

EDN: ABHLGL
УДК 678:621.798.01

METHOD FOR ASSESSING THE SUITABILITY OF PACKAGING POLYMERIC MATERIALS FOR MULTIPLE RECYCLING IN A CLOSED LOOP ECONOMY

**Tatiana I. Chalykh^{*}, Irina A. Kirsh, Marina I. Gubanova,
Olga V. Beznaeva, Sergey A. Ovsyannikov**

Russian Biotechnological University, Moscow, Russian Federation

Received 18.12.2024, approved after reviewing 28.12.2024, accepted 13.01.2025

Abstract. Trade enterprises, production and consumers leave a significant amount of packaging waste that requires recycling. For this purpose, in a closed-loop economy, the state sets certain requirements that are related, among other things, to the frequency of recycling, which is determined by the nature of the materials. For polymers, namely polyolefins, it has become established that they cannot be recycled more than 2–3 times due to a significant loss of technological and operational properties. The paper presents the results of experimental studies of multiple extrusion processing of polyethylene and polypropylene over 10 consecutive cycles. Each processing cycle was accompanied by measurements of physical and mechanical properties (elongation at break and tensile strength), measurements of melt flow index, changes in chemical structure and yellowness index (YI) for the original and processed polymers. It is proposed to evaluate the suitability of materials for multiple processing not by individual indicators, but by a set of properties that ultimately determine both the technological properties and the ability to be processed, as well as the operational properties and resistance to aging. For this purpose, we proposed to combine six individual indicators, which were taken as a unit for the initial samples, and the total value, which we called the criterion of technological aging, was determined as the area of the composed hexagon. In this case, the area of the hexagon of the original sample was taken as 1, or 100%, and the area of the resulting hexagon after each processing cycle was determined by the ratio to the original value. As is customary in polymer research practice, the criterion of suitability was considered to be deviations in the total value, which did not exceed $\pm 20\%$. This allowed us to determine the number of polyethylene processing cycles as 9, and polypropylene as 8 cycles, which exceeds the established standard values.

Keywords: polymers, packaging, modeling of multiple processing, complex aging index, recycling.

Citation: Chalykh, T. I., Kirsh, I. A., Gubanova, M. I., Beznaeva, O. V., Ovsyannikov, S. A. (2025). Method for assessing the suitability of packaging polymeric materials for multiple recycling in a closed loop economy. In: Trade, service, food industry. Vol. 5(1). Pp. 104–117. EDN: ABHLGL



**МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ПРИГОДНОСТИ УПАКОВОЧНЫХ
ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ К МНОГОКРАТНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ
В ЭКОНОМИКЕ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА**

**Татьяна Ивановна Чалых^{*}, Ирина Анатольевна Кириш,
Марина Ивановна Губанова, Ольга Владимировна Безнаева,
Сергей Алексеевич Овсянников**

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ),
Москва, Российская Федерация

© Siberian Federal University. All rights reserved
^{*}Corresponding author E-mail address: tichalykh310@mail.ru

Аннотация. Предприятия торговли, перерабатывающие предприятия и рядовые потребители оставляют значительное количество отходов упаковки, которая требует переработки. Для этого в экономике замкнутого цикла государство устанавливает определенные требования, связанные, среди прочего, с кратностью повторной переработки, которая определяется природой материалов. О полимерах, а именно полиолефинах, установилось мнение, что их невозможно перерабатывать более 2–3 раз вследствие значительной потери технологических и эксплуатационных свойств. В работе приведены результаты экспериментальных исследований многократной экструзионной переработки полиэтилена и полипропилена в течение 10 последовательных циклов. Каждый цикл переработки сопровождался измерением физико-механических свойств (относительное удлинение при разрыве и разрушающее напряжение), измерением показателя текучести расплава, изменением химической структуры и показателя желтизны для исходных и переработанных полимеров. Предложено оценивать пригодность материалов к многократной переработке не по отдельным единичным показателям, а по совокупности свойств, которые в итоге определяют как технологические свойства и способность к переработке, так и эксплуатационные свойства, и устойчивость к старению. Нами рассмотрены шесть единичных показателей (для исходных образцов их принимали за единицу), и совокупное свойство – критерий технологического старения (площадь составленного многоугольника). При этом площадь многоугольника исходного образца принимали за 1, или 100%, а площадь получаемого многоугольника после каждого цикла переработки находили отношением к исходному значению. Как это принято в практике полимерных исследований, критерием пригодности считали отклонения в суммарной величине, не превышавшие $\pm 20\%$. Это позволило определить количество циклов переработки полиэтилена как 9, а полипропилена как 8, что превышает установленные нормативные значения.

Ключевые слова: полимеры, упаковка, моделирование многократной переработки, комплексный показатель старения, рециклинг.

Цитирование: Чалых, Т. И. Методология оценки пригодности упаковочных полимерных материалов к многократной переработке в экономике замкнутого цикла / Т. И. Чалых, И. А. Кириш, М. И. Губанова, О. В. Безнаева, С. А. Овсянников // Торговля, сервис, индустрия питания. – 2025. – № 5(1). – С. 104–117. – EDN: ABHLGL



Введение / Introduction. Экономика замкнутого цикла на современном этапе предполагает использование вторичных материалов и их возврат в технологию как полноценного сырья. Федеральный проект «Экономика замкнутого цикла» направлен на решение проблемы возвращения отходов производства и потребления товаров для воспроизводства других товаров и одновременного решения экологических проблем. К 2030 г. планируется обеспечить стопроцентную сортировку твердых коммунальных отходов (ТКО), сокращение захоронения отходов на 50%, а также переработку 25% других видов отходов производства и потребления [1].

Известно, что применение вторичных полимеров ограничивают процессы старения, которые происходят в них. При переработке и эксплуатации полимер и полимерный материал (пластик) подвергаются действию различных факторов – кислорода, тепла, механических нагрузок, света, влаги, агрессивных растворителей. Это создает условия для инициирования и развития в полимере различных химических реакций; как правило, это реакции деструкции и реакция сшивания макромолекул [2, 3].

Старение полимеров – это совокупность химических и физических превращений, происходящих в полимере при переработке, эксплуатации или хранении и приводящих к потере им частично или полностью комплекса основных полезных свойств. В работах [2, 4] предложены схемы рециклинга для основных полимеров, используемых при производстве упаковки. Чаще всего это механический рециклинг. Для отходов низкого уровня качества (из источника ТКО) возможно применение химического рециклинга, когда продукты термоллиза могут быть использованы для синтеза новых полимеров [2–5].

Традиционно считается, что полиолефины нельзя перерабатывать многократно, поскольку процессы сшивки преобладают в общем процессе старения и полимеры трудно переработать повторно. Необходимость присвоения повышенного коэффициента при расчете величины ежегодного экологического сбора с предприятий – переработчиков полимеров [1, 6] для полиолефинов связана с количеством возможных циклов переработки: чем меньше циклов – тем выше значение коэффициента.

Поскольку старение – сложный и многофакторный процесс, необходимо найти методологический подход для объединения этих факторов в единый комплексный показатель, на основании которого можно оценить максимальное количество циклов переработки. Необходимо также из совокупности свойств составить перечень основных единичных показателей качества (свойств), которые определяют технологические и эксплуатационные характеристики полимеров.

Цель исследования – найти критерий установления допустимого количества циклов вторичной переработки полимеров без существенной потери их свойств. Это необходимо для подтверждения перерабатываемости вторичного полимерного сырья, сопоставимой с перерабатываемостью первичного материала.

Для выполнения указанной цели были поставлены следующие задачи.

1. Оптимизация перечня единичных показателей качества (свойств), которые определяют технологические и эксплуатационные свойства полимеров.

2. Исследование физико-химических, реологических, термохимических и физико-механических свойств полимерных материалов после каждого цикла переработки методом экструзии.

3. Определение изменения средней молекулярной массы полимерных материалов, индекса желтизны, изменения химической природы функциональных групп полимера, происходящих в процессе термоокислительного воздействия, как индикаторов процесса старения после многократной экструзионной переработки.

Материалы и методы / Materials and Methods. В работе исследованы полиэтилен низкого давления (ПЭНД) и полипропилен (ПП) в виде гранул: ПЭНД (HDPE) марки HD 10530 (экструзионно-выдувной) и ПП марки PP R015 (экструзионно-выдувной). Основные технические характеристики исходных, первичных полимеров приведены в табл. 1.

Исходные гранулы перерабатывали методом экструзии при температурах по зонам экструдера: для ПЭНД 180-190-210-220 °С и для ПП 215-220-225-225 °С с использованием одношнекового экструдера для получения стренг (изготовитель ООО «Машпласт», установлен в РОСБИОТЕХ). Образец формировали в виде стренг, которые охлаждали в ванне с водой. Для моделирования вторичной переработки использовали процессы экструзия-измельчение на одношнековом экструдере, а для форсированного режима – в двухшнековом экструдере без стабилизатора (установлен в ИСПМ им. Н.С. Ениколопова РАН). Количество циклов переработки составляло 10. Температурные режимы были одинаковы для всех циклов повторной переработки полимеров.

Таблица 1. Паспортные технические характеристики исходных полиэтилена и полипропилена, приведенные изготовителем
Table 1. Technical characteristics of the original polyethylene and polypropylene, provided by the manufacturer

Марка	Показатель текучести расплава (190 °С / 2,16 кг), г/10 мин	Плотность, 20 °С, г/см ³	Предел текучести при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Ударная прочность по Изоду / с надрезом, кДж/м ²
PP R015	1,8	-	29	13	12
HD 10530	10,0	0,953	26	400	19,0

Методы исследования:

– определение показателя текучести расплава (ПТР). Для оценки реологических свойств полимерных материалов использовали метод капиллярной вискозиметрии по ГОСТ 11645-2021 (ISO 1133-1:2011) «Пластмассы. Методы определения показателя текучести расплава термопластов»;

– определение индекса желтизны (YI). Измерение желтизны гранул оценивают на дисках, которые получают из гранул. Для этого использовали прибор Спектротон 19 (Чирчикское ОКБА НПО «Химвавтоматика») по ГОСТ 15875-80. Индекс желтизны (YI) определяли в соответствии с ASTM E-313-05;

– ИК-Фурье спектроскопия. Для оценки структурных изменений в полимерах и композициях использовали метод ИК-Фурье-спектроскопии на приборе Фурье-спектрометр FTIR, обеспечивающим разрешение 1,0 см⁻¹ в диапазоне волновых чисел 400–4000 см⁻¹. Обработка ИК спектров проводилась с целью установления динамики изменения содержания кислородсодержащих групп в полимерах;

– исследование физико-механических свойств. Определение относительного удлинения при разрыве и разрушающего напряжения для исходных и переработанных полимеров проводили в соответствии с ГОСТ 14236–81 «Пленки полимерные. Методы испытания на растяжение». Испытания проводили на разрывной машине РМ–50, оснащенной компьютерным интерфейсом. Предел допускаемого значения погрешности измерения нагрузки при прямом ходе не превышал ±1% измеряемой нагрузки. Скорость деформации образца – 100 мм/мин;

– определение средней молекулярной массы. Для определения средней молекулярной массы полимеров использовали вискозиметрический метод. Эксперименты проводили для ПЭНД и ПП в *o*-ксилоле при температуре 85±2°С.

Готовые изделия после их использования проходят основные стадии вторичной переработки: измельчение и грануляцию. Полученное вторичное сырье в виде гранул формируют комплекс технологических и эксплуатационных свойств для последующей переработки в новое изделие. Моделирование переработки упаковки проводили методом многократной экструзии полимеров. Сущность метода заключается в применении нескольких циклов переработки гранул и их измельчения с изготовлением образцов для испытаний в виде гранул, стренг, лопаток и пленок. На каждом следующем цикле стренги измельчали и вновь загружали в экструдер.

Полученные результаты и их обсуждение / Results and Discussion. Каждый из исследованных полимеров ПЭНД и ПП перерабатывали на экструдере последовательно от одного до десяти раз (циклов). Первый цикл переработки первичного полимера был взят в качестве исходного значения. Переработка моделировала контролируемое старение полимеров от цикла к циклу. Внешним воздействием считали температуру,

длительность циклов, участие кислорода воздуха. Механические нагрузки в одношнековом экструдере считали щадящими, на двухшнековом экструдере – интенсивными. Защита полимеров от старения заключалась в использовании стабилизаторов, которые дополнительно вводили в полимеры. Таким образом сочетали процессы термомеханического и термоокислительного старения этих полимеров.

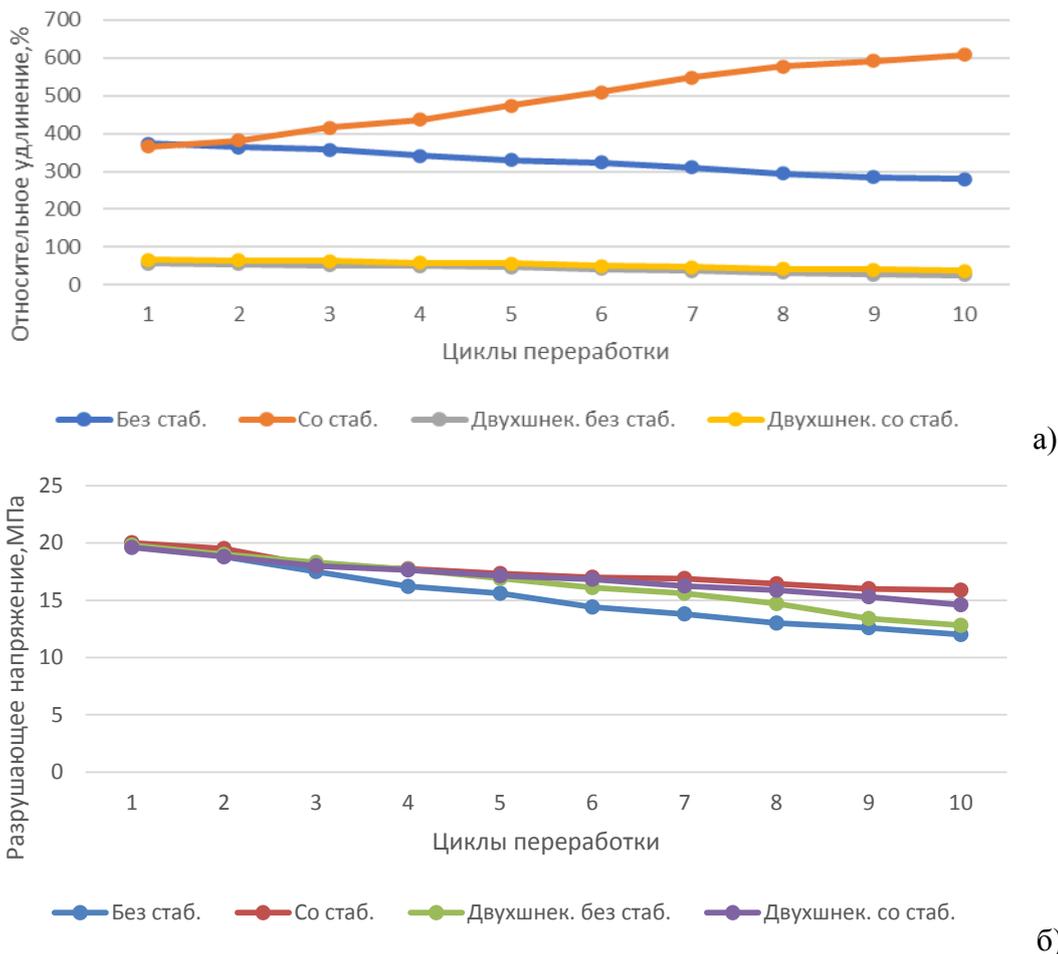


Рисунок 1. Изменение относительного удлинения а) и разрушающего напряжения б) в процессе многократной экструзионной переработки для ПЭНД 10530
 Figure 1. Elongation at break a) and tensile strength b) during multiple extrusion processing for HDPE 10530

Как следует из рис. 1б, для ПЭ низкого давления марки 10530 разрушающее напряжение образцов монотонно снижается с разной скоростью. К 10-му циклу переработки в щадящем режиме значение σ падает с 20 до 16 МПа со стабилизатором и до 13 МПа без стабилизатора. Эти значения вполне приемлемы для переработки ПЭНД. Для этих же образцов относительное удлинение падает с 366 до 280% для образца без стабилизатора и даже растет до 600% для стабилизированного образца (рис. 1а).

Многократная переработка приводит к незначительному изменению температуры плавления на 1–3% у всех образцов ПЭНД, что находится в рамках доверительного интервала (табл. 2). Установлено, что десятикратный повторный процесс переработки ПЭНД приводит к снижению температуры плавления в пределах 5 градусов и небольшому снижению энтальпии плавления, характеризующей степень кристалличности, не более чем на 5% (по данным ДСК).

Таблица 2. Температуры плавления (°C) ПЭНД 10530
в процессе многократной переработки
Table 2. Melting points (°C) of HDPE 10530 during multiple processing

Тип экструдера/ наличие стабилизатора	Цикл переработки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Одношнековый / без стаб.	144,0	143,6	143,5	143,3	143,0	142,7	142,4	142,2	142,1	142,0
Одношнековый / со стаб.	144,5	144,0	143,9	143,9	143,8	143,6	143,3	143,2	143,0	142,9
Двухшнековый / без стаб.	144,0	143,2	143,0	142,8	142,6	142,3	142,0	141,5	141,3	141,0
Двухшнековый / со стаб.	144,0	144,0	143,8	143,72	143,64	142,42	143,36	143,2	143,12	143,0

У образцов ПЭНД 10530 показатель текучести расплава (ПТР) незначительно снижается при переработке на одношнековом экструдере, при этом для двухшнекового экструдера изменение ПТР происходит с 0,02 до 0,06 г/10мин. при нагрузке 2,16 кг, что находится в области интервала области переработки для данной марки полимера (рис. 2). Исследования ПТР при нагрузке 21,6 кг демонстрируют малое изменение значений, которые находятся в области доверительного интервала.

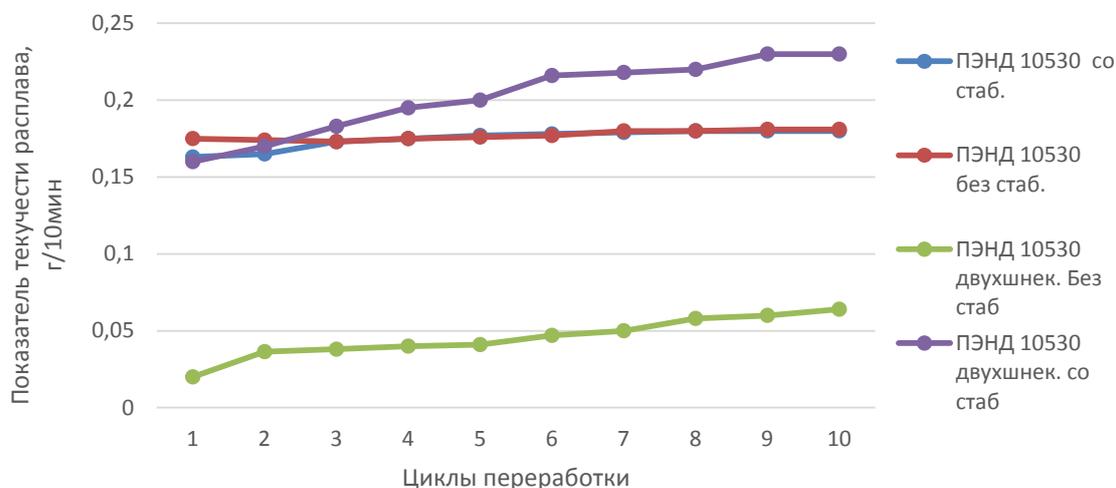


Рисунок 2. Изменение ПТР образцов в процессе многократной экструзионной переработки ПЭНД 10530, нагрузка 2,16 кг

Figure 2. Melt flow index (MFI) of samples during multiple extrusion processing of HDPE 10530, load 2.16 kg

При исследовании образцов методом ИК-спектроскопии установлено, что в большинстве случаев с увеличением кратности переработки наблюдается увеличение кислородсодержащих групп (табл. 3), что согласуется с результатами работ [7, 8], а введение стабилизатора в полимер приводит к уменьшению этого показателя.

Таблица 3. Индексы содержания кислородосодержащих групп ПЭНД 10530 в процессе многократной переработки

Table 3. Indexes of the content of oxygen-containing groups of HDPE 10530 in the process of multiple extrusion

Тип экструдера/ наличие стабилизатора	Цикл переработки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Одношнековый / без стаб.	0,011	0,015	0,0185	0,019	0,023	0,027	0,03	0,033	0,035	0,0365
Одношнековый / со стаб.	0,048	0,0542	0,055	0,0567	0,0573	0,059	0,0604	0,061	0,062	0,062
Двухшнековый / без стаб.	0,056	0,06	0,067	0,071	0,073	0,076	0,078	0,08	0,081	0,082
Двухшнековый / со стаб.	0,023	0,0243	0,0267	0,028	0,03	0,0338	0,037	0,038	0,04	0,047

Полный цикл исследований был проведен для второго полимера – полипропилена. Результаты табл. 4 получены исходя из результатов исследования эксплуатационных свойств, демонстрирующих степень деструкции и технологических свойств образцов ПП после каждого цикла переработки.

Таблица 4. Изменение свойств ПП после 10 циклов переработки «измельчение-экструзия»

Table 4. PP properties after 10 grinding-extrusion processing cycles

Марка ПП	Наличие стабилизатора	Количество шнеков в экструдере	Процент изменения свойств полимера после 10 циклов переработки «измельчение-экструзия»			
			σ_p	ϵ_p	ММ	$T_{пл}$
R015	нет	1	-22,2	-6,0	-2,6	-1,8
	да	1	-10,1	-5,3	-1,1	-0,6
	нет	2	-67,0	-55,3	-8,4	-1,9
	да	2	-30,2	-44,0	-4,2	-1,2

Из приведенных данных следует, что в целом более значительные изменения наблюдаются для более интенсивной переработки в двухшнековом экструдере, без стабилизатора.

Внешний вид образцов исследованных полимеров от цикла к циклу изменяется незначительно: наблюдалось небольшое пожелтение образцов, которые получали в виде стренг, как это показано на рис. 3.

Можно отметить, что ПТР образцов ПП R015, полученных на двухшнековом экструдере без стабилизатора, увеличивается после 10 циклов переработки с 2,2 до 5,7 г/10мин., что находится в интервале области переработки ПП данных марок. Если многократную переработку ПП проводили со стабилизатором, то за 10 циклов по схеме «измельчение-экструзия» ПТР остается в области значения первого цикла переработки (рис. 4).

Проведенный комплекс исследований показал, что все свойства изменяются в процессе многократной переработки по-разному, с разной скоростью, и на основании единичных свойств трудно сделать однозначное заключение о количестве циклов, которые они могут выдержать, тем более что критерий не установлен.

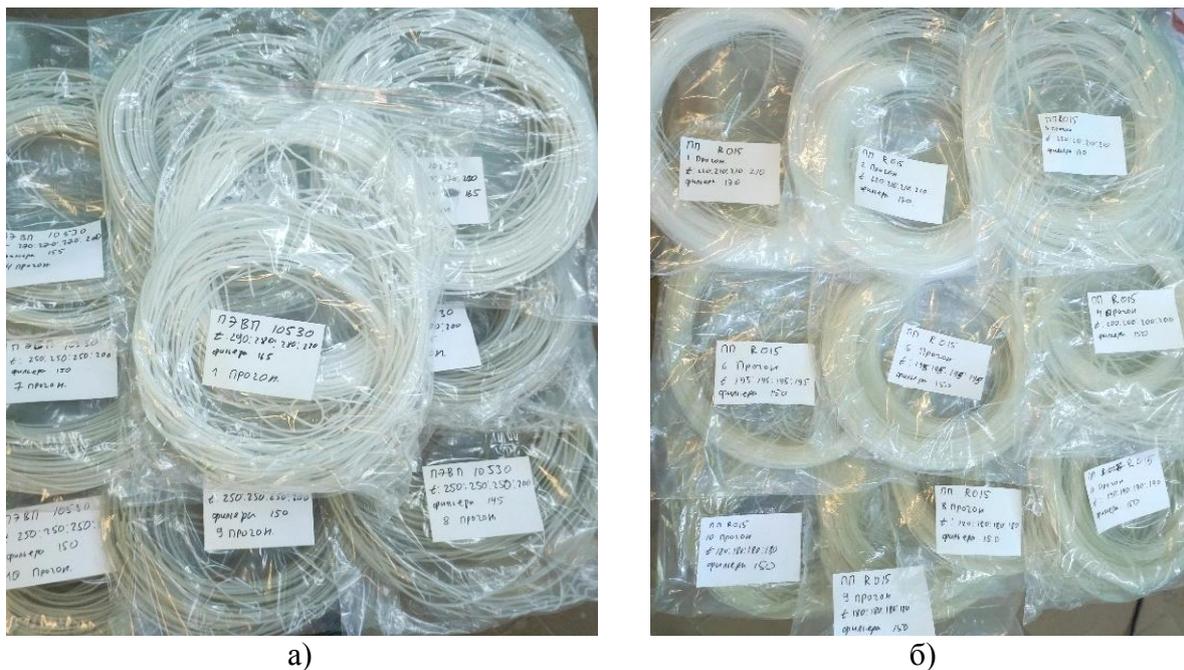


Рисунок 3. Изменение цвета образцов в процессе многократной экструзионной переработки

Figure 3. Color of samples during multiple extrusion process

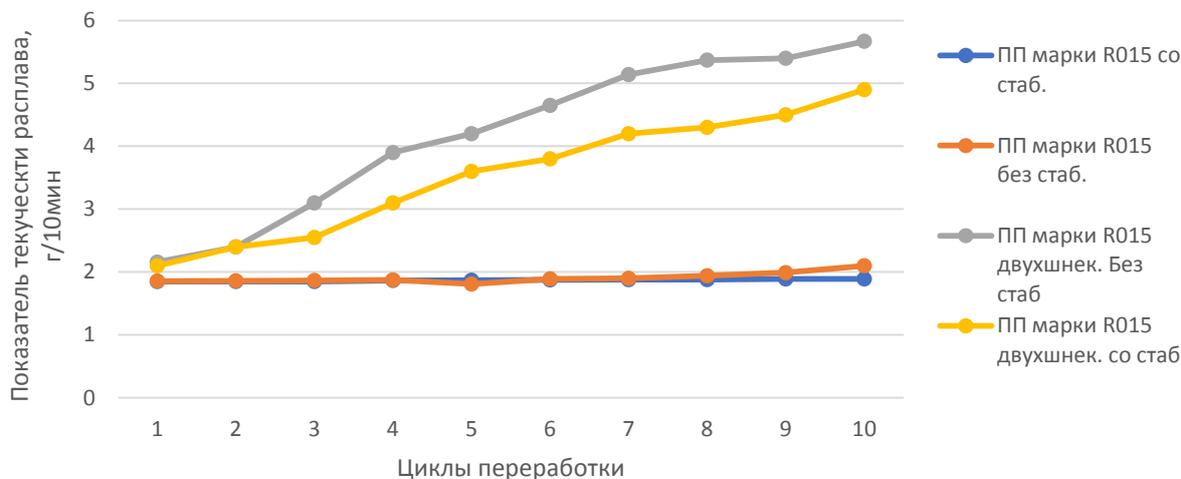


Рисунок 4. Зависимость ПТР от количества циклов переработки ПП марки R015

Figure 4. Dependence of the MFR on the number of processing cycles of PP R015

Обоснование выбранного методологического подхода. Полимеры, используемые для производства упаковки, обладают комплексом технологических свойств, которые определяют возможность их использования для разных технологий производства изделий (литье под давлением, экструзия пленок, профилей и т.п.), а также комплексом эксплуатационных характеристик, которые определяют их пригодность для использования по назначению в течение гарантийного срока и/или срока эксплуатации.

Полимеры и пластмассы (пластики) обладают большим ресурсом эксплуатации за счет специально введенных стабилизаторов, которые защищают полимеры и изделия от старения под действием тепла, света, кислорода воздуха, влаги, химических реагентов.

В мировой науке и практике изменение свойств полимеров в процессе термоокислительного, термомеханохимического старения оценивают по изменению величин: показателя текучести расплава, напряжения при разрушении σ_p , удлинения при разрыве ϵ_p , плотности ρ , ударной вязкости, изменению цвета (индекс желтизны YI), химическим изменениям с макромолекулами полимера по ИК-спектрам, изменениям структуры по $T_{пл}$, степени кристалличности и др.

Данная методика является типовой для оценки свойств полимерных материалов и исследований циклов их переработки, что широко описано в научных работах, опубликованных в журналах *Polymers* (2024); *Recycling* (2022); *Пластические массы* (2016; 2022) [9–12].

Поскольку свойства полимера в процессе технологического старения за 10 циклов последовательно проводимой экструзионной переработки при одновременном действии нескольких факторов (тепло, механические нагрузки, кислород воздуха) изменяются комплексно, мы предлагаем оценивать изменение технологических и эксплуатационных свойств комплексным критерием технологического старения (ККТС), или КС.

Экспертным методом (10 специалистов в области переработки и эксплуатации полимеров с опытом работы не менее 15 лет) было установлено, что для комплексного критерия необходимо и достаточно использовать шесть основных свойств: молекулярную массу (ММ), разрушающее напряжение (σ), относительное удлинение при разрыве (ϵ), индекс содержания кислородсодержащих групп (ИКГ), индекс желтизны (ИЖ), показатель текучести расплава (ПТР).

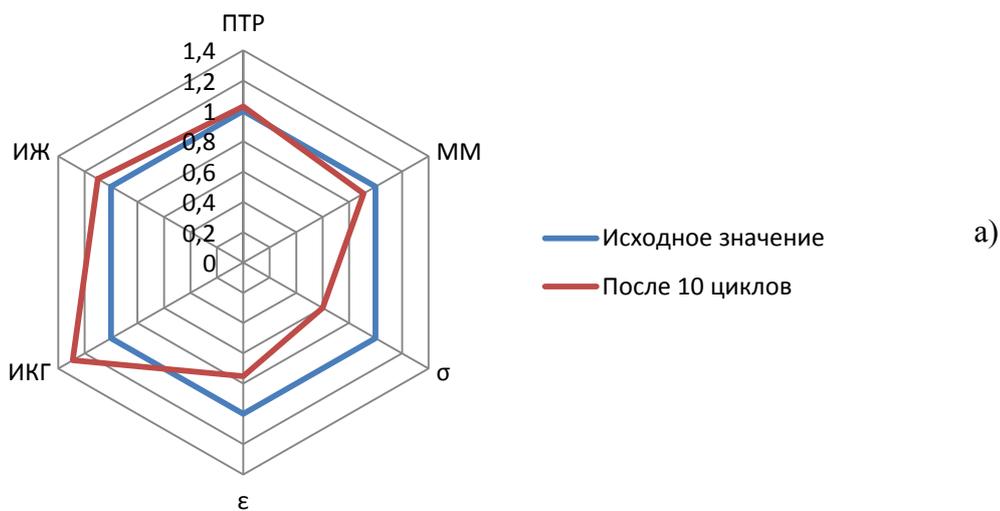
Пригодность к многократной переработке оценивается суммой этих шести показателей с учетом их одинаковой весомости. Каждый показатель переводится в безразмерную величину и оценивается как единица, поэтому максимально возможное значение комплексного показателя определяется как площадь этого шестиугольника. За базу сравнения принимается начальный показатель измеряемого свойства до переработки. Тогда первоначальная площадь шестиугольника принимается за единицу или 100%. Откладывая на соответствующих осях значения свойств после 10 циклов можно видеть все изменения. Считаем, что площадь многоугольника 2 не должна изменяться более, чем на 20% от исходной площади, что обеспечивает сохранение технологических и эксплуатационных свойств. Критерий 20% традиционно принимается в химии полимеров на основе анализа данных по старению, приведенных в работах В. Е. Гуля, Г. Е. Заикова, F. P. La Mantia, M. V. Neiman [13–16].

На рис. 5 приведены графические данные по определению комплексного критерия технологического старения для ПЭ. Масштаб рисунков отличается потому, что значения некоторых показателей существенно больше базового. Расчет площади многоугольника проводили с учетом масштаба. Контрольная проверка значений выполнена весовым методом.

Расчет значений, приведенных на рис. 5, показал, что КС для переработки со стабилизатором составил 5%, а без стабилизатора – 28%.

Такие расчеты были проведены для полиэтилена и полипропилена выбранных марок. Как показали результаты, полимеры проявили свои возможности в многократной переработке по-разному.

ПЭНД 10530, одношнековый, со стабилизатором



ПЭНД 10530, одношнековый, без стабилизатора

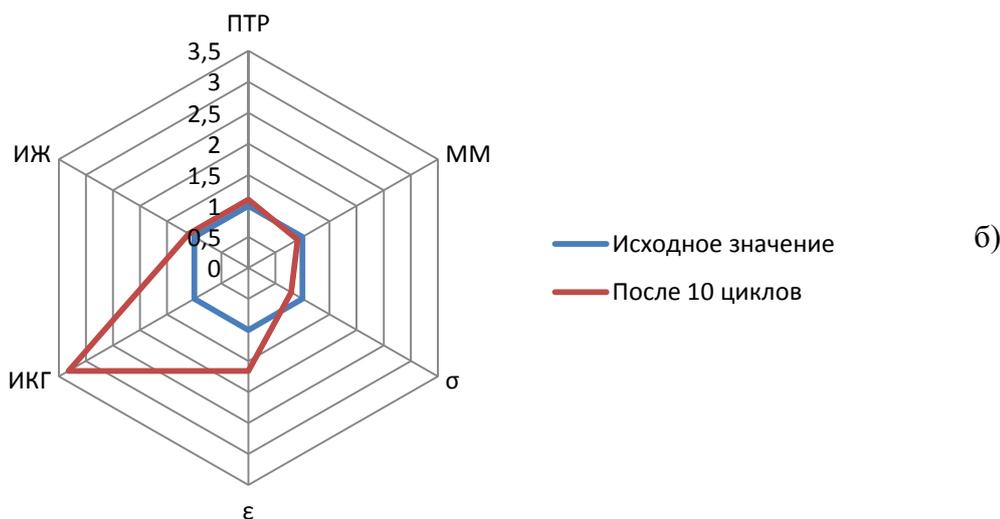


Рисунок 5. Изменение комплексного критерия технологического старения (КС) для ПЭ марки 10530 после 10 циклов переработки со стабилизатором а) и без стабилизатора б)
Figure 5. Complex criterion of technological aging (КС) for PE 10530 after 10 processing cycles with stabilizer a) and without stabilizer b)

На рис. 6 даны обобщенные результаты расчета для полипропилена марки R15 по 8-му и 10-му циклам в сравнении с базовым значением КС.

На основании этого исследования были выбраны значения числа циклов переработки, которые обеспечивают возможность использования полимеров данных марок к многократной переработке: КС после 10 циклов составил 42%, после 8 – 19,6%. Следовательно, переработка полипропилена может составить 8 циклов. Для полиэтилена КС составляет после 10 циклов 30%, после 9 – 19%.

ПП R015, двухшнековый, без стабилизатора

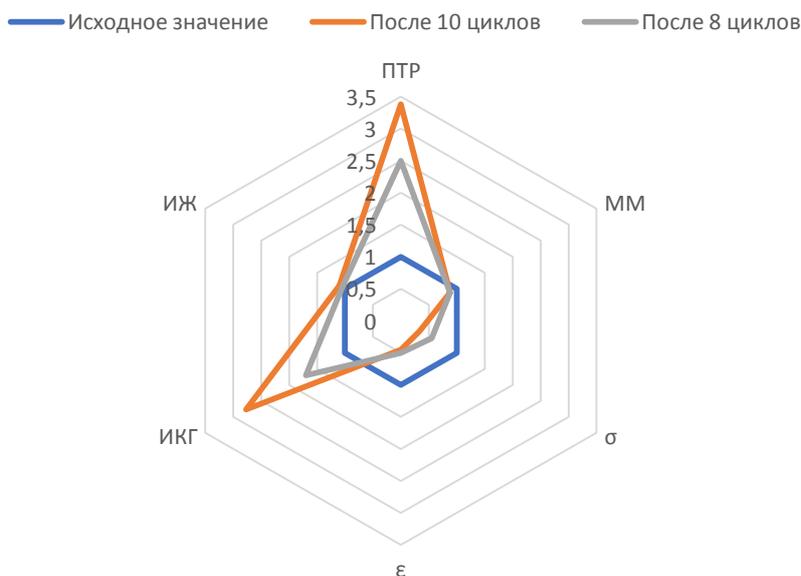


Рисунок 6. Изменение комплексного критерия технологического старения (КС) для ПП в зависимости от количества циклов переработки
 Figure 6. Complex criterion of technological aging (KC) for PP depending of processing cycles

Выводы и дискуссионные вопросы / Conclusions. Проведенные исследования позволили разработать и использовать методологический подход для оценки комплексного критерия технологического старения полиолефинов – полиэтилена марки 10530 и полипропилена марки R015, который заключается в выборе необходимого и достаточного количества показателей: технологических (показатель текучести расплава, молекулярная масса и индекс содержания кислородсодержащих групп) и эксплуатационных (разрушающее напряжение, относительное удлинение при разрыве, индекс желтизны) свойств. Отличие величин базового комплексного показателя технологического старения $KC_{\text{баз.}}$ и исследуемого $KC_{\text{ис.}}$ не должны составлять более, чем $\pm 20\%$. Это обеспечивает сохранение основных показателей качества полимера в пределах свойств исходного первичного полимера.

Выполнен комплекс исследований физико-химических, реологических и физико-механических свойств полимеров, которые позволили определить комплексный критерий технологического старения для полиолефинов – полиэтилена и полипропилена в широком диапазоне изменения внешних воздействий, оцениваемых как термомехано-окислительное воздействие на образцы полимеров в процессе последовательных 10 циклов экструзионной переработки.

Показано, что исследованные полиолефины могут гарантированно выдержать не менее 7–8 циклов последовательной экструзионной переработки, что позволяет использовать их как ценное сырье в экономике замкнутого цикла. Это заключение дает основания пересмотреть присвоение коэффициента возможных циклов переработки отходов от использования полиолефинов в формуле Методики расчета базовой ставки экологического сбора в дальнейшем [1].

Библиографический список

1. Об утверждении методики расчета базовой ставки экологического сбора и применения коэффициента, учитывающего сложность извлечения отходов от

использования товаров для дальнейшей утилизации, наличие технологической возможности их утилизации с учетом изменения физических, химических и механических свойств материалов при многократном использовании (с учетом возможных циклов переработки отходов от использования товаров), востребованность вторичного сырья, полученного из таких отходов, для использования при производстве товаров (продукции): Постановление Правительства Российской Федерации от 29.12.2023 № 2392 [Электронный ресурс]. – URL: <http://government.ru/docs/all/151519/> (дата обращения: 02.12.2024).

2. Fredi, G. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research [Text] / G. Fredi, A. Dorigato. – 2021. – № 4. – Pp. 159–177.

3. Попов, А. А. Окисление ориентированных и напряженных полимеров [Текст] / А. А. Попов, Н. Я. Рапопорт, Г. Е. Заиков. – Москва : Химия, 1987. – 232 с.

4. Chanda, M. Chemical aspects of polymer recycling [Text] / M. Chanda // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. – 2021. – № 4. – С. 133–150.

5. Lamberti, F. M. Recycling of bioplastics: routes and benefits [Text] / F. M. Lamberti, L. A. Roman-Ramirez, J. Wood // Journal of Polymers and the Environment. – 2020. – № 28(10). – 2551–2571.

6. О порядке взимания экологического сбора: Постановление Правительства Российской Федерации от 08.10.2015. № 1073 (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. – URL: <http://government.ru/docs/all/103702/> (дата обращения: 02.12.2024).

7. Перспективы повторной переработки отходов одноразовой упаковки [Текст] / И. А. Кириш, С. А. Овсянников, О. В. Безнаева [и др.] // Health, Food & Biotechnology. – 2022. – Т. 4, № 2. – С. 31–47.

8. Изучение свойств полиолефиновых композиций при воздействии ультразвука на их расплавы [Текст] / И. А. Кириш, Д. А. Помогова, А. Е. Чалых [и др.] // Пластические массы. – 2018. – № 5-6. – С. 5–8.

9. De las Heras, R. B. Comparative Analysis of the Effects of Incorporating Post-Industrial Recycled LLDPE and Post-Consumer PE in Films: Macrostructural and Microstructural Perspectives in the Packaging Industry [Text] / R. B. de las Heras, X. Colom, J. Cañavate // Polymers. – 2024. – No. 16. – P. 916. DOI: 10.3390/polym16070916.

10. Polymer Waste Recycling of Injection Molding Purges with Softening for Cutting with Fresnel Solar Collector – A Real Problem Linked to Sustainability and the Circular Economy [Text] / Ma. G. Plaza, M. L. M. López, J. P. Bueno [et al.] // Polymers. – 2024. – No. 16(7). – P. 1012. DOI: 10.3390/polym16071012.

11. Рагушина, М. Д. Влияние различных модификаторов на свойства вторичного полиэтилена, подходы к рециклингу пластмасс [Текст] / М. Д. Рагушина, В. В. Битт, Е. В. Калугина // Пластические массы. – 2022. – № 9-10. – С. 42–45.

12. Влияние многократной экструзии на свойства полипропилена, модифицированного органоглиной и малеинизированным полипропиленом [Текст] / М. Т. Нгуен, Н. М. Чалая, В. С. Осипчик [и др.] // Пластические массы. – 2016. – № 11-12. – С. 57–62.

13. Гуль, В. Е. Структура и механические свойства полимеров [Текст] / В. Е. Гуль, В. Н. Кулезнев. – Москва : Высшая школа, 1972. – 320 с.

14. Physico-chemical laws of surface oxidation of polypropylene and polyethylene [Text] / G. E. Zaikov, M. V. Bazunova, S. V. Kolesov [et al.] // Materials chemistry: A multidisciplinary approach to innovative methods. – Oakville, 2016. – Pp. 17–24.

15. Frontiers in the Science and Technology of Polymer Recycling [Text] / G. Akovali, C. A. Bernardo, Ja. Leidner [et al.]. – Amsterdam: Academic Publishers, 1998. – 385 p.

16. Нейман, М. Б. Старение и стабилизация полимеров [Текст] / М. Б. Нейман. – Москва : Химия, 1998. – 398 с.

References

1. On approval of the methodology for calculating the base rate of environmental collection and the application of a coefficient that takes into account the complexity of waste extraction from the use of goods for further disposal, the technological feasibility of their disposal, taking into account changes in the physical, chemical and mechanical properties of materials during repeated use (taking into account possible recycling cycles from the use of goods), the demand for secondary raw materials obtained from such waste, for use in the manufacture of goods (products): Resolution of the Government of the Russian Federation dated 29.12.2023 No. 2392 [Electronic source] URL: <http://government.ru/docs/all/151519/> (Date of access: 02.12.2024).
2. Fredi, G., Dorigato A. (2021). Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 4, 159–177.
3. Popov, A. A., Rapoport, N. Ya., Zaikov, G. E. (1987). Oxidation of oriented and stressed polymers. Moscow: Khimiya Publ., 232.
4. Chanda, M. (2021). Chemical aspects of polymer recycling. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 4, 133–150.
5. Lamberti, F. M., Roman-Ramirez, L. A., Wood, J. (2020). Recycling of bioplastics: routes and benefits. Journal of Polymers and the Environment, 28(10), 2551–2571.
6. On the procedure for collecting environmental fees: Decree of the Government of the Russian Federation dated 08.10.2015 No. 1073 (with amendments and additions). [Electronic source] URL: <http://government.ru/docs/all/103702/> (Date of access: 02.12.2024).
7. Kirsh, I. A., Ovsyannikov, S. A., Beznaeva, O. V., et al. (2022). Prospects for recycling disposable packaging waste. Health, Food & Biotechnology, Vol. 4, No. 2. 31–47.
8. Kirsh, I. A., Pomogova, D. A., Chalykh, A. E., et al. (2018). Study of the properties of polyolefin compositions when exposed to ultrasound on their melts. Plastic masses, 5-6, 5–8.
9. De las Heras, R. B., Colom, X., Cañavate, J. (2024). Comparative Analysis of the Effects of Incorporating Post-Industrial Recycled LLDPE and Post-Consumer PE in Films: Macrostructural and Microstructural Perspectives in the Packaging Industry. Polymers, 16, 916. DOI: 10.3390/polym16070916.
10. Plaza, Ma. G., Lopez, M. L. M., Bueno, J. P. et al. (2024). Polymer Waste Recycling of Injection Molding Purges with Softening for Cutting with Fresnel Solar Collector – A Real Problem Linked to Sustainability and the Circular Economy. Polymers, 16(7), 1012. DOI: 10.3390/polym16071012.
11. Ragushina, M. D., Bitt, V. V., Kalugina, E. V. (2022). The influence of various modifiers on the properties of secondary polyethylene, approaches to plastic recycling. Plastic masses, 9-10, 42–45.
12. Nguyen, M. T., Chalaya, N. M., Osipchik, V. S. et al. (2016). The effect of multiple extrusion on the properties of polypropylene modified with organoglin and maleinized polypropylene. Plastic masses, 11-12, 57–62.
13. Gul, V. E., Kuleznev, V. N. (1972). Structure and mechanical properties of polymers. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 320.
14. Zaikov, G. E., Bazunova, M. V., Kolesov, S. V. et al. (2016). Physico-chemical laws of surface oxidation of polypropylene and polyethylene. Materials chemistry: A multidisciplinary approach to innovative methods. Oakville, 17–24.

15. Akovali, G., Bernardo, C. A., Leidner, Ja., Utracki, L. A., Xanthos, M. (1998). *Frontiers in the Science and Technology of Polymer Recycling*. Amsterdam: Academic Publishers, 385.

16. Neumann, M. B. (1998). *Aging and stabilization of polymers*. Moscow: Khimiya Publ., 398.

Сведения об авторах:

Чалых Татьяна Ивановна – доктор химических наук, профессор кафедры промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет
ORCID: 0000-0003-0871-9020
e-mail: tichalykh310@mail.ru

Кириш Ирина Анатольевна – доктор химических наук, заведующий кафедрой промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет
ORCID: 0000-0003-3370-4226
e-mail: kirshia@mgupp.ru

Губанова Марина Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет
ORCID: 0000-0003-3547-716X
e-mail: gubanovami@mgupp.ru

Безнаева Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет
ORCID: 0000-0003-2906-094X
e-mail: olgazaikina@mail.ru

Овсянников Сергей Алексеевич – аспирант, Российский биотехнологический университет
ORCID: 0000-0002-9773-3555

Information about the authors:

Chalykh Tatyana Ivanovna – Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department of Industrial Design, Packaging Technology and Expertise, Russian Biotechnological University
ORCID: 0000-0003-0871-9020
e-mail: tichalykh310@mail.ru

Kirsh Irina Anatolyevna – Doctor of Chemical Sciences, Head of the Department of Industrial Design, Packaging Technology and Expertise, Russian Biotechnological University
ORCID: 0000-0003-3370-4226
e-mail: kirshia@mgupp.ru

Gubanova Marina Ivanovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Design, Packaging Technology and Expertise, Russian Biotechnological University
ORCID: 0000-0003-3547-716X
e-mail: gubanovami@mgupp.ru

Beznaeva Olga Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Design, Packaging Technology and Expertise, Russian Biotechnological University
ORCID: 0000-0003-2906-094X
e-mail: olgazaikina@mail.ru

Ovsyannikov Sergey Alekseevich – Postgraduate, Russian Biotechnological University
ORCID: 0000-0002-9773-3555