



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

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.48> EDN: VBPGSL**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПЕНОПЛАСТОВ**

Научная статья

Христофоров А.И.¹, Христофорова И.А.^{2,*}, Смирнов Е.А.³¹ORCID : 0000-0002-0143-5175;²ORCID : 0000-0002-4768-4425;^{1,2,3}Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), Владимир, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (khrstoforova-i[at]mail.ru)

Аннотация

Показана возможность формирования полимерных композитов из отходов пенопластов и наполнителя песка горячим прессованием. Установлено, что технологические параметры находятся в сложной взаимосвязи с составом разработанного материала с его свойствами. По результатам исследований получен композит со следующими характеристиками: плотность — 1568 ± 89 кг/м³, прочность на сжатие — $1,20 \pm 0,03$ МПа, водопоглощение — $4 \pm 1\%$. Полученный материал можно будет рекомендовать использовать как отделочную и тротуарную плитку разных цветов и размеров, химически-, бензо-, био- и маслоустойчивые напольные и оконные покрытия в химических предприятиях, агротехнических и сельскохозяйственных комплексах, автозаправочных станциях, авиастроении, теплоизоляции, канализационных люков, погонажных изделий, настилов полов животноводческих ферм.

Ключевые слова: полимерный композит, отходы полимеров, горячее прессование, наполнитель, песок, пенополивинилхлорид, пенополистирол.

POLYMER COMPOSITES BASED ON FOAM WASTE

Research article

Khristoforov A.I.¹, Khristoforova I.A.^{2,*}, Smirnov E.A.³¹ORCID : 0000-0002-0143-5175;²ORCID : 0000-0002-4768-4425;^{1,2,3}Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VLSU), Vladimir, Russian Federation

* Corresponding author (khrstoforova-i[at]mail.ru)

Abstract

The possibility of forming polymer composites from foam plastic waste and sand filler using hot pressing is demonstrated. It has been established that the process parameters are in a complex relationship with the composition and properties of the developed material. Based on the research results, a composite with the following characteristics was obtained: density — 1568 ± 89 kg/m³, compressive strength — $1,20 \pm 0,03$ MPa, water absorption — $4 \pm 1\%$. The developed material can be used as finishing and paving slabs of various colors, chemical-, gasoline-, bio- and oil-resistant flooring, windows in chemical industries, agro-technical and agricultural complexes, gas stations, aircraft manufacturing, thermal insulation, sewer manholes, moldings, flooring for livestock farms.

Keywords: polymer composite, polymer waste, hot pressing, filler, sand, polyvinyl chloride foam, polystyrene foam.

Введение

Поливинилхлорид (ПВХ), полистирол (ПС) и пенопласты на их основе применяются как в промышленности, так и в строительстве и бытовых нуждах, поэтому отходы этих материалов накапливаются в огромном количестве (бытовые, технологическое сырьё, остатки оконных профилей и упаковочных плёнок, кабельный пластикат, трубы, обрезки).

На данный момент в России существуют разработки по получению из ПВХ и древесных отходов профильно-погонажных изделий [1], [2], [3], дверных и оконных профилей, труб [4], изготовления строительных изделий из смеси полимерных отходов полиэтилена, полистирола, поливинилхлорида [5].

Используют для получения изделий различного назначения в основном первичный полимер или его отходы, собираемые у населения и промышленных предприятий [6], [8], [9], [11].

Как показывает практика, за границей отходы полимеров и композитов утилизируются в основном пиролизом, сжиганием, фото- или биоразложением, а также банальным захоронением. Довольно широко известно, что композиты изготавливаются из первичных материалов [12], [13], [14], а вот такие изделия, как предметы культурно-бытового назначения, промышленности, строительства, теплоизоляции и т.д. возможно и нужно перерабатывать повторно для получения новых продуктов потребления. Становится понятно и очевидно, что композиционные материалы на их основе довольно выгодно из-за растущего на них годами спроса, а вместе с тем и не теряющих своей актуальности вопросов охраны окружающей среды.

Соответствующая литература и патентная информация показывают, что разработки по утилизации отходов пенопластов для получения полимербетонов на данный момент не выявлены. Поэтому тематика научных исследований является актуальной.

Исходя из вышесказанного, целью работы явилось создание композитного материала на основе отходов пенопластов ПВХ и ПС с высокими техническими параметрами, эксплуатационными и физико-механическими свойствами.

В соответствии с целью поставлены следующие задачи:

- Исследовать достижения в развитии технологии в утилизации отходов пенопластов на мировом уровне.
- Проанализировать технологические параметры получения композитов.
- Изучить свойства полученных образцов и их зависимость от показателей.
- Рекомендовать состав, технологические параметры и свойства на внедрение в производство.

Методы и принципы исследования

Для исследования выбраны следующие составляющие: отходы пенопластов — ППВХ и ППС, диоктилфталат (ДОФ) и наполнитель — песок, свойства которых представлены ниже.

Отходы пенопластов — это смесь дробленных отходов теплоизоляционных материалов из ПВХ и ПС с предприятия, производящего теплоизоляцию (г. Владимир). В ходе экспериментальных данных было получено, что пенополивинилхлорида в отходах содержится в количестве 78%, а пенополистирола — 22%. Данные по фракционному составу отходов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Фракционный состав отходов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.48.1>

Содержание отходов по фракциям, масс. %	Фракция, мм				
	> 1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	< 0,1
	1,92	2,40	14,76	27,58	53,34

Чтобы улучшить свойства готовых материалов и перерабатываемость, а также повысить связь компонентов между собой, использовался диоктилфталат (ГОСТ 8728-88) — самый распространенный пластификатор для ПВХ.

Для наполнения композитов использовался песок, взятый из Улыбышевского карьера во Владимирской области, (ГОСТ 8736-93). Ситовый определен при исследовании (табл.2). Для получения образцов взята фракция 0,315:0,63 мм, так как она лучше перемешивается в композиции, в отличие от более мелких фракций.

Таблица 2 - Фракционный состав песка

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.48.2>

Размер сита, №	0,315,0,63
Доля фракции, мас. %	37,0

Ингредиенты взвешивались, а затем шло перемешивание в шаровой мельнице. Образцы получали горячим прессованием. После получения образцов проводились следующие испытания: прочность при 10%-сжатии $\sigma_{сж}$ (ГОСТ 10180-2012), плотность (ГОСТ 12730.1-78), водопоглощение (ГОСТ 12730.3-78).

Для хорошей сходимости результатов, малой погрешности и рассеянии при математическом моделировании применён план Бокса-Бенкина (размерность — K=3) [15].

Основные результаты

Суть данного плана состоит в реализации 17 опытов с варьированием значений трёх выбранных компонентов (табл. 3). Зафиксированные параметры — температура, время изготовления образцов и давление прессования.

Таблица 3 - Факторы и уровни их варьирования

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.48.3>

Фактор	Обозначение	Единицы измерения	Уровни варьирования факторов		
			верхний	нулевой	нижний
			Кодированное обозначение		
			+1	0	-1
Отходы	X ₁	Мас.ч	110	100	90
ДОФ	X ₂	Мас.ч	52	46	40

Фактор	Обозначение	Единицы измерения	Уровни варьирования факторов		
			верхний	нулевой	нижний
			Кодированное обозначение		
			+1	0	-1
Песок	X ₃	Мас.ч	80	70	60

После проведения эксперимента получили экспериментальные данные, которые сведены в таблицу 4.

Таблица 4 - Параметры выхода системы проведенного эксперимента

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.48.4>

№ образца	Плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Прочность при сжатии, МПа
1	1490	6	1,1
2	1483	6,5	0,94
3	1513	7,5	0,74
4	1553	8,8	0,91
5	1312	9	0,95
6	1342	9	1,14
7	1408	9,5	0,9
8	1340	9,5	0,82
9	1378	9	0,89
10	1324	12	0,81
11	1354	10	0,87
12	1377	11	0,87
13	1513	2,5	1,17
14	1485	5	1,15
15	1697	4,5	1,18
16	1623	3,5	1,16
17	1520	4,5	1,14

В ходе проведения математического моделирования были получены следующие уравнения регрессии взаимосвязи свойств изделий с их составом:

$$Y_1(\rho, \text{кг/м}^3) = 1567,6 - 184,3x_3^2;$$

$$Y_2(B, \%) = 4 + 2,225x_2^2 + 4,275x_3^2;$$

$$Y_3(\sigma_{сж}, \text{МПа}) = 1,16 + 0,095x_1 - 0,0725x_1^2 - 0,165x_2^2 - 0,135x_3^2 + 0,0825x_1x_2 - 0,0675x_1x_3.$$

По расчетам все модели адекватны.

Адекватность уравнения регрессии оценивали по критерию Фишера F, однако по плану Бокса-Бенкина анализ S_{DU} позволяет допустить применение полиномиальной модели без проверки адекватности. Исходя из сказанного, принимаем, что при условии S{Y₀} > S_{DU} соблюдено и модель считается адекватной [16].

Далее в программе *Microsoft Excel* построили поверхности отклика зависимости свойств материалов от состава композиции.

На рис. 1–3 приведены зависимости свойств материала от состава полимербетона при различных значениях концентраций компонентов.

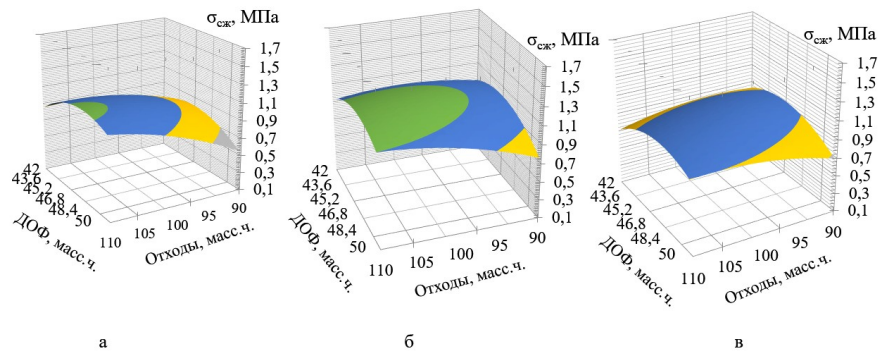


Рисунок 1 - Зависимость прочности при 10 %-ном сжатии полимербетона от концентрации компонентов при различном содержании песка:

a - 60; *б* - 70; *в* - 80

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.48.5>

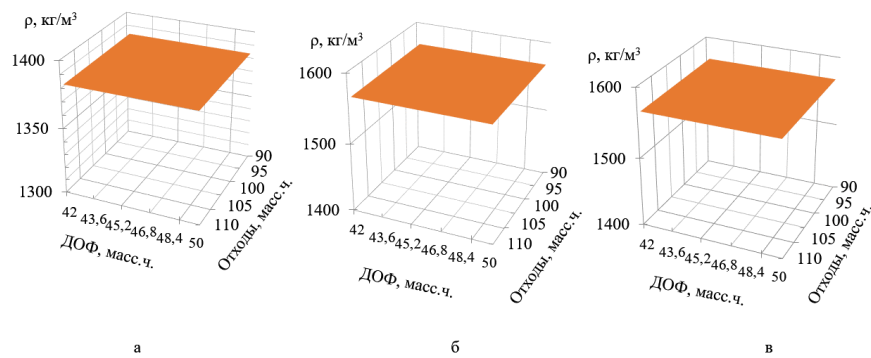


Рисунок 2 - Зависимость плотности полимербетона от концентрации компонентов при различном содержании песка:

a - 60; *б* - 70; *в* - 80

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.48.6>

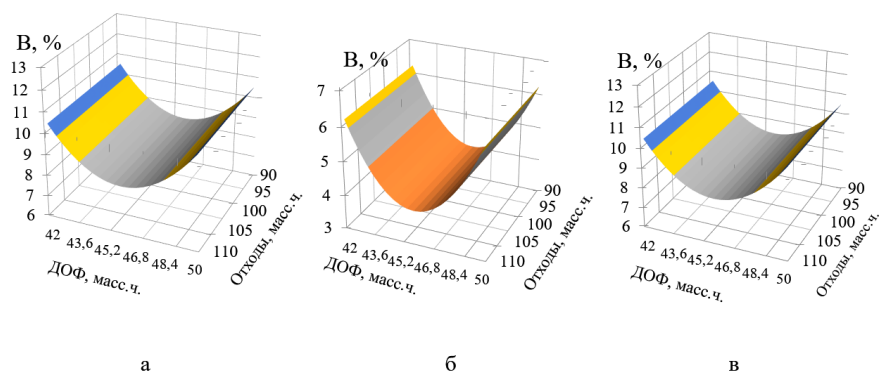


Рисунок 3 - Зависимость водопоглощения полимербетона от концентрации компонентов при различном содержании песка:

a - 60; *б* - 70; *в* - 80

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.48.7>



Исходя из представленных зависимостей видно, что свойства изделий изменяются различным способом от содержания концентрации компонентов композита. Прочность при 10%-ном сжатии изменялась от 0,6 до 1,2 МПа в зависимости от состава. Плотность составила 1383–1568 кг/м³, водопоглощение — от 4 до 11 %.

Было выявлено, что при увеличении концентрации ДОФ водопоглощение и прочность имеют параболическую зависимость свойств, плотность при этом практически не изменяется. При росте концентрации отходов пенопластов водопоглощение и плотность практически не изменяется, прочность растет.

Рост концентрации песка в композиции приводит к увеличению плотности, прочности, водопоглощение же при этом варьируется в пределах 4 – 11%.

В работе также проведено исследование по влиянию технологических параметров на свойства получаемых изделий. Выявлено, что температура горячего прессования не должна превышать 180 °С, время выдержки образцов под термонагрузкой — не более 40 мин. (температура и время обусловлены температурой деструкции полимера). Удельное давление прессования должно составлять 20 МПа.

В таблице 5 приведен сравнительный анализ разработанного композита и выбранного ему аналога.

Таблица 5 - Показатели разработанного композита и аналога

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.48.8>

Характеристики	Аналог (композит на основе полиэтилена)	Разработанный композит на основе отходов
Прочность при сжатии, МПа	0,98	1,20 0,03
Плотность, кг/м ³	1120	1568
Водопоглощение, %	1	4
Температура получения, °С	250	180

Обсуждение

Ранее проведенные исследования показали эффективность создания композитов из термопластичных полимеров, применение которых ограничено из-за сложности переработки и совмещения их с наполнителями [13], [14]. Известны работы по применению полиэтилена как связующего для получения высоконаполненных композитов. Наполнителем использовался песок. Однако данные композиты имеют такие важные недостатки как низкая теплостойкость (до 50 °С), скользкая поверхность и фотодеструкция. Композиты на основе поливинилхлорида и их смесей такими недостатками не обладают.

Заключение

В ходе проведенных исследований были получены высоконаполненные композиты на основе отходов пенопластов поливинилхлорида и полистирола с использованием кремнеземистого наполнителя.

Выявлены зависимости влияния концентрации компонентов композиции на свойства готовых изделий. По полученным уравнениям регрессии и построенным поверхностям отклика следует, что при увеличении количества отходов и концентрации пластификатора плотность находится приблизительно на одном уровне, а при росте концентрации песка происходит увеличение плотности и прочности композита.

Предложен для практического применения состав композита и технологические параметры его производства. Разработанный материал превосходит по своим показателям известный аналог, выпускаемый на рынке строительных материалов.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

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

Conflict of Interest

None declared.

Review

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

Список литературы / References

1. Пат. 2495065 С1 Российская Федерация, МПК С08L 27/06, С08К 5/5415, С08К 3/30. Способ получения экструзионной поливинилхлоридной композиции строительного назначения и композиция, полученная этим способом / Прокопов Н.И., Маркузе И.Ю., Симонов-Емельянов И.Д., Персиц В.Г., Марков А.В., Иванов В.В., Ганиев Э.Ш., Аншин В.С., Марков В.А. — № 2012110911/05; заявл. 22.03.2012; опубл. 10.10.2013.

2. Пат. 2583812 С2 Российская Федерация, МПК С08L 27/06. Полимерная композиция на основе поливинилхлорида / Исламов А.М., Фахрутдинова В.Х., Абдрахманова Л.А., Хозин В.Г. — № 2013125890/05; заявл. 04.06.2013; опубл. 10.05.2016.



3. Пат. 2469976 Российская Федерация, МПК C04B26/08. Способ утилизации отходов с получением огнестойкого строительного материала и композиция для получения огнестойкого строительного материала / Зелинская Е.В., Федор Шуттов Ф.А., Толмачева Н.А., Сутурина Е.О., Баракхтенко В.В., Бурдонов А.Е., Пронин С.А. — № 2011106608/03; заявл. 2011.02.22; опубл. 20.12.2012.
4. Пат. 2210579 Российская Федерация, МПК C08L27/06. Поливинилхлоридная композиция / Гафурьянович Ш.Ф. — № 2000121124/04; заявл. 04.08.2000; опубл. 20.08.2003.
5. Пат. 2302433 Российская Федерация, МПК C08J11/04. Способ переработки отходов пластмасс в строительный материал / Фомин В.В., Каблуков В.И., Торо Р.А., Ожев А.Н. — № 2006117965/04; заявл. 24.05.2006; опубл. 10.07.2007.
6. Пат. 2358993 Российская Федерация, МПК C08L 27/06. Поливинилхлоридная композиция / Галеев Р.Р., Низамов Р.К., Абдрахманова Л.А., Колесникова И.В., Николаева Л.В., Хозин В.Г. — № 2007141087/04; заявл. 26.10.2007; опубл. 20.06.2009.
7. Пат. 2543869 Российская Федерация, МПК C09K21/06. Огнестойкий вспененный полимерный композиционный материал и способ его получения / Есаулов С.К. — № 2013117711/05; заявл. 18.04.2013; опубл. 10.03.2015.
8. Лутфуллаев С.Ш. Стабилизация ПВХ химическими добавками / С.Ш. Лутфуллаев, Ф.Л.К. Давронова // *Universum: химия и биология*. — 2019. — № 7 (61). — С. 31–33.
9. Шварц О. Основы переработки полимеров методом прессования / О. Шварц, Ф.В. Эбелинг, Б. Фурт; под. общ. ред. А.Д. Паниматченко. — Санкт-Петербург: Профессия, 2005. — 320 с.
10. Литвинова Ю.В. Изучение свойств полимербетонов / Ю.В. Литвинова, В.А. Литвинова // *Университетская наука*. — 2019. — № 1 (7). — С. 41–47.
11. Кутырев Г.А. Оценка качества полимерных и композиционных материалов: учебное пособие / Г.А. Кутырев, Л.Р. Галеева, С.С. Ахтямова [и др.]. — Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2019. — 140 с.
12. Кудина Е.Ф. Методы утилизации и рециклинга полимерных композиционных материалов / Е.Ф. Кудина, К.В. Ефимчик // *Полимерные материалы и технологии*. — 2022. — Т. 8. — № 4. — С. 77–86.
13. Христофорова И.А. Полимербетоны на основе термопластов / И.А. Христофорова // *Строительные материалы*. — 2005. — № 4. — С. 56–57.
14. Горячева В.А. Полимербетоны на основе поливинилхлорида, модифицированного силановыми добавками / В.А. Горячева, И.А. Христофорова, А.И. Христофоров // *Строительство и реконструкция*. — Орёл, 2017. — № 5 (73). — С. 102–107.
15. Берикашвили Б.Ш. Статистическая обработка данных, планирование эксперимента и случайные процессы / Б.Ш. Берикашвили, С.П. Оськи. — Москва: Юрайт, 2018. — 263 с.
16. Христофорова И.А. Проведение активного эксперимента при разработке состава шихты для производства керамических изделий: Методические указания к лабораторным занятиям по дисциплине «Статистические методы исследования шихт в стекольной промышленности» / И.А. Христофорова. — Владимир: Владимирский государственный университет, 2000. — 24 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Pat. 2495065 C1 Russian Federation, IPC C08L 27/06, C08K 5/5415, C08K 3/30. Sposob polucheniya ekstruzionnoi polivinilkhloridnoi kompozitsii stroitel'nogo naznacheniya i kompozitsiya, poluchennaya etim sposobom [Method for producing an extruded polyvinyl chloride composition for construction purposes and a composition obtained by this method] / Prokopov N.I., Markuze I.Yu., Simonov-Emelyanov I.D., Persits V.G., Markov A.V., Ivanov V.V., Ganiev E.Sh., Anshin V.S., Markov V.A. — № 2012110911/05; appl. 22.03.2012; publ. 10.10.2013. [in Russian]
2. Pat. 2583812 C2 Russian Federation, IPC C08L 27/06. Polimernaya kompozitsiya na osnove polivinilkhlorida [Polymer composition based on polyvinyl chloride] / Islamov A.M., Fakhrutdinova V.Kh., Abdrakhmanova L.A., Khozin V.G. — № 2013125890/05; appl. 04.06.2013; publ. 10.05.2016. [in Russian]
3. Pat. 2469976 Russian Federation, IPC C04B26/08. Sposob utilizatsii otkhodov s polucheniem ognestoikogo stroitel'nogo materiala i kompozitsiya dlya polucheniya ognestoikogo stroitel'nogo materiala [Method for recycling waste to produce fire-resistant building material and composition for producing fire-resistant building material] / Zelinskaya Ye.V., Fedor Shutov F.A., Tolmacheva N.A., Suturina Ye.O., Barakhtenko V.V., Burdonov A.E., Pronin S.A. — № 2011106608/03; appl. 2011.02.22; publ. 20.12.2012. [in Russian]
4. Pat. 2210579 Russian Federation, IPC C08L27/06. Polivinilkhloridnaya kompozitsiya [Polyvinyl chloride composition] / Gafuryanovich Sh.F. — № 2000121124/04; appl. 04.08.2000; publ. 20.08.2003. [in Russian]
5. Pat. 2302433 Russian Federation, IPC C08J11/04. Sposob pererabotki otkhodov plastmass v stroitel'nii material [Method for processing plastic waste into construction material] / Fomin V.V., Kablukov V.I., Toro R.A., Ozhev A.N. — № 2006117965/04; appl. 24.05.2006; publ. 10.07.2007. [in Russian]
6. Pat. 2358993 Russian Federation, IPC C08L 27/06. Polivinilkhloridnaya kompozitsiya [Polyvinyl chloride composition] / Galeev R.R., Nizamov R.K., Abdrakhmanova L.A., Kolesnikova I.V., Nikolaeva L.V., Khozin V.G. — № 2007141087/04; appl. 26.10.2007; publ. 20.06.2009. [in Russian]
7. Pat. 2543869 Russian Federation, IPC C09K21/06. Ognestoikii vspenennii polimernii kompozitsionnii material i sposob yego polucheniya [Fire-resistant foamed polymer composite material and method for producing same] / Yesaulov S.K. — № 2013117711/05; appl. 18.04.2013; publ. 10.03.2015. [in Russian]
8. Lutfullaev S.Sh. Stabilizatsiya PVKh khimicheskimi dobavkami [Stabilization of PVC with chemical additives] / S.Sh. Lutfullaev, F.L.K. Davronova // *Universum: khimiya i biologiya* [Universum: chemistry and biology]. — 2019. — № 7 (61). — P. 31–33. [in Russian]



9. Shvarts O. Osnovi pererabotki polimerov metodom pressovaniya [Fundamentals of Polymer Processing by Pressing] / O. Shvarts, F.V. Ebeling, B. Furt; ed. by A.D. Panimatchenko. — Saint Petersburg: Professiya, 2005. — 320 p. [in Russian]
10. Litvinova Yu.V. Izuchenie svoystv polimerbetonov [Study of the Properties of Polymer Concretes] / Yu.V. Litvinova, V.A. Litvinova // Universitetskaya nauka [University Science]. — 2019. — № 1 (7). — P. 41–47. [in Russian]
11. Kutirev G.A. Otsenka kachestva polimernikh i kompozitsionnikh materialov: uchebnoe posobie [Assessment of the quality of polymeric and composite materials: a tutorial] / G.A. Kutirev, L.R. Galeeva, S.S. Akhtyamova [et al.]. — Kazan: Kazan National Research Technological University, 2019. — 140 p. [in Russian]
12. Kudina E.F. Metodi utilizatsii i retsiklinga polimernikh kompozitsionnikh materialov [Methods of utilization and recycling of polymer composite materials] / E.F. Kudina, K.V. Yefimchik // Polimernie materialy i tekhnologii [Polymer materials and technologies]. — 2022. — Vol. 8. — № 4. — P. 77–86. [in Russian]
13. Khristoforova I.A. Polimerbetoni na osnove termoplastov [Polymer concretes based on thermoplastics] / I.A. Khristoforova // Stroitelnye materialy [Construction materials]. — 2005. — № 4. — P. 56–57. [in Russian]
14. Goryacheva V.A. Polimerbetoni na osnove polivinilkhlorida, modifitsirovannogo silanovimi dobavkami [Polymer concretes based on polyvinyl chloride modified with silane additives] / V.A. Goryacheva, I.A. Khristoforova, A.I. Khristoforov // Stroitelstvo i rekonstruktsiya [Construction and Reconstruction]. — Orel, 2017. — № 5 (73). — P. 102–107. [in Russian]
15. Berikashvili B.Sh. Statisticheskaya obrabotka dannikh, planirovanie eksperimenta i sluchainie protsessy [Statistical Data Processing, Experimental Design, and Random Processes] / B.Sh. Berikashvili, S.P. Oski. — Moscow: Yurait, 2018. — 263 p. [in Russian]
16. Khristoforova I.A. Provedenie aktivnogo eksperimenta pri razrabotke sostava shikhti dlya proizvodstva keramicheskikh izdelii: Metodicheskie ukazaniya k laboratornim zanyatiyam po distsipline «Statisticheskie metody issledovaniya shikht v stekolnoi promishlennosti» [Conducting an active experiment in developing the composition of a batch for the production of ceramic products: Methodological guidelines for laboratory classes in the discipline "Statistical methods for studying batches in the glass industry"] / I.A. Khristoforova. — Vladimir: Vladimir State University, 2000. — 24 p. [in Russian]