

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 196–209.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 196–209.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 504.06

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-196-209

EDN: UFMUTP

ВТОРИЧНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕКУПЕРАЦИОННЫХ БИТУМОВ ИЗ ОТХОДОВ РУЛОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Николай Игоревич Шестаков, Евгения Владимировна Ткач,
Наталья Владимировна Хохлова, Анастасия Юрьевна Приходько**

Национальный исследовательский

Московский государственный строительный университет,

г. Москва, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Рассматривается проблематика утилизации и вторичного использования битумных компонентов из отходов кровельных материалов, вызванная острой необходимостью минимизации экологического воздействия и экономически эффективного использования природных ресурсов.

Исследование обусловлено существенной ролью битумных материалов в строительной отрасли и проблемами, связанными с их утилизацией после окончания срока службы, включая экологическую угрозу от накопления отходов и утрату первоначальных свойств материалов под воздействием деструктивных факторов, таких как ультрафиолетовое излучение, температурные перепады и влажность.

Цель исследования заключается в оценке эффективности методов рекуперации битума, при которых используются различные органические растворители. В работе особый акцент сделан на химическом методе, характеризующемся применением активных химических компонентов для растворения и извлечения битума, таких как технический керосин, трихлорэтилен, хлороформ и тетрахлорметан. В качестве контрольного образца для сравнения рассматривался битум, извлеченный термическим способом из рубероида без воздействия растворителей.

Методы исследования. Применение органических растворителей оценивалось через анализ полярности и способности растворять определенные группы углеводородов, что позволяло селективно изменять химический состав битума. Проведенные исследования включают методы жидкостно-адсорбционной хроматографии и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) для определения изменений в групповом составе и тепловых свойствах битума соответственно.

Результаты показывают, что изменение концентрации углеводородных групп в битуме под воздействием растворителей влияет на физико-химические свойства материала, что открывает перспективы для его повторного использования в производстве строительных и дорожных покрытий. Изменения в тепловом потоке, наблюдаемые при ДСК, позволяют оптимизировать свойства извлеченного битума и повышают эффективность его применения.

Выводы исследования подтверждают возможность интеграции рекуперированных битумных отходов в производственный цикл, что ведет к снижению потребности в первичных ресурсах и уменьшению экологической нагрузки от захоронения отходов, способствуя устойчивому развитию строительной отрасли.

Ключевые слова: рубероид, битум, рекуперация, растворители, групповой состав битума, синхронный термический анализ

Для цитирования: Шестаков Н.И., Ткач Е.В., Хохлова Н.В., Приходько А.Ю. Вторичное применение рекуперационных битумов из отходов рулонных материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 196–209. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-196-209. EDN: UFMUTP

ORIGINAL ARTICLE

SECONDARY USE OF RECOVERED BITUMEN FROM WASTE ROLL MATERIALS

**Nikolay I. Shestakov, Evgenia V. Tkach,
Natalia V. Khokhlova, Anastasia Y. Prikhodko**
*National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow, Russia*

Abstract. The article discusses current issues of recycling bitumen components from waste roofing materials due to an urgent need to minimize the environmental impact and provide cost-effective use of natural resources. The study is driven by the significant role of bituminous materials in the construction industry and their disposal after the end of their service life, including the environmental threat from waste accumulation and loss of original properties of materials caused by the ultraviolet radiation, temperature changes and humidity.

Purpose: The aim of the work is to evaluate the effectiveness of bitumen recovery methods utilizing various organic solvents. Special emphasis is placed on the chemical method characterized by the use of active chemical components to dissolve and extract bitumen, such as technical kerosene, trichlorethylene, chloroform and carbon tetrachloride. For comparison, a bitumen sample is thermally extracted from roofing felt without exposure to solvents.

Methodology/approach: The analysis of polarity of organic solvents and their ability to dissolve certain groups of hydrocarbons, which made it possible to selectively change the bitumen chemical composition. Liquid adsorption chromatography and differential scanning calorimetry techniques are used to determine changes in the composition and thermal properties of bitumen, respectively.

Research findings: Changes in the concentration of hydrocarbon groups in bitumen under the influence of solvents affect physicochemical properties of the material, that opens up pro-

spects for its reuse in construction and road coating production. Changes in heat flow observed during the DSC analysis, allow optimizing the properties of the extracted bitumen and improve the efficiency of its application.

Practical implications: The possibility is shown for integrating recovered bitumen waste in the production cycle, which leads to a reduction in the need for primary resources and environmental burden from waste disposal, contributing to the sustainable development of the construction industry.

Keywords: bitumen felt, bitumen, recovery, solvent, bitumen composition, simultaneous thermal analysis

For citation: Shestakov N.I., Tkach E.V., Khokhlova N.V., Prikhod'ko A.Yu. Secondary use of recovered bitumen from waste roll materials. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 196–209. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-196-209. EDN: UFMUTP

В современной строительной практике битумные материалы являются неотъемлемой частью кровельных работ, выбор которых обоснован их превосходными гидроизоляционными свойствами. Тем не менее с окончанием срока службы этих материалов возникает проблема обращения с битумосодержащими строительными отходами [1, 2, 3], которые не подлежат простой утилизации и представляют значительную экологическую опасность [4, 5, 6]. Битумные компоненты кровли в процессе эксплуатации подвергаются воздействию множественных деструктивных факторов, в числе которых ультрафиолетовое излучение, термические колебания и постоянная влажность. Эти условия приводят к деградации физико-химических свойств битума, включая разрыв молекулярных связей [7, 8], что обуславливает снижение его эластичности, механической прочности и гидроизоляционных качеств.

Проблематика кровельных отходов осложняется феноменом многослойности и самих материалов (рис. 1), и состоящих из них кровельных систем, когда новые материалы наслаиваются на старые без их предварительного демонтажа в процессе капитального ремонта или реконструкции зданий. Это приводит к формированию кровель с многослойной структурой, в некоторых случаях включающих до 20 различных слоев, что существенно затрудняет последующую рециклизацию и утилизацию данных отходов [9, 10, 11, 12].

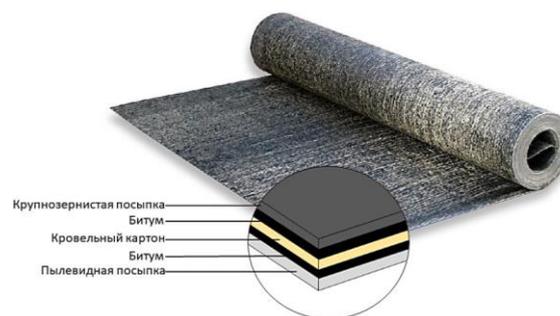


Рис. 1. Схема слоев на примере рубероида РКК-420А

Fig. 1. Layers of RKK-420A roofing material

Согласно ГОСТ 10923–93 «Рубероид. Технические условия», рубероид является многокомпонитным строительным материалом, преимущественно органического происхождения. Состав применяемых материалов изменяется в зависимости от условий эксплуатации и проектных решений. Нормативный состав материалов с указанием массы присутствующего в них битума представлен в табл. 1.

Таблица 1

Состав различных марок рубероида

Table 1

Composition of various roofing materials

Тип рубероида	Марка рубероида	Назначение	Марка картона	Содержание битума, кг/м ²
Кровельный с крупнозернистой посыпкой	РКК-420А	Для верхнего слоя кровельного ковра	А-420	1,2–1,8
	РКК-420Б		Б-420	1,2–1,8
	РКК-350Б		Б-350	1,2–1,8
Кровельный с чешуйчатой посыпкой	РКЧ-350Б		Б-350	1,4–2,0
Кровельный с пылевидной посыпкой	РКП-350А	Для верхнего слоя кровельного ковра с защитным слоем	А-350	1,2–1,6
	РКП-350А		Б-350	1,2–1,6
Подкладочный с пылевидной посыпкой	РПП-300А	Для верхнего слоя кровельного ковра	А-300	1,4–1,8
	РПП-300Б		Б-300	1,4–1,8
Подкладочный эластичный с пылевидной посыпкой	РПЭ-300	Для нижнего слоя кровельного ковра в районах Крайнего Севера	А-300	1,4–1,8

Научные исследования в области переработки битумосодержащих отходов [13, 14, 15, 16, 17] стали активно развиваться во второй половине XX в., когда перед мировым сообществом встали задачи по сохранению природных ресурсов и предотвращению экологических катастроф. В различных странах, в том числе и в России, происходило внедрение разнообразных технологий для решения этой проблемы [18, 19, 20, 21].

Международный опыт показывает [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28], что эффективное решение вопроса лежит через интеграцию переработки отходов в экономику замкнутого цикла. Примером могут служить страны, где приняты строгие нормативы по утилизации строительных отходов. Активно развиваются технологии не только утилизации, но и полного цикла переработки битумных материалов с их последующим возвращением в производство кровельных или дорожных покрытий. Основные направления по переработке и утилизации битумосодержащих кровельных строительных отходов представлены в сводной табл. 2.

Таблица 2

**Методы переработки и утилизации битумосодержащих
кровельных строительных отходов**

Table 2

Methods for processing and disposal of bitumen-containing waste

Метод переработки	Описание	Преимущества	Ограничения
Термическая обработка	Восстановление битума путем нагревания материалов и последующей обработки	Позволяет повторно использовать битум, снижает объем отходов	Требует высоких температур и контроля выбросов
Измельчение и добавление в новые смеси	Измельченные материалы используются как добавка в асфальтобетонные смеси или при производстве новых битумных кровельных материалов	Повторное использование материала как добавки улучшает свойства смесей	Возможное присутствие загрязняющих веществ, требует тщательной очистки
Пиролиз	Разложение материалов при высоких температурах без доступа кислорода	Преобразование отходов в масло, газ и твердые остатки для последующего использования	Необходимость обработки полученных продуктов, высокая стоимость оборудования
Газификация	Превращение отходов в синтез-газ для использования в качестве топлива или в химической промышленности	Получение энергии и химических веществ, снижение объема отходов	Технологически сложный и дорогостоящий процесс
Сжигание	Сжигание отходов для выработки энергии	Выработка энергии, уменьшение объема отходов	Необходимость строгого контроля выбросов
Совместное сжигание	Использование отходов в качестве добавок к топливу в цементных печах	Восстановление энергии, уменьшение использования натурального топлива	Требования к контролю за выбросами, возможные ограничения по составу отходов
Биологическая рекультивация	Применение материалов в процессе рекультивации земель	Восстановление нарушенных территорий, улучшение структуры почвы	Необходимость исследования воздействия на экосистему
Захоронение на полигонах	Захоронение отходов на специализированных полигонах	Изолирование отходов от окружающей среды	Долгосрочные риски загрязнения, ограниченное пространство

Проблематика переработки и утилизации битумосодержащих кровельных отходов в России стоит особенно остро в свете непрерывного роста стро-

ительного сектора и увеличения объемов производимых отходов. Использование современных методов рекуперации и извлечения битума из отходов не только актуально, но и становится необходимостью [29, 30]. Такие методы предоставляют возможность возвращения битума в производственный цикл, способствуя значительной экономии ресурсов и сокращению потребности в добыче нового сырья. Переработка отходов снижает их объем, обеспечивая решение проблемы ограниченного пространства на полигонах и минимизируя экологический ущерб от захоронения.

Активное применение методов рекуперации и извлечения битума из отходов становится не только путем снижения экологической нагрузки, но и стратегическим направлением в строительной отрасли России, способствуя устойчивому развитию и эффективному управлению ресурсами.

Существует несколько различных по своим принципам методов рекуперации, а именно: химический, термический, ультразвуковой и их различные комбинации. Наиболее актуальным является химический способ, характеризующийся воздействием активных химических компонентов, которые могут растворять и извлекать битум из материала.

Для установления степени эффективности данного метода были исследованы различные органические растворители (табл. 3). Контрольный образец (К) – битум, извлеченный механическим способом при нагревании кровельного материала без применения растворителей.

Таблица 3

Исследуемые составы

Table 3

Compositions

Условное обозначение	Состав
К	Контрольный образец
1	Технический керосин КТ-1
2	Трихлорэтилен (C ₂ HCl ₃)
3	Хлороформ (CHCl ₃)
4	Тетрахлорметан (CCl ₄)

Поскольку химические свойства растворителей и битумных компонентов определяются их полярностью, можно предположить, что растворители с разной полярностью будут иметь различную эффективность в извлечении определенных групп углеводородов. Полярные растворители будут более эффективны в растворении полярных компонентов (например, смол и асфальтенов), в то время как неполярные растворители будут лучше растворять неполярные углеводороды (например, парафины).

Для определения степени изменения битумных материалов в процессе рекуперации был проведен анализ их группового химического состава. Групповой химический состав тяжелых нефтепродуктов определялся методом жидкостно-адсорбционной хроматографии с градиентным вытеснением на лабораторной установке «Градиент-М» с детектором теплопроводности.

Сущность метода заключается в ступенчатом градиентно-вытеснительном разделении высококипящих нефтепродуктов на 7 групп с последующей их регистрацией с детектором по теплопроводности (табл. 4).

Таблица 4

Групповой химический состав исследуемых битумов

Table 4

Chemical composition of bitumen

Групповые элементы	К	1	2	3	4
Парафино-нафтеновые углеводороды	12,7	12,6	15,5	10,0	15,4
Ароматика легкая	7,4	7,1	7,1	4,1	4,1
Ароматика средняя	2,1	2	4,1	2,4	0,6
Ароматика тяжелая	7,1	6,9	4,7	7,5	6,3
Смолы бензольные	5,1	6,0	7,3	6,3	7,1
Смолы спирто-бензольные	28,2	28,2	32,5	37,0	34,4
Асфальтены	37,4	37,2	28,8	32,7	32,1
Итого	100	100	100	100	100

Проанализировав полученные результаты определения группового состава, можно выделить группы состава по объединенным признакам.

Парафино-нафтеновые углеводороды являются насыщенными и относительно неполярными. Их увеличение в образце 3 обусловлено более высокой растворимостью ароматических и полярных компонентов битума в хлороформе, что приводит к обогащению оставшегося битума насыщенными углеводородами. Этот же механизм может объяснить увеличение содержания парафино-нафтеновых углеводородов в образце 4, однако эффект менее выражен из-за различий в селективности растворения тетрахлорметана.

Ароматические углеводороды (легкие, средние, тяжелые) имеют различную степень полярности и кипения. Уменьшение их содержания в образцах 3 и 4 является следствием высокой степени растворимости этих компонентов в хлороформе и тетрахлорметане. Эти растворители обладают хорошей способностью растворять ароматические соединения из-за своей полярности и химической совместимости.

Смолы (бензольные и спирто-бензольные) являются высокомолекулярными и полярными компонентами битума. Увеличение их содержания в образцах 3 и 4 связано с удалением других более летучих и растворимых компонентов, что приводит к относительному увеличению концентрации смол. Это также может быть связано с разложением или изменением молекулярной

структуры других компонентов битума под воздействием растворителя, приводящим к образованию смолистых продуктов.

Асфальтены относятся к группе высокомолекулярных полярных компонентов битума. Их уменьшение в образцах, обработанных хлороформом и тетрахлорметаном, указывает на эффективную работу этих растворителей по удалению асфальтовых компонентов в процессе рекуперации.

Общий механизм изменения группового состава битумов может включать следующие факторы и закономерности:

– селективное растворение: различные растворители имеют разную селективность к компонентам битума, что приводит к их различному извлечению и изменению соотношения компонентов в остатке;

– растворение и коагуляцию: некоторые растворители могут изменять межмолекулярные взаимодействия между компонентами битума, приводя к растворению одних и коагуляции других;

– химическую деструкцию и поликонденсацию: взаимодействие с растворителем может вызвать химические реакции, такие как деструкция (разрыв связей) или поликонденсация (образование новых связей), изменяющие групповой состав битума;

– изменение фазового состояния: под воздействием растворителей могут происходить фазовые переходы, например из твердого в жидкое состояние, что также влияет на растворимость различных компонентов.

Для каждого растворителя, отражая его химические свойства, механизмы взаимодействия с битумом будут различаться. Например, хлорированные растворители более эффективны для полярных и ароматических компонентов из-за их способности к донорно-акцепторным взаимодействиям и высокой полярности.

Таким образом, применение различных органических растворителей для рекуперации битумов из рубероида приводит к селективному извлечению и изменению концентрации определенных групп углеводов в зависимости от их полярности и молекулярной массы. Это изменение в концентрации компонентов влияет на физико-химические свойства извлеченного битума и может быть оптимизировано для получения материалов с желаемыми характеристиками.

Для подтверждения предложенной концепции, а также для анализа температурных переходов и химических реакций в битумах была выполнена дифференциальная сканирующая калориметрия (рис. 2). Это метод анализа, который позволяет изучать тепловые свойства материалов, такие как температуры стеклования, плавления, кристаллизации, а также теплота реакций. В контексте битумов ДСК подходит для изучения термических процессов, происходящих при нагреве, включая разложение или перераспределение компонентов в зависимости от их термической стабильности.

Для выявления пиков теплового потока использовались методы определения локальных максимумов с учетом их выраженности. Таким образом были идентифицированы температурные точки, соответствующие значимым термическим событиям в образцах. Полученные результаты обобщены с дополнительными характеристиками тепловых потоков и представлены в табл. 5.

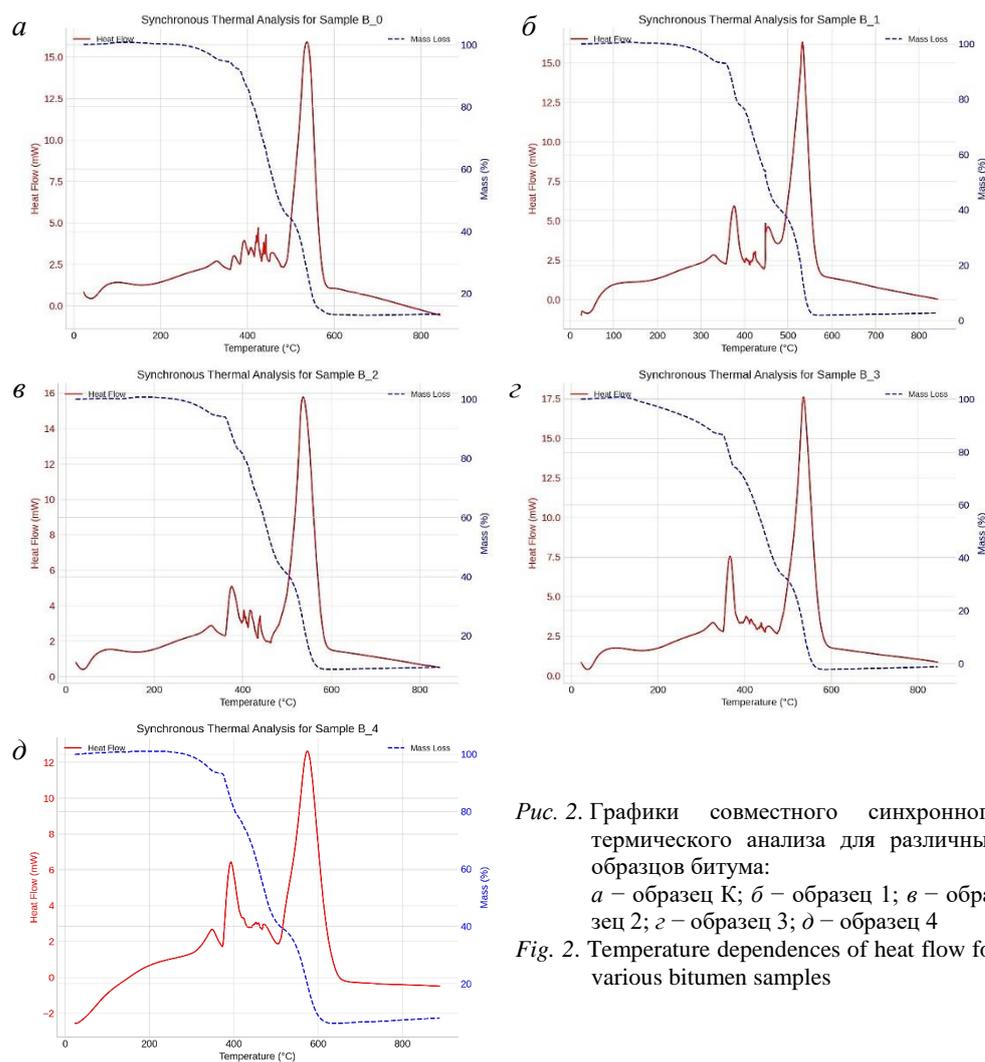


Рис. 2. Графики совместного синхронного термического анализа для различных образцов битума:

a – образец К; *б* – образец 1; *в* – образец 2; *г* – образец 3; *д* – образец 4

Fig. 2. Temperature dependences of heat flow for various bitumen samples

Таблица 5

Характеристики пиков теплового потока исследуемых составов битумов

Table 5

Heat flow peaks of bitumen compositions

Образец	Пик	Температура пика, °С	Тепловой поток, мВт	Потеря массы, %
К	1	392,52	3,941	88,31
	2	424,87	4,712	75,24
	3	442,82	4,300	66,08
	4	536,82	15,904	27,48
1	1	375,94	5,948	83,18
	2	424,37	3,069	64,32
	3	447,68	4,852	53,05
	4	532,63	16,320	15,49

Окончание табл. 5
End of table 5

Образец	Пик	Температура пика, °С	Тепловой поток, мВт	Потеря массы, %
2	1	375,09	5,090	88,05
	2	417,12	3,745	74,51
	3	439,37	3,432	64,33
	4	536,46	15,769	24,52
3	1	366,21	7,543	78,23
	2	535,72	17,601	13,21
4	1	348,62	2,674	94,23
	2	393,16	6,440	83,93
	3	574,27	12,629	19,83

Воздействие растворителей на битумные материалы меняет их групповой состав, что влияет на термическое поведение материала. Растворители могут вымывать или изменять концентрацию определенных компонентов, приводя к изменениям в тепловом потоке, наблюдаемым при ДСК-анализе.

Выводы

Проведенные эксперименты показывают эффективность применения органических растворителей для рекуперации битума из отходов кровельных материалов. Исследования различных растворителей позволили установить, что их химические свойства, в частности полярность, имеют решающее значение в извлечении определенных групп углеводов, что приводит к изменениям в групповом химическом составе битума и его физико-химических свойств.

Выявлено, что полярные растворители эффективнее воздействуют на полярные компоненты битума, такие как смолы и асфальтены, в то время как неполярные лучше растворяют неполярные углеводороды, например парафины. Это позволяет селективно управлять составом рекуперированного битума для достижения требуемых характеристик материала.

Анализ группового химического состава позволил детально оценить изменения в составе битума после обработки различными растворителями. Дополнительно, для изучения тепловых свойств битума, была использована дифференциальная сканирующая калориметрия, которая позволила выявить температурные точки, соответствующие значимым термическим событиям в образцах.

Эксперименты подтвердили, что воздействие растворителей может вызывать вымывание или изменение концентрации определенных компонентов битума, что наблюдается как изменение в тепловом потоке при ДСК-анализе. Такие данные указывают на возможность контролируемой модификации химического состава битума для получения материалов с заданными свойствами.

Результаты исследования подчеркивают потенциал рекуперации битума из отходов для его последующего использования, что способствует сокращению потребности в новом сырье, минимизации отходов, уменьшению экологической нагрузки и содействует устойчивому развитию строительной отрасли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Антонова И.И., Массарова Г.И. Утилизация отходов гидроизоляционных материалов на основе битума // Наследие В.И. Вернадского и современные проблемы экологии. 2023. Т. 1 (1). С. 179–182.
2. Красновских М.П. Перспективы термохимической утилизации многокомпонентных и загрязненных полимерных отходов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2023. № 3. С. 50–58.
3. Мифтахов М.Н. Проблема утилизации битумных отходов // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2017. № 1 (74). С. 14–22.
4. Сагдеева Г.С., Патракова Г.Р. Переработка отходов производства и потребления с использованием их ресурсного потенциала // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 17 (6). С. 194–198.
5. Ермолаев Д.В., Мингалеева Г.Р. Механизм термического разложения асфальтенов природных битумов // Вестник Технологического университета. 2015. № 18 (12). С. 27–31.
6. Пискунов И.В., Белоконь Н.Ю., Глаголева О.Ф. Получение битумов из продуктов вторичных процессов – остатков процессов висбрекинга и деасфальтизации // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2021. № 2 (303). С. 83–95.
7. Пискунов И.В., Белоконь Н.Ю., Глаголева О.Ф. Производство битумных материалов из нефтяных остатков и вторичных ресурсов // Нефть. Газ. Новации. 2021. № 6. С. 67–71.
8. Bolden J., Abu-Lebdeh T., Fini E. Utilization of recycled and waste materials in various construction applications // American Journal of Environmental Sciences. 2013. P. 94–24.
9. Cremiato R., Mastellone M.L., Tagliaferri C., Zaccariello L., Lettieri P. Environmental impact of municipal solid waste management using Life Cycle Assessment: The effect of anaerobic digestion, materials recovery, and secondary fuels production // Renewable Energy. 2018. № 124. P. 180–188.
10. Aziz M.M.A., Rahman M.T., Hainin M.R., Bakar W.A. An overview on alternative binders for flexible pavement // Construction and Building Materials. 2015. № 84. P. 315–319.
11. Mashaan N.S., Ali A.H., Karim M.R., Abdelaziz M. A review on using crumb rubber in reinforcement of asphalt pavement // Scientific World Journal. 2014. DOI: 10.1155/2014/214612
12. Garcia J., Hansen K. HMA Mix Type Selection Guide. Information Series 128. National Asphalt Pavement Association: Lanham MD, USA, 2001.
13. Adhikari B., De D., Maiti S. Reclamation and recycling of waste rubber // Progress in Polymer Science. 2000. № 25 (7). P. 909–948.
14. Merdrignac I., Espinat D. Physicochemical characterization of petroleum fractions: the state of the art // Oil and Gas Science and Technology. 2007. № 62 (1). P. 7–32.
15. Claudy P., Letoffe J.M., King G.N., Planche J.P., Brule B. Characterization of paving asphalts by Differential Scanning Calorimetry // Fuel Science and Technology International. 1991. № 9 (1). P. 71–92.
16. Карпов Г.Н. Кровельным отходам необходима промышленная переработка // Вестник ОГУ. 2003. № 5. С. 144–147.
17. Халиуллина Л.Э. Вторичное использование отходов кровельных материалов // Достижения науки и образования. 2018. № 17(39). С. 9–11.
18. Асадуллина З.У., Исмаилов С.А., Яковлев В.В. Техничко-экономические и экологические преимущества природоохранной технологии // Башкирский химический журнал. 2012. № 2. С. 74–77.
19. Шеповалов П.П., Штыка О., Елубай М.А. Применение тяжелоутилизируемых отходов во время производства строительных материалов // Наука и техника Казахстана. 2022. № 3. С. 160–167.
20. Дронов С.В., Гаджиева А.Х. Применение кровельных битумсодержащих отходов в производстве битумных композиционных материалов // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2019. № 49 (75). С. 36–39.

21. Шашмаркина А.Е., Сахибгареев И.Р., Каюкова Г.П., Романов Г.В. Техногенные нефтяные образования в окружающей среде – дополнительный источник углеводородного сырья // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 9. С. 208–213.
22. Walker I.D., Colwell R.R., Petrakis L. The rate of micrological degradation of components of crude oils // Canadian Journal of Microbiology. 1976. № 22 (8). P. 1209–1213.
23. Medeiros P.M., Bicego M.C. Investigation of natural and anthropogenic hydrocarbon inputs in sediments using geochemical markers // Marine Pollution Bulletin. 2004. № 49. P. 892–899.
24. Moldovan J.M. Application of biological marker technology to bioremediation of refinery by-products // Energy Fuels. 1995. № 9. P. 155–162.
25. Chainea C.H., Morel J.L., Oudot J. Land treatment of oil-based drill cuttings in an agricultural soil // Journal of Environmental Quality. 1996. № 25 (4). P. 858–867.
26. Шевцов С.А., Каргашилов Д.В., Животягин И.А. Экологически чистая пожаробезопасная и энергоэффективная технология переработки битумсодержащих отходов // Экология промышленного производства. 2020. № 1. С. 2–5.
27. Shevtsov S.A., Kargashilov D.V., Shutkin A.N. Fire and explosion safe technology of storage and regasification of liquefied petroleum gas // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. № 54 (1–2). P. 38–40.
28. Radeef H.R., Hassan N.A., Abidin A.R. Enhanced Dry Process Method for Modified Asphalt Containing Plastic Waste // Frontiers in Materials. 2021. № 8. P. 1–14.
29. Шестаков Н.И., Чертец К.Л., Хохлова Н.В., Урханова Л.А. Биопозитивные технологии обращения с битумосодержащими строительными отходами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 9 (765). P. 27–38.
30. Хохлова Н.В., Шестаков Н.И., Федосов С.В., Тутова И.И., Сячинова Н.В. Особенности изменения битума в процессе рекуперации // Строительные материалы. 2023. № 7. P. 67–72.

REFERENCES

1. Antonova I.I., Massarova G.I. Disposal of waste waterproofing materials based on bitumen. *Nasledie V.I. Vernadskogo i sovremennye problemy ekologii*. 2023; 1 (1):179–182. (In Russian)
2. Krasnovskikh M.P. Prospects for thermochemical recycling of multicomponent and contaminated polymer waste. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2023; (3): 50–58. (In Russian)
3. Miftakhov M.N. The problem of recycling bitumen waste. *Sotsial'no-ekonomicheskie i tekhnicheskie sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizatsiya*. 2017; 1 (74): 14–22. (In Russian)
4. Sagdeeva G.S., Patrakova G.R. Recycling industrial and consumer waste using their resource potential. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014; 17 (6): 194–198. (In Russian)
5. Ermolaev D.V., Mingaleeva G.R. Thermal decomposition of asphaltenes in natural bitumen. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 2015; 18 (12): 27–31. (In Russian)
6. Piskunov I.V., Belokon N.Yu., Glagoleva O.F. Bitumen production from residues of visbreaking and deasphalting processes. *Trudy Rossiiskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza imeni I.M. Gubkina*. 2021; 2 (303): 83–95. (In Russian)
7. Piskunov I.V., Belokon N.Yu., Glagoleva O.F. Production of bituminous materials from oil residues and secondary resources. *Neft'. Gaz. Novatsii*. 2021; (6): 67–71. (In Russian)
8. Bolden J., Abu-Lebdeh T., Fini E. Utilization of recycled and waste materials in various construction applications. *American Journal of Environmental Sciences*. 2013; 9: 4–24.
9. Cremiato R., Mastellone M.L., Tagliaferri C., Zaccariello L., Lettieri P. Environmental impact of municipal solid waste management using Life Cycle Assessment: The effect of anaerobic digestion, materials recovery, and secondary fuels production. *Renewable Energy*. 2018; 124: 180–188.
10. Aziz M.M.A., Rahman M.T., Hainin M.R., Bakar W.A. An overview on alternative binders for flexible pavement. *Construction and Building Materials*. 2015; 84: 315–319.
11. Mashaan N.S., Ali A.H., Karim M.R., Abdelaziz M. A review on using crumb rubber in reinforcement of asphalt pavement. *Scientific World Journal*. 2014; doi:10.1155/2014/214612
12. Garcia J., Hansen K. HMA Mix Type Selection Guide. Information Series 128. National Asphalt Pavement Association: Lanham MD, USA, 2001.

13. Adhikari B., De D., Maiti S. Reclamation and recycling of waste rubber. *Progress in Polymer Science*. 2000; 25 (7): 909–948.
14. Merdrignac I., Espinat D. Physicochemical characterization of petroleum fractions: the state of the art. *Oil and Gas Science and Technology*. 2007; 62 (1): 7–32.
15. Claudy P., Letoffe J. M., King G.N., Planche J.P., Brule B. Characterization of paving asphalts by Differential Scanning Calorimetry. *Fuel Science and Technology International*. 1991; 9 (1): 71–92.
16. Karpov G.N. Roofing waste requires industrial processing. *Vestnik OGU*. 2003; (5): 144–147. (In Russian)
17. Khaliulina L.E. Recycling of waste roofing materials. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya*. 2018; 17 (39): 9–11. (In Russian)
18. Asadullina Z.U., Ismagilov S.A., Yakovlev V.V. Technical, economic and environmental advantages of environmental technology. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal*. 2012; (2): 74–77. (In Russian)
19. Shepvalov P.P., Shtyka O., Elubay M.A. Application of heavily recyclable waste during construction material production. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2022; (3): 160–167. (In Russian)
20. Dronov S.V., Gadzhieva A.Kh. Application of roofing bitumen-containing waste in the production of bitumen composite materials. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta*. 2019; 49 (75): 36–39. (In Russian)
21. Shashmarkina A.E., Sakhibgareev I.R., Kayukova G.P., Romanov G.V. Technogenic oil formations in the environment as additional source of hydrocarbon raw materials. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2011; (9): 208–213. (In Russian)
22. Walker I.D., Colwell R.R., Petrakis L. The rate of micrological degradation of components of crude oils. *Canadian Journal of Microbiology*. 1976; 22 (8): 1209–1213.
23. Medeiros P.M., Bicego M.C. Investigation of natural and anthropogenic hydrocarbon inputs in sediments using geochemical markers. *Marine Pollution Bulletin*. 2004; (49): 892–899.
24. Moldovan J.M. Application of biological marker technology to bioremediation of refinery by-products. *Energy Fuels*. 1995; (9): 155–162.
25. Chainea C.H., Morel J.L., Oudot J. Land treatment of oil-based drill cuttings in an agricultural soil. *Journal of Environmental Quality*. 1996; 25 (4): 858–867.
26. Shevtsov S.A., Kargashilov D.V., Zhivotyagin I.A. Environmentally friendly, fireproof and energy-efficient technology for processing bitumen-containing waste. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2020; (1): 2–5. (In Russian)
27. Shevtsov S.A., Kargashilov D.V., Shutkin A.N. Fire and explosion safe technology of storage and regasification of liquefied petroleum gas. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018; 54 (1–2): 38–40.
28. Radeef H.R., Hassan N.A., Abidin A.R. Enhanced dry process method for modified asphalt containing plastic waste. *Frontiers in Materials*. 2021; 8: 1–14.
29. Shestakov N.I., Chertes K.L., Khokhlova N.V., Urkhanova L.A. Biopositive technologies for handling bitumen-containing construction waste. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2022; 9 (765): 27–38. (In Russian)
30. Khokhlova N.V., Shestakov N.I., Fedosov S.V., Titova I.I., Syachinova N.V. Features of changes in bitumen during the recovery process. *Stroitel'nye materialy*. 2023. (7): 67–72. (In Russian)

Сведения об авторах

Николай Игоревич Шестаков, канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, SHestakovNI@mgso.ru

Евгения Владимировна Ткач, докт. техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, ev_tkach@mail.ru

Наталья Владимировна Хохлова, аспирант, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Natalyahoh@bk.ru

Анастасия Юрьевна Приходько, бакалавр, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, 23nastyaa@mail.ru

Authors Details

Nikolay I. Shestakov, PhD, A/Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, SHestakovNI@mgsu.ru

Evgenia V. Tkach, DSc, Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, ev_tkach@mail.ru

Natalya V. Khokhlova, Research Assistant, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, Natalyahoh@bk.ru

Anastasia Yu. Prikhodko, Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, 23nastyaa@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.02.2024
Одобрена после рецензирования 28.02.2024
Принята к публикации 22.04.2024

Submitted for publication 09.02.2024
Approved after review 28.02.2024
Accepted for publication 22.04.2024