.

В настоящее время широко используются только три метода удаления отходов пластмасс: захоронение, сжигание и рециркуляция (переработка). Каждая технология имеет свои преимущества и недостатки. Свалки и сжигание отходов приводят к выбросу опасных вторичных загрязнителей в окружающую среду, а полигоны для мусора имеют дополнительный недостаток – необходимость отведения больших участков земельного пространства. Рециркуляция полимеров решает экологические проблемы свалок и сжигания отходов, однако этот процесс является малоэффективным, а ограничивающим фактором является стоимость сбора и переработки отходов, а также снижение качества получаемого вторичного полимера.

Биodeградация является привлекательным вариантом для экологически чистого и эффективного удаления отходов пластмасс. В настоящее время еще не разработаны технологии, позволяющие реально утилизировать ПЭТФ путем биodeградации в коммерческих масштабах; однако в области биodeградации проводится большое количество исследований, и, учитывая огромный метаболический потенциал микроорганизмов, ожидается, что разработка рентабельных и жизнеспособных процессов биodeградации – это просто вопрос времени.

Многими исследователями [27] рассматриваются перспективы биокаталитической переработки пластмассовых отходов. Обнаружено, что несколько окислительно-

восстановительных ферментов бактерий способствуют деструкции полиэтилена (ПЭ). Прежде чем можно будет предусмотреть применение ферментов для рециркуляции отходов ПЭ, необходимо будет определить подходящие ферменты и лучше понять механизм деградации. Вместо этого цельноклеточный катализ с использованием специализированных микроорганизмов или даже микробных сообществ уже в настоящее время может обеспечить альтернативную стратегию биотехнологической переработки ПЭ.

Синтетические полиэфиры, такие как ПЭТФ, а также полистирол и полиуретан, оказались восприимчивы к ферментационной деградации с помощью гидролаз, выделяемых ферментами микроорганизмов. Ряд грибковых и бактериальных энзимов способны к усвоению пленок и волокон ПЭТФ. Стратегия направленной эволюции может привести к культивированию мутации в гидролазах полистирола [28]. Для улучшенных биокатализаторов в настоящее время используются высокопроизводительные методы скрининга, специально разработанные для мониторинга активности полиэфиргидролазы, которые позволяют быстро идентифицировать их ферменты. Поэтому деятельность исследователей нацелена на открытие новых гидролаз полистирола, а создание высокоактивных вариантов остается ключевой проблемой для развития жизнеспособного процесса биокаталитической переработки потребительских отходов ПЭТФ.

Согласно работе [29], ПЭТФ – синтетический полиэфирный материал, изготовленный из мономеров диэтилтерефталата (ДЕТ), широко используется в пластмассовых изделиях для повседневной жизни и вызывает серьезное загрязнение глобальной окружающей среды. Микробный метаболизм является основным путем деградации, ответственным за деградацию ДЕТ в естественной почве; однако механизм деградации микробного ДЕТ остается неясным. Вновь выделенный штамм WL-3, идентифицированный как принадлежащий к роду *Delftia*, оказался способным деградировать 5 г 94%-ного ДЕТ и использовать его в качестве единственного источника углерода для роста в течение 7 дней. Кроме того, штамм WL-3 способен к стабильной деградации ДЕТ в широком диапазоне значений pH (6,0–9,0) и температуры (20–42°C) соответственно. Кроме того, на основе выявленных промежуточных продуктов деградации предложен биохимический путь деградации ДЕТ штаммом WL-3. Мономер ДЕТ сначала превращается в терефталевую кислоту при гидролизе двух эфирных связей, которые впоследствии преобразуются в протокатеховую кислоту. Наблюдения с использованием сканирующего микроскопа выявили трещины на поверхности ПЭТФ-пленки после двухмесячного заражения штаммом WL-3, что свидетельствует о потенциале штамма для биоремедиации загрязненных ПЭТФ сред.

Ферментативный механизм разрушения ПЭТФ

Авторами работы [30] путем скрининга природных микробных сообществ, подверженных воздействию ПЭТФ в окружающей среде, выделена новая бактерия штамма *Ideonella sakaiensis* 201-F6, которая способна использовать ПЭТФ в качестве основного источника энергии и углерода. При выращивании на ПЭТФ этот штамм продуцирует два фермента, способных гидролизовать ПЭТФ и промежуточное звено реакции – моно(2-гидроксиэтил)терефталевую кислоту. Оба энзима необходимы для последовательного преобразования ПЭТФ в терефталевую кислоту и этиленгликоль.

Исследователями в работах [31–33] установлено, что деградация и последующее высвобождение гексабромциклододекана (ГБЦДД) из полистирола в естественной среде происходит в результате выщелачивания при контакте с водой (разбавление), фото- и термической деградации, биodeградации и физических факторов (например, волнового воздействия). В поверхностных водах все эти факторы действуют одновременно и стимулируют старение. В аналогичных условиях солености, температуры и темноты

в натуральных и лабораторных условиях выщелачивание больше в натуральных условиях (37%), чем в лабораторных (23%). Солнечный свет и дальнейшая фрагментация могут увеличить выщелачивание ГБЦДД в воде на 12%. Кроме этого, воздействие интенсивного ультрафиолетового излучения, сильное биообрастание, дальнейшая фрагментация, сильное встряхивание и обмен большим объемом воды привели к большему выщелачиванию ГБЦДД в натуральных условиях по сравнению с лабораторией, где использовался ограниченный объем воды.

Два недавно открытых бактериальных фермента, с помощью которых специально производят деградацию ПЭТФ, представляют собой перспективное решение для утилизации пластиков. Во-первых, выделяемый бактерией *Ideonella sakaiensis* фермент PETase – специализированный фермент γ -гидролазы, превращает ПЭТФ в моно(2-гидроксиэтил)терефталат (МГЕТ). Второй ключевой фермент МГЕТаза гидролизует МГЕТ до терефталата и этиленгликоля. В работе [33] сообщается о кристаллических структурах активной безлигандной МГЕТазы, которая напоминает эстеразы ферулоила. Исследование мутагенеза и структурно-направленного изменения субстрата будет перспективным направлением для дальнейшего изучения ферментативной деградации пластиков.

Особенности обрастания и деструкции полимеров в водах различной природы

При выполнении работ по гранту РФФИ «Физическое и химическое воздействие организмов биодеструкторов на полиэфирные материалы в различных климатических зонах» в рамках конкурса «Воздействие организмов-деструкторов на материалы (металлы и сплавы, полимеры, полимерно-композиционные материалы, керамика, бетоны, лакокрасочные покрытия, резины, герметики) и топлива, изучение процессов биологической коррозии и деструкции в различных климатических зонах» проведена экспозиция образцов стали, полистирола и ПЭТФ в воде различной минерализации и в различных климатических зонах. На основании анализа прочностных свойств образцов и отложений на поверхности оценена стадийность процесса биообрастания и биодеструкции на начальном этапе – до 60 сут экспонирования.

1. Установлено, что по мере обрастания поверхности происходит образование отложений механических примесей и водорослей, затем постепенное зарастание поверхности бактериями и отложениями солей кальция (как в морской, так и в оборотной воде) до практически полного заполнения поверхности. На первом этапе под действием водорослей происходит окисление и упрочнение поверхности образцов кислородом, выделяемым в процессе фотосинтеза. На втором этапе (после 30–40 сут экспонирования) происходит насыщение образцов полимера влагой и деструкция поверхности продуктами метаболизма бактерий, что приводит к падению как прочности, так и пластичности образцов полистирола и ПЭТФ.

2. Одной из наиболее коррозионноопасных групп организмов по отношению к металлам в Черном море являются морские губки класса *Calcispongiae*. Продукты их жизнедеятельности приводят к подкислению приповерхностных слоев воды выдыхаемой губками углекислотой, что вызывает коррозию и образование карбонатных отложений.

3. С помощью модуля программы Local Mapper проведен анализ ферментов деградации полициклических ароматических углеводородов, присутствующих в исследуемых природных сообществах. В результате этого анализа среди этих ферментов обнаружены два фермента, осуществляющие катаболизирование терефталевой кислоты

до протокатеховой кислоты, причем эти ферменты наиболее представлены в группе бактерий, присутствующих в охлаждающей воде нефтехимического предприятия. Эти данные подтверждают возможность осуществления бактериями этой группы катаболизации, по крайней мере промежуточного метаболита деградации ПЭТФ до терефталевой кислоты. Этот же модуль программы iVicotak позволяет оценить вклад различных таксонов бактерий в осуществление анализируемого направления метаболизма. По результатам анализа этот вклад различался для исследуемых групп сообществ. В биологических пробах, взятых с образцов материалов на нефтехимическом предприятии, наиболее активны представители родов гаммапротеобактерий (*Pseudomonas* и *Aeromonas*), а также родов бетапротеобактерий (*Acidovorax* и *Hydrogenophaga*); в пробах, взятых с образцов в черноморской воде, – родов альфапротеобактерий (*Erythrobacter*, *Marivita* и *Altererythrobacter*); в пробах, взятых с образцов в речной воде, – род бетапротеобактерий *Aquabacterium*. Поскольку именно для представителей рода *Pseudomonas*, согласно научно-техническим литературным данным, показана способность к деградации ПЭТФ, именно они, а возможно и рода *Acidovorax*, могут быть бактериями-деструкторами ПЭТФ в исследуемых сообществах.

Опыт исследования биозаражений различных промышленных объектов и разработка методов защиты оборудования от биодеструкции и биокоррозии представлены в работах [34–38]. Размножение и распространение таких организмов, как обнаруженные в воде нефтехимического предприятия представители родов *Pseudomonas* и *Acidovorax*, приведут к разрушению на окружающей территории не только пластикового мусора, но и изделий длительной эксплуатации – трубопроводов, зданий и сооружений, при изготовлении которых используются полимерные материалы.

Для обеспечения работоспособности технических изделий, объектов инфраструктуры и сооружений необходимо учитывать возможность биологического заражения штаммами-биодеструкторами, ранее не встречавшимися в данной местности. Исследование биоценозов в различных регионах, производствах, водоемах и других локальных объектах, отличающихся условиями окружающей среды, позволит в значительной мере предотвратить преждевременное разрушение объектов инфраструктуры под действием биологической деградации и деструкции материалов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по Договору №18-29-05033/18 на выполнение гранта «Физическое и химическое воздействие организмов биодеструкторов на полиэфирные материалы в различных климатических зонах».

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаптев А.Б., Луценко А.Н., Скрипачев С.Ю. Стандартизация климатической квалификации изделий // Стандарты и качество. 2016. №11. С. 82–85.
2. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В., Скирта А.А. Статистическая обработка результатов климатических испытаний стеклопластиков // Пластические массы. 2016. №3–4. С. 58–64.
3. Луценко А.Н., Курс М.Г., Лаптев А.Б. Обоснование сроков натуральных климатических испытаний металлических материалов в атмосфере черноморского побережья. Аналитический обзор // Вопросы материаловедения. 2016. №3. С. 126–137.
4. Теремова М.И., Воробьева С.В., Романченко А.С. Углекислородокисляющие бактерии как потенциальные деструкторы полиэтилена высокого давления // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2011. Вып. 11. С. 133–138.
5. Воробьева Г.А. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств. М.: Химия, 1975. 816 с.

6. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
7. Palm G.J., Reisky L., Böttcher D. et al. Structure of the plastic-degrading Ideonella sakaiensis MNETase bound to a substrate // *Nature Communications*. 2019. Vol. 10 (1). P. 1717–1723.
8. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // *Тенденции и ориентиры инновационного развития России*. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
9. Каблов Е.Н., Ерофеев В.Т., Светлов Д.А., Смирнов В.Ф., Богатов А.Д. Биоповреждения в космических аппаратах // *Сб. Междунар. науч.-технич. конф. «Композиционные материалы. Теория и практика»*. Тула, 2015. С. 40–46.
10. 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.
11. Кривушина А.А., Горяшник Ю.С. Способы защиты материалов и изделий от микробиологического поражения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №2 (47). С. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-80-86.
12. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
13. Gregory M.R. Environmental implications of plastic debris in marine settings entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitchhiking and alien invasions // *Philosophy Transaction Rich Society London Bay Biology Science*. 2002. Vol. 364. P. 2013–2025.
14. Law K.L., Morét-Ferguson S., Maximenko N.A. et al. Plastic accumulation in the North Atlantic Subtropical Gyre // *Science*. 2010. Vol. 3. P. 1185–1188.
15. Carson H.S., Colbert S.L., Kaylor M.J., McDermid K.J. Small plastic debris changes water movement and heat transfer through beach sediments // *Marine Pollution Bulletin*. 2011. Vol. 62. P. 1708–1713.
16. Лаптев А.Б., Николаев Е.В., Колпачков Е.Д. Термодинамические характеристики старения полимерных композиционных материалов в условиях реальной эксплуатации // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №3 (52). С. 80–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-80-88.
17. Ribitsch D., Heumann S., Trotscha E. et al. Hydrolysis of polyethylene terephthalate by paranitrobenzylesterase from *Bacillus subtilis* // *Biotechnology Program*. 2011. Vol. 27. P. 951–960. DOI: 10.1002/btpr.610.
18. Webb H.K., Arnott J., Crawford R.J., Ivanova E.P. Plastic Degradation and Its Environmental Implications with Special Reference to Poly(ethylene terephthalate) // *Polymers*. 2013. Vol. 5. P. 1–18. DOI: 10.3390/polym5010001.
19. Williams A., Rangel-Buitrago N. Marine litter: Solutions for a major environmental problem // *Journal of Coastal Research*. 2019. Vol. 35 (3). P. 648–663.
20. Wei R., Zimmermann W. Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we? // *Microbiol Biotechnology*. 2017. Vol. 10. P. 1308–1322.
21. Kawai F., Oda M., Tamashiro T. et al. A novel Ca²⁺-activated, thermostabilized polyesterase capable of hydrolyzing polyethylene terephthalate from *Saccharomonospora viridis* AHK190 // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2014. Vol. 98. P. 10053–10064.
22. Liu J., Xu G., Dong W. et al. Biodegradation of diethyl terephthalate and polyethylene terephthalate by a novel identified degrader *Delftia* sp. WL-3 and its proposed metabolic pathway // *Letters in Applied Microbiology*. 2018. Vol. 67. Issue 3. P. 254–261.
23. Yoshida S., Hiraga K., Takehana T. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate) // *Science*. 2016. Vol. 351. Issue 6278. P. 1196–1199. DOI: 10.1126/science.aad6359.
24. Rani M., Shim W.J., Jang M. et al. Releasing of hexabromocyclododecanes from expanded polystyrenes in seawater-field and laboratory experiments // *Chemosphere*. 2017. Vol. 185. P. 798–805.

25. Hadad D., Geresh S., Sivan A. Biodegradation of polyethylene by the thermophilic bacterium *Brevibacillus borstelensis* // *Journal Application Microbiology*. 2005. Vol. 98. P. 1093–1100.
26. Maeda Y., Nakayama A., Iyoda J. et al. Synthesis and biodegradation of the copolymers of succinic anhydride with various oxiranes // *Kobunshi Ronbunshu*. 1993. Vol. 50. P. 723–729.
27. Ronkvist A.M., Xie W., Lu W., Gross R.A. Cutinase-catalyzed hydrolysis of poly(ethyleneterephthalate) // *Macromolecules*. 2009. Vol. 42. P. 5128–5138.
28. Sharon M., Sharon C. Studies on Biodegradation of Polyethylene terephthalate. A synthetic polyme // *Journal Microbiology Biotechnology Research*. 2012. Vol. 2 (2). P. 248–257.
29. Kleeberg I., Hetz C., Kroppenstedt R.M. et al. Biodegradation of aliphatic/aromatic copolyesters by thermophilic actinomycetes // *Applied Environmental Microbiology*. 1998. Vol. 64. P. 1731–1735.
30. Kleeberg I., Welzel K., van den Heuvel J. et al. Characterization of a new extracellular hydrolase from *Thermobifida fusca* degrading aliphatic-aromatic copolyesters. *Biomacromolecules* // *Microbiology*. 2005. Vol. 6. P. 262–270.
31. Sauvageau D. Microbial esterase and the degradation of plasticizers: dissertation. McGill University Montreal. Quebec, 2004. 156 p.
32. Liu C., Shi C., Zhu S. et al. Structural and functional characterization of polyethylene terephthalate hydrolase from *Ideonella sakaiensis* // *Biochemistry Biophysics Research Communication*. 2019. Vol. 508 (1). P. 289–294. DOI: 10.1016/j.bbrc.2018.11.148.
33. Miyakawa T., Mizushima H., Ohtsuka J. et al. Structural basis for the Ca²⁺-enhanced thermostability and activity of PET-degrading cutinase-like enzyme from *Saccharomonospora viridis* ANK190 // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2015. Vol. 99 (10). P. 4297–307. DOI: 10.1007/s00253-014-6272-8.
34. Лаптев А.Б. Методы и агрегаты для магнитогидродинамической обработки водонефтяных сред: дис. ... докт. техн. наук. Уфа, 2008. 350 с.
35. Ахияров Р.Ж., Бугай Д.Е., Лаптев А.Б. Проблемы подготовки оборотных и сточных вод предприятий нефтедобычи // *Нефтепромысловое дело*. 2008. №9. С. 61–65.
36. Ахияров Р.Ж., Лаптев А.Б., Ибрагимов И.Г. Повышение промышленной безопасности эксплуатации объектов нефтедобычи при биозаражении и выпадении солей методом комплексной обработки пластовых вод // *Нефтепромысловое дело*. 2009. №3. С. 44–46.
37. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В. Основные направления исследований сохраняемости свойств материалов под воздействием климатических и эксплуатационных факторов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 547–561. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561.
38. Коган А.М., Николаев Е.В., Голубев А.В., Лаптев А.Б., Мовенко Д.А. Этапы биообрастания и коррозии стали в черноморской воде // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2019. №6 (78). Ст. 09. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 08.07.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-84-94.