

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2022, №2, Том 9 / 2022, N 2, Vol. 9 <https://t-s.today/issue-2-2022.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/06SATS222.pdf>

DOI: 10.15862/06SATS222 (<https://doi.org/10.15862/06SATS222>)

## Полимерные материалы вторичного производства в мостостроении

<sup>1</sup>Аншваев А.К., <sup>1,2</sup>Овчинников И.Г.

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Саратовский государственный  
технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия

Автор, ответственный за переписку: Овчинников Игорь Георгиевич, e-mail: [bridgesar@mail.ru](mailto:bridgesar@mail.ru)

**Аннотация.** В статье рассматривается воздействие пластиковых отходов на окружающую среду, способы их утилизации и проблемы выделения из общего числа отходов. Описывается технология их вторичной переработки, а также свойства полученных материалов, их плюсы и минусы относительно аналогов из традиционных материалов (бетон, сталь и дерево), зарубежный опыт их применения в мостостроении (строительство новых мостов, реконструкция старых мостовых сооружений). Так же в статье анализируется экономическая составляющая строительства при использовании строительных материалов из отработанного пластика и их воздействие на окружающую среду. Приводится сравнение материалов из первичных полимеров и полимерных материалов вторичного производства. Показано, как обстоят дела с утилизацией отходов пластика за рубежом и в России, какие прорабатываются системы для улучшения и оптимизации процесса утилизации.

Цель статьи указать на то, что человечеству необходимо пересмотреть свой взгляд на экологическую ситуацию в мире, в связи с загрязнением окружающей среды пластиковыми отходами и показать, что существует путь решения этой проблемы и это — вторичная переработка отработанного пластика. Такой вариант утилизации пластиковых отходов позволит очистить нашу планету от скоплений пластикового мусора (которые образуются как на суше, так и на океанских просторах, пагубно влияя на флору и фауну) и создавать конкурентоспособные, надежные строительные материалы и изделия, позволяющие ускорить процесс сооружения мостовых конструкций, облегчить и сделать экономичнее эксплуатацию мостов в будущем.

**Ключевые слова:** полимеры; мост; свая; компаунд; модуль упругости; деформация; термопласт; деградация

## Polymeric materials of secondary industry in bridge engineering

<sup>1</sup>Adil K. Anshvaev, <sup>1,2</sup>Igor G. Ovchinnikov

<sup>1</sup>Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, Russia

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

**Corresponding author:** Igor G. Ovchinnikov, e-mail: [bridgesar@mail.ru](mailto:bridgesar@mail.ru)

**Abstract.** The article discusses the impact of plastic waste on the environment, disposal methods, and the problems of isolation from the total waste amount. The technology of its recycling is described, as well as the properties of the materials obtained, pros and cons relative to analogs from traditional materials (concrete, steel, and wood), the foreign experience of its use in bridge engineering (construction of new bridges, reconstruction of old bridge structures). The article also analyzes the economic component of construction using building materials from plastic waste and its impact on the environment. A comparison is made of materials from primary polymers and secondary industry polymeric materials. It is shown how things are with plastic waste recycling abroad and in Russia, and what systems are being developed to improve and optimize the recycling process.

The purpose of the article is to point out that humanity needs to reconsider its view of the environmental situation in the world, due to environmental pollution with plastic waste, and to show that there is a way to solve this problem and it is recycling plastic waste. This option of recycling plastic waste will allow us to clean our planet from accumulations of plastic waste (which is formed both on land and in the ocean, adversely affecting flora and fauna) and create competitive, reliable building materials and products that will speed up the process of building bridge structures, facilitate and make more economical the operation of bridges in the future.

**Keywords:** polymers; bridge; pile; compound; modulus of elasticity; deformation; thermoplastic; degradation

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



## Введение

### Introduction

Современные полимерные материалы на основе различных эластомеров, волокон и пластмасс получили огромное распространение в мире. Их используют практически во всех сферах человеческой деятельности, таких как производство изделий для бытового применения и хранения продуктов (пищевые контейнеры, пластиковые бутылки, одноразовая или многоразовая посуда), изготовление различных гаджетов, медицинских инструментов, строительных материалов и т. д.

Сегодня промышленность производит семь основных групп пластмасс с различными физическими, механическими и химическими свойствами. Некоторые из этих различий показаны в таблице 1.

Полимерные материалы с истекшим сроком годности обычно выбрасываются, но они фактически не разлагаются и загрязняют окружающую среду. Нередко из-за невнимательности человека или процессов природного происхождения отходы полимерных материалов попадают в реки, моря и океаны, где в огромном количестве скапливается, что пагубно влияет на экосистемы. Бесконтрольное сжигание полимерных отходов также сопровождается загрязнением вредными веществами окружающей человека среды, выделяющимися при сжигании многокомпонентных полимерных материалов [1].

Альтернативным решением этой проблемы является использование полимерных отходов в качестве вторичного сырья. Это позволит решить целый комплекс проблем с экологией, экономикой, а также социальных проблем, связанных с утилизацией отходов.

Повторная переработка полимерных материалов для продления срока их службы дает возможность использовать их в различных продуктах, от транспортировочных пленок до элементов мостовых сооружений. Только в Соединенных Штатах производится более 1400 переработанных полимеров.

Использование материалов из переработанного пластика дает много преимуществ. Например, их часто продают дешевле на 20–25 %, чем оригинальные аналоги. Так же очень важен экологический фактор. Преимущество заключается в меньшем количестве отходов, которые необходимо сжигать или выбрасывать. Например, получение ПЭТ из бутылок снижает энергозатраты на производство этого полимера на 84 %.

Вторичные полимерные материалы стремительно завоевывают строительный сектор производства.

Таблица 1 / Table 1

Классификация видов пластика

Plastic types classification

| Вид пластика<br>Type of plastic                                                                 | <br>PET                                                   | <br>HDPE                                                             | <br>PVC                                                                  | <br>LDPE                                                                   | <br>PP                                                                     | <br>PS                                                       | <br>OTHER                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                 | полиэтилентерефталат<br>polyethylene terephthalate                                                                                         | полиэтилен<br>низкого<br>давления<br>low-pressure<br>polyethylene                                                                                     | поливинилхлорид<br>polyvinylchloride                                                                                                                       | полиэтилен<br>высокого<br>давления<br>high-density<br>polyethylene                                                                                            | полипропилен<br>polypropylene                                                                                                                                 | полистирол<br>polystyrene                                                                                                                       | смесь различных<br>пластиков или полимеры,<br>не указанные выше<br>a mixture of different plastics or<br>polymers not listed above |
| Химическая<br>формула<br>Chemical formula                                                       | $(C_{10}H_8O_4)_n$                                                                                                                         | $(C_2H_4)_n$                                                                                                                                          | $(C_2H_3Cl)_n$                                                                                                                                             | $(C_2H_4)_n$                                                                                                                                                  | $(C_3H_6)_n$                                                                                                                                                  | $(C_8H_8)_n$                                                                                                                                    | —                                                                                                                                  |
| Физические<br>свойства<br>Physical properties                                                   | Плотность<br>1,38–1,4 г/см <sup>3</sup> ,<br>температура плавления<br>260°C<br>Density 1.38–1.4 g/cm <sup>3</sup> ,<br>melting point 260°C | Плотность<br>0,960 г/см <sup>3</sup> ,<br>температура<br>плавления<br>129–135°C<br>Density<br>0.960 g/cm <sup>3</sup> ,<br>melting point<br>129–135°C | Плотность<br>1,35–1,43 г/см <sup>3</sup> ,<br>температура<br>плавления<br>150–220°C<br>Density 1.35–1.43<br>g/cm <sup>3</sup> , melting point<br>150–220°C | Плотность<br>0,93–0,97 г/см <sup>3</sup> ,<br>температура<br>плавления<br>125–132°C<br>Density<br>0.93–0.97 g/cm <sup>3</sup> ,<br>melting point<br>125–132°C | Плотность<br>0,90–0,92 г/см <sup>3</sup> ,<br>температура<br>плавления<br>160–170°C<br>Density<br>0.90–0.92 g/cm <sup>3</sup> ,<br>melting point<br>160–170°C | Плотность<br>0,90–0,92 г/см <sup>3</sup> ,<br>температура<br>плавления 240°C<br>Density 0.90–0.92<br>g/cm <sup>3</sup> , melting<br>point 240°C | —                                                                                                                                  |
| Примеры целевых<br>продуктов<br>Target products<br>examples                                     | Бутылки из-под воды,<br>газировки, соков и т. д.<br>Water, soda and juice<br>bottles, etc.                                                 | Упаковка для<br>шампуней,<br>моющих<br>средств и т. д.<br>Shampoo and<br>detergent<br>packages, etc.                                                  | Пищевая пленка,<br>шланги, натяжные<br>потолки<br>Food film, tube coils,<br>stretched ceiling                                                              | Мусорные<br>пакеты,<br>игрушки,<br>упаковка для<br>пищи<br>Garbage bags,<br>toys, food<br>packaging                                                           | Пищевые<br>контейнеры,<br>шприцы,<br>ингаляторы<br>Food containers,<br>syringes, inhalers                                                                     | Одноразовая<br>посуда,<br>стаканчики для<br>йогуртов,<br>пенопласт<br>Disposable<br>tableware, yogurt<br>cups, plastic foam                     | Смешанные многослойные<br>виды пластмасс<br>Mixed layered types of plastics                                                        |
| Опасность для<br>окружающей среды<br>и человека<br>The danger for the<br>environment and humans | Может выделять<br>фталат и тяжелые<br>металлы<br>May release phthalate and<br>heavy metals                                                 | Практически<br>не токсичен<br>Almost non-toxic                                                                                                        | Один из самых<br>ядовитых видов<br>пластика<br>One of the most toxic<br>types of plastic                                                                   | Практически<br>не токсичен<br>Almost non-toxic                                                                                                                | Считается<br>безопасным<br>Considered safe                                                                                                                    | Выделяет<br>стирол<br>(канцероген)<br>Discharge styrene<br>(cancerogene)                                                                        | При частом мытье,<br>нагревании выделяет<br>бисфенол А<br>With frequent washing up, heating<br>discharge bisphenol A               |

Источник / Source [2]

Из них изготавливают как строительные материалы, так и различные элементы конструкций для гражданского и транспортного строительства, например: трубы для дренажа, водоотвода, рулонные гидроизоляционные материалы, плиты для звуко и теплоизоляции, фибру для изготовления фибробетона, дорожные покрытия на основе полимерных материалов. Также становится актуальным применение полимерных материалов вторичного производства при строительстве мостов, а именно: при изготовлении конструкции мостовых сооружений (элементы пролетного строения, балки, перильные ограждения, элементы водоотвода и т. д.), что позволит снизить общий вес конструкций, упростить эксплуатацию мостового сооружения и сократить затраты на поддержание его в рабочем состоянии [1; 2].

## **1. Анализ состояния проблемы пластиковых отходов**

### **1. Analysis of the state of the plastic waste problem**

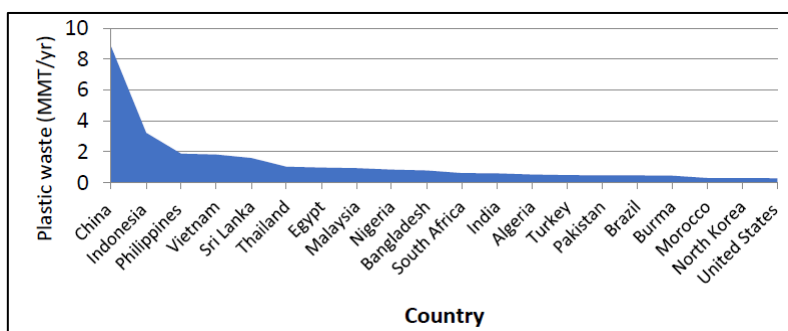
#### **1.1 Загрязнение планеты отработанным пластиком**

##### **1.1 Pollution of the planet with waste plastic**

Пластиковые отходы распространены повсеместно и поступают от Арктики до Антарктики, от поверхности до отложений. Фрагменты пластика с открытых свалок могут быть унесены ветром в ручьи, реки или прямо в океан. Загрязнение пластиком пресноводной и морской среды было признано глобальной проблемой. Подсчитано, что пластиковый мусор составляет 60–80 % морского мусора, достигая в некоторых районах 90–95 %. 80 % пластикового загрязнения происходит из наземных источников, а остальная часть поступает из источников в океане (рыболовные сети, рыболовные веревки). Основными наземными источниками являются незаконные свалки (рис. 1) и неадекватное обращение с пластиковыми отходами. Мировое производство пластмасс в настоящее время составляет около 300 миллионов тонн год, а неразлагаемый пластик приходится на 73 % мусора в любой водной среде обитания, при этом примерно 50 % утилизируется после одноразового использования [3–6].

Пластиковые отходы являются принципиально новым загрязняющим фактором. Они не подвергаются быстрому биоразложению и сохраняются в водной среде в течение длительного времени. По оценкам [7] в мировом океане от Арктики до Антарктики плавает около 5 триллионов кусков пластика. Пластиковый мусор на сегодняшний день это целые мусорные города, такие как искусственный остров Тилафуши на Мальдивах (рис. 2), город-свалка Агбоглоши в Аккре (рис. 3) и даже

«острова» в океане (пять гигантских скоплений мусора в Тихом, Атлантическом и Индийском океанах).



**Рисунок 1.** Неправильно утилизированные пластиковые отходы в 20 ведущих странах мира [7]. Неуправляемые пластиковые отходы — это материалы, которые либо засоряют окружающее пространство, либо утилизированы ненадлежащим образом (захоронение на свалках или открытых неконтролируемых полигонах, где они не полностью утилизируются). Шестнадцать из 20 крупнейших производителей пластиковых отходов с ненадлежащим управлением относятся к странам с уровнем дохода ниже среднего, где происходит быстрый экономический рост, но отсутствует инфраструктура управления отходами

**Figure 1.** Incorrectly disposed of plastic waste in the top 20 countries of the world. Unmanaged plastic waste is material that either litter the environment or is disposed of improperly (burial ground disposal or open uncontrolled landfills where they are not fully recycled). Sixteen of the top 20 poorly managed plastic waste producers are in lower-middle-income countries with rapid economic growth but no waste management infrastructure

Большинство химикатов, используемых для производства пластиковых полимеров, получают из невозобновляемой сырой нефти, и некоторые из них опасны. Пластмассы подразделяются на мелкие микропластики (0,33–1 мм), более крупные микропластики (1,01–4,75 мм), мезопластики (4,76–200 мм) и макропластики (> 200 мм).



а



б

**Рисунок 2.** Искусственный остров Тилафуши на Мальдивах:  
а — общий вид острова; б — вид поверхности острова из пластикового мусора

**Figure 2.** Thilafushi artificial island in the Maldives — source  
а — general view of the island; б — view of the surface of the island from plastic debris

(источник / source <https://www.scitechno.ru>)



Сегодня на рынке преобладают шесть основных типов пластика: полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП), поливинилхлорид (ПВХ), полистирол (ПС), полиуретан (ПУ) и полиэтилентерефталат (ПЭТ). Упаковка является крупнейшим в мире сектором пластмасс, на который приходится около четверти всего производства. В США, Европе, Австралии и Японии пластмассы классифицируются как твердые отходы [3; 8–10].



*Рисунок 3. Город-свалка Агбоглоши в Аккре*

*Figure 3. The dump town of Agbogbloshi in Accra*

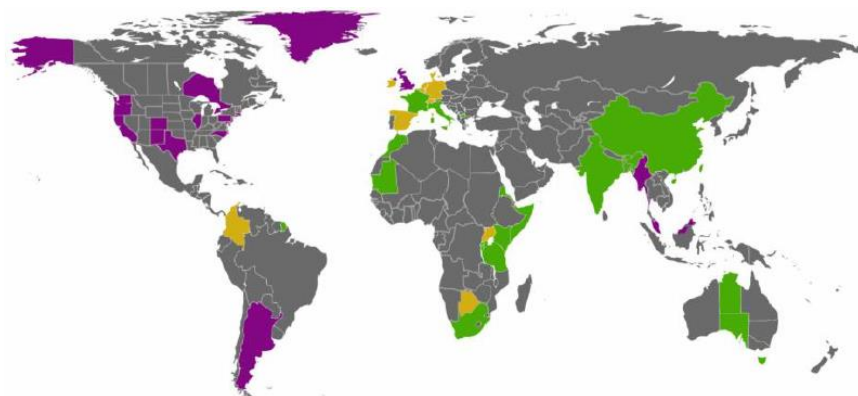
(источник / source <https://www.newframe.com/new-frontier-mineral-exploitation-ghana/?shared=email&msg=fail>)

Неуправляемый пластик (пластик, сбрасываемый открыто) попадает в окружающую среду через внутренние водные пути, сбросы сточных вод и транспортируется ветром или приливами. Мелкие частицы пластика (микропластик/микрогранулы) не могут быть полностью отфильтрованы, что делает очистные сооружения сточных вод значительным источником микропластикового загрязнения водных экосистем. Микропластики, попав в водную среду, могут преодолевать огромные расстояния, плавая в морской воде или оседая на морском дне [4; 5; 7].

Крупные пластиковые предметы, такие как выброшенные рыболовные веревки и сети, могут запутывать беспозвоночных, птиц, млекопитающих, кораллы и т. д. Запутывание водных видов пластиковым мусором может вызвать голод, удушье, раны, инфекции, снижение репродуктивного успеха и смертность. Гораздо более мелкие микропластиковые частицы (микрошарики) обычно белого или непрозрачного цвета, многие рыбы, питающиеся с поверхности, обычно ошибочно принимают их за корм (планктон). Проглатывание пластика водными организмами является одним из основных вредных воздействий на водную среду. Многие организмы (киты, черепахи, морские птицы, моллюски, рыбы) проглатывают кусочки пластика, которые могут накапливаться в их пищеварительной системе. Проглатывание пластика

может вызвать физическое повреждение или закупорку кишечного тракта, что может привести к инфекции, голоданию и даже смерти. Из сотен наблюдаемых морских видов 17 % занесены в Красную книгу МСОП (Международный Союз Охраны Природы), и не менее 10 % проглотили пластик. Лабораторные исследования показывают, что воздействие микропластика на Тихоокеанских устриц (фильтраторы) приводит к более низкому качеству их яиц и уменьшению производства личинок [4; 9].

Пластик вдоль береговой линии создает эстетическую проблему, что негативно сказывается на туризме. Экономические потери связаны с уменьшением доходов от туризма, негативным воздействием на рекреационную деятельность, повреждением судов, нарушением морской среды. Выброшенный на берег пластик также негативно влияет на судоходство, производство энергии, рыболовство и ресурсы аквакультуры.



**Рисунок 4.** Поэтапный отказ от пластиковых пакетов во всем мире путем запрета, налогообложения или и того, и другого. Запрет: Аргентина (2012 г.); Австралия (SA, ACT, TAS); Бангладеш (2002 г.); Канада (2007 г.); Китай (2008 г.); Эритрея (2005 г.); Индия (2005 г.); Италия (2013 г.); Кения (2007 год); Мавритания (2013 год); Марокко (2016 год); Мьянма (2011 год); Папуа-Новая Гвинея (2016 г.); Пуэрто-Рико (2016 г.); Руанда (2008 год); Южная Африка (2003 г.); Тайвань (2003 г.); Танзания (2006 г.); Уганда (2007 г.), США (2007 г.); Сбор (налог на полиэтиленовые пакеты): Ботсвана (2007 г.); Канада (2012 г.); Китай (2008 г.); Дания (1994 год); Германия (1991 год); Гонконг (2009 г.); Израиль (2016 г.); Англия (2015 г.); Кения (2011 год); Ирландия (2009 г.); Малайзия (2011 г.); Нидерланды (2016 год); Шотландия (2014 г.); Уганда (2007 год); США (2016 г.); Уэльс (2011 г.) [4]

**Figure 4.** Worldwide refusal of plastic bags through ban, taxation, or both. Ban: Argentina (2012); Australia (SA, ACT, TAS); Bangladesh (2002); Canada (2007); China (2008); Eritria (2005); India (2005); Italy (2013); Kenya (2007); Mauritania (2013); Morocco (2016); Myanmar (2011); Papua New Guinea (2016); Puerto Rico (2016); Rwanda (2008); South Africa (2003); Taiwan (2003); Tanzania (2006); Uganda (2007), USA (2007); Fee (tax on plastic bags): Botswana (2007); Canada (2012); China (2008); Denmark (1994); Germany (1991); Hong Kong (2009); Israel (2016); England (2015); Kenya (2011); Ireland (2009); Malaysia (2011); Netherlands (2016); Scotland (2014); Uganda (2007); USA (2016); Wales (2011) [4]



Пластиковые отходы являются переносчиками «приоритетных загрязнителей» (загрязняющие вещества, выбросы которых влияют на превышение гигиенических нормативов качества атмосферного воздуха, создают риски для здоровья человека). Пестициды и органические загрязнители, такие как полихлорированные бифенилы (ПХБ) и дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ), постоянно обнаруживаются в пластиковых отходах (эти химические вещества адсорбируются из-за гидрофобной природы) во вредных концентрациях (например, в 100 раз выше чем в отложениях и в 1 миллион раз больше, чем в морской воде). Многие из них являются «приоритетными загрязнителями». Эти приоритетные загрязнители могут проникать в ткани водных организмов после того, как они поедают мусор, и могут перемещаться вверх по пищевой цепочке к потребителям (от употребления зараженной рыбы/морепродуктов/моллюсков). У морских птиц, которые потребляли пластиковые отходы, в тканях концентрация полихлорированных бифенилов на 300 % выше, чем у тех, кто не ел пластик [10].

Самым безопасным методом утилизации отходов из отработанного пластика с экологической точки зрения является их вторичная переработка. Она позволяет извлекать из мусора максимум полезных компонентов и перерабатывать их в новые вещи, т.е. повторно использовать. Из переработанного пластика можно делать огромное количество товаров: одежду, мебель, канцелярские принадлежности, строительные материалы и др.

Главные плюсы вторичной переработки: сокращение объема отходов из пластика, выбрасываемого или вывозимого на открытые полигоны; возврат отработанных полимерных материалов в хозяйственный оборот; сохранение ресурсов, используемых для производства первичных полимеров.

Благодаря этому методу есть возможность сократить огромный объем производимого пластикового мусора, не причиняя при этом непоправимый вред окружающей среде. На данный момент общемировая тенденция такова, что в странах, где экологическая безопасность стоит в приоритете, вторичной переработке твердых бытовых отходов (ТБО), в том числе и пластикового мусора, придают большое значение. В целом страны Евросоюза перерабатывают в материалы более 40 % отходов. В Японии, где нет места для мусорных свалок, основное внимание уделяется рекуперации энергии (преобразование неперерабатываемых отходов в полезное тепло, электричество, или топливо с помощью различных процессов) из отходов, а не другим формам переработки. Таким образом, в настоящее время Япония перерабатывает 78 % своих отходов [5]. В мире уже достаточно давно осознали, что просто выкидывать мусор не экономично.

К сожалению, в России на сегодняшний день система переработки отработанного пластика практически не развита, перерабатывается всего 5–7 % ТБО, в том числе и пластиковые отходы. Развитию в нашей стране данного метода утилизации отработанного пластика препятствуют две основные причины: плохо налаженная практика раздельного сбора ТБО и равнодушное отношение населения к проблеме утилизации мусора.

В последнее время наметились положительные тенденции в этом направлении. Во многих городах все чаще стали появляться пункты приема вторсырья и заводы по его переработке, на железнодорожных вокзалах, в аэропортах и других социальных объектах установлены специальные контейнеры для раздельного сбора мусора, в некоторых районах введены эксперименты по сортировке мусора, в результате которых переработаны тонны вторсырья, включая и пластиковые материалы [5].

Как показывает мировая практика этого недостаточно. Люди воспринимают новую систему обращения с отходами лишь при наличии нескольких условий: доступности пунктов сбора мусора, системы бонусов и льгот, поддерживающих экологическое поведение, штрафов за нарушение соответствующих норм закона. Остается надеяться, что в будущем, ситуация с утилизацией бытовых отходов, особенно отработанного пластика, будет улучшаться, так как их влияние на окружающую среду становится все более угрожающим [3–6].

## **1.2 Выделение полимеров из бытовых отходов**

### **1.2 Polymers separation from household waste**

Одной из главных проблем на сегодняшний день является выделение отработанных полимерных материалов из общего объема ТБО. С начала 1990-х гг. в европейских странах началось формирование системы утилизации полимерных отходов, которая в дальнейшем распространилась по всему миру. Подавляющая часть отходов пластика составляет полимерная упаковка, для нее рамочным документом стала директива Европейского Союза (ЕС) по упаковке и упаковочным отходам (утверждена 20 декабря 1994 г.), согласно которой впервые для государств — членов ЕС были введены квоты по утилизации различных типов отходов. К ключевым элементам директивы относится определение различных отходов упаковки и способов утилизации, а также установление обязательности периодической ревизии квот утилизации. Полимерные материалы, при общей квоте 60 %, имеют лицензируемый объем утилизации в качестве материала не менее 36 %. Остальные 24 % могут утилизироваться в качестве материала, сырья или энергоносителя. Организация этого процесса сопряжена со значительными сложностями.

Полимеры — единственный упаковочный материал, для которого квоты утилизации в отдельных случаях находятся ниже заданий директивы. Задание в 15 % перекрыто только в Германии (45 %, включая утилизацию в качестве сырья), Финляндии и Австрии (по 20 %). В Германии, например, рециклинг (процесс возвращения отходов в процессы техногенеза) материалов рассматривается как звено традиционной производственной цепи. При этом требуются соответствующие производственные мощности, обеспечивающие функционирование системы возврата и повторного использования отходов [1].

С 1991 г. в Германии начала работу компания «Дуальная система» (Der Grüne Punkt — Duales System Deutschland) для торговой упаковки — все отходы делятся на два «потока» — перерабатываемые и неперерабатываемые. К началу ее формирования имелись производственные мощности, обеспечивающие функционирование системы возврата и рециклинга только для стекла, бумаги и, в некоторых местах, для металла. Особую проблему представлял рециклинг полимерных материалов, так как имелась возможность для повторного использования только 30 тыс. тонн этих материалов. В Германии компанией «Дуальная система» из более чем 60 тыс. тонн использованных старых полимерных материалов на утилизацию направлено 93 %. 43 % торговой упаковки из полимерных материалов было использовано в качестве материала и 57 % — в качестве сырья. Внутри страны используется 93 % такой упаковки.

В России делаются лишь первые шаги в этой области. В 2003 г. в Москве прошла международная конференция «Рециклинг как способ утилизации полимерной упаковки». В докладах были констатированы многочисленные законодательные, технические и организационные проблемы на пути организации системы рециклинга. Важнейшим шагом в формировании системы утилизации полимерной упаковки в России должен стать закон «Об упаковке и упаковочных отходах». Он обсуждался уже несколько лет и был принят 25 ноября 2008 года Межпарламентской Ассамблеей государств-участников СНГ. Закон вводит положение о раздельной утилизации отходов упаковки для вторичной переработки. При создании закона учитывали опыт Евросоюза. В частности, на упаковку будет наноситься специальное обозначение, свидетельствующее о том, что производитель уже заплатил за последующую переработку упаковочных отходов. Закон является модельным и носит рекомендательный характер [1; 2].

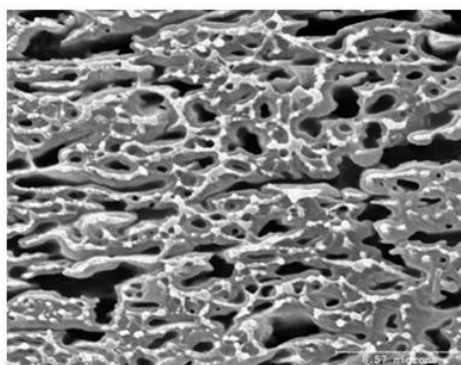
## 2. Исследование возможности и путей применения пластика вторичного производства в мостостроении

### 2. Research on the possibility and ways of using recycled plastic in bridge construction

#### 2.1 Появление материалов из переработанного пластика на строительном рынке

##### 2.1 Emergence of recycled plastic materials in the construction market

В начале 1990-х годов переработанный пластиковый пиломатериал (RPL) на основе HDPE пластика появился на рынке США как привлекательный заменитель натурального дерева с аналогичными показателями прочности, что и у пиломатериалов аналогичного размера. Однако первые изделия из RPL имели низкий модуль упругости, а также значительную ползучесть при напряжениях до 0,55 МПа по сравнению с расчетными напряжениями 6,2 МПа для многих древесных пород, обычно используемых в строительстве. Дальнейшие исследования привели к созданию армированных термопластичных композитных пиломатериалов (RTCL) с более высоким модулем упругости и сопротивлением ползучести за счет включения несмешивающихся полимерных смесей с армирующими агентами в матрицу RPL, например волокон, или путем создания композитов из несмешивающихся полимерных смесей с одним высокомодульным компонентом. Дальнейшие исследования с использованием специализированных методов обработки привели к созданию композитов с наноструктурированной морфологией (рис. 5), также называемых RSPC, с улучшенными механическими свойствами, включая повышенную вязкость без ущерба для модуля упругости или прочности [11; 12].



*Рисунок 5. СЭМ-микрофотографии в масштабе 8,57 мкм материала RSPC*

*Figure 5. SEM micrograph at a scale of 8.57  $\mu\text{m}$  of the RSPC material*

*(источник / source [12])*

## 2.2 Технология вторичной переработки полимерных отходов

### 2.2 Polymer waste recycling technology

#### *Этапы подготовки пластиковых отходов к вторичной переработке / Stages of preparing plastic waste for recycling*

Перед фактической переработкой отработанных полимерных материалов в новые продукты необходимо произвести преобразование отходов в новое сырье. Эта фаза обычно называется «Конец отходов» и начинается после этапа сбора. Для ТБО этот процесс может включать в себя следующие этапы, каждый из которых может выполняться несколько раз на протяжении всей последовательности или не выполняться вообще:

- разделение и сортировка: это происходит по форме, плотности, размеру, цвету или химическому составу;
- пакетирование: если пластик не обрабатывается там, где он сортируется, его часто упаковывают в тюки для транспортировки;
- мойка: удаление (часто органических) загрязнений;
- измельчение: измельчение пластиковых отходов до стружки;
- гранулирование: необязательная переработка полученной стружки в гранулы, который легче использовать для конвертеров, чем стружку.

Отходы РІ (постпромышленные отходы) лучше сортировать заранее по составу, поэтому сортировка применяется к отходам РС (отходы после потребления) гораздо чаще, чем к отходам РІ. То же самое касается мойки, так как отходы РС обычно более загрязнены.

#### *Технология компаундирования / Compounding technology*

Одним из самых распространенных вариантов переработки вышедших из эксплуатации полимерных материалов в новую продукцию является **технология компаундирования**. Это процесс, включающий в себя введение таких ингредиентов, как пластификаторы, вулканизирующие агенты, отвердители, стабилизаторы, наполнители, красители, пламегасители и смазочные вещества, в полимерный материал, а смеси полимеров с этими добавками называются “компаундами”. Компаунд может содержать от 4 до 10 ингредиентов, смешанных соответствующим образом для достижения успешного функционирования готового изделия.

Свойства компаундов напрямую зависят от полимерной основы смешиваемых компонентов. Не менее 50 полимеров различных марок и сотни добавок дают возможность модифицировать набор ключевых



свойств полимерного изделия. Как полимеры, так и добавки выпускаются в различных формах (гранулы, порошки, жидкости) и имеют широкий диапазон температур плавления и термических свойств. Такое разнообразие материалов и их свойств является причиной разнообразия процессов компаундирования [13].

С точки зрения физико-химических процессов все процессы компаундирования классифицируются в соответствии с базовыми научными законами и параметрами:

- дисперсионное смешение, то есть дробление агломератов до уровня порошков;
- дистрибутивное смешение, то есть достижение высокой степени однородности в полимерной матрице;
- термическое регулирование, то есть установление устойчивого температурно-временного профиля при течении системы (расплава), состоящей из полимера и добавок.

Каждое изменение, происходящее с материалом при компаундировании, так или иначе связано именно с этими тремя основными процессами: дисперсионное смешение, дистрибутивное смешение и термическое регулирование. Очень часто эти процессы происходят одновременно, однако есть композиции, при компаундировании которых протекает лишь один из перечисленных процессов.

Оптимальное смешение и оптимальное компаундирование полимеров и добавок являются важнейшими операциями при производстве полимерной композиции. Выбор оборудования и технологии производства компаунда напрямую зависит от исходного состояния и параметров полимерного материала и добавок, а также от желаемых свойств конечного продукта.

Технология и аппаратное оформление процесса смешения зависят от физического состояния, параметров, технологических свойств исходных компонентов и параметров структуры полимерного компаунда.

Исходные компоненты могут находиться в трех различных состояниях: твердом (сыпучем), жидком и вязкопластическом, что определяет выбор смесительного оборудования и механизма процесса смешения.

Компаунды на основе термопластичных полимеров можно готовить путем холодного и горячего смешения, периодическим или непрерывным способом. Первый, так называемый «метод сухих смесей», заключается в смешении жидких и твердых добавок и наполнителей с полимерной

матрицей до получения сыпучей порошкообразной массы с равномерно распределенными ингредиентами для последующей переработки обычными методами. Оборудование, необходимое для данного вида смешения: барабанные смесители, лопастные смесители, Z-образные смесители, смесители с механическим псевдоожижением [13].

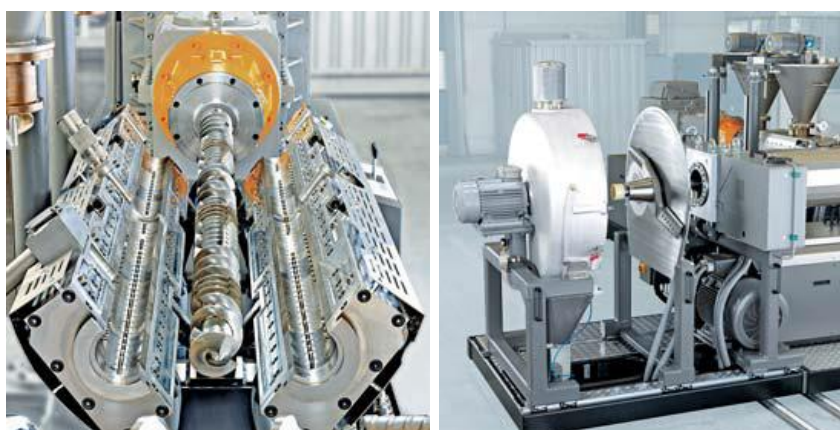
Для приготовления жидких и пастообразных полимерных масс, например, ПВХ-паст, используются аппараты с мешалкой.

Как правило, для достижения высокого качества смеси термопластичного полимера с добавками и наполнителями смешение происходит в пластическом состоянии. В процессе пластикации предварительно смешанная в сухом состоянии полимерная масса расплавляется и гомогенизируется. Среди используемых для этого процесса машин следует различать работающие в периодическом режиме смесители-пластикаторы и вальцы, а также работающие в непрерывном режиме экструдеры различных типов.

Непрерывный процесс смешения наиболее прогрессивен и заключается в смешении исходных компонентов в объеме аппарата под воздействием рабочих органов, получении готового материала заданного качества смешения и непрерывной его выгрузке или получении непрерывного изделия, например, профиля [13].

Для непрерывного смешения чаще всего используются экструдеры различных типов: одно- и двухшнековые, осциллирующие и дисковые, с различными типами смесительных элементов.

Получение компаундов на экструзионном оборудовании, как правило, протекает при высоких скоростях. Процесс высокоскоростной экструзии для компаундирования материалов в течение многих лет осуществлялся на двухшнековых экструдерах.



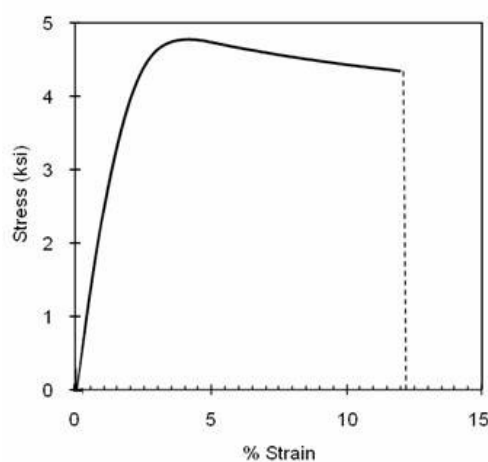
*Рисунок 6. Одношнековый экструдер-смеситель Buss MX*

**Figure 6. Buss MX Single Screw Extruder Mixer**

(источник / source <https://www.plastics.ru>)

На одношнековых экструдерах (рис. 6) высокоскоростная экструзия не применялась в промышленных масштабах вплоть до 1995 года. Приблизительно с 1995 года некоторые производители экструдеров предприняли меры по разработке высокоскоростных одношнековых экструдеров, и в настоящее время они успешно используются в промышленности. Теперь можно достичь одинакового качества распределительного и дисперсионного смешения как на двухшнековых, так и на одношнековых экструдерах [13].

На рисунке 7 показаны кривая "напряжение-деформация" при растяжении для одношнекового компаундирования.



**Рисунок 7.** Кривая напряжения-деформации для одношнекового компаундирования (в источнике не указываются параметры образцов, а также условия, в которых данные образцы подвергались испытанию)

**Figure 7.** Stress-strain curve for single-screw compounding  
(the source does not indicate the parameters of the samples, as well as the conditions under which these samples were tested)

(источник / source [12])



**Рисунок 8.** Двухшнековый компаундер ZSE 60 MAXX

**Figure 8.** Twin screw compounder ZSE 60 MAXX

(источник / source <https://www.plastics.ru>)

Двухшнековые экструдеры (рис. 8), используемые для компаундирования, обычно эксплуатируются при скоростях вращения шнека в пределах от 200 до 500 об./мин.; в некоторых случаях — вплоть до 1000 об./мин. Одношнековые же экструдеры — при скоростях вращения шнека от 50 до 150 об./мин.

## **2.3 Основные проблемы, связанные с переработкой пластиковых отходов**

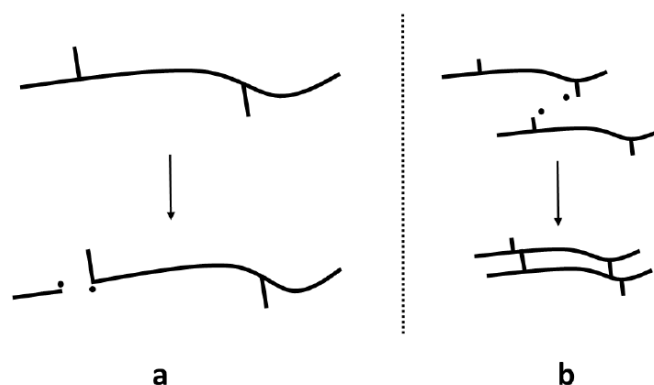
### **2.3 The main problems associated with the recycling of plastic waste**

Различные проблемы возникают при переработке как моно-, так и смешанных пластиков. Основная проблема заключается в том, что полимеры разлагаются при определенных условиях. Этими условиями являются: тепло, окисление, свет, ионное излучение, гидролиз и механический сдвиг. При переработке полимерных отходов преобладают два типа деградации: деградация, вызванная переработкой (термомеханическая деградация) и деградация в течение срока службы.

В первую очередь это термомеханическая деградация полимеров при переработке. Переработка пластмасс как PI, так и PC страдает от этого типа деградации, вызванной сочетанием тепла и механического сдвига. Другой тип деградации — это деградация, происходящая в течение жизни в результате длительного воздействия всевозможных факторов окружающей среды (тепло, кислород, свет, влага и т. д.). Однако этот тип деградации важен только в случае вторичной переработки поликарбонатных пластиков [14; 15].

### ***Термомеханическая деградация / Thermomechanical degradation***

Термомеханическая деградация вызвана нагревом и механическим сдвигом полимера во время обработки расплава. Различные процессы будут инициироваться в полимере, когда он подвергается сочетанию температуры и сдвига. Наиболее распространенными механизмами, происходящими в полимерах, являются разрыв цепи и разветвление цепи. В зависимости от типа полимера и таких аспектов, как начальная молекулярная масса ( $M_w$ ) и температура, тот или иной из этих конкурирующих радикальных механизмов становится более доминирующим. Термомеханическое разложение обычно начинается с гомолитического разрыва ковалентной связи углерод-углерод в основной цепи полимера с образованием свободных радикалов. Эти свободные радикалы могут подвергаться некоторым химическим реакциям, таким как диспропорционирование, вызывающее разрыв цепи или образование поперечных связей (рис. 9), также известное как разветвление [16].

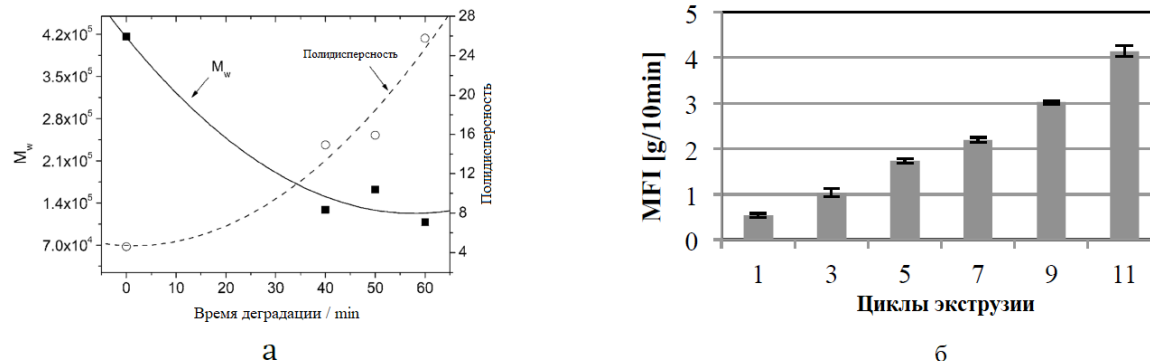


**Рисунок 9.** Случайный разрыв цепи (а) и образование поперечных связей (б)

**Figure 9.** Random chain breaking (a) and cross linkage (b)

(источник / source [16])

Разрыв цепи в основном происходит в терминальных боковых группах или в основной цепи полимера и снижает молекулярную массу полимера и, следовательно, также свойства. Разветвление цепи приводит к образованию поперечных связей и увеличению молекулярной массы. Типичный пример разрыва цепи происходит при РР в то время как некоторые типы РЕ более склонны к разветвлению цепи. Обе реакции приводят к степени ненасыщенности и выделению низкомолекулярных летучих компонентов.



**Рисунок 10.** (а) Изменение молекулярной массы и полидисперсности образца полипропилена [19]; (б) Изменение MFI многократно переработанного образца полипропилена [20] (в источнике не указываются параметры образцов, а также условия, в которых образцы подвергались испытанию)

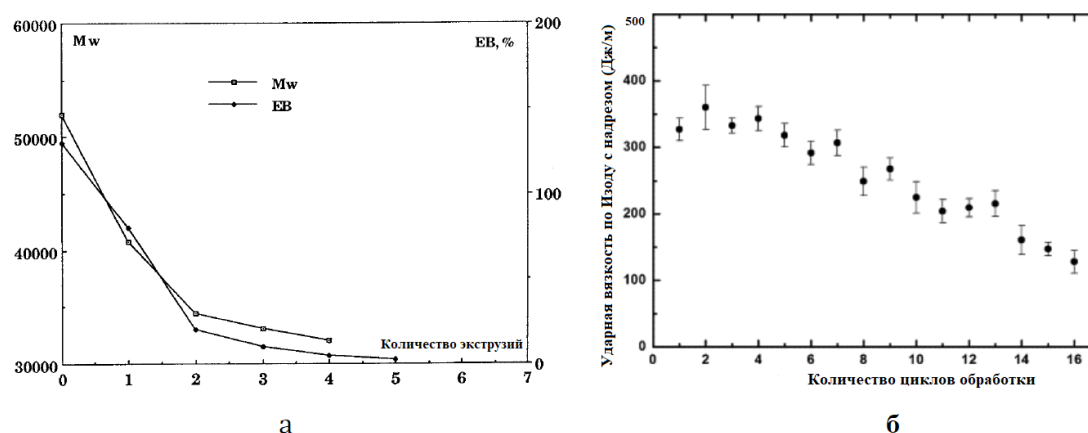
**Figure 10.** (a) Change in molecular weight and polydispersity of a polypropylene sample; (b) Change in MFI of a multiple recycled polypropylene sample (the source does not indicate the parameters of the samples, as well as the conditions under which the samples were tested)

На рисунке 10 показан типичный пример снижения молекулярной массы за счет термомеханической деградации образца полипропилена в течение определенного времени деградации. Наряду со снижением  $M_w$  во времени часто наблюдается также увеличение полидисперсности и сдвиг в распределении  $M_w$ , что указывает на наличие различной длины цепей в



полимере. Увеличение индекса текучести расплава (MFI), как показано на рисунке 10б, является симптомом снижения  $M_w$  [17; 18].

Изменение  $M_w$  оказывает сильное влияние на реологическое и механическое поведение полимеров. На рисунке 11а показан пример удлинения при разрыве образца ПЭТ, подвергнутого различным этапам экструзии, имитирующим процесс переработки. Серьезное снижение  $M_w$  происходит уже при первых нескольких экструзиях, сопровождаемое такой же тенденцией к уменьшению относительного удлинения при разрыве. Помимо удлинения при разрыве, в зависимости от изменения  $M_w$  будут изменяться все механические свойства. В общем, удлинение при разрыве и ударные свойства являются механическими параметрами, на которые непосредственно влияет термомеханическое разрушение. На рис. 11б показано влияние на ударную вязкость образца ПА6. Изменение прочностных свойств в значительной степени зависит от полимера и может даже увеличиться для некоторых полимеров после переработки. Помимо изменения механических и реологических свойств, термомеханическая деструкция также влияет на термические свойства (температура плавления, кристаллизация и т. д.) и физические свойства (поверхностные свойства, цвет и т. д.) [23; 24].



**Рисунок 11.** (а) молекулярная масса и удлинение при разрыве в зависимости от количества экструзий для образца ПЭТ — источник [15]; (б) ударная вязкость для количества циклов обработки образца ПА6 — источник [26] (в источнике не указываются параметры образцов, а также условия, в которых образцы подвергались испытанию)

**Figure 11.** (a) molecular weight and elongation at break based on the number of extrusions for a polyethylene terephthalate sample — source; (b) impact strength for the number of processing cycles of the polyamide-6 sample — source (the source does not indicate the parameters of the samples, as well as the conditions under which the samples were tested)

Эти эффекты термомеханической дегградации можно компенсировать добавлением различных добавок. Можно найти огромный ассортимент добавок для повышения пригодности пластмасс к вторичной

переработке. Обычно термостабилизаторы повторно добавляются во время переработки, потому что они в основном были израсходованы в течение первого срока службы и обработки пластика. Наряду с термостабилизаторами могут быть добавлены модификаторы ударопрочности, сшиватели, компатибилизаторы, пигменты и наполнители. Особым случаем является переработка ПЭТФ, при которой применяются методы постконденсации для улучшения прочности расплава и механических свойств. Подробнее об этом будет сказано далее [23–25].

### ***Деградация в течение жизни / Degradation during the life cycle***

Пластмассовые изделия в течение всего срока службы подвергаются воздействию тепла, кислорода, света, радиации, влаги и механических нагрузок. Результирующая деградация в основном вызвана процессами фотоокисления. Структурные изменения в полимере очень похожи на изменения, вызванные термомеханической деструкцией. Основным отличием здесь является наличие кислорода в атмосфере (обычно его нет в обрабатывающих машинах). Это приводит к образованию окисгенированных групп в полимерной цепи и, таким образом, влияет на конечные свойства материала.

Как разложение в течение срока службы, так и термомеханическое разложение приводят к образованию низкомолекулярных летучих соединений, которые в основном удерживаются в полимере, когда он находится в твердом состоянии. Однако во время переработки эти загрязняющие вещества могут диффундировать через расплав и препятствовать эффективной переработке. Эти загрязнители могут не только ухудшить свойства продукта, но и сам процесс обработки, поскольку некоторые из них могут вызвать коррозию технологического оборудования. Для уменьшения этой проблемы требуется надлежащая дегазация на оборудовании для переработки. Эти летучие вещества представляют собой небольшие (насыщенные кислородом) фрагменты исходного полимера и могут быть идентифицированы с помощью различных аналитических методов, таких как масс-спектропия [27–28].

## **2.4 Воздействие материалов из переработанного пластика на окружающую среду**

### **2.4 Environmental impact of recycled plastic materials**

Элементы из вторичных полимерных материалов (RSPC) соответствуют последним рекомендациям Министерства транспорта США (USDOT) в отношении учета инноваций, устойчивости и

«экологичности». Компоненты RSPC производятся из бытовых и промышленных отходов. Он не переносит яды в почву или воду, потому что в продукте нет канцерогенов или добавленных химикатов, которые могут со временем вымываться. Его производство снижает потребление энергии и связанные с этим выбросы парниковых газов в атмосферу.

Например, по данным онлайн-ресурса EPA (агентство по охране окружающей среды США), энергетическая выгода, выраженная в неиспользованных галлонах бензина, составляет 22 296 галлонов для строительства одного моста в/ч «Форт-Брэгг» (было использовано 39 009 кг переработанного пластика). Это «неиспользование» бензина, в свою очередь, равняется 196 метрическим тоннам не выбрасываемого диоксида углерода.

Между тем, американские железные дороги заменяют 20 миллионов шпал ежегодно. Этого достаточно, чтобы построить 6 670 миль пути, что эквивалентно 5 000 000 деревьев или 71 квадратной миле леса — площадь больше, чем Вашингтон, округ Колумбия, Северная Вирджиния и часть Мэриленда.

Структурная коррозия обходится Министерству обороны более чем в 22 миллиарда долларов в год, в то время как расходы налогоплательщиков США приближаются к 300 миллиардам долларов. Эту экономическую утечку можно значительно уменьшить за счет использования RSPC на территориях, где это практически осуществимо.

К другим положительным характеристикам материалов из RSPC относится то, что он непористый (не впитывает влагу и не гниет); не проводит электричество; экологичен и долговечен; не подвержен проникновению насекомых; звукопоглощающий; легче бетона или стали и примерно такого же веса, как древесина дуба; и является хорошим материалом для использования в сейсмических зонах из-за его небольшого собственного веса, способности поглощать энергию и высокой скорости деформации до разрушения. На материал также можно нанести композитный антипирен [11; 29–30]<sup>1</sup>.

### **3. Плюсы и минусы материалов из вторичных полимеров при строительстве мостовых сооружений**

#### **3. Pros and cons of materials from recycled polymers in the bridge structures construction**

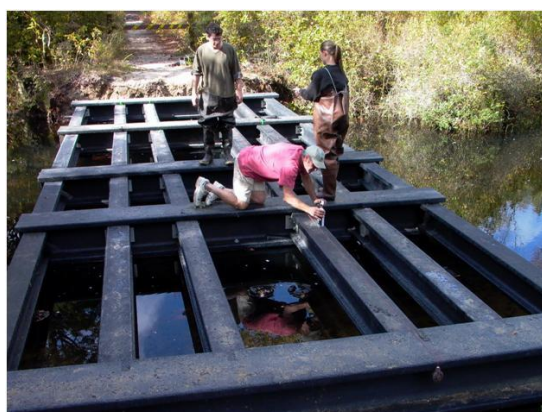
---

<sup>1</sup> US Patent 9340666. Use of recycled plastics for structural building forms / Lynch, J., Nosker, T., Lehman, R., Idol, J.D., Van Ness, K., Renfree, R.W.; Rutgers, State University of New Jersey. — May 17, 2016 (<https://patents.justia.com/patent/9340666>).

### 3.1 Уменьшение трудоемкости процесса возведения мостов

#### 3.1 Reducing the complexity of the bridge-building process

Элементы из вторичных полимерных материалов (RSPC) низкой плотности подходят для ускоренного строительства. Транспортировка продукции RSPC не требует тяжелого или специального оборудования и может осуществляться стандартными грузовиками. Это также верно, когда речь идет о строительстве в полевых условиях. Во время строительства можно использовать более легкое оборудование, что позволяет ускорить процесс возведения конструкций и повысить безопасность (рис. 12) [11].



*Рисунок 12. Устройство пролетного строения моста Wharton State Forest в Нью-Джерси из двутавровых балок*

*Figure 12. The superstructure construction of the Wharton State Forest bridge in New Jersey from I-beams*

*(источник / source [11])*

### 3.2 Экономичность использования материалов из полимеров вторичного производства

#### 3.2 Economical use of materials from recycled polymers

Таблица 2 / Table 2

Сравнение стоимости материалов, используемых для строительства мостов

Comparison of the materials cost used for the bridge construction

| Материал<br>Material                                                | Расходы<br>Expenses | Масса, кг<br>Weight, kg | Срок эксплуатации<br>Service life                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Первичные полимеры<br>Primary polymers                              | \$1,400,000         | 88 450,5                | Нет данных<br>No data                                                                                  |
| Сталь/Бетон<br>Steel/Concrete                                       | \$600,000           | 136 077,7               | 20 лет + обслуживание<br>20 years + maintenance                                                        |
| Древесина<br>Wood                                                   | \$450,000           | 79 378,66               | 8–12 лет + обслуживание<br>8–12 years + maintenance                                                    |
| Материалы из переработанного пластика<br>Recycled plastic materials | \$300,000           | 54 431,08               | Более 50 лет + минимальное обслуживание или его отсутствие<br>Over 50 years + little or no maintenance |

*Источник / source [12]*

В таблице 2 сравнивается стоимость строительства моста длиной 18,29 м с использованием различных типов материалов, включая требования к техническому обслуживанию в течение его жизненного цикла.

Как видно, стоимость материала из переработанного пластика и его масса гораздо ниже, чем у других материалов, а долговечность больше.

### 3.3 Свойства материалов из переработанного пластика

#### 3.3 Material properties made of recycled plastic

Сравнение удельного веса RSPC и других широко используемых строительных материалов показано ниже в таблице 3:

Таблица 3 / Table 3

#### Удельный вес различных материалов

#### The specific gravity of various materials

| Материал / Material       | Удельный вес, кг/м <sup>3</sup> / Specific gravity, kg/m <sup>3</sup> |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Дерево (Дуб) / Wood (Oak) | 720,8                                                                 |
| RSPC / RSPC               | 800,9                                                                 |
| Бетон / Concrete          | 2400                                                                  |
| Сталь / Steel             | 7833                                                                  |

Источник / source [12]

Видно, что удельный вес пластика незначительно превышает удельный вес дерева и значительно ниже удельного веса других строительных материалов.

Помимо вышеуказанных данных, ниже рассматриваются дополнительные особенности переработанного пластика:

- **Ультрафиолетовое разложение:** менее 0,0076 см в год, намного меньше, чем у дерева или ржавчины на стали.
- **Огнестойкость:** точка воспламенения RSPC выше, чем у многих древесных материалов, особенно с креозотом. Доступно композитное огнестойкое покрытие, полностью предотвращающее возгорание.
- **Поглощение влаги:** практически непроницаемый и сохраняет механические свойства во влажной среде.
- **Термическое сопротивление:** температура теплового отклонения составляет 125°C, а материал жизнеспособен до -125°C, что значительно превышает наблюдаемые температуры Земли.



- **Устойчивость к окружающей среде:** устойчивость к атакам морских организмов, коррозии, насекомым и гниению.
- **Истирание:** высокая устойчивость к истиранию, которое может возникнуть в морской среде из-за солей и песка, поскольку HDPE является одним из наиболее стойких полимерных материалов, что продемонстрировано испытаниями Табера на истирание и испытаниями на химическую стойкость.
- **Ползучесть:** изделия из термопласта рассчитаны на допустимое напряжение растяжения, сжатия и изгиба равное 4,14 МПа, при низком показателе зависимости напряжение-деформация, показанной на рисунке 5.
- **Соппротивление скольжению:** коэффициент трения можно изменить за счет текстурирования поверхности в процессе производства.
- **Кислотостойкость:** материал RSPC устойчив к большинству кислот и солей, которые могут встретиться при использовании мостов.
- **Текстурирование поверхности:** можно добавить текстурирование поверхности пролетного строения для его декорирования посредством процесса тиснения в линию. Это улучшает как эстетику, так и коэффициент трения.
- **Цвет:** хотя основным цветом компонентов RSPC является графитовый или черный цвет, также можно создавать такие цвета, как серый, бежевый и т. д. [11; 12]<sup>1</sup>.

## 4. Опыт применения материалов из вторичных полимеров в мостостроении

### 4. Experience in the use of materials from secondary polymers in bridge construction

Первый автомобильный мост, состоящий из несмешивающейся полимерной смеси полистирола/термопласта, армированного полиэтиленом высокой плотности с прямоугольным поперечным сечением пролетного строения, был построен в в/ч «Форт Леонард Вуд», штат Миссури, в 1998 году с высокой начальной стоимостью по сравнению с традиционными материалами (рис. 13). В мосту использовались стальные балки для поддержания секций из термопласта, и по сей день он не требует обслуживания и выглядит новым. Если анализировать стоимость жизненного цикла, то мост окупился даже при высокой первоначальной стоимости менее чем за восемь лет.



**Рисунок 13.** Автомобильный мост в в/ч Форт Леонард Вуд», штат Миссури, построенный в 1998 году с максимальной грузоподъемностью 12,5 тонн

**Figure 13.** Automobile bridge at the military unit Fort Leonard Wood, Missouri, built in 1998 with a maximum carrying capacity of 12.5 tons

(источник / source [11])

Затем, в 2002 году, появился автомобильный мост с использованием того же композитного материала, который использовался в в/ч «Форт Леонард Вуд», расположенный в Государственном лесу Уортон в Нью-Джерси, с грузоподъемностью 36 тонн и начальной стоимостью, близкой к стоимости химически обработанного деревянного моста (рис. 14).



**Рисунок 14.** Автомобильный мост в государственном лесу Уортон, штат Нью-Джерси, построенный в 2002 году из двутавровых балок, Максимальная грузоподъемность 36 тонн

**Figure 14.** Road bridge in Wharton State Forest, New Jersey, built in 2002 from I-beams, maximum load capacity of 36 tons

(источник / source [11])

Это был первый мост, в котором использовалось то обстоятельство, что двутавровые балки можно формовать из пластика, эти балки гораздо эффективнее работают на изгиб, чем балки с прямоугольным поперечным сечением. Дополнительным преимуществом является возможность размещения секций для распределения нагрузки и сокращения времени строительства [11; 31].

## 4.1 Мосты в в/ч «Форт-Брэгг»

### 4.1 Bridges in the military unit "Fort Bragg"

В начале 2009 года в военной части (в/ч) «Форт-Брэгг», Северная Каролина, были построены первые в мире мосты T85-18 и T85-19 полностью из переработанного конструкционного пластика (RSPC), способные нести 71-тонные танки M1 Abrams и выдерживать нагрузки класса HS25 (9 072 кг на колесо). Мост T85-18 располагается на Tuckers Road через Big Muddy Creek, а T85-19 (рис. 15) на Gravel Road через Muddy Creek. Практически все компоненты моста, включая балки, части опор, плиту проезжей части, перила и сваи, изготовлены из переработанного пластика. Материал RSPC изготовлен из полиэтилена высокой плотности с заключенным в полипропилен стекловолокном. Эта компоновка была конкурентоспособной по стоимости с древесиной, чтобы нести ту же нагрузку [12; 30]<sup>2</sup>.



*Рисунок 15. Успешный переход 30-тонного катка через мост T85-19 в Форт-Брэгге, Северная Каролина*

*Figure 15. Successful passage of a 30-ton roller across the T85-19 bridge at Fort Bragg, North Carolina*

*(источник / source [29])*

Мост T85-18 представляет собой трехпролетную конструкцию, длина каждого пролета 3,66 м и общая длина 11,68 м. Ширина моста составляет 5,33 м. Фундамент состоит из свайных опор из материала RSPC

<sup>2</sup> <https://www.iwconsultingservice.com/post/understanding-cover-load-ratings> — дата обращения 14.10.2021 г.

диаметром 30,48 см. Крайние опоры состоят из трех вертикальных свай, тогда как промежуточные опоры состоят из четырех свай на каждую опору, причем две внешние сваи наклонены в поперечном направлении в соотношении 1:6. Свайный ростверк (также изготовленный из материала RSPC) состоит из двутавровой балки высотой 45,72 см и соединяется со всеми сваями с помощью распорных болтов диаметром 2,54 см. Пролетное строение неразрезное, непрерывное по трем пролетам, состоит из 11 двутавров высотой 45,72 см, установленных бок о бок. Настил состоит из досок RSPC размером 7,62 на 30,48 см, соединенных с балками RSPC. Балки пролетного строения крепятся к балкам ростверка болтами. В балках и стальных несущих пластинах предусмотрены зазоры на концах мостов для восприятия теплового перемещения. Боковые ограждения состоят из стоек RSPC размером 15,24 на 15,24 см с перилами RSPC размером 5,08 на 15,24 см.

Мост T85-19 представляет собой четырехпролетную конструкцию из двух концевых пролетов длиной 2,97 м и промежуточных пролетов длиной 3,66 м. Общая длина моста 13,97 м. Ширина проезжей части такая же, как у T85-18 (5,33 м). Конфигурация фундамента и пролетного строения аналогична T85-18.

На рисунках 16 и 17 показано устройство одного из мостов (T85-18). Оба моста были спроектированы так, чтобы выдерживать 71-тонную нагрузку танка M-1 Abrams в дополнение к другим обычным транспортным нагрузкам.



**Рисунок 16.** Двутавровые балки пролетного строения установлены и закреплены на трех рядах свай. Мост T85-18

**Figure 16.** I-beams of the superstructure are installed and fixed on three rows of piles. Bridge T85-18

(источник / source [29])

Для обоих мостов сваи погружались с помощью вибромолота и дизельного молота. Сваи были длиной примерно 19,81 м и имели стыковку [11; 29]<sup>3</sup>.





*Рисунок 17. Балки, установленные на мосту Т85-18 по длине*

*Figure 17. Beams installed on the T85-18 bridge along the length*

*(источник / source [29])*

## 4.2 Мосты в в/ч «Форт-Юстис»

### 4.2 Bridges in the military unit "Fort Eustis"

Два моста, № 3 и 7, были спроектированы и строятся для армии США в в/ч «Форт-Юстис», штат Вирджиния, они выдерживают нагрузку в 117 934 кг с 20 % ударной нагрузкой. Оба моста имеют высоту 3,66 м в высшей точке. Существующие деревянные устои, выдерживающие нагрузку обратной засыпки, сохраняются для экономии затрат, в то время как нагрузки от пролетного строения, включая вертикальную временную нагрузку, передаются через промежуточные опоры в грунт. Горизонтальная временная нагрузка, такая как продольная сила, возникающая из-за торможения или ускорения, воспринимается береговыми и промежуточными опорами [11; 29].

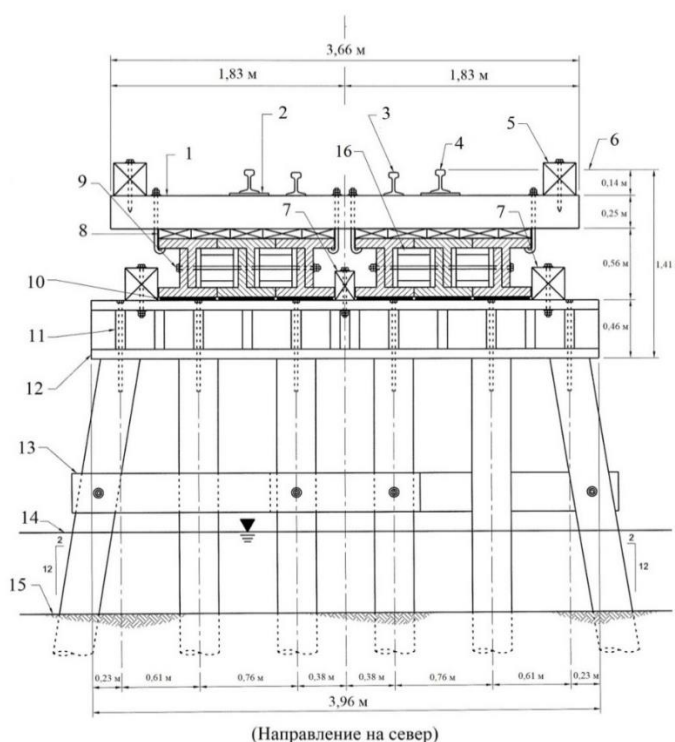
Мост № 3 представляет собой непрерывную четырехпролетную конструкцию длиной 11,73 м. Он состоит из двух крайних опор и трех промежуточных опор. Фундамент состоит из шести вертикальных свай в крайних опорах и шести свай в промежуточных опорах. Из шести свай на промежуточных опорах две установлены под наклоном в поперечном направлении в соотношении 1:6, две — в соотношении 1:6 в продольном направлении, а две оставшиеся — в вертикальном. Все сваи выполнены из материала RSPC диаметром 30,48 см. Сваи имеют длину около 13,72 м и забиты до конечного опорного давления 17 тонн на сваю. Свайный ростверк для всех опор состоит из двутавров высотой 45,72 см, соединённых со сваями с помощью распорных болтов из нержавеющей стали.

Пролетное строение железнодорожного моста состоит из двух балок таврового сечения высотой 45,72 см, сформированных в двутавровую форму с помощью клея и болтов. Каждый рельс поддерживается на трех



таких балках, и балки соединяются между собой поперечными стяжными шпильками (рис. 18). Пролетное строение опирается на эластомерные опоры. Ограничители предотвращают перемещение балок в поперечном направлении, а в продольном направлении — за пределы тепловых ограничений. Балки усилены накладками поверху, которые представляют собой планки из материала RSPC размером 7,62 см на 30,48 см и 7,62 см на 25,4 см, приклеенные и прикрученные к балкам. Рельсовые шпильки из материала RSPC передают нагрузку с рельсов на балки и соединяются с балками J-образными болтами [11; 29].

Мост № 7 представляет собой восьмипролетное сооружение длиной 25,625 м.



1 — рельсовая стяжка (материал RPL); 2 — анкерная плита; 3 — направляющий рельс; 4 — главный рельс; 5 — бордюр (материал RPL); 6 — отметка верха рельса; 7 — блок сдвига (материал RPL); 8 — защитная панель; 9 — тяж; 10 — эластомерная опорная площадка; 11 — несущее ребро жесткости; 12 — двутавровая свайная насадка толщиной 45,72 см; 13 — поперечный соединитель (материал RPL); 14 — уровень воды; 15 — дно реки; 16 — блок (материал RPL)

1 — rail tie (RPL material); 2 — tie plate; 3 — guide rail; 4 — main rail; 5 — road kerb (material RPL); 6 — the mark of the top of the rail; 7 — shear block (RPL material); 8 — protective panel; 9 — tension bar; 10 — elastomeric support platform; 11 — bearing stiffener; 12 — I-beam pile nozzle 45.72 cm thick; 13 — transverse connector (material RPL); 14 — water level; 15 — the bottom of the river; 16 — block (RPL material)

**Рисунок 18.** Поперечное сечение моста № 3 в в/ч  
«Форт Юстис», Вирджиния. секция на промежуточных опорах 2, 3, 4

**Figure 18.** Cross section of bridge No. 3 in the  
Fort Eustis military unit, Virginia. the section on intermediate supports 2, 3, 4  
(источник / source [11])

Он состоит из двух крайних опор и семи промежуточных опор. Крайние опоры поддерживаются четырьмя вертикальными сваями из материала RSPC диаметром 30,48 см, а промежуточные опоры поддерживаются пятью вертикальными и наклонными сваями из материала RSPC диаметром 30,48 см. Пролетное строение состоит из двух трехпролетных неразрезных блоков и одного двухпролетного неразрезного блока. Типовая часть моста № 7 идентична мосту № 3, за исключением расположения свай. Ожидается, что сваи будут забиты на глубину до 13,72 м с минимальным опорным давлением 20 тонн на сваю [11; 29].

### 4.3 Мост через реку Твид в Шотландии

#### 4.3 Bridge over the River Tweed in Scotland

Недавно основанная в Уэльсе (Великобритания) молодая компания Vertech оказала большую помощь окружающей среде тем, что переработала 50 тонн полимерных отходов и построила из них пешеходный мост шириной 2.7 метра, который смог бы выдержать нагрузку от грузовых транспортных средств, он пересекает реку Твид в Шотландии (рис. 19).



**Рисунок 19.** Пешеходный пластиковый мост через реку Твид выдерживает грузовик

**Figure 19.** A pedestrian plastic bridge over the Tweed River withstanding a truck

(источник / source <https://sintezgaz.org.ua/energonovosti/309/most-iz-pererabotannogo-plastika> — дата обращения 10.11.2021 г.)

Работая совместно с архитекторами и инженерами американского Ратгерского университета и британского Кардиффского университета, компания добилась отличного результата. Все элементы моста состояли на 100 % из полимерных материалов вторичного производства. Теперь он

является частью горного пешеходного маршрута John Buchan Way, который сейчас очень популярен среди приезжающих сюда туристов<sup>3</sup>.

Преимущества такого моста, кроме того, что он выполнен с использованием десятков тонн переработанных полимерных материалов, которые бы иначе оказались на местной свалке или были закопаны, причиняя вред окружающей среде, заключаются и в том, что он не подвержен коррозии, требует минимального обслуживания и не нуждается в покраске. Помимо этого, весь процесс сооружения моста (изготовление частей и сборка на месте) занял всего 2 недели (рис. 20)<sup>4</sup>.



**Рисунок 20.** Монтаж элементов  
пролетного строения пешеходного моста через реку Твид

**Figure 20.** Installation of superstructure  
elements of the pedestrian bridge over the river Tweed

(источник / source <https://sintezgaz.org.ua/energonovosti/309/most-iz-pererabotannogo-plastika> — дата обращения 10.11.2021г.)

## Заключение

### Conclusion

Область применения переработанного пластика весьма широка и отличается многообразием технологических процессов. Он часто используется для производства пленки, емкостей самого разного объема, различных полуфабрикатов, ирригационных труб. Другой пример массового применения переработанного пластика это производство строительных и отделочных материалов, строительство прибрежных сооружений, таких как отбойники, причалы и пирсы и т. п., а так же применение в мостостроении (производство конструкций и элементов мостовых сооружений, устройство дорожного покрытия из полимерных материалов вторичного производства). Материалы из переработанного

<sup>3</sup> <https://sintezgaz.org.ua/energonovosti/309/most-iz-pererabotannogo-plastika> — дата обращения 10.11.2021 г.

пластика успешно применены в строительстве и реконструкции автодорожных и железнодорожных мостов; строительстве мостов быстрого развертывания; временных мостов и в других областях, где желательна долговечность, устойчивость и ускоренное строительство в сочетании с преимуществами экологически безопасных продуктов. Расчетные допущения для моста в в/ч «Форт-Брэгг» впоследствии были подтверждены в процессе мониторинга с использованием контрольно-измерительных приборов.

Продукция из полимерных материалов после вторичной переработки предлагает множество экологических преимуществ, благодаря возможности повторно использовать то, что в противном случае было бы вечным, не разлагающимся пластиком на свалках. Это обеспечивает экономию энергии во время производства, снижает деградацию лесов, доказывая, что строительный продукт не подвержен коррозии и гниению, а также не подвержен атакам насекомых или морских организмов, при этом обеспечивая стабильную легкую платформу, подходящую для ускоренного строительства с минимальным обслуживанием. Его использование, несомненно, будет расти по мере появления новых идей, что станет в свою очередь большим шагом в улучшении экологии нашей планеты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Вольфсон, С.А.** Вторичная переработка полимеров / С.А. Вольфсон // Высокомолекулярные соединения. Серия С. — 2000. — Т 42. — № 11. — С. 2000–2014. — URL: [http://www.polymsci.ru/static/Archive/2000/VMS\\_2000\\_T42\\_11/VMS\\_2000\\_T42\\_11\\_2000-2014.pdf](http://www.polymsci.ru/static/Archive/2000/VMS_2000_T42_11/VMS_2000_T42_11_2000-2014.pdf) (дата обращения: 12.05.2022).
2. **Пугин, К.Г.** Разработка технологии использования отходов пластика в дорожном строительстве / К.Г. Пугин, В.К. Пугина // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. — 2020. — № 3. — С. 21–28. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43994742> (дата обращения: 12.05.2022).
3. **Cressey, D.** Bottles, bags, ropes and toothbrushes: the struggle to track ocean plastics / D. Cressey. — DOI <https://doi.org/10.1038/536263a> // Nature. — 2016. — Т 536. — С. 263–265. — URL: <https://www.nature.com/articles/536263a> (дата обращения: 12.05.2022).
4. **Xanthos, D.** International policies to reduce plastic marine pollution from single-use plastics (plastic bags and microbeads): A review / D. Xanthos, T. R. Walker. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.02.048> // Marine Pollution Bulletin. — 2017. — Т 118. — № 1–2. — С. 17–26. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X17301650> (дата обращения: 12.05.2022).
5. **Sebille, E.** The ocean plastic pollution challenge: towards solutions in the UK / E. Sebille, C. Spathi, A. Gilbert. — Лондон: Imperial College London, 2016. — 16 с. — URL: [https://www.researchgate.net/publication/305640734\\_The\\_ocean\\_plastic\\_pollution\\_challenge\\_towards\\_solutions\\_in\\_the\\_UK](https://www.researchgate.net/publication/305640734_The_ocean_plastic_pollution_challenge_towards_solutions_in_the_UK) (дата обращения: 12.05.2022).



6. **Bergmann, M.** Citizen scientists reveal: Marine litter pollutes Arctic beaches and affects wild life / M. Bergmann, B. Lutz, M.B. Tekman, L. Gutow. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.055> // Marine Pollution Bulletin. — 2017. — Т 125. — № 1–2. — С. 535–540. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X17307919> (дата обращения: 12.05.2022).
7. **Jambeck, J.R.** Plastic waste inputs from land into the ocean / J.R. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, T.R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan, K.L. Law. — DOI <https://doi.org/10.1126/science.1260352> // Science. — 2015. — Т 347. — № 6223. — С. 768–771. — URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1260352> (дата обращения: 12.05.2022).
8. **Eriksen, M.** Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea / M. Eriksen, L.C.M. Lebreton, H.S. Carson, M. Thiel, C.J. Moore, J.C. Borerro [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913> // PLoS ONE. — 2014. — Т 9. — № 12. — С. e111913. — URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0111913> (дата обращения: 12.05.2022).
9. **Matsuguma, Y.** Microplastics in Sediment Cores from Asia and Africa as Indicators of Temporal Trends in Plastic Pollution / Y. Matsuguma, H. Takada, H. Kumata, H. Kanke, S. Sakurai, T. Suzuki, M. Itoh, Y. Okazaki, R. Boonyatumanond, M.P. Zakaria, S. Weerts, B. Newman. — DOI <https://doi.org/10.1007/s00244-017-0414-9> // Arch Environ Contam Toxicol. — 2017. — Т 73. — № 2. — С. 230–239. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28534067/> (дата обращения: 12.05.2022).
10. **Rochman, C.M.** Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress / C.M. Rochman, E. Hoh, T. Kurobe, S.J. Teh. — DOI <https://doi.org/10.1038/srep03263> // Scientific Reports. — 2013. — Т 3. — № 1. — С. 3263. — URL: <https://www.nature.com/articles/srep03263> (дата обращения: 12.05.2022).
11. **Nosker, T.J.** The Utilization of Recycled Thermoplastic Composites for Civil and Military Load Bearing Applications / T.J. Nosker, J.K. Lynch, R.G. Lampo. — DOI [https://doi.org/10.1007/978-94-007-2357-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2357-3_10) // Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Infrastructure Applications. Strategies for Sustainability / Под ред. Jain R., Lee L. Дордрехт: Springer, 2012. — С. 193–218. — URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-2357-3\\_10](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-2357-3_10) (дата обращения: 29.05.2022).
12. **Jackson, L.** Technology, Applicability, and Future of Thermoplastic Timber / L. Jackson, T. Nosker // Proceedings of the DoD Corrosion Conference 2009, held August 10–14 at Gaylord National Resort and Convention Center in National Harbor / Мэриленд Б. и., 2009. — URL: [https://www.researchgate.net/publication/228838241\\_Technology\\_Applicability\\_and\\_Future\\_of\\_Thermoplastic\\_Timber](https://www.researchgate.net/publication/228838241_Technology_Applicability_and_Future_of_Thermoplastic_Timber) (дата обращения: 29.05.2022).
13. **Пищулин, И.** Прямая экструзия высоконаполненных ПК / И. Пищулин // ПЛАСТИКС: индустрия переработки пластмасс. — 2013. — № 9/І. — С. 38–42.
14. **Ravve, A.** Principles of Polymer Chemistry. Third Edition / A. Ravve. — DOI <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2212-9>. — Нью-Йорк: Springer New York, 2012. — 801 с. — URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4614-2212-9> (дата обращения: 29.05.2022).
15. **La Mantia, F.P.** Recycling of PVC and Mixed Plastic Waste / F.P. La Mantia. — Торонто: ChemTec Publishing, 1996. — 199 с.
16. **Beyler, C.L.** Thermal Decomposition of Polymers / C.L. Beyler, M.M. Hirschler // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 2, Section 1, Chapter 7 / Куинси: National Fire Protection Association (NFPA), 2002. — С. 111–131. — URL: [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgict55\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1811388](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgict55))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1811388) (дата обращения: 29.05.2022).
17. **González-González, V.A.** Polypropylene chain scissions and molecular weight changes in multiple extrusion / V.A. González-González, G. Neira-Velázquez, J.L. Angulo-Sánchez. — DOI [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(96\)00233-9](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(96)00233-9) // Polymer Degradation and Stability. — 1998. — Т 60. — № 1. — С. 33–42. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391096002339> (дата обращения: 29.05.2022).
18. **Pinheiroa, L.A.** The role of chain scission and chain branching in high density polyethylene during thermo-mechanical degradation / L.A. Pinheiroa, M.A. Chinellatto, S.V. Canevarolo. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.05.016> // Polymer Degradation and Stability. — 2004. — Т 86. — № 3. — С. 445–453. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391004002058> (дата обращения: 29.05.2022).



19. **Qian, S.** Thermal degradation behavior of polypropylene in the melt state: molecular weight distribution changes and chain scission mechanism / S. Qian, T. Igarashi, Kh. Nitta. — DOI <https://doi.org/10.1007/s00289-011-0560-6> // Polymer Bulletin. — 2011. — Т 67. — № 8. — С. 1661–1670. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00289-011-0560-6> (дата обращения: 29.05.2022).
20. **Delva, L.** The Effect of Multiple Extrusions on the Properties of Montmorillonite Filled Polypropylene / L. Delva, K. Ragaert, J. Degrieck, L. Cardon. — DOI <https://doi.org/10.3390/polym6122912> // Polymers. — 2014. — Т 6. — № 12. — С. 2912–2927. — URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/6/12/2912> (дата обращения: 29.05.2022).
21. **Geyer, B.** Recycling of poly (ethylene terephthalate) — A review focusing on chemical methods / B. Geyer, G. Lorenz, A. Kandelbauer. — DOI <https://doi.org/10.3144/EXPRESSPOLYMLET.2016.53> // Express Polymer Letters. — 2016. — Т 10. — № 7. — С. 559–586. — URL: [http://www.expresspolymlett.com/letolt\\_uj.php?file=EPL-0006898&mi=c](http://www.expresspolymlett.com/letolt_uj.php?file=EPL-0006898&mi=c) (дата обращения: 29.05.2022).
22. **Braun, D.** Recycling of PVC / D. Braun. — DOI [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(02\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(02)00036-9) // Progress in Polymer Science. — 2002. — Т 27. — № 10. — С. 2171–2195. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670002000369> (дата обращения: 07.06.2022).
23. **Ulutun, S.** Influence of additional thermal stabilizers on the reprocessing of postconsumer poly (vinyl chloride) bottles / S. Ulutan. — DOI <https://doi.org/10.1002/app.13133> // Journal of Applied Polymer Science. — 2003. — Т 90. — № 14. — С. 3994–3999. — URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.13133> (дата обращения: 07.06.2022).
24. **Murphy J.** Other Types of Additive: Additives for Recycling / J. Murphy. — DOI <https://doi.org/10.1016/B978-185617370-4/50022-1> // Additives for Plastics Handbook. 2nd Edition / Амстердам: Elsevier, 2001. — С. 237–244. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781856173704500221> (дата обращения: 07.06.2022).
25. **Dimonie, D.** Overview on Mechanical Recycling by Chain Extension of POSTC-PET Bottles / D. Dimonie, R. Socoteanu, S. Pop, I. Fierascu, R. Fierascu, C. Petrea, C. Zaharia, M. Petrache. — DOI <https://doi.org/10.5772/31841> // Material Recycling — Trends and Perspectives / Под ред. Achillas D.S. — Лондон: IntechOpen, 2012. — URL: <https://www.intechopen.com/chapters/32562> (дата обращения: 07.06.2022).
26. **Su, K.H.** Influence of reprocessing on the mechanical properties and structure of polyamide 6 / K.H. Su, J.H. Lin, C.C. Lin. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.056> // Journal of Materials Processing Technology. — 2007. — Т 192–193. — С. 532–538. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013607003986> (дата обращения: 07.06.2022).
27. **La Mantia, F.P.** Basic concepts on the recycling of homogeneous and heterogeneous plastics / F.P. La Mantia // Recycling of PVC and Mixed Plastic Waste / Торонто: ChemTec Publishing, 1996. — С. 63–76.
28. **Xiang, Q.** Effects of melt reprocessing on volatile emissions and structural/rheological changes of unstabilized polypropylene / Q. Xiang, M. Xanthos, S. Mitra, S.H. Patel, J. Guo. — DOI [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00083-6](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00083-6) // Polymer Degradation and Stability. — 2002. — Т 77. — № 1. — С. 93–102. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391002000836> (дата обращения: 07.06.2022).
29. **Finney, D.** Recycled plastic bridge at Fort Bragg stands up to M-1 traffic / D. Finney // DPW Digest. — 2009. — С. 5.
30. **Breslin, V.T.** Long-term engineering properties of recycled plastic lumber used in pier construction / V.T. Breslin, U. Senturk, C.C. Berndt. — DOI [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(98\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(98)00024-X) // Resources, Conservation and Recycling. — 1998. — Т 23. — № 4. — С. 243–258. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092134499800024X> (дата обращения: 07.06.2022).

31. **Lampo, R.G.** Development and testing of plastic lumber materials for construction applications / R.G. Lampo, T.J. Nosker. — Спрингфилд US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratories, 1997. — 88 с. — URL: [https://webharvest.gov/peth04/20041027062443/http://www.cecer.army.mil/techreports/lamlum/LAMLUM\\_post.PDF](https://webharvest.gov/peth04/20041027062443/http://www.cecer.army.mil/techreports/lamlum/LAMLUM_post.PDF) (дата обращения: 07.06.2022).

#### Сведения об авторах:

**Аншваев Адиль Кайрулович** — аспирант кафедры «Транспортное строительство (ТСТ)», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия, e-mail: [anshvaevadil@inbox.ru](mailto:anshvaevadil@inbox.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8103-272X>

**Овчинников Игорь Георгиевич** — доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильные дороги и мосты», ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия, профессор кафедры «Транспортное строительство», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия, e-mail: [bridgesar@mail.ru](mailto:bridgesar@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>

Статья получена: 11.07.2022. Принята к публикации: 22.08.2022. Опубликовано онлайн: 06.09.2022.

## REFERENCES

1. Wolfson S.A. Polymer Recycling. *Polymer Science, Series C*. 2000; 42(11): 2000–2014. Available at: [http://www.polymsci.ru/static/Archive/2000/VMS\\_2000\\_T42\\_11/VMS\\_2000\\_T42\\_11\\_2000-2014.pdf](http://www.polymsci.ru/static/Archive/2000/VMS_2000_T42_11/VMS_2000_T42_11_2000-2014.pdf) (accessed 12th May 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Pugin K.G., Pugina V.K. Development of Technology for Using Plastic Waste in Road Construction. *Transport. Transport facilities. Ecology*. 2020; (3): 21–28. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43994742> (accessed 12th May 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
3. Cressey D. Bottles, bags, ropes and toothbrushes: the struggle to track ocean plastics. *Nature*. 2016; 536: 263–265. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1038/536263a>.
4. Xanthos D., Walker T.R. International policies to reduce plastic marine pollution from single-use plastics (plastic bags and microbeads): A review. *Marine Pollution Bulletin*. 2017; 118(1–2): 17–26. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.02.048>.
5. Seville E., Spathi C., Gilbert A. The ocean plastic pollution challenge: towards solutions in the UK. London: Imperial College London; 2016. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/305640734\\_The\\_ocean\\_plastic\\_pollution\\_challenge\\_towards\\_solutions\\_in\\_the\\_UK](https://www.researchgate.net/publication/305640734_The_ocean_plastic_pollution_challenge_towards_solutions_in_the_UK) (accessed 12th May 2022). (In Eng.).
6. Bergmann M., Lutz B., Tekman M.B., Gutow L. Citizen scientists reveal: Marine litter pollutes Arctic beaches and affects wild life. *Marine Pollution Bulletin*. 2017; 125(1–2): 535–540. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.055>.
7. Jambeck J.R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T.R., Perryman M., Andrady A., Narayan R., Law K.L. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science in China, Series B*. 2015; 347(6223): 768–771. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1260352>.
8. Eriksen M., Lebreton L.C.M., Carson H.S., Thiel M., Moore C.J., Borerro J.C., et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLoS ONE*. 2014; 9(12): e111913. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>.
9. Matsuguma Y., Takada H., Kumata H., Kanke H., Sakurai S., Suzuki T., Itoh M., Okazaki Y., Boonyatumanond R., Zakaria M.P., Weerts S., Newman B. Microplastics in Sediment Cores from Asia and Africa as Indicators of Temporal Trends in Plastic Pollution. *Arch Environ Contam Toxicol*. 2017; 73(2): 230–239. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00244-017-0414-9>.

10. Rochman C.M., Hoh E., Kurobe T., Teh S.J. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Scientific Reports*. 2013; 3(1): 3263. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1038/srep03263>.
11. Nosker T.J., Lynch J.K., Lampo R.G. The Utilization of Recycled Thermoplastic Composites for Civil and Military Load Bearing Applications. In: Jain, R., Lee, L. (eds). *Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Infrastructure Applications. Strategies for Sustainability*. Dordrecht: Springer; 2012. p. 193–218. Available at: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-2357-3\\_10](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-2357-3_10) (accessed 29th May 2022). (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-2357-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2357-3_10).
12. Jackson L., Nosker T. Technology, Applicability, and Future of Thermoplastic Timber. In: *Proceedings of the DoD Corrosion Conference 2009, held August 10–14 at Gaylord National Resort and Convention Center in National Harbor, Maryland; 2009*. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/228838241\\_Technology\\_Applicability\\_and\\_Future\\_of\\_Thermoplastic\\_Timber](https://www.researchgate.net/publication/228838241_Technology_Applicability_and_Future_of_Thermoplastic_Timber) (accessed 29th May 2022). (In Eng.).
13. Pishchulin I. Pryamaya ekstruziya vysokonapolnennykh PK [Direct extrusion of highly filled polymer composites]. *PLASTIKS: industriya pererabotki plastmass [PLASTICS: the plastics processing industry]*. 2013; (9/I): 38–42. (In Russ.).
14. Ravve A. *Principles of Polymer Chemistry*. Third Edition. New York: Springer New York; 2012. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4614-2212-9> (accessed 29th May 2022). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2212-9>.
15. La Mantia F.P. *Recycling of PVC and Mixed Plastic Waste*. Toronto: ChemTec Publishing; 1996. (In Eng.).
16. Beyler C.L., Hirschler M.M. Thermal Decomposition of Polymers. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 2, Section 1, Chapter 7*. Quincy: National Fire Protection Association (NFPA); 2002. p. 111–131. Available at: [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgict55\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1811388](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgict55))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1811388) (accessed 29th May 2022). (In Eng.).
17. González-González V.A., Neira-Velázquez G., Angulo-Sánchez J.L. Polypropylene chain scissions and molecular weight changes in multiple extrusion. *Polymer Degradation and Stability*. 1998; 60(1): 33–42. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(96\)00233-9](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(96)00233-9).
18. Pinheiroa L.A., Chinelatto M.A., Canevarolo S.V. The role of chain scission and chain branching in high density polyethylene during thermo-mechanical degradation. *Polymer Degradation and Stability*. 2004; 86(3): 445–453. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.05.016>.
19. Qian S., Igarashi T., Nitta Kh. Thermal degradation behavior of polypropylene in the melt state: molecular weight distribution changes and chain scission mechanism. *Polymer Bulletin*. 2011; 67(8): 1661–1670. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-011-0560-6>.
20. Delva L., Ragaert K., Degrieck J., Cardon L. The Effect of Multiple Extrusions on the Properties of Montmorillonite Filled Polypropylene. *Polymers*. 2014; 6(12): 2912–2927. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/polym6122912>.
21. Geyer B., Lorenz G., Kandelbauer A. Recycling of poly (ethylene terephthalate) — A review focusing on chemical methods. *Express Polymer Letters*. 2016; 10(7): 559–586. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3144/EXPRESSPOLYMLETT.2016.53>.
22. Braun D. Recycling of PVC. *Progress in Polymer Science*. 2002; 27(10): 2171–2195. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(02\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(02)00036-9).
23. Ulutan S. Influence of additional thermal stabilizers on the reprocessing of postconsumer poly (vinyl chloride) bottles. *Journal of Applied Polymer Science*. 2003; 90(14): 3994–3999. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/app.13133>.
24. Murphy J. Other Types of Additive: Additives for Recycling. In: *Additives for Plastics Handbook. 2nd Edition*. Amsterdam: Elsevier; 2001. p. 237–244. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781856173704500221> (accessed 7th June 2022). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-185617370-4/50022-1>.

25. Dimonie D., Socoteanu R., Pop S., Fierascu I., Fierascu R., Petrea C., Zaharia C., Petrache M. Overview on Mechanical Recycling by Chain Extension of POSTC-PET Bottles. In: Achilias D.S. (Ed.). *Material Recycling — Trends and Perspectives*. London: IntechOpen; 2012. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/32562> (accessed 7th June 2022). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5772/31841>.
26. Su K.H., Lin J.H., Lin C.C. Influence of reprocessing on the mechanical properties and structure of polyamide 6. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007; 192–193: 532–538. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.056>.
27. La Mantia F.P. Basic concepts on the recycling of homogeneous and heterogeneous plastics. In: *Recycling of PVC and Mixed Plastic Waste*. Toronto: ChemTec Publishing; 1996. p. 63–76. (In Eng.).
28. Xiang Q., Xanthos M., Mitra S., Patel S.H., Guo J. Effects of melt reprocessing on volatile emissions and structural/rheological changes of unstabilized polypropylene. *Polymer Degradation and Stability*. 2002; 77(1): 93–102. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00083-6](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00083-6).
29. Finney D. Recycled plastic bridge at Fort Bragg stands up to M-1 traffic. *DPW Digest*. 2009; 5. (In Eng.).
30. Breslin V.T., Senturk U., Berndt C.C. Long-term engineering properties of recycled plastic lumber used in pier construction. *Resources, Conservation and Recycling*. 1998; 23(4): 243–258. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(98\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(98)00024-X).
31. Lampo R.G., Nosker T.J. Development and testing of plastic lumber materials for construction applications. Springfield: US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratories; 1997. Available at: [https://webharvest.gov/peth04/20041027062443/http://www.cecer.army.mil/techreports/lamlum/LAMLUM\\_post.PDF](https://webharvest.gov/peth04/20041027062443/http://www.cecer.army.mil/techreports/lamlum/LAMLUM_post.PDF) (accessed 7th June 2022). (In Eng.).

---

**Information about the authors:**

**Adil K. Anshvaev** — Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, Russia,  
e-mail: [anshvaevadil@inbox.ru](mailto:anshvaevadil@inbox.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8103-272X>

**Igor G. Ovchinnikov** — Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, Saratov State  
Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, Russia, e-mail: [bridgesar@mail.ru](mailto:bridgesar@mail.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>

---

Submitted: 11th July 2022. Revised: 22nd August 2022. Published online: 6th September 2022.