

## Оценка деструкции модифицированного прооксидантами полиэтилена в контексте экобезопасности

Артём В. Протасов	<sup>1</sup>	<a href="mailto:pav-vgta86@mail.ru">pav-vgta86@mail.ru</a>
Любовь Н. Студеникина	<sup>1</sup>	<a href="mailto:lubov-churkina@yandex.ru">lubov-churkina@yandex.ru</a>
Владимир И. Корчагин	<sup>1</sup>	<a href="mailto:kvi-vgta@rambler.ru">kvi-vgta@rambler.ru</a>
Наталья Г. Ахметова	<sup>1</sup>	<a href="mailto:notik1477@mail.ru">notik1477@mail.ru</a>
Юлия А. Реброва	<sup>1</sup>	<a href="mailto:iurebrowa@yandex.ru">iurebrowa@yandex.ru</a>

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

**Реферат.** В работе приведены результаты оценки деструкции полиэтилена марки ПВД (ПЭ), модифицированного прооксидантами – карбоксилатами железа, меди и кобальта (в количестве 1,5 масс. %) при ускоренном термическом и ультрафиолетовом старении в течение 192 часов. Оценка деструкции в контексте экобезопасности включала установление степени соответствия исследуемых материалов требованиям ГОСТ 33747-2016 «Оксобiodegradable packaging», согласно которому критерием эффективности оксобiodeградации полиолефинов может являться снижение прочности и относительного удлинения при разрыве образца при ускоренном старении, а также количественное определение выделения формальдегида при термодеструкции модифицированного прооксидантами ПЭ для сравнения с показателями предельно-допустимой концентрации. В работе изучены реологические показатели материалов и проведена сравнительная оценка снижения вязкости расплава и снижения относительно удлинения при разрыве в динамике ускоренного термического и ультрафиолетового старения модифицированного прооксидантами ПЭ в выбранном временном интервале 192 часа воздействия. Установлено снижение относительного удлинения при разрыве ПЭ, содержащего прооксидант на основе кобальта, на 94% при термическом старении в течении 192 часов, и на 46% – при ультрафиолетовом. Для ПЭ, модифицированного карбоксилатом меди, эти значения составили соответственно 64 и 33%, для ПЭ, модифицированного карбоксилатом железа – 35 и 40% соответственно. Снижение прочности на 95% от первоначального значения за 192 часа воздействия температуры было достигнуто у образца, модифицированного кобальтом, что подтверждает его соответствие ГОСТ 33747-2016. Для остальных образцов степень снижения прочности в выбранном временном интервале не позволяет дать оценку соответствия указанному стандарту. Выделение формальдегида при термическом старении в течение 192 часов на 1 г образца ПЭ, модифицированного карбоксилатом кобальта, составило 0,051 мг/м<sup>3</sup>, для ПЭ, модифицированного карбоксилатом меди – 0,032 мг/м<sup>3</sup>, для ПЭ, модифицированного карбоксилатом железа – 0,034 мг/м<sup>3</sup>. Установлено превышение ПДК формальдегида в воздушной вытяжке ПЭ с карбоксилатом кобальта в 1,2 раза при термическом старении более 96 часов и в 1,5 раза при термическом старении более 192 часов. Зафиксировано снижение вязкости ПЭ, содержащего прооксидант на основе кобальта, на 90% при термическом старении в течении 192 часов, и на 10% – при ультрафиолетовом. Для ПЭ, модифицированного карбоксилатом меди, эти значения составили соответственно 9 и 2%, для ПЭ, модифицированного карбоксилатом железа – 8 и 5 % соответственно.

**Ключевые слова:** оксоразлагаемый полиэтилен, прооксидант, деструкция, экобезопасность

## Assessment of destruction of polyethylene modified with pro-oxidants in the context of environmental safety

Artem V. Protasov	<sup>1</sup>	<a href="mailto:pav-vgta86@mail.ru">pav-vgta86@mail.ru</a>
Lubov N. Studenikina	<sup>1</sup>	<a href="mailto:lubov-churkina@yandex.ru">lubov-churkina@yandex.ru</a>
Vladimir I. Korchagin	<sup>1</sup>	<a href="mailto:kvi-vgta@rambler.ru">kvi-vgta@rambler.ru</a>
Natalia G. Akhmetova	<sup>1</sup>	<a href="mailto:notik1477@mail.ru">notik1477@mail.ru</a>
Yulia. A. Rebrova	<sup>1</sup>	<a href="mailto:iurebrowa@yandex.ru">iurebrowa@yandex.ru</a>

<sup>1</sup> Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

**Summary.** The paper presents the results of the evaluation of the destruction of polyethylene LDPE (hereinafter-PE), modified by prooxidants based on iron, copper and cobalt carboxylates (in the amount of 1.5 mass. % ) with accelerated thermal and ultraviolet aging for 192 hours. The assessment of degradation in the context of environmental safety included the determination of the degree of compliance of the materials with the requirements of state standard 33747-2016 "Oxo-biodegradable packaging", according to which the criterion of the efficiency of oxobiodegradation polyolefins may be a decrease in strength and elongation at break of the sample at accelerated aging, as well as the quantitative determination of the release of formaldehyde during thermal degradation modified with

Для цитирования

Протасов А.В., Студеникина Л.Н., Корчагин В.И., Ахметова Н.Г., Реброва Ю.А. Оценка деструкции модифицированного прооксидантами полиэтилена в контексте экобезопасности // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 3. С. 352–357. doi:10.20914/2310-1202-2018-3-352-357

For citation

Protasov A.V., Studenikina L.N., Korchagin V.I., Akhmatova N.G., Rebrova Yu.A. Assessment of destruction of polyethylene modified with pro-oxidants in the context of environmental safety. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 3. pp. 352–357. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-3-352-357

prooxidants PE for comparison with the maximum permissible concentration. The rheological parameters of the materials were studied and a comparative assessment of the melt viscosity reduction and reduction with respect to elongation at break in the dynamics of accelerated thermal and UV aging of the PE modified with prooxidants in the selected time interval of 192 hours of exposure was carried out. A decrease in the relative elongation at rupture of PE containing cobalt - based prooxidant by 94% at thermal aging for 192 hours, and by 46% at ultraviolet was established. For PE modified with copper carboxylate, these values were 64 and 33 %, respectively, for PE modified with iron carboxylate – 35% and 40%, respectively. The reduction of strength by 95% of the initial value for 192 hours of temperature exposure was achieved in a sample modified with cobalt, which confirms its compliance with state standard 33747-2016. For other samples, the degree of strength reduction in the selected time interval does not allow to assess compliance with the specified standard. The release of formaldehyde during thermal aging for 192 hours per 1 g of the PE sample modified with cobalt carboxylate was 0.051 mg/m<sup>3</sup>, for PE modified with copper carboxylate – 0.032 mg/m<sup>3</sup>, for PE modified with iron carboxylate – 0.034 mg/m<sup>3</sup>. Installed excessive concentrations of formaldehyde in air hood PH with the carboxylate of cobalt 1.2 times under thermal aging 96 hours and 1.5 times the thermal ageing of a maximum of 192 hours. The reduction of the viscosity of PE containing cobalt – based prooxidant by 90% at thermal aging for 192 hours and by 10% at ultraviolet was recorded. For PE modified with copper carboxylate, these values were 9 and 2 %, respectively, for PE modified with iron carboxylate – 8 and 5%, respectively.

**Keywords:** oxodegradable polyethylene, the prooxidants, destruction, environmental safety

## Введение

Широкое распространение оксоразлагаемых пленок, наблюдаемое в последнее время на рынке упаковочных материалов, требует оценки их соответствия нормативным документам на оксобиоразлагаемую упаковку, а также исследования безопасности для человека и окружающей среды, в частности, изучения динамики образования токсичных продуктов деструкции.

ГОСТ 33474-2016 «Оксобиоразлагаемая упаковка» требует снижения прочности материала до 95% при термической или ультрафиолетовой деструкции в течение 45 сут, при этом материал должен быть безопасен и нетоксичен.

Известно, что модификация полиолефинов солями металлов переменной валентности способствует их ускоренной деградации [1, 2, 3], при этом процесс разложения начинается с окислительной деструкции основной полимерной цепи [4], в результате которой полимер фрагментируется с изменением основных свойств (например, появляется гидрофильность и способность к биodeградации) [5]. Процесс сопровождается выделением газообразных продуктов деструкции, в том числе кетонов, альдегидов и пр. [6, 7].

Поведение полиэтилена (ПЭ), модифицированного прооксидантами на основе карбоксилатов кобальта, меди и железа, на предмет соответствия вышеуказанному стандарту ранее не было подробно описано в литературе и требует дополнительно изучения.

Проведение корреляции между потерей прочности и потерей вязкости оксоразлагаемого полиэтилена также ранее не изучалось и представляет интерес для подтверждения эффективности деструкции.

Изучение токсикологических показателей модифицированного прооксидантами ПЭ необходимо как для установления соответствия

санитарным нормам, так и для выработки рекомендаций по безопасной эксплуатации, например, по ограничению условий хранения в помещениях с повышенной температурой. Данные о количественном выделении токсичных продуктов разложения оксоразлагаемых полиолефинов необходимы для разработки технических решений по их минимизации, например, введение в рецептуру добавок-прооксидантов ингибиторов, антиоксидантов или других функциональных технологических добавок.

**Цель работы** – определение степени деструкции ПЭ, модифицированного прооксидантами различной природы, по потере показателя относительного удлинения при разрыве и по снижению показателя эффективной вязкости в динамике ускоренного термического и ультрафиолетового старения для оценки соответствия стандартам на экоупаковку; определение токсичности материала по показателю выделения формальдегида.

В задачи исследования входило:

– получение образцов оксоразлагаемого ПЭ, модифицированного прооксидантами – карбоксилатами железа, меди и кобальта;

– изучение динамики деструкции оксоразлагаемого ПЭ по показателю относительного удлинения при разрыве в условиях ускоренного термического и ультрафиолетового старения в течение 192 ч;

– изучение динамики снижения вязкости оксоразлагаемого ПЭ в условиях ускоренного термического и ультрафиолетового старения методом капиллярной вискозиметрии и проведение корреляции полученных значений с показателями прочности;

– количественное определение формальдегида в воздушной вытяжке оксоразлагаемого ПЭ в динамике термодеструкции с оценкой соответствия предельно допустимой концентрации.

### Материалы и методы

В опытно-производственных условиях ООО «Векторполимер» были получены 3 образца оксоразлагаемых пленок (рисунок 1) на основе полиэтилена марки ПВД с содержанием добавки-прооксиданта в количестве 1,5 масс. %:

- образец № 1 – оксобиоразлагаемая пленка с карбоксилатом железа,
- образец № 2 – оксобиоразлагаемая пленка с карбоксилатом меди,
- образец № 3 – оксобиоразлагаемая пленка с карбоксилатом кобальта.



Рисунок 1. Образцы оксоразлагаемого ПЭ с содержанием прооксиданта 1,5 масс. %

Figure 1. Samples of polyethylene containing prooxidant 1.5 wt. %

Образцы получали путем прямого смешения в лопастном смесителе гранул ПЭ и порошкообразной добавки-прооксиданта с последующим экструзионно-выдувным формованием пленки.

Определение относительного удлинения при разрыве модифицированного прооксидантами ПЭ в динамике термической и ультрафиолетовой деструкции проводили по ГОСТ 11262-80.

Определение показателей вязкости проводилось методом капиллярной вискозиметрии с помощью реометра «Smart RHEO-1000» с программным обеспечением «CeastVIEW 5.94 4D».

Определение содержания формальдегида в воздушной вытяжке модифицированного ПЭ проводилось в соответствии с ГОСТ 22648-77 «Пластмассы. Методы определения гигиенических показателей».

Ускоренное термическое ультрафиолетовое старение образцов проводили согласно ГОСТ 33747-2016.

### Результаты и обсуждение

В соответствии с ГОСТ 33747-2016 «Оксобиоразлагаемая упаковка» процентное удлинение при растяжении пленки должно быть не более 5% после 45 дней воздействия (т. е. 1000 ч), периодичность контроля: каждые 48 ч для образцов из полиэтилена.

Известно, что модификация полиэтилена металлами переменной валентности в условиях ускоренного термического старения способствует снижению прочностных показателей [8]. В работе [9] описано влияние стеарата и карбоксилата железа на термоокислительную деструкцию полиэтилена, показано увеличение индекса деградации при повышении содержания прооксиданта в полимерной матрице.

В таблице 1 представлена динамика снижения относительного удлинения при разрыве модифицированного прооксидантами ПЭ в динамике термической и ультрафиолетовой деструкции.

Из таблицы 1 видно, что по показателю относительного удлинения при разрыве образец ПЭ, модифицированный карбоксилатом кобальта, показал снижение прочности на 94% за 192 ч воздействия температуры, но при ультрафиолетовом старении этот показатель снизился лишь на 46%. Для образца ПЭ, модифицированного карбоксилатом меди, эти значения составили 64 и 33%, для ПЭ, модифицированного карбоксилатом железа, – 35 и 40% соответственно.

Снижение прочности на 95% от первоначального значения за 192 ч воздействия температуры было достигнуто у образца, модифицированного кобальтом, что подтверждает его соответствие ГОСТ 33747-2016. Для остальных образцов степень снижения прочности в выбранном временном интервале не позволяет дать оценку соответствия указанному стандарту.

Известно, что при деструкции полимеров в особенности оксобиоразлагаемых происходит снижение их молекулярной массы [10], что влияет на реологические показатели материала, в частности, на эффективную вязкость.

На рисунке 2, 3 показана динамика снижения эффективной вязкости модифицированного прооксидантами ПЭ в условиях ускоренного термического и ультрафиолетового старения в течение 192 ч.

Показатели относительного удлинения при разрыве модифицированного прооксидантами полиэтилена в динамике термической и ультрафиолетовой деструкции

Table 1.

Indicators of relative elongation at break of polyethylene modified by prooxidants in the dynamics of thermal and ultraviolet degradation

Условия деструкции Conditions of destruction	Время воздействия, ч Exposure time, hours'	Среднее значение по 5 опытным образцам Average value for 5 prototypes			
		ПЭ + карбоксилат кобальта PE + a carboxylate cobalt's	ПЭ + карбоксилат меди PE + a carboxylate coppers	ПЭ + карбоксилат железа PE + a carboxylate gland	ПЭ без прооксиданта PE without of prooxidants
Термическое старение Thermal ageing	0	255	252	248	256
	48	252	259	272	266
	96	195	275	256	254
	144	114	225	211	231
	192	15	90	160	222
Ультрафиолетовое старение UV aging	0	242	239	245	260
	48	246	263	275	270
	96	251	258	250	275
	144	165	195	213	258
	192	130	160	146	241

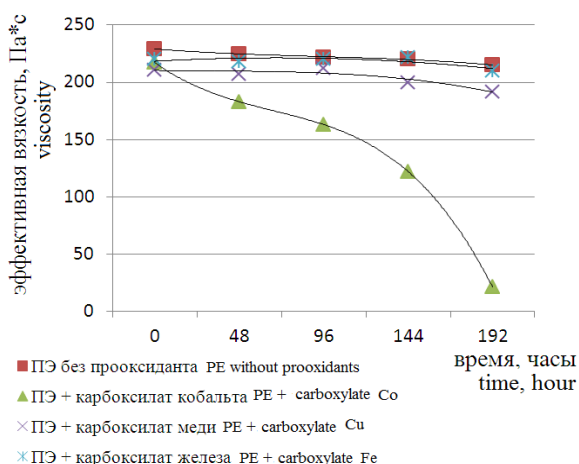


Рисунок 2. Динамика снижения эффективной вязкости модифицированного прооксидантами ПЭ при ускоренном термическом старении

Figure 2. The decrease of the effective viscosity of polyethylene with Pro-oxidants during accelerated thermal aging

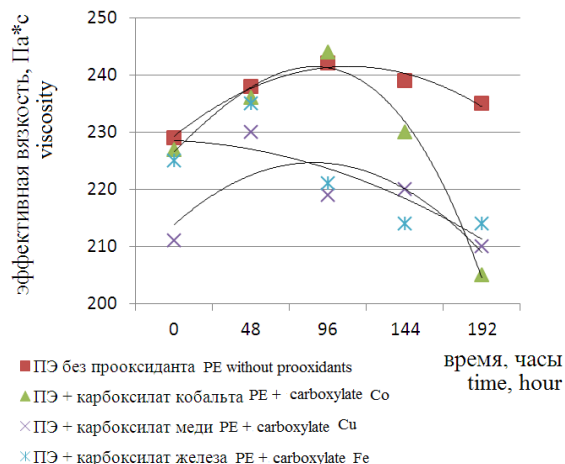


Рисунок 3. Динамика снижения эффективной вязкости модифицированного прооксидантами ПЭ при ускоренном ультрафиолетовом старении

Figure 3. The decrease of the effective viscosity of polyethylene with Pro-oxidants during accelerated UV aging

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что при термической и ультрафиолетовой деструкции полиэтилена, модифицированного карбоксилатами кобальта, меди и железа, наблюдаются различные механизмы разложения: при термодеградациии прослеживается плавное снижение вязкости, а при ультрафиолетовой-деградации сначала наблюдается повышение вязкости, что, видимо, связано с перегруппировкой боковых звеньев полимерной цепи, и только после 96 ч воздействия происходит ее снижение.

Поведение материала в условиях ускоренного термического старения при температуре 60 °С имитирует его размещение на полигонах ТБО, а также в помещениях с повышенной температурой, что позволяет провести оценку степени выделения токсичных продуктов деструкции в производственных условиях или в условиях окружающей среды.

В таблице 2 показаны результаты определения содержания формальдегида в воздушной вытяжке модифицированного различными прооксидантами ПЭ в динамике ускоренной термодеструкции.

Концентрация формальдегида, мкг/м<sup>3</sup>, в воздушной вытяжке модифицированного прооксидантами ПЭ в динамике термического старения

Table 2.

Concentration of formaldehyde, µg/m<sup>3</sup>, in air extract of polyethylene with Pro-oxidants in the dynamics of thermal aging

Прооксидант The prooxidants	Время действия температуры, ч The duration of the temperature, hours'				
	0	48	96	144	192
Без прооксиданта   Without prooxidant	0	1	4	7	10
Карбоксилат железа   The gland carboxylate	5	5	18	25	34
Карбоксилат меди   The carboxylate of copper	3	6	20	23	32
Карбоксилат кобальта   The carboxylate of cobalt	15	29	42	48	51

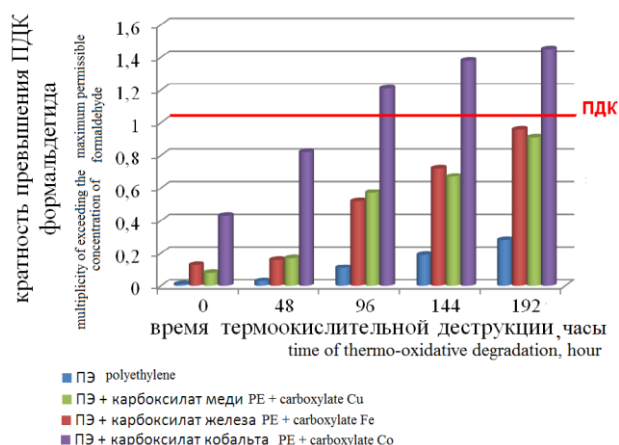


Рисунок 4. Кратность превышения ПДК формальдегида в воздушной вытяжке модифицированного ПЭ в динамике термодеструкции

Figure 4. The multiplicity of excess of maximum permissible concentration of formaldehyde in air extract of polyethylene with Pro-oxidants in the dynamics of thermal aging

Кратность превышения предельно-допустимой концентрации (ПДК) формальдегида в воздушной вытяжке модифицированного ПЭ в зависимости от природы прооксиданта и времени термоокислительной деструкции визуализирована в виде диаграммы на рисунке 4,

**ЛИТЕРАТУРА**

1 Nikolic M., Gauthier E., George K., Cash G. et al. Antagonism between transition metal pro-oxidants in polyethylene films // Polymer Degradation and Stability. 2012. V. 97. № 7. P. 1178–1188.  
 2 Корчагин В.И., Протасов А.В., Мельнова М.С., Жан С.Л. и др. Морфология импортных добавок, используемых при получении оксобиоразлагаемых полиолефинов // Вестник ВГУИТ. 2017. № 1. С. 227–231. doi:10.20914/2310-1202-2017-1-227-231  
 3 Fontanella S., Bonhomme S., Koutny M., Husarov L. et al. Comparison of the biodegradability of various polyethylene films containing pro-oxidant additives // Polymer Degradation and Stability. 2010. V. 95. № 6. P. 1011–1021.  
 4 Reddy M. Oxo-biodegradation of Polyethylene. 2008. 183 p.

из которой видно, что ПДК формальдегида в воздушной вытяжке ПЭ с карбоксилатом кобальта превышена в 1,2 раза при термическом старении более 96 ч и в 1,5 раза – при термическом старении более 192 ч.

**Заключение**

За 192 ч термического старения подтверждено соответствие ГОСТ 33747–2016 оксоразлагаемого ПЭ, модифицированного прооксидантом на основе кобальта.

Снижение вязкости при деструкции ПЭ с прооксидантами после 96 ч ускоренного старения коррелируется с показателями относительного удлинения при разрыве.

Выделение формальдегида из ПЭ с карбоксилатом кобальта при термодеструкции более 96 ч превышает ПДК.

На основании полученных данных могут быть даны рекомендации по условиям хранения оксидразлагаемых полиэтиленовых пленок, а именно: хранение в герметичной упаковке без доступа кислорода воздуха и света при температуре не более 20 °С, запрет на хранение в местах возможного повышения температуры окружающей среды до температуры начала деструкции (50 °С), например, вблизи отопительных приборов, в салоне автомобиля в летнее время и т. д.

5 Mantiaa F.P., Morrealeb M., Bottaa L., Mistrettaa M.C. et al. Degradation of polymer blends: A brief review // Polymer Degradation and Stability. 2017. V. 145. P. 79–92.  
 6 Ammalaa A., Batemana S., Deana K., Petinakisa E. et al. An over view of degradable and biodegradable polyolefins: Biodegradation of polyethylenefilms with prooxidant additives // Progress in Polymer Science. 2011. V. 36. P. 1015–1049.  
 7 Кучменко Т.А., Корчагин В.И., Дроздова Е.В., Ерофеева Н.В. и др. Оценка степени деструкции пленок из оксобиоразлагаемого полиэтилена под действием УФ-излучения по информации «электронного носа» // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2017. Т. 58. № 5. С. 240–249.

8 Andradý A.L., Pegram J.E., Nakatsuka S. Studies on enhanced degradable plastics: 1. The geographic variability in outdoor lifetimes of enhanced photodegradable polyethylenes // Journal of Polymers and the Environment. 1993. V. 1. № 1. P. 31–43.

9 Корчагин В.И., Протасов А.В., Студеникина Л.Н., Жан С.Л. и др. Прогнозирование параметров переработки вторичного полиэтилена с карбоксилатами железа при получении добавок прооксидантов // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 1. С. 232–236. doi:10.20914/2310–1202–2017–1–232–236.

10 Карасёва С.Я., Саркисова В.С., Дружинина Ю.А. Химические реакции полимеров: учеб. пособие. Самара: СГТУ, 2012. 125 с.

#### REFERENCES

1 Nikolic M., Gauthier E., George K., Cash G. et al. Antagonism between transition metal pro-oxidants in polyethylene films. Polymer Degradation and Stability. 2012. vol. 97. no. 7. pp. 1178–1188.

2 Korchagin V.I., Protasov A.V., Mel'nova M.S., Zhan S.L. et al. The morphology of imported additives used in the preparation of oxobiodegradable polyolefins. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2017. no. 1. pp. 227–231. doi:10.20914/2310-1202-2017-1-227-231 (in Russian)

3 Fontanella S., Bonhomme S., Koutny M., Husarov L. et al. Comparison of the biodegradability of various polyethylene films containing pro-oxidant additives. Polymer Degradation and Stability. 2010. vol. 95. no. 6. pp. 1011–1021.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Артем В. Протасов** к.т.н., доцент, кафедра промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, pav-vgta86@mail.ru

**Любовь Н. Студеникина** к.т.н., доцент, кафедра промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, lubov-churkina@yandex.ru

**Владимир И. Корчагин** д.т.н., зав. кафедрой, кафедра промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kvi-vgta@rambler.ru

**Наталья Г. Ахметова** магистрант, кафедра промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, notik1477@mail.ru

**Юлия А. Реброва** магистрант, кафедра промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, iurebrowa@yandex.ru

#### КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 01.03.2018

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 02.04.2018

4 Reddy M. Oxo-biodegradation of Polyethylene. 2008. 183 p.

5 Mantiaa F.P., Morrealeb M., Bottaa L., Mistrettaa M.C. et al. Degradation of polymer blends: A brief review. Polymer Degradation and Stability. 2017. vol. 145. pp. 79–92.

6 Ammalaa A., Batemana S., Deana K., Petinakisa E. et al. An over view of degradable and biodegradable polyolefins: Biodegradation of polyethylene films with prooxidant additives. Progress in Polymer Science. 2011. vol. 36. pp. 1015–1049.

7 Kuchmenko T.A., Korchagin V.I., Drozdova E.V., Erofeeva N.V. et al. Evaluation of the degree of destruction of films of oxo-biodegradable polyethylene under the action of UV radiation according to the information of the «electronic nose». Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2: Himiya [Bulletin of Moscow University. Series 2: Chemistry.]. 2017. vol. 58. no. 5. pp. 240–249. (in Russian)

8 Andradý A.L., Pegram J.E., Nakatsuka S. Studies on enhanced degradable plastics: 1. The geographic variability in outdoor lifetimes of enhanced photodegradable polyethylenes. Journal of Polymers and the Environment. 1993. vol. 1. no. 1. pp. 31–43.

9 Korchagin V.I., Protasov A.V., Studenikina L.N., Zhan S.L. et al. Prediction of processing parameters of recycled polyethylene with iron carboxylates upon receipt of prooxidant additives. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2017. vol. 79. no. 1. pp. 232–236. doi:10.20914/2310–1202–2017–1–232–236 (in Russian)

10 Karasyova S.Ya., Sarkisova V.S., Druzhinina Yu.A. Himicheskie reakci polimerov [Chemical reactions of polymers]. Samara, SSTU. 2012. 125 p. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Artem V. Protasov** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, industrial ecology, chemical and petrochemical production equipment department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, pav-vgta86@mail.ru

**Lubov N. Studenikina** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, industrial ecology, chemical and petrochemical production equipment department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, lubov-churkina@yandex.ru

**Vladimir I. Korchagin** Dr. Sci. (Chem.), head of department, industrial ecology, chemical and petrochemical production equipment department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kvi-vgta@rambler.ru

**Natalia G. Akhmetova** master student, industrial ecology, chemical and petrochemical production equipment department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, notik1477@mail.ru

**Yulia A. Rebrova** master student, industrial ecology, chemical and petrochemical production equipment department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, iurebrowa@yandex.ru

#### CONTRIBUTION

all authors equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

#### CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 3.1.2018

ACCEPTED 4.2.2018