

ТЕХНОЛОГИЯ И ПЕРЕРАБОТКА СИНТЕТИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ ПОЛИМЕРОВ И КОМПОЗИТОВ/TECHNOLOGY AND PROCESSING OF SYNTHETIC AND NATURAL POLYMERS AND COMPOSITES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.26>

РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ПОЛИУРЕТАНОВ КАК ФАКТОР ЭКОНОМИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Научная статья

Радюк А.Н.^{1,*}, Буркин А.Н.², Ковальков Н.С.³, Пржевальская М.Е.⁴¹ ORCID : 0000-0002-6233-8328;² ORCID : 0000-0002-2963-6390;^{1,2} Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь^{3,4} Частное производственное унитарное предприятие «Обувное ремесло», Витебск, Беларусь

* Корреспондирующий автор (ana.r.13[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассматривается возможность использования отходов производства в качестве одного из путей решения экономических, экологических и ресурсных проблем обувной промышленности. Представлены основные предприятия-объекты переработки отходов полиуретана в Республике Беларусь и определены основные причины наличия небольшого количества таких предприятий. С целью подтверждения эффективности производства из вторичных ресурсов для предприятия выявлены критерии, позволяющие повысить объективность ее оценки. Произведен расчет технологической, экономической и экологической составляющих на примере вовлечения отходов полиуретанов в производство гранулята на его основе, обоснована социальная эффективность.

Ключевые слова: отходы, вторичный полиуретан, гранулят отходов, рециклинг, эффективность.

RATIONAL USE OF POLYURETHANE WASTE AS A FACTOR IN ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL SECURITY

Research article

Radyuk A.N.^{1,*}, Burkin A.N.², Kovalkov N.S.³, Przhevalskaya M.Y.⁴¹ ORCID : 0000-0002-6233-8328;² ORCID : 0000-0002-2963-6390;^{1,2} Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus^{3,4} Private Production Unitary Enterprise "Shoe Crafts", Vitebsk, Belarus

* Corresponding author (ana.r.13[at]mail.ru)

Abstract

The article examines the possibility of using production waste as one of the ways to solve economic, environmental and resource problems in the footwear industry. The main enterprises involved in the processing of polyurethane waste in the Republic of Belarus are presented, and the main reasons for the small number of such enterprises are identified. In order to confirm the effectiveness of production from secondary resources for the enterprise, criteria have been identified that allow for a more objective evaluation. The technological, economic and environmental components have been calculated on the example of the use of polyurethane waste in the production of granules based on it, and the social effectiveness has been substantiated.

Keywords: waste, secondary polyurethane, waste granulate, recycling, efficiency.

Введение

Полиуретаны (ПУ) представляют собой важный класс термопластичных и термореактивных полимеров, поскольку их механические, термические и химические свойства могут быть изменены путем реакции различных полиолов и полиизоцианатов. К ПУ относятся те полимеры, которые содержат значительное количество уретановых групп (–HN–COO–), независимо от того, какой может быть остальная часть молекулы [1], [2].

Из-за их разнообразного применения и коммерческого успеха каждый год производится все больше отходов полиуретана. Такие отходы включают в себя отслужившие свой срок и пост-потребительские продукты, а также отходы от производства полиуретанов. Последнее является результатом несовершенства методов производства и обработки и может составлять до 10% от произведенного полиуретана [3], [4].

Во всем мире все больше внимания уделяется переработке полиуретана из-за постоянных изменений в нормативных и экологических вопросах. Рост расходов на захоронение отходов и сокращение площади свалок заставляют рассматривать альтернативные варианты утилизации отходов ПУ [2].

Управление твердыми отходами обычно регулируется «Лестницей Лансинка», которая определяет общепринятую иерархию методов обращения с отходами и стала основой для иерархии, действующей с Директивы 2008/98/ЕС Европейского парламента и Совета от 19 ноября 2008 года. Эта иерархия устанавливает приоритетный порядок в законодательстве и политике в области отходов [3], [5].

Захоронение на свалках по-прежнему является наиболее распространенным способом переработки полиуретановых отходов, однако прекрасной альтернативой захоронению на свалках рассматривается переработка отходов [3], [6].

Самым простым и базовым способом переработки ПУ является механическая переработка, заключающаяся в преобразовании твердых отходов в хлопья, гранулы или порошок [3].

Целью данного исследования является анализ экономических и экологических факторов, определяющих целесообразность и экономическую эффективность использования отходов полиуретанов.

Методологической основой настоящего исследования является рассмотрение основных факторов, определяющих размер эффекта и последствий их изменения по цепочке «ресурсы — производство — потребление», включая технологическую, экологическую, экономическую и социальную составляющие, позволяющих расширить источники образования эффекта и повысить объективность его оценки.

Основные результаты

Рециклинг отходов в настоящее время считается самым экологически безопасным и экономически целесообразным методом утилизации отходов. В связи с этим рациональное использование вторичных природных ресурсов в нынешних экономических и экологических условиях является наиболее актуальным. Это связано с тем, что в Республике Беларусь только 8–10% полимерных отходов используются полезно, в то время как в европейских странах — до 60%, остальные размещаются на полигонах ТБО, или просто на свалках. Для промышленных предприятий это связано с обеспечением непрерывного технологического процесса необходимыми сырьевыми ресурсами. Особенно важно это для предприятий, занимающихся производством обуви [7]. Основным фактором, сдерживающим повторное использование отходов, является отсутствие необходимой инфраструктуры, а также самих предприятий — переработчиков.

Производители вторичных полимеров на рынке занимают узкоспециализированные сегменты и если и занимаются переработкой вторичных полимеров, то в большинстве случаев делают это для собственных нужд, либо готовят вторичное сырье на продажу.

Так, согласно реестру объектов по использованию, хранению, захоронению и обезвреживанию отходов (по состоянию на 1 октября 2025 г.), размещенному на официальном сайте Республиканского научно-исследовательского унитарного предприятия «Бел НИЦ «Экология» в Республике Беларусь [8] основными предприятиями-объектами переработки отходов полиуретана, являются объекты, представленные в таблице 1.

Таблица 1 - Основные предприятия-объекты переработки отходов полиуретана

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.26.1>

Код	Наименование отходов	Объект	Вариант использования
5711001	Полиуретан	2690 Участок по переработке полимерных отходов	Принимает от других
5711001	Полиуретан	ООО «Экопакплюс»	Собственник
5711011	Пенополиуретан	2690 Участок по переработке полимерных отходов	Принимает от других
5711011	Пенополиуретан	ООО «Экопакплюс»	Собственник
5711014	Эластичный пенополиуретан (поролон)	1651 Щипальная машина СШ-850; машина для гранулирования поролона "PLAMA"	Использует собственные
5711014	Эластичный пенополиуретан (поролон)	Унитарное предприятие «Радуга» ОАО «Актамир»	Собственник
5711019	Прочие отходы полиуретана, пенополиуретана	1338 Производственный участок по изготовлению вкладыша каблучного	Использует собственные
5711019	Прочие отходы полиуретана, пенополиуретана	ОАО «Лидская обувная фабрика»	Собственник

Как можно заметить, предприятий-объектов переработки отходов небольшое количество, это связано с тем, что отсутствуют необходимые технологии и оборудования и возможности у потенциальных предприятий-объектов переработки. Необходимо также отметить, что ООО «Экопакплюс» перерабатывает отходы упаковочного производства, а ОАО «Лидская обувная фабрика» — для производства вкладыша в каблучную часть подошвы.

При этом с точки зрения предприятия-объекта переработки отходов целесообразно выделить основные направления, способствующие повышению эффективности использования отходов в производстве обуви. Так, предприятие, вовлекающее отходы в производство, для повышения эффективности их использования может:

1. Производить из отходов новые материалы. Данное направление является актуальным и перспективным, так как позволяет сократить объем отходов, обеспечить экономические выгоды за счет увеличения масштабов производства при неизменном размере сырьевой базы.

2. Использовать отходы или продукцию из них для нужд предприятия или по заказу других предприятий.

3. Модифицировать полимерные композиции. Для получения материалов с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами, т.е. с необходимым комплексом показателей, или улучшения свойств материалов возможна модификация их свойств при переработке отходов производства. Таким путем получают материалы с различными свойствами в зависимости от области применения изделий. Широкие возможности модификации свойств позволяют получить разнообразный ассортимент материалов для низа обуви различного назначения [9].

Реализация данных направлений является важнейшим направлением экономии первичных ресурсов, потенциальный объем которых имеет определенные границы, а также во многом решает экологические проблемы.

Качество вторичных материалов может определяться абсолютным показателем — технологической ценностью (потребительной стоимостью) и относительным показателем — коэффициентом их технологической ценности.

Б.С. Войтешенко было предложено определять технологическую ценность вторичного сырья уровнем цен на соответствующие виды первичного сырья. В работе [10] предложена методика определения эффективности использования вторичных материалов в производстве. На основании данной методик и исходных данных на примере резидента Технопарка ЧПУП «Обувное ремесло» рассчитаны равновесные цены и эффект от переработки отходов полиуретанов в гранулят.

В настоящее время ЧПУП «Обувное ремесло» в рамках производственной программы переработки отходов планирует использовать 5 т/год отходов собственного производства и 71 т/год отходов, принимаемых от юридических лиц и индивидуальных предпринимателей. В рамках производственной программы выработки готовой продукции планируется получить 75,297 т/год гранулята отходов полиуретана. Полученный гранулят отходов полиуретана планируется использовать на предприятии для изготовления изделий традиционными методами переработки пластмасс: литье на термопластавтоматах.

В качестве исходных данных для расчета используют следующие показатели:

- количество отходов (Q) — 76 т/год;
- цена первичного полиуретана (C_n) — 10350 руб./т;
- коэффициент технологической ценности вторичного полиуретана ($K_{тц}$) — 0,7;
- расходы по сортировке и отбору из отходов вторичного полиуретана (P) — 2250 руб./т;
- минимальный уровень рентабельности переработки отходов (R) — 20%;
- транспортные расходы по доставке вторичного полиуретана до участка переработки (T) — 4500 руб./т.

Последовательность расчета и расчет определения эффективности переработки отходов полиуретанов в гранулят представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Расчет определения эффективности переработки отходов полиуретанов в гранулят

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.26.2>

Показатель	Расчет
Технологическая ценность (максимальная цена) вторичного полиуретана	$ТЦ = K_{тц} \times C_n = 0,7 \cdot 10350 = 7245 \text{ руб./т}$
Минимальная цена вторичного полиуретана	$C_{\min} = (1 + R) \cdot P = (1 + 0,2) \cdot 2250 = 2700 \text{ руб./т}$
Экономический эффект от использования отходов в качестве вторичного сырья в обувном производстве	$\mathcal{E} = ТЦ - C_{\min} - T = 7245 - 2700 - 4500 = 45 \text{ руб./т}$
Распределение экономического эффекта между участком по производству и участком по переработке	$\mathcal{E} = \mathcal{E}_п = 1/3 \mathcal{E} = 1/3 \cdot 45 = 15 \text{ руб./т}$
Ожидаемая цена вторичного полиуретана, отсортированного в результате переработки	$C = C_{\min} + 1/3 \mathcal{E} = 2700 + 15 = 2715 \text{ руб./т}$
Удельная прибыль от вовлечения вторичного полиуретана в производство, отсортированного при переработке отходов	$\Pi_y = C - P = 2715 - 2250 = 465 \text{ руб./т}$
Годовая масса прибыли от вовлечения вторичного полиуретана в производство гранулята	$\Pi = \Pi_y \times Q = 465 \cdot 76 = 35340 \text{ руб.} = 35,34 \text{ тыс. руб.}$

Как видно из расчетов, экономическая эффективность заключается в снижении себестоимости произведенной продукции благодаря использованию отходов производства и получению прибыли. Так как участок по производству и участок по переработке находятся на одном предприятии и на начальном этапе принято распределение экономического эффекта между ними как 1/3, то в долгосрочном периоде прибыль от вовлечения вторичного полиуретана в производство будет выше.

Экологическая эффективность отражает степень предотвращения негативного воздействия отходов на окружающую среду или уменьшение наносимого отходами экологического вреда.

Согласно Классификатору отходов, образующихся в Республике Беларусь [11] используемые отходы относятся к 3-ему классу опасности. Поэтому единственную экологическую опасность при переработке отходов полиуретанов в гранулят могут нести образующиеся выбросы при измельчении и экструзии отходов.

При измельчении отходов ПУ источником выделения является дробилка FB4, а загрязняющими выбросами (ЗВ) — 2902 «Твердые частицы суммарно (недифференцированная по составу пыль (аэрозоль))».

При гранулировании отходов ПУ источником выделения является экструдер шнековый ЭШ-80Н4, а загрязняющими выбросами (ЗВ) — 303 «Аммиак», 1317 «Ацетальдегид (уксусный альдегид, этаналь)» и 337 «Углерод оксид (окись углерода, угарный газ)».

Расчет выбросов производится в соответствии с ТКП 17.08-06-2007 [12] и представлен в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты расчета выбросов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.26.3>

Код ЗВ	Удельное выделение ЗВ на единицу перерабатываемого материала, г/кг	Количество материала, кг/год	Количество материала, кг/ч	Поправочный коэффициент	Мах выделение ЗВ, г/с	Мах выброс ЗВ, г/с	Валовое выделение ЗВ, т/г	Валовой выброс ЗВ, т/г
2902	1,35	76000	300	0,2	0,1125	0,023	0,1026	0,021
303	0,087	76000	150	0,9	0,0036	0,003	0,0066	0,0006
1317	0,087	76000	150	1	0,0036	0,004	0,0066	0,007
337	8,8	76000	150	1	0,3671	0,367	0,6688	0,669

По данным расчета можно отметить, что все выбросы находятся в рамках допустимых, отходы не воздействуют негативно на окружающую среду. При этом экологическая эффективность состоит также в сохранении первичных ресурсов, которые замещаются вторичными.

Социальная эффективность заключается в повышении степени удовлетворенности потенциальных потребителей относительно недорогими материалами и деталями низа обуви на основе гранулята отходов полиуретана.

Заключение

Использование отходов дает существенный экономический эффект. Это проявляется как в снижении себестоимости произведенной продукции, так и в получении прибыли. Экологическая составляющая эффекта способствует сохранению первичных ресурсов и отражает отсутствие негативного влияния отходов на окружающую среду. Технологическая составляющая определяется технологической ценностью ресурсов и является основой ценообразования любых вторичных материальных ресурсов. Социальная эффективность заключается в повышении степени удовлетворенности потребителей относительно недорогими материалами и деталями низа обуви. Таким образом, как говорилось ранее, использование отходов является не только экономически эффективным, а эффективным с позиции комплекса факторов, определяющих размер эффекта и последствий их изменения по цепочке «ресурсы — производство — потребление». При этом технологическая, экономическая и экологическая отвечают за все 3 цепочки, а социальная только за последнюю.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Szycher M. Szycher's handbook of polyurethanes / M. Szycher. — Boca Raton, FL: CRC Press, 2012. — 1144 p.
2. Zia K.M. Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review / K.M. Zia, H.N. Bhatti, A.I. Bhatti // Reactive and Functional Polymers. — 2007. — № 67(8). — P. 675–692. DOI: 10.1016/J.REACTFUNCTPOLYM.2007.05.004
3. Kemona A. Polyurethane Recycling and Disposal: Methods and Prospects / A. Kemona, M. Piotrowska // Polymers. — 2020. — № 12(8). DOI: 10.3390/polym12081752

4. Simón D. Sustainable Polyurethanes: Chemical Recycling to Get It / D. Simón, A.M. Borreguero, A. de Lucas [et al.] // *Environment, Energy and Climate Change I. The Handbook of Environmental Chemistry*. — 2014. — Vol. 32. — P. 229–260. DOI: 10.1007/698_2014_275
5. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives. Off. J. Eur. Union. — 2008. — P. 99–126. — URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098> (accessed: 05.08.2025).
6. Datta J. Recycling of polyurethanes / J. Datta, M. Włoch // *Polyurethane Polymers: Blends and Interpenetrating Polymer Networks*. — 2017. — P. 323–358.
7. Буркин А.Н. Обувные материалы из отходов пенополиуретанов / А.Н. Буркин, К.С. Матвеев, В.К. Смелков [и др.]. — Витебск: УО "ВГТУ", 2001. — 173 с.
8. Реестры объектов по использованию, хранению, захоронению и обезвреживанию отходов // Республиканское научно-исследовательское унитарное предприятие «Бел НИЦ «Экология». — 2025. — URL: <https://www.ecoinfo.by/content/90.html> (дата обращения: 03.10.2025).
9. Кочнев А.М. Модификация полимеров / А.М. Кочнев, С.С. Галибеев. — Казань: Казан. гос. технол. ун-т, 2008. — 533 с.
10. Войтешенко Б.С. Кооперативы эпохи перестройки как этап экологического предпринимательства в Республике Беларусь / Б.С. Войтешенко // *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Социально-экономические и общественные науки*. — 2021. — № 5(128). — С. 156–162.
11. Общегосударственный классификатор Республики Беларусь ОКРБ 021-2019 «Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь»: утвержденный постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 09.09.2019 № 3-Т. — Минск: Минприроды, 2019. — 206 с.
12. ТКП 17.08-06-2007(02120). Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Правила расчета выбросов при производстве и переработке изделий из пластмасс. — Взамен раздела 6.1 "Временной методики по определению выбросов вредных веществ в атмосферу предприятиями отрасли"; введ. 01.12.07. — Минск: БелНИЦ "Экология"; Минприроды Республики Беларусь, 2007. — 23 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Szycher M. Szycher's handbook of polyurethanes / M. Szycher. — Boca Raton, FL: CRC Press, 2012. — 1144 p.
2. Zia K.M. Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review / K.M. Zia, H.N. Bhatti, A.I. Bhatti // *Reactive and Functional Polymers*. — 2007. — № 67(8). — P. 675–692. DOI: 10.1016/J.REACTFUNCTPOLYM.2007.05.004
3. Kemonia A. Polyurethane Recycling and Disposal: Methods and Prospects / A. Kemonia, M. Piotrowska // *Polymers*. — 2020. — № 12(8). DOI: 10.3390/polym12081752
4. Simón D. Sustainable Polyurethanes: Chemical Recycling to Get It / D. Simón, A.M. Borreguero, A. de Lucas [et al.] // *Environment, Energy and Climate Change I. The Handbook of Environmental Chemistry*. — 2014. — Vol. 32. — P. 229–260. DOI: 10.1007/698_2014_275
5. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives. Off. J. Eur. Union. — 2008. — P. 99–126. — URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098> (accessed: 05.08.2025).
6. Datta J. Recycling of polyurethanes / J. Datta, M. Włoch // *Polyurethane Polymers: Blends and Interpenetrating Polymer Networks*. — 2017. — P. 323–358.
7. Burkin A.N. Obuvnie materiali iz otkhodov penopoliuretanov [Shoe materials from polyurethane foam waste] / A.N. Burkin, K.S. Matveev, V.K. Smelkov [et al.]. — Vitebsk: UO "VGTU", 2001. — 173 p. [in Russian]
8. Reestri obektov po ispolzovaniyu, khraneniuyu, zakhoroneniuyu i obezvrezhivaniuyu otkhodov [Registers of facilities for the use, storage, disposal and disposal of waste] // Republican Research Unitary Enterprise "Bel NIC "Ecology". — 2025. — URL: <https://www.ecoinfo.by/content/90.html> (accessed: 03.10.2025). [in Russian]
9. Kochnev A.M. Modifikaciya polimerov [Polymer modification] / A.M. Kochnev, S.S. Galibeev. — Kazan': Kazan. gos. texnol. un-t, 2008. — 533 p. [in Russian]
10. Voiteshenko B.S. Kooperativi epokhi perestroiki kak etap ekologicheskogo predprinimatelstva v Respublike Belarus [Cooperatives of the Perestroika Era as a Stage of Environmental Entrepreneurship in the Republic of Belarus] / B.S. Voiteshenko // *Izvestiya Gomelskogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skorini. Sotsialno-ekonomicheskie i obshchestvennye nauki* [News of the F. Skorina Gomel State University. Series: Socio-economic and Social Sciences]. — 2021. — № 5 (128). — P. 156–162. [in Russian]
11. Obshchegosudarstvennyj klassifikator Respubliki Belarus' OKRB 021-2019 «Klassifikator otkhodov, obrazuyushchih v Respublike Belarus'» [General State Classifier of the Republic of Belarus OKRB 021-2019 "Classifier of Waste Generated in the Republic of Belarus"] : approved by the Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus dated 09.09.2019 No. 3-T. — Minsk: Ministry of Natural Resources, 2019. — 206 p. [in Russian]
12. ТКП 17.08-06-2007(02120). Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodnopol'zovanie. Atmosfera. Vybrosoy zagryaznyayushchih veshchestv v atmosfernyj vozduh. Pravila rascheta vybrosov pri proizvodstve i pererabotke izdelij iz plastmass [TKP 17.08-06-2007(02120). Environmental Protection and Nature Management. Atmosphere. Emissions of Pollutants into the Atmospheric Air. Rules for Calculating Emissions During the Production and Processing of Plastic Products]. — Replaces Section 6.1 of the "Temporary Methodology for Determining Emissions of Harmful Substances into the

Atmosphere by Enterprises in the Industry" ; introduced 01.12.07. — Minsk: BelNITs "Ecology"; Ministry of Natural Resources of the Republic of Belarus, 2007. — 23 p. [in Russian]