 © Авторы статьи / Authors of the article

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

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.141.4 EDN: OLIGSY

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА И ШЛИФОВАЛЬНОЙ ПЫЛИ ФАНЕРЫ МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ

Научная статья

Шкуро А.Е.[1, *], Глухих В.В.[2]
[1] ORCID : 0000-0002-0469-2601;
[1, 2] Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (shkuroae[at]m.usfeu.ru)

Предложена: 05.10.2023; Принята: 22.02.2024; Опубликована: 18.03.2024

Аннотация

Наиболее распространенным методом переработки композитов с полимерными фазами синтетических термопластов и лигноцеллюлозными наполнителями на сегодня является экструзия. Экструзия — высокопроизводительный метод переработки полимерных композитов, однако имеет ряд недостатков. В настоящей работе рассматриваются вопросы получения изделий из полимерных композиционных материалов методом горячего прессования. Исследование посвящено поиску оптимальных параметров технологического процесса получения изделий из композитов с полимерной фазой полиэтилена высокой плотности и шлифовальной пылью березовой фанеры методом горячего прессования. Для этого был составлен и реализован эксперимент по плану Плэккетта-Бермана. В результате его реализации были разработаны экспериментально-статистические модели, описывающие влияние технологические параметры процесса получения композитов на их свойства. По полученным моделям симплексным методом были найдены оптимальные условия получения изделий с требуемыми свойствами.

Ключевые слова: композит, полимерные композиционные материалы, шлифовальная пыль, горячее прессование, оптимизация.

OPTIMIZATION OF MODES FOR OBTAINING COMPOSITES ON THE BASIS OF POLYETHYLENE AND SANDER DUST OF PLYWOOD BY HOT PRESSING TECHNIQUE

Research article

Shkuro A.E.[1, *], Glukhikh V.V.[2]
[1] ORCID : 0000-0002-0469-2601;
[1, 2] Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (shkuroae[at]m.usfeu.ru)

Suggested: 05.10.2023; Accepted: 22.02.2024; Published: 18.03.2024

Abstract

The most common method of processing composites with polymer phases of synthetic thermoplastics and lignocellulosic fillers today is extrusion. Extrusion is a highly productive method of processing polymer composites, but it has a number of disadvantages. The present work examines the issues of obtaining products from polymer composites by hot pressing. The research is dedicated to the search for optimal parameters of the technological process of obtaining products from composites with polymer phase of high-density polyethylene and sander dust of birch plywood by hot pressing. For this purpose, an experiment according to the Plackett-Berman plan was designed and implemented. As a result of its realization, experimental and statistical models describing the influence of technological parameters of the process of obtaining composites on their properties were developed. According to the obtained models, the optimal conditions for obtaining products with the required properties were found by simplex method.

Keywords: composite, polymer composites, sander dust, hot pressing, optimization.

Введение

Для получения изделий из композитов с полимерными фазами природных [1], [2], [3], [4] и синтетических термопластов [5], [6], [7] и лигноцеллюлозными наполнителями применяют традиционные методы переработки термопластичных полимеров. Сочетание полимерной матрицы и натуральных армирующего лигноцеллюлозного наполнителя позволяет получить композит, обладающий лучшими свойствами каждого компонента. Поскольку пластики более мягкие, гибкие и легкие по сравнению с натуральными волокнами, их сочетание обеспечивает высокое соотношение прочности и плотности композита. Основным недостатком лигноцеллюлозных наполнителей является их высокая полярность, что делает их трудно совместимыми со слабо полярными полимерами. Кроме того, низкая водостойкость делает использование натуральных волокон менее привлекательным для использования таких композитов вне помещений или в условиях повышенной влажности. Свойства композитов с лигноцеллюлозными наполнителями зависят от свойств отдельных компонентов и их межфазного взаимодействия. Полимеры имеют различное сродство к наполнителям из-за разницы в их химической структуре. В качестве матриц для подобных

 © Авторы статьи / Authors of the article

композитов используются термореактивные полимеры, такие как полиэфиры, эпоксидные и фенольные смолы, а также термопластичные полимеры – полиэтилен (ПЭ), полистирол (ПС) и полипропилен (ПП). Перспективным представляется направление получения композиционных материалов с лигноцеллюлозными наполнителями на основе природных и искусственных термопластов [1], [2], [3], [4].

Для получения изделий из композитов с термопластичными матрицами [5], [6], [7] и лигноцеллюлозными наполнителями применяют традиционные методы переработки термопластичных полимеров. Наиболее распространенным способом переработки таких композитов на сегодня является экструзия. Эту технологию применяют для производства из композитов с лигноцеллюлозными наполнителями преимущественно профильно-погонажных изделий: досок и панелей для пола, ограждений, облицовочных досок и панелей для наружного применения на открытом воздухе, тонких и толстых листов и трубчатых элементов.

Экструзия является высокопроизводительным методом переработки полимерных материалов, однако имеет ряд недостатков. Одной из основных трудностей экструзии высоконаполненных композитов является необходимость компаундирования высоковязких, мало текучих, разнородных по физическим и химическим свойствам компонентов. Кроме того, изделия из композитов обычно имеют довольно большие геометрические размеры и массу, превышающие аналогичные параметры изделий из ненаполненных полимеров, что усложняет их охлаждение после выхода из экструдера [8].

Также экструзия не является подходящим методом для производства более сложных в конструкционном плане изделий (тары, фурнитуры и т.д.), либо рулонных материалов (напольных и настенных покрытий, изоляционных мембран, сеток и т.д.). Полученные в работе результаты показывают, что такие изделия могут изготавливаться из полимерных композитов с лигноцеллюлозными наполнителями методами горячего прессования и каландрования.

Перспективными для практического применения по ряду физико-механических свойств и биостойкости могут быть композиты с полимерной фазой первичного полиэтилена и шлифовальной пылью березовой фанеры, которые не уступают по этим свойствам ДПК с древесной мукой [9].

Целью исследования являлось установление закономерностей влияния технологических факторов процесса горячего прессования и компонентного состава таких композитов на их физико-механические свойства. В задачи работы также входила оптимизация технологических параметров переработки композитов и их рецептур в соответствии с установленными закономерностями.

Методы и принципы исследования

Для определения закономерностей влияния параметров процесса горячего прессования и компонентного состава материала на свойства композитов был проведен семифакторный эксперимент по плану Плэккетта-Бермана [10]. Реализация этого плана (табл. 1 и табл. 2) обеспечивает оптимальное соотношение между точностью регрессионных моделей и количеством экспериментов. Выходные факторы эксперимента (Z_i) приведены ниже:

Z_1 – содержание шлифовальной пыли березовой фанеры, мас. ч.;
Z_2 – содержание металена F-1108 (компатибилизатор), мас. ч.;
Z_3 – температура при горячем прессовании, °С;
Z_4 – давление при горячем прессовании, МПа;
Z_5 – давление при холодном прессовании, МПа;
Z_6 – продолжительность горячего прессования, мин;
Z_7 – продолжительность холодного прессования, мин.

Таблица 1 - План эксперимента с кодированными значениями факторов

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.141.4.1

Номер образца	Кодированные значения факторов (x_i)						
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
1	–1	–1	–1	1	1	1	–1
2	1	–1	–1	–1	–1	1	1
3	–1	1	–1	–1	1	–1	1
4	1	1	–1	1	–1	–1	–1
5	–1	–1	1	1	–1	–1	1
6	1	–1	1	–1	1	–1	–1
7	–1	1	1	–1	–1	1	–1
8	1	1	1	1	1	1	1

Полимерным связующим был первичный полиэтилен высокой плотности марки 273-83. Содержание в образцах плит лубриканта (стеарата кальция) составляло 1,5 мас. %. Смешение компонентов проводилось методом экструзии.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Таблица 2 - План эксперимента с натуральными значениями факторов

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.141.4.2

Номер образца	Натуральные значения факторов (Z_i)						
	Z_1, мас. ч.	Z_2, мас. ч.	Z_3, °С	Z_4, МПа	Z_5, МПа	Z_6, мин	Z_7, мин
1	25,0	0,0	175	30	12,6	20	5
2	67,0	0,0	175	15	9,4	20	10
3	25,0	1,5	175	15	12,6	10	10
4	67,0	1,5	175	30	9,4	10	5
5	25,0	0,0	185	30	9,4	10	10
6	67,0	0,0	185	15	12,6	10	5
7	25,0	1,5	185	15	9,4	20	5
8	67,0	1,5	185	30	12,6	20	10

Для полученных образцов были определены показатели следующих свойств (Y_j):
Y_1 – плотность, кг/м^3;
Y_2 – твердость по Бринеллю, МПа;
Y_3 – пластичность, %;
Y_4 – модуль упругости при сжатии, МПа;
Y_5 – прочность при изгибе, МПа;
Y_6 – ударная вязкость, кДж/м^2;
Y_7 – водопоглощение за сутки, %;
Y_8 – водопоглощение за 30 суток, %;

Основные результаты

Результаты определения физико-механических свойств образцов композитов с полимерной фазой ПЭНД и шлифовальной пылью березовой фанеры приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Показатели свойств полученных образцов плит

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.141.4.3

Номер образца	Средние арифметические значения показателей свойств образцов плит							
	Y_1, кг/м^3	Y_2, МПа	Y_3, %	Y_4, МПа	Y_5, МПа	Y_6, кДж/м^2	Y_7, %	Y_8, %
1	956	47,2	36,9	569	36,0	14,6	0,0	1,9
2	1015	56,0	36,2	692	15,0	9,1	1,3	7,9
3	934	44,0	37,9	523	18,9	14,0	0,2	1,8
4	1031	54,4	39,0	670	34,5	23,7	1,0	7,6
5	935	45,4	40,2	543	40,7	17,0	0,0	2,5
6	1040	57,9	38,4	720	37,3	12,2	0,7	6,7
7	1033	41,9	41,6	492	20,3	17,9	0,1	1,8
8	1066	46,8	43,0	562	19,5	13,4	0,7	7,7

В результате проведенного регрессионного анализа были выведены следующие уравнения регрессии, которые описывают влияние входных факторов на свойства полученных образцов с высокой степенью достоверности ($p \geq 0,90$) и точностью описания экспериментальных данных (коэффициент детерминации $R^2>0,90$):

Y_1, кг/м^3 = $1,79 \times Z_1 + 5,11 \times Z_3$ ($R^2 = 0,98$);
Y_2, МПа = $0,22 \times Z_1 + 0,21 \times Z_3$ ($R^2 = 0,99$);
Y_3, % = $1,68 \times Z_2 + 0,21 \times Z_3$ ($R^2 = 0,99$);
Y_4, МПа = $3,13 \times Z_1 + 2,51 \times Z_3$ ($R^2 = 0,99$);
Y_5, МПа = $0,18 \times Z_3$ ($R^2 = 0,99$);
Y_6, кДж/м^2 = $0,08 \times Z_3$ ($R^2 = 0,93$);
Y_7, % = $0,02 \times Z_1 – 0,06 \times Z_5$ ($R^2 = 0,96$);
Y_8, % = $0,12 \times Z_1$ ($R^2 = 0,91$).

С помощью разработанных экспериментально-статистических моделей была поставлена и решена оптимизационная задача направленную на выбор наиболее рациональных технологических условий процесса горячего прессования и компонентного состава композитов на основе ПЭНД и шлифовальной пыли березовой фанеры для производства изделий конструкционного назначения. Ниже приведено решение этой задачи.

 © Авторы статьи / Authors of the article

В качестве целевой функции оптимизационной задачи был принят показатель прочности при изгибе (Y_5). Оптимизация технологических параметров процесса горячего прессования должна была способствовать достижению максимального значения этого показателя.

Для ключевых показателей физико-механических свойств были предложены следующие ограничения:

1) твердость по Бринеллю (Y_2) – не менее 50 МПа;
2) ударная вязкость (Y_6) – не менее 10 кДж/м^2;
3) водопоглощение за 30 суток (Y_7) – не более 10 мас. %.

Исходя из имеющейся научно-технической информации и производственного опыта для решения оптимизационной задачи были выбраны следующие граничные условия:

1) содержание наполнителя (Z_1) – не менее 50 мас. ч.;
2) содержание компатибилизатора (Z_2) – не более 4 мас. ч.
3) температура горячего прессования (Z_3) – в диапазоне 175 – 185 ^{o}C;
4) давление при горячем прессовании (Z_4) – в диапазоне 15 – 30 МПа;
5) давление при холодном прессовании (Z_5) – в диапазоне 9,4 – 12,6, МПа;
6) продолжительность горячего прессования (Z_6) – не менее 10 мин.;
7) продолжительность холодного прессования (Z_7) – не менее 5 мин.

В результате решения поставленной оптимизационной задачи для экспериментальной проверки были предложены следующие параметры процесса горячего прессования и компонентного состава композита с полимерной фазой ПЭНД и шлифовальной мукой березовой фанеры:

1) содержание шлифовальной пыли березы (Z_1) – 67,1 мас. ч.;
2) содержание металена F-1108 (Z_2) – 0,0 мас. ч.;
3) температура при горячем прессовании (Z_3) – 185 ^{o}C;
4) давление при горячем прессовании (Z_4) – 15 МПа;
5) давление при холодном прессовании (Z_5) – 9,9 МПа.
6) продолжительность горячего прессования (Z_6) – 10 мин.;
7) продолжительность холодного прессования (Z_7) – 5 мин.

Результаты измерений свойств образцов плит, полученных при рассчитанных оптимальных значениях технологических параметрах по данной математической модели оптимизационной задачи приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Показатели свойств образцов плит, полученных при рассчитанных оптимальных значениях технологических параметрах

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.141.4.4

Свойство	Расчетное значение	Фактический результат	Расхождение, %
Плотность, кг/м^3	1064	1058	-0,5
Твердость, МПа	54,8	52,6	-4,2
Пластичность, %	39,0	41,6	6,2
Модуль упругости при сжатии, МПа	673	645	-4,4
Прочность при изгибе, МПа	33,3	31,3	-6,4
Ударная вязкость кДж/м^2	15,5	11,8	-31,4
Водопоглощение за сутки, %	1,0	1,4	28,6
Водопоглощение за 30 суток, %	8,0	8,4	4,0

Обсуждение

Установлено, что большинство физико-механических свойств, рассмотренных в работе композитов находятся в прямой зависимости от температуры горячего прессования (Z_3). Показатели плотности твердости, жесткости и водопоглощения увеличиваются пропорционально росту содержания шлифовальной пыли (Z_1) в полимерной фазе композита. Повышение давления на стадии охлаждения формы под давлением (Z_5) обеспечивает формирование более ровной поверхности материала, снижает ее смачиваемость и обеспечивает более низкое водопоглощение при краткосрочном контакте с водой. Увеличение содержания металена (Z_2) приводит к повышению пластичности материала, и не оказывает значимого влияния на остальные свойства композита. Общая неэффективность действия компатибилизатора противоречит известным литературным данными [8], но может объясняться недостаточным максимальным уровнем его введения в материал из-за большей дисперсности наполнителя по сравнению с традиционно применяемой древесной мукой.

Значения большинства определённых показателей не отклоняются от расчётных более чем на 10%. Это является подтверждением высокой точности предложенных математических моделей. Однако показатели ударной вязкости и

 © Авторы статьи / Authors of the article

водопоглощения за 24 часа являются исключениями: для них расхождение между расчетными и фактическими значениями составляет 31,4 и 28,6% соответственно. Недостаточную точность прогнозирования этих свойств можно объяснить присутствием нелинейных зависимостей между ними и входными факторами эксперимента. Наличие таких зависимостей практически невозможно установить при использовании плана эксперимента Плэккетта-Бермана. Для улучшения качества экспериментально-статистических моделей необходимо проведение дополнительных опытов.

Физико-механические свойства композита, полученного при оптимальных параметрах процесса горячего прессования в целом сопоставимы с уровнем свойств композитов, получаемых с использованием в качестве полимерной матрицы ПЭНД, а в качестве наполнителя – древесной муки (при 50 мас. %) [8], [9], [11]. Ключевыми преимуществами полученного материала являются высокие значения показателей прочности при изгибе (31,3 МПа) и ударной вязкости (11,8 кДж/м^2) значительно превосходящие соответствующие показатели эталонных композитов с ПЭНД и древесной мукой.

Заключение

В результате выполнения работы:

1. Получена серия образцов композиционных материалов на основе ПЭНД и шлифовальной пыли березовой фанеры различного состава и при различных условиях процесса горячего прессования.

2. Для полученных образцов были определены показатели ключевых физико-механических свойств.

3. Установлены закономерности влияния компонентного состава и технологических параметров получения изделий из композитов с полимерной фазой полиэтилена высокой плотности и шлифовальной пылью березовой фанеры на их ключевые физико-механические свойства.

4. Определены и экспериментально подтверждены оптимальные значения компонентного состава композитов и технологических параметров их получения.

5. Установлено, что композит, полученный при оптимальных технологических параметрах процесса прессования, по большинству физико-механических свойств сопоставим с эталонами на основе ПЭНД и древесной муки, а по показателям прочности при изгибе и ударной вязкости значительно их превосходит.

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. Захаров П. С. Исследование физико-механических свойств композиционных материалов с полимерной фазой диацетата целлюлозы и древесной мукой / П. С. Захаров, К. А. Усова, А. Е. Шкуро и др. // Деревообрабатывающая промышленность. — 2023. — 1. — С. 99–105.

2. Чирков Д. Д. Физико-механические свойства полимерных композиционных материалов на основе этилцеллюлозы и древесной муки / Д. Д. Чирков, А. Е. Шкуро, В. В. Глухих и др. // Вестник Технологического университета. — 2022. — 11. — С. 122–127. DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_11_122.

3. Подденежный Е. Н. Биоразлагаемые композиты на основе полилактида и органических наполнителей / Е. Н. Подденежный, Н. Е. Дробышевская, А. А. Бойко и др. // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. — 2021. — 3 (86). — С. 21–26.

4. Дерябина А. Е. Исследование динамики биоразложения древеснонаполненного полилактида в активном грун / А. Е. Дерябина, А. Е. Шкуро, В. В. Глухих // Деревообрабатывающая промышленность. — 2021. — 2. — С. 109–117.

5. Глухих В. В. Наполнители из макулатуры для древесно-полимерных композитов / В. В. Глухих, Н. М. Мухин, А. Е. Шкуро // Вестник Казанского технологического университета. — 2014. — 14 (17). — С. 275–277.

6. Шкуро А. Е. Наполнители аграрного происхождения для древесно-полимерных композитов (обзор) / А. Е. Шкуро, В. В. Глухих, П. С. Кривоногов и др. // Вестник Казанского технологического университета. — 2014. — 17 (21). — С. 160–163.

7. George J. A Review on Interface Modification and Characterization of Natural Fiber Reinforced Plastic Composites / J. George, S. Thomas, M. S. Sreekala // Polymer Engineering and Science. — 2001. — 41 (9). — P. 1471–1485. DOI: 10.1002/pen.10846.

8. Kim J. K. Recent Advances in the Processing of Wood-Plastic Composites / J. K. Kim, K. Pal — New York : Springer-Verlag, 2010. — 173 p.

9. Чижова М. А. Древесные отходы в реальную прибыль / М. А. Чижова, А. П. Чижов // Актуальные проблемы лесного комплекса. — 2010. — 25. — С. 208–2010.

10. Казаков В. Г. Планирование экспериментальных исследований и статистическая обработка данных. Основы научных исследований в промышленной теплоэнергетике / В. Г. Казаков, П. В. Луканин, Е. Н. Громова. — Санкт-Петербург : ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. — 95 с.

11. Мусин И. Н. Влияние полимерного связующего на свойства древесно-полимерных композитов / И. Н. Мусин, И. З. Файзуллин // Вестник Казанского технологического университета. — 2014. — № 14. — URL:

 © Авторы статьи / Authors of the article

https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-polimernogo-svyazuyuschego-na-svoystva-drevesno-polimernyh-kompozitov (дата обращения: 31.01.2024).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Zaharov P. S. Issledovanie fiziko-mehanicheskih svojstv kompozitsionnyh materialov s polimernoj fazoj diatsetata tselljulozy i drevesnoj mukoj [Study of the Physical and Mechanical Properties of Composite Materials with the Polymer Phase of Cellulose Diacetate and Wood Flour] / P. S. Zaharov, K. A. Usova, A. E. Shkuro et al. // Wood Processing Industry. — 2023. — 1. — P. 99–105. [in Russian]

2. Chirkov D. D. Fiziko-mehanicheskie svojstva polimernyh kompozitsionnyh materialov na osnove etiltselljulozy i drevesnoj muki [Physico-mechanical Properties of Polymer Composite Materials Based on Ethylcellulose and Wood Flour] / D. D. Chirkov, A. E. Shkuro, V. V. Gluhih et al. // Bulletin of the Technological University. — 2022. — 11. — P. 122–127. DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_11_122. [in Russian]

3. Poddenezhnyj E. N. Biorazlagaemye kompozity na osnove polilaktida i organicheskih napolnitelej [Biodegradable Composites Based on Polylactide and Organic Fillers] / E. N. Poddenezhnyj, N. E. Drobyshevskaja, A. A. Bojko et al. // Bulletin of GGTU named after. P. O. Sukhoi. — 2021. — 3 (86). — P. 21–26. [in Russian]

4. Derjabina A. E. Issledovanie dinamiki biorazlozhenija drevesnonapolnennogo polilaktida v aktivnom grun [Study of the Dynamics of Biodegradation of Wood-filled Polylactide in Active Soil] / A. E. Derjabina, A. E. Shkuro, V. V. Gluhih // Wood Processing Industry. — 2021. — 2. — P. 109–117. [in Russian]

5. Gluhih V. V. Napolniteli iz makulatury dlja drevesno-polimernyh kompozitov [Fillers from Waste Paper for Wood-polymer Composites] / V. V. Gluhih, N. M. Muhin, A. E. Shkuro // Bulletin of Kazan Technological University. — 2014. — 14 (17). — P. 275–277. [in Russian]

6. Shkuro A. E. Napolniteli agrarnogo proishozhdenija dlja drevesno-polimernyh kompozitov (obzor) [Fillers of Agricultural Origin for Wood-polymer Composites (review)] / A. E. Shkuro, V. V. Gluhih, P. S. Krivonogov et al. // Bulletin of Kazan Technological University. — 2014. — 17 (21). — P. 160–163. [in Russian]

7. George J. A Review on Interface Modification and Characterization of Natural Fiber Reinforced Plastic Composites / J. George, S. Thomas, M. S. Sreekala // Polymer Engineering and Science. — 2001. — 41 (9). — P. 1471–1485. DOI: 10.1002/pen.10846.

8. Kim J. K. Recent Advances in the Processing of Wood-Plastic Composites / J. K. Kim, K. Pal — New York : Springer-Verlag, 2010. — 173 p.

9. Chizhova M. A. Drevesnye othody v real'nuju pribyl' [Wood Waste into Real Profit] / M. A. Chizhova, A. P. Chizhov // Current Problems of the Forestry Complex. — 2010. — 25. — P. 208–2010. [in Russian]

10. Kazakov V. G. Planirovanie eksperimental'nyh issledovanij i statisticheskaja obrabotka dannyh. Osnovy nauchnyh issledovanij v promyshlennoj teploenergetike [Planning of Experimental Studies and Statistical Data Processing. Fundamentals of Scientific Research in Industrial Heat and Power Engineering] / V. G. Kazakov, P. V. Lukanin, E. N. Gromova. — Sankt-Peterburg : VShTE SPbGUPTD, 2021. — 95 p. [in Russian]

11. Musin I. N. Vlijanie polimernogo svjazujuschego na svojstva drevesno-polimernyh kompozitov [The Influence of a Polymer Binder on the Properties of Wood-polymer Composites] / I. N. Musin, I. Z. Fajzullin // Bulletin of Kazan Technological University. — 2014. — № 14. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-polimernogo-svyazuyuschego-na-svoystva-drevesno-polimernyh-kompozitov (accessed: 31.01.2024). [in Russian]