

УДК 678.7

А.А. Кривушина¹, Д.В. Севастьянов¹, Е.А. Шеин¹, М.И. Дасковский¹,
З. Усагава², Г.П. Авилейра², М.Г. Батиста²

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕСТРУКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ШТАММОВ МИКРОМИЦЕТОВ, ВЫДЕЛЕННЫХ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ КУБА, НА ПЛЕНОЧНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-141-150

Проведено лабораторное исследование биодegradации пленочных полимерных материалов (полиэтилена низкого давления, полиэтилена высокого давления, полипропилена, полиэтилентерефталата и поливинилхлорида (ПВХ)) под действием штаммов микромицетов, характерных для экосистемы острова Куба. Установлено, что наибольший рост микромицетов наблюдается для образцов ПВХ. Выявленный при эксперименте по оценке грибоустойкости (28 сут) минимальный уровень биодegradации пленок ПВХ подтвержден результатами испытания на растяжение.

Ключевые слова: биодegradация, штаммы микромицетов, пленочные полимерные материалы, экосистема острова Куба, биоповреждения, микромицеты-деструкторы, деструктивная активность, испытания.

A.A. Krivushina¹, D.V. Sevastyanov¹, E.A. Shein¹, M.I. Daskovsky¹,
Z. Usagawa², G.P. Avilleira², M.G. Batista²

STUDY FOR DESTRUCTIVE INFLUENCE OF MICROMYCETE STRAINS, ISOLATED UNDER CLIMATIC CONDITIONS OF THE REPUBLIC OF CUBA, ON POLYMER FILM MATERIALS

A laboratory study for biodegradation of polymer film materials (high-density and low-density polyethylene, polypropylene, polyethylene terephthalate, polyvinyl chloride) under the action of micromycete strains isolated under conditions of the island of Cuba was carried out. The maximum growth of micromycetes was observed in case of PVC samples. The minimum level of biodegradation for PVC films revealed at the mould resistance test (28 days) was confirmed by the results of tensile testing.

Keywords: biodegradation, micromycete strains, polymer films, ecosystem of the island of Cuba, biodeterioration, micromycetes-destructors, the destructive activity, tests.

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

²Центр экологических исследований Сьенфуэгос, г. Сьенфуэгос, Республика Куба [Cienfuegos Environmental Studies Center, Cienfuegos, the Republic of Cuba]; e-mail: ceac@ceac.cu

Введение

Актуальность проблемы утилизации пластиковых отходов в последние годы не вызывает сомнений в связи с постоянным ужесточением экологических требований [1–6]. Одним из подходов к решению данной проблемы является биодegradация синтетических пластиков под действием микроорганизмов (бактерий и грибов). Подробный анализ процессов биоразложения синтетических термопластичных полимеров и пластиков на их основе приведен в обзорной работе [1].

Наиболее разрушительным для материалов является тропический климат, характеризующийся высокими значениями температуры и относительной влажности

воздуха, а также интенсивным УФ-излучением, что в случае полимерных материалов вызывает их старение. Кроме того, биоразнообразие тропических экосистем, в том числе островных, отличающихся высоким уровнем эндемичности, обеспечивает широкий спектр микроорганизмов, среди которых с высокой вероятностью будут выявлены виды, способные к биоразложению пластиков.

Представляется актуальным изучение биодegradации пластиков посредством воздействия микробиологической среды, характерной для островных тропических экосистем. Подобные исследования позволят выбрать наиболее агрессивные для синтетических пластиков микроорганизмы с целью последующей разработки технологий биоразложения наиболее широко используемых в промышленности полимеров. Одним из ярких представителей тропических островных экосистем является экосистема острова Куба.

Данная работа посвящена изучению воздействия в лабораторных условиях штаммов микромицетов, выделенных в условиях экосистемы острова Куба, на образцы пластиковых пленок (полиэтилен низкого давления (ПНД), полиэтилен высокого давления (ПВД), полипропилен (ПП), поливинилхлорид (ПВХ) и полиэтилентерефталат (ПЭТФ)).

Материалы и методы

Для исследования взяты 5 видов полимерных пленочных материалов (табл. 1), представляющих наиболее широко используемые в промышленности виды пластиков, и 13 штаммов микромицетов, выделенных с поверхности различных материалов в условиях экосистемы острова Куба (табл. 2).

Таблица 1

Полимерные пленочные материалы, используемые в эксперименте

Условный номер образца	Материал	Размеры образцов, мкм
1	Полиэтилен низкого давления	10 × 150 × 30
2	Полиэтилен высокого давления	10 × 150 × 50
3	Поливинилхлорид	10 × 150 × 150
4	Полиэтилентерефталат	10 × 150 × 36
5	Полипропилен	10 × 150 × 30

Таблица 2

Перечень штаммов микромицетов, выделенных с поверхности материалов в условиях экосистемы острова Куба

Условный номер образца	Обозначение штамма	Вид микромицетов
1	viam 0181	<i>Acremonium sp.</i>
2	viam 0114	<i>Aspergillus niger</i>
3	viam 0182	<i>Cladosporium hillianum</i>
4	viam 0116	<i>Cladosporium perangustum</i>
5	viam 0118	<i>Cladosporium tenuissimum</i>
6	viam 0183	<i>Fusarium lactis</i>
7	viam 0184	<i>Fusarium proliferatum</i>
8	viam 0189	<i>Mycelia sterilia</i>
9	viam 0190	<i>Mycelia sterilia</i>
10	viam 0185	<i>Penicillium corylophilum</i>
11	viam 0186	<i>Penicillium cyclopium</i>
12	viam 0187	<i>Penicillium restrictum</i>
13	viam 0188	<i>Phoma sp.</i>

Для подтверждения деструктивной активности выделенных штаммов предварительно проведено исследование активности роста всех выделенных штаммов микромицетов на селективных питательных средах: агаризованной минеральной среде с добавлением микрокристаллической целлюлозы (в качестве единственного источника углерода) и агаризованной минеральной среде без целлюлозы (в качестве контроля). По характеру роста и морфологическим признакам установлено, что выделенные штаммы являются потенциальными деструкторами и представляют интерес для дальнейших исследований влияния их роста на свойства различных групп материалов. К таким морфологическим признакам относится более плотный и объемный внешний вид колоний, обильное образование воздушного мицелия, более интенсивное развитие спороношения и более яркая пигментация мицелия [7].

Перед испытанием на грибостойкость образцы полимерных пленок взвешивали на аналитических весах AND GH-200.

Изучение деструктивного воздействия штаммов микромицетов проводили по двум методикам – по ГОСТ 9.049–91 (метод 1) и по ASTM G21-15 (рис. 1). Для проведения испытаний пленок по выбранным методикам использовали суспензию спор микромицетов согласно ГОСТ 9.048–89. Для приготовления суспензии микромицеты предварительно выращивали на чашках Петри с агаризованным сусликом в течение 10–14 дней при температуре 28 ± 2 °С. Затем в стерильных условиях с помощью бактериологической петли, прокаленной в иглопрокаливателе, переносили споры микромицетов в стеклянную емкость со стерильной дистиллированной водой. При взятии спор избегали касания поверхности твердой питательной среды. Суспензию спор каждого вида гриба тщательно перемешивали путем встряхивания до разделения всех комочков спор и отфильтровывали через 4 слоя стерильной марли от фрагментов мицелия, агара и комочков спор. Концентрацию спор каждого гриба в отдельности подсчитывали с помощью камеры Горяева, а при необходимости добавляли стерильную воду до получения необходимой концентрации. Для испытаний использовали суспензию с концентрацией спор каждого вида гриба $1\text{--}2$ млн/см³ (по ГОСТ 9.048–89).

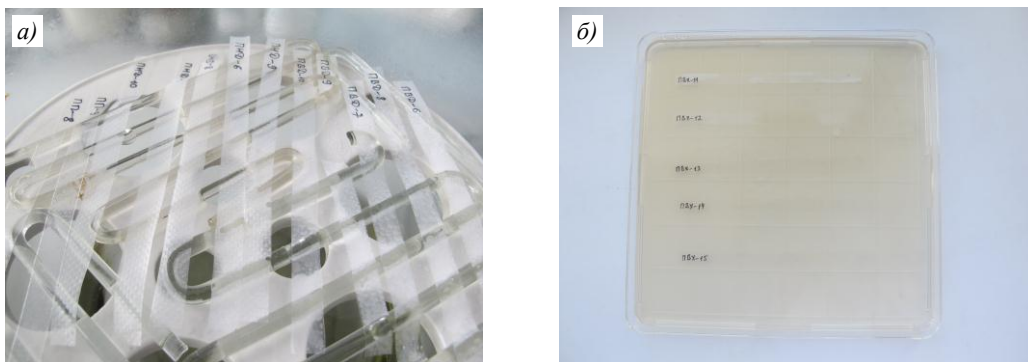


Рис. 1. Проведение испытаний по ГОСТ 9.049–91 (а) и по ASTM G21-15 (б)

При испытании по ГОСТ 9.049–91 (метод 1) образцы полимерных материалов инокулировали суспензией спор микромицетов с помощью пульверизатора. Инокуляцию осуществляли равномерно по всей поверхности образцов. Контрольные образцы не подвергали инокулированию. Инокулированные и контрольные образцы полимерных пленок помещали в специальные камеры, которые поддерживают заданные температуру и влажность. Образцы экспонировали в камерах в течение 28 сут при температуре 28 ± 2 °С и относительной влажности воздуха >90 %. После завершения испытаний

образцы извлекали из камеры, осматривали, микроскопировали при увеличении $\times 50$ и проводили оценку грибостойкости по 6-балльной шкале (по ГОСТ 9.048–89).

При испытании по ASTM G21-15 готовили чашки Петри с агаризованной средой, на поверхности которой после ее затвердевания размещали образцы испытываемых полимерных материалов. Далее, как и в методике по ГОСТ 9.049–91 (метод 1), инокулировали всю поверхность среды вместе с образцами суспензией спор микроорганизмов. Инокулированные и контрольные образцы полимерных пленок помещали в специальные камеры, которые поддерживают заданные температуру и влажность. Образцы экспонировали в камерах в течение 28 сут при температуре 28 ± 2 °С и относительной влажности воздуха >90 %. После завершения испытаний образцы извлекали из камеры, осматривали, выполняли микроскопирование (при увеличении $\times 50$) и проводили оценку грибостойкости по 5-балльной шкале (по ASTM G21-15).

В завершение оценки грибостойкости образцы пленок очищали от органических загрязнений с помощью ваты и этанола, а затем проводили взвешивание на аналитических весах AND GH-200.

С целью подтверждения биodeградации образцов полимерных пленок под действием штаммов микроорганизмов-деструкторов, после взвешивания образцы подвергали испытанию при растяжении (по ГОСТ 14236–81). Испытание проводили на испытательной машине ИР 5046-5 при следующих условиях: высота рабочей зоны 50 мм, скорость растяжения 100 мм/мин.

Результаты и обсуждение

Выбор ГОСТ 9.049–91 (метод 1) для определения грибостойкости испытываемых полимерных пленок обусловлен тем, что данная методика позволяет делать вывод о содержании компонентов, поддерживающих рост и развитие микроорганизмов, а также предусматривает приготовление споровой суспензии в воде без добавления каких-либо компонентов. В случае активного роста микроорганизмов (более 3 баллов по шкале, представленной в ГОСТ 9.048–89) можно утверждать, что материал не является грибостойким и что микроорганизмы развиваются благодаря усвоению самого материала. При проведении испытания по ASTM G21-15 рост микроорганизмов происходит благодаря питательной среде, которая выполняет роль подложки для испытываемых материалов. В данном случае идет более интенсивное воздействие на испытываемые материалы. Указанная методика, как правило, применяется для исследования материалов, которые эксплуатируются в условиях наличия органических загрязнений, а также для определения фунгицидных и фунгистатических свойств материалов.

Результаты по определению грибостойкости образцов полимерных пленок после 28 сут испытаний по ГОСТ 9.049–91 (метод 1) и ASTM G21-15 представлены в табл. 3. Видно, что для 4 из 5 исследованных типов полимерных материалов характерен балл грибостойкости, равный 1.

Таблица 3

Грибостойкость полимерных пленок после 28 сут испытаний

Условный номер образца	Материал	Грибостойкость, балл, после испытаний	
		по ГОСТ 9.049–91	по ASTM G21-15
1	Полиэтилен низкого давления	1	1
2	Полиэтилен высокого давления	1	1
3	Поливинилхлорид	5	4
4	Полиэтилентерефталат	1	1
5	Полипропилен	1	1

При микроскопировании после испытания по ГОСТ 9.049–91 (метод 1) на поверхности материалов наблюдали отдельные проросшие в гифы споры (рис. 2). Однако на образцах полимерных пленок ПВХ отмечено активное развитие грибов (рис. 2, *д*, *е*), что проявлялось в наличии спороношения и хорошо развитого мицелия, покрывающего >25 % площади испытываемых образцов.

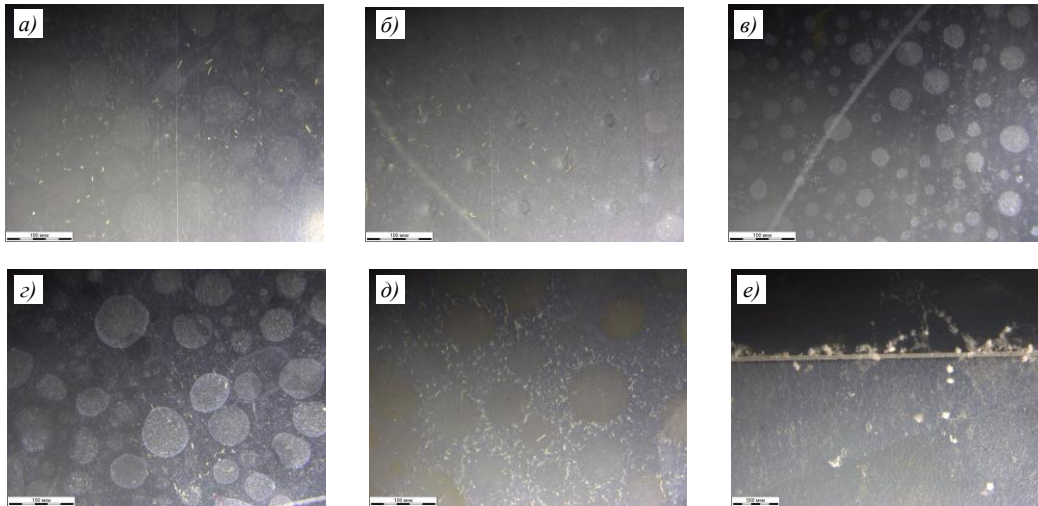


Рис. 2. Поверхность образцов полимерных материалов ПВД (*а*), ПНД (*б*), ПП (*в*), ПЭТФ (*г*) и ПВХ (*д*, *е*) после испытания по ГОСТ 9.049–91 (метод 1)

При проведении испытания по ASTM G21-15 уже на 3–5 сут наблюдали образование колоний микромицетов на питательной среде, а на 7 сут мицелием была покрыта вся поверхность среды, за исключением тех мест, где находились образцы полимерных пленок. Следует отметить, что при испытании по данной методике материал подвержен воздействию вторичных метаболитов, выделяемых микромицетами в процессе роста на питательной среде, если даже сам по себе не является питательным субстратом для грибов. Как и при испытании по ГОСТ 9.049–91 (метод 1), отмечено слабое развитие микромицетов на образцах четырех типов полимерных материалов – ПВД, ПНД, ПЭТФ и ПП. Активное развитие мицелия и наличие большого количества спороношений отмечены для образцов ПВХ (рис. 3).

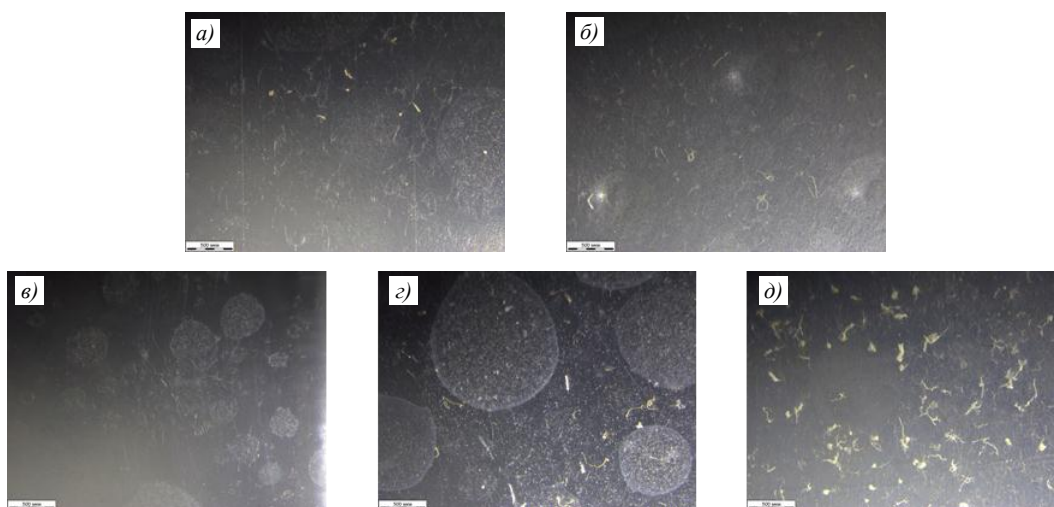


Рис. 3. Поверхность образцов полимерных материалов ПВД (*а*), ПНД (*б*), ПП (*в*), ПЭТФ (*г*) и ПВХ (*д*) после испытания по ASTM G21-15

С целью определения степени воздействия микромицетов на полимерные пленки, помимо визуальной оценки степени обрастания, проведено измерение массы образцов до и после испытания на грибостойкость. Результаты представлены в табл. 4–6.

В табл. 4 приведены данные для образцов, которые находились в условиях повышенной влажности (>90 %), но не подвергались воздействию грибов. Видно, что для всех 5 типов пластиков можно наблюдать незначительное увеличение массы, что, вероятно, связано с влагопоглощением полимерных материалов. Наибольшее увеличение массы (8,5 %) отмечено в случае образцов ПЭТФ.

Таблица 4

Результаты взвешивания контрольных образцов полимерных пленок, находившихся в условиях повышенной влажности (>90 %), до и после испытания на грибостойкость

Материал	Условный номер образца	Масса до испытания, г	Масса после испытания, г	Разница в массе, г	Средняя разница в массе	
					г	%
ПНД	1	0,0384	0,0397	0,0013	0,0006	1,5
	2	0,0374	0,0378	0,0004		
	3	0,0383	0,0388	0,0005		
	4	0,0394	0,0397	0,0003		
	5	0,0377	0,0380	0,0003		
ПВД	1	0,0657	0,0663	0,0006	0,0006	0,9
	2	0,0662	0,0669	0,0007		
	3	0,0657	0,0661	0,0004		
	4	0,0667	0,0673	0,0006		
	5	0,0658	0,0665	0,0007		
ПВХ	1	0,2807	0,2834	0,0027	0,0025	0,9
	2	0,2662	0,2678	0,0016		
	3	0,2767	0,2780	0,0013		
	4	0,2719	0,2757	0,0038		
	5	0,2925	0,2956	0,0031		
ПЭТФ	1	0,0783	0,0802	0,0019	0,0071	8,5
	2	0,0816	0,0897	0,0081		
	3	0,0831	0,0952	0,0121		
	4	0,0838	0,0892	0,0054		
	5	0,0892	0,0973	0,0081		
ПП	1	0,0371	0,0375	0,0004	0,0004	0,1
	2	0,0463	0,0467	0,0004		
	3	0,0418	0,0421	0,0003		
	4	0,0382	0,0388	0,0006		
	5	0,0383	0,0385	0,0002		

Масса образцов, подвергшихся воздействию микромицетов, практически не изменилась как в случае проведения испытания по ГОСТ 9.049–91 (метод 1), так и в случае более жестких условий испытания по ASTM G21-15 (табл. 5 и 6). Можно предположить, что масса образцов при проведении испытаний изменялась в двух направлениях: в сторону увеличения в процессе влагонасыщения образцов пластиков и в сторону уменьшения в результате биологической деградации образцов под воздействием вторичных метаболитов микромицетов. Для проверки данного предположения необходимо проведение исследований более длительного воздействия микромицетов на полимерные пленки.

Дополнительно выполнено взвешивание образцов ПВХ сразу после завершения испытания по ГОСТ 9.049–91 (метод 1), поскольку данный материал оказался единственным, на котором наблюдалось активное развитие грибов. Взвешивание проведено с образовавшейся на поверхности образцов биомассой. Как видно из данных, представленных в табл. 5, масса образцов с грибами снизилась по сравнению с исходной на ~0,3 % (0,0008 г), а после смыва биомассы – еще на 0,1 % (0,0002 г). В случае воздействия по ASTM G21-15 уменьшение массы образцов составило 0,15 % (0,0004 г). Взвешивание вместе с биомассой после испытания по ASTM G21-15 не проводили, поскольку образцы в процессе испытания находились на питательной среде и определение массы образцов с остатками среды и мицелия с чашек привело бы к некорректному результату.

Таблица 5

**Результаты взвешивания образцов полимерных пленок
до и после испытания по ГОСТ 9.049–91 (метод 1)**

Материал	Условный номер образца	Масса до испытания, г	Масса с грибами, г	Масса после смыва грибов, г	Разница в массе, г	Средняя разница в массе	
						г	%
ПНД	6	0,0362	–	0,0362	0,0000	–0,0001	0,3
	7	0,0368	–	0,0369	0,0001		
	8	0,0418	–	0,0418	0,0000		
	9	0,0385	–	0,0381	–0,0004		
ПВД	10	0,0381	–	0,0381	0,0000	0,0000	0,0
	6	0,0669	–	0,0669	0,0000		
	7	0,0663	–	0,0664	0,0001		
	8	0,0668	–	0,0668	0,0000		
ПВХ	9	0,0678	–	0,0677	–0,0001	–0,0011	0,4
	10	0,0661	–	0,0661	0,0000		
	6	0,2770	0,2765	0,2762	–0,0008		
	7	0,2796	0,2787	0,2787	–0,0009		
ПЭТФ	8	0,2566	0,2558	0,2554	–0,0012	–0,0002	0,2
	9	0,2706	0,2696	0,2694	–0,0012		
	10	0,2654	0,2646	0,2641	–0,0013		
	6	0,0725	–	0,0730	0,0005		
ПП	7	0,0719	–	0,0712	–0,0007	0,0000	0,0
	8	0,0822	–	0,0820	–0,0002		
	9	0,0840	–	0,0839	–0,0001		
	10	0,0826	–	0,0820	–0,0006		
	6	0,0449	–	0,0449	0,0000	–0,0004	0,2
	7	0,0464	–	0,0464	0,0000		
	8	0,0372	–	0,0371	–0,0001		
	9	0,0467	–	0,0467	0,0000		
	10	0,0396	–	0,0396	0,0000	0,0001	0,2

Таблица 6

**Результаты взвешивания образцов полимерных пленок
до и после испытания по ASTM G21-15**

Материал	Условный номер образца	Масса до испытания, г	Масса после испытания, г	Разница в массе, г	Средняя разница в массе	
					г	%
ПНД	11	0,0387	0,0386	–0,0001	–0,0001	0,3
	12	0,0363	0,0366	0,0003		
	13	0,0388	0,0386	–0,0002		
	14	0,0383	0,0380	–0,0003		
	15	0,0364	0,0361	–0,0003		
ПВД	11	0,0651	0,0651	0,0000	0,0000	0,0
	12	0,0671	0,0671	0,0000		
	13	0,0657	0,0659	0,0002		
	14	0,0686	0,0686	0,0000		
	15	0,0665	0,0664	–0,0001		
ПВХ	11	0,2795	0,2786	–0,0009	–0,0004	0,2
	12	0,2614	0,2614	0,0000		
	13	0,2699	0,2694	–0,0005		
	14	0,2867	0,2867	0,0000		
	15	0,2595	0,2591	–0,0004		
ПЭТФ	11	0,0810	0,0794	–0,0016	–0,0005	0,6
	12	0,0764	0,0764	0,0000		
	13	0,0855	0,0845	–0,0010		
	14	0,0817	0,0820	0,0003		
	15	0,0929	0,0927	–0,0002		
ПП	11	0,0391	0,0394	0,0003	0,0001	0,2
	12	0,0448	0,0448	0,0000		
	13	0,0476	0,0475	–0,0001		
	14	0,0392	0,0393	0,0001		
	15	0,0480	0,0480	0,0000		

Выбор испытания при растяжении в качестве дополнительного метода исследований обусловлен тем, что изменения механических свойств очень чувствительны к изменениям молекулярной массы полимера, которая может служить индикатором деградации. Как отмечается в работах [8–17], изменение какого-либо механического свойства полимера (особенно прочности при растяжении) часто используется в качестве параметра биodeградации при минимальной потере массы.

Результаты испытания при растяжении для образцов полимерных пленок, предварительно подвергнутых испытанию на грибостойкость, а также для контрольных образцов, которые не подвергались воздействию штаммов микромицетов, представлены в табл. 7–9. Следует отметить, что испытание при растяжении проводили только для образцов ПВХ, поскольку на них наблюдался наиболее активный рост микромицетов. Наибольшее значение относительной потери массы (0,6 %) для образцов ПЭТФ в случае испытания по ASTM G21-15 можно объяснить наличием в молекуле ПЭТФ подверженной гидролизу эфирной связи, что облегчает процесс биodeградации по сравнению с карбоцепными полимерами [8].

Из данных, представленных в табл. 7–9, следует, что прочность при растяжении образцов ПВХ, предварительно подвергнутых испытанию на грибостойкость, на ~4 % меньше прочности при растяжении для контрольных образцов, что может свидетельствовать о минимальном уровне биodeградации образцов и согласуется с данными эксперимента по грибостойкости.

Таблица 7

Результаты испытания при растяжении контрольных образцов пленок ПВХ, не подвергавшихся испытанию на грибостойкость

Условный номер образца	Толщина, мм	Модуль упругости, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Абсолютное удлинение при разрыве, мм	Относительное удлинение при разрыве, %
16	0,13	5,30	28,0	140,6	281
17	0,14	4,96	26,3	135,2	270
18	0,14	4,51	25,1	143,6	287
19	0,13	4,86	28,0	154,6	309
20	0,13	5,23	27,3	140,3	281
Среднее значение и средне-квадратическое отклонение		4,97 ± 0,31	26,9 ± 1,2	142,9 ± 7,0	286 ± 14

Таблица 8

Результаты испытания при растяжении образцов пленок ПВХ, предварительно подвергнутых испытанию на грибостойкость по ГОСТ 9.049–91 (метод 1)

Условный номер образца	Толщина, мм	Модуль упругости, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Абсолютное удлинение при разрыве, мм	Относительное удлинение при разрыве, %
6	0,14	4,95	26,7	145,6	291
7	0,14	4,72	25,6	141,5	283
8	0,14	4,71	24,4	136,4	273
9	0,14	4,96	25,4	146,7	293
10	0,14	4,75	26,7	156,4	313
Среднее значение и средне-квадратическое отклонение		4,82 ± 0,13	25,8 ± 1,0	145,3 ± 6,9	291 ± 15

Таблица 9

Результаты испытания при растяжении образцов пленок ПВХ, предварительно подвергнутых испытанию на грибостойкость по ASTM G21-15

Условный номер образца	Толщина, мм	Модуль упругости, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Абсолютное удлинение при разрыве, мм	Относительное удлинение при разрыве, %
11	0,14	4,51	26,8	157,4	315
12	0,14	4,85	26,4	147,9	296
13	0,14	4,63	25,5	138,8	278
14	0,14	4,66	25,4	138,8	278
15	0,14	4,84	25,6	144,6	289
Среднее значение и средне-квадратическое отклонение		4,70 ± 0,15	25,9 ± 0,6	145,5 ± 8,0	291 ± 16

Заключения

Установлено, что из исследованных пленочных материалов наибольший рост микромицетов наблюдается у образцов ПВХ: грибостойкость при испытании по ГОСТ 9.049–91 (метод 1) составила 5 баллов, при испытании по ASTM G21-15: 4 балла. Результаты испытания на растяжение пленок ПВХ подтверждают минимальный уровень биodeградации образцов.

Наличие некоторой закономерности в результатах после проведения измерений не позволяет достоверно судить о тенденции в изменении массы образцов. Так, несмотря на отмеченное интенсивное развитие микромицетов, потеря массы у образцов из пленочного ПВХ составила только 0,4 % (испытание по ГОСТ 9.049–91 (метод 1)) и 0,2 % (испытание по ASTM G21-15).

Для более подробного исследования процесса биodeградации пленочных полимерных материалов необходимо проведение более длительных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов.

Статья подготовлена в рамках выполнения работ по гранту РФФИ № 18-53-34006 «Реакции автотрофных и гетеротрофных биологических систем на деградацию материалов в естественных условиях с последующим изучением сукцессионных изменений экосистемы в тропическом климате».

Библиографический список

1. Севастьянов Д.В., Дасковский М.И., Шеин Е.А., Скрипачев С.Ю., Усагава З., Авиллейра Г.П., Батиста М.Г. Биodeградация синтетических термопластичных полимеров и пластиков на их основе (обзор) // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 7. С. 2–14. DOI: 10.31044/1994-6260-2020-0-7-2-14.
2. 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.
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 2 (47). С. 56–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
4. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
5. Петров А.В., Дориомедов М.С., Скрипачев С.Ю. Технологии утилизации полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2015. № 8. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-9-9.

6. Перов Н.С. Конструирование полимерных материалов на молекулярных принципах. I. Создание полимерных материалов с дополнительными механизмами диссипации механической энергии при низких температурах // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 3 (48). С. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-50-55.
7. Кривушина А.А., Бобырева Т.В., Мосунова Д.Н., Новиков А.А. Деструктивная активность микромицетов, выделенных с материалов в условиях тропического климата, на селективных питательных средах // *Материаловедение*. 2021. № 6 (в печати).
8. Alshehrei F. Biodegradation of synthetic and natural plastic by microorganisms // *Journal of Applied & Environmental Microbiology*. 2017. Vol. 5. No. 1. P. 8–19. DOI: 10.12691/jaem-5-1-2.
9. Ahmed T., Shahid M., Azeem F. et al. Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. No. 8. P. 7287–7298. DOI: 10.1007/s11356-018-1234-9.
10. Shah A.A., Hasan F., Hameed A., Ahmed S. Biological degradation of plastics: a comprehensive review // *Biotechnology Advances*. 2008. Vol. 26. P. 246–265. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2007.12.005.
11. Лаптев А.Б., Турова Т.П., Голубев А.В., Киреев Д.М. Распространение биодеструкторов полимерных композиционных материалов в природных средах // *Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. (г. Москва, 18 окт. 2019 г.)*. М.: ВИАМ, 2019. С. 84–98.
12. Лаптев А.Б., Николаев Е.В., Луценко А.Н., Скрипачев С.Ю. Направления исследований в области защиты от коррозии, старения и биоповреждения материалов // *Климат-2017. Проблемы оценки климатической стойкости материалов и сложных технических систем: сб. материалов II Всерос. науч.-техн. конф. (г. Геленджик, 3–4 авг. 2017 г.)*. М.: ВИАМ, 2017. С. 46–54.
13. Калинина И.Г., Гумаргалиева К.З., Семенов С.А. Биокоррозия пластифицированного поливинилхлорида под воздействием микроскопического гриба *Aspergillus niger* // *Коррозия: материалы, защита*. 2017. № 2. С. 37–40.
14. Турова Т.П., Назина Т.Н., Соколова Д.Ш., Лаптев А.Б. Видовые особенности микробиологического заражения полимерных материалов в морской и пресной воде // *Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»: материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. (г. Москва, 30 июня 2020 г.)*. М.: ВИАМ, 2020. С. 61–77.
15. Лаптев А.Б., Турова Т.П., Соколова Д.Ш. Деструкция полиэфиров микроорганизмами-обработателями в водных средах // *Климат-2019. Современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы: материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. (г. Геленджик, 16–17 мая 2019 г.)*. М.: ВИАМ, 2020. С. 212–216.
16. Лаптев А.Б., Ермишев В.Ю., Старцев В.О., Соколова Д.Ш. Применение методов молекулярной биологии для оценки биостойкости // *Материалы XII Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Современные аспекты в области исследований структурно-фазовых превращений при создании материалов нового поколения» (г. Москва, 7 февр. 2020 г.)*. М.: ВИАМ, 2020. С. 471–478.
17. 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.