Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-126-133

Подготовка материалов рециклинга для гранулитов в условиях Севера и Арктики

А.Е. Франтов[1, 2] ✉, И.Н. Лапиков[1], Ф.С. Белоусов[1], Н.Л. Вяткин[2, 3], Ю.Н. Болотова[2, 3]
[1] Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
[2] Научный совет Российской академии наук по проблемам народнохозяйственного использования взрывов, г. Москва, Российская Федерация
[3] Национальная организация инженеров-взрывников в поддержку профессионального развития, г. Москва, Российская Федерация
✉ aef1948@gmail.com

Резюме: Статья посвящена проблеме утилизации техногенных отходов горнодобывающей промышленности и других секторов экономики в Арктической зоне Российской Федерации путем их использования в качестве компонентов взрывчатых веществ – гранулитов. Обоснована целесообразность рециклинга материалов для снижения экологической нагрузки и повышения экономической эффективности взрывных работ в сложных климатических условиях Севера.
Предложена подробная классификация материалов рециклинга (отработанные нефтепродукты, резиновая и пластиковая крошка, угольный порошок, коксовая мелочь, вторичные алюминиевые порошки и др.) по источникам возникновения и видам. Рассмотрены принципиальные технологические схемы подготовки этих материалов к применению, включая очистку, модификацию низкотемпературных свойств (например, получение низкотемпературных топливных смесей) и регулирование морфологических характеристик порошковых компонентов.
Показано, что использование материалов рециклинга в рецептурах гранулитов позволяет не только утилизировать отходы, но и улучшать взрывчатые и физико-механические характеристики готовых продуктов, обеспечивая их эффективность при низких температурах. Отмечены патентная защита ряда разработанных составов и успешные результаты их промышленных испытаний.
Проведенный анализ демонстрирует значительный потенциал рециклинга для создания ресурсосберегающих и экологически ориентированных технологий взрывных работ при освоении месторождений в арктических регионах.

Ключевые слова: рециклинг, гранулиты, взрывные работы, Арктическая зона, техногенные отходы, отработанные нефтепродукты, резиновая крошка, низкотемпературные свойства, классификация отходов, подготовка материалов
Для цитирования: Франтов А.Е., Лапиков И.Н., Белоусов Ф.С., Вяткин Н.Л., Болотова Ю.Н. Подготовка материалов рециклинга для гранулитов в условиях Севера и Арктики. *Горная промышленность.* 2025;(6):126–133. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-126-133

Preparation of Recycled Materials for Granulites in Arctic and Subarctic Conditions

A.E. Frantov[1, 2] ✉, I.N. Lapikov[1], F.S. Belousov[1], N.L. Vyatkin[2, 3], Yu.N. Bolotova[2, 3]
[1] Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
[2] National Organization of Explosive Engineers in Support of Professional Development, Moscow, Russian Federation
[3] Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the Problems of the National Economic Use of Blasts, Moscow, Russian Federation
✉ aef1948@gmail.com

Abstract: The article addresses the issue of disposing of man-made waste from the mining industry and other sectors of the economy in the Arctic zone of the Russian Federation by using it as components of explosives, specifically granulites (granular explosives prepared on-site). The feasibility of recycling materials is demonstrated as a means to reduce environmental impact and increase the economic efficiency of blasting operations in the harsh climatic conditions of the North.
A detailed classification is proposed for the recycled materials (spent petroleum products, rubber and plastic chips, coal powder, coke fines, secondary aluminium powders, etc.) by their sources and types. Process flow diagrams for the preparation of these materials are discussed, including cleaning, modification of low-temperature properties (e.g., production of low-temperature fuel mixtures), and adjustment of the morphological characteristics of powder components.
It has been demonstrated that the use of recycled materials in the granulate formulations not only allows for waste disposal, but also improves the blasting properties and physical and mechanical characteristics of the finished products, ensuring their

efficient performance at low temperatures. A number of the developed compositions have been patented, and their industrial testing has yielded successful results.
The analysis performed demonstrates a significant potential for recycling to create resource-saving and environmentally friendly technologies for blasting operations when mining deposits in the Arctic regions.

Keywords: recycling, granulites, blasting, Arctic zone, man-made waste, spent petroleum products, rubber chips, low-temperature properties, waste classification, material preparation
For citation: Frantov A.E., Lapikov I.N., Belousov F.S., Vyatkin N.L., Bolotova Yu.N. Preparation of Recycled Materials for Granulites in Arctic and Subarctic Conditions. *Russian Mining Industry.* 2025;(6):126–133. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-126-133

Введение

Совершенствование технологий взрывных работ на горных предприятиях является залогом успешности всего производственно-технологического цикла добычи полезных ископаемых. Отходы горного производства – отработанные нефтепродукты, крупногабаритные шины карьерных автосамосвалов, резинотехнические изделия, пластиковые материалы упаковки, пылевые фракции угля, являются серьезным фактором загрязнения окружающей среды. Развитие и совершенствование новых технических решений, а именно рециклинга материалов в технологии взрывных работ, будет способствовать расширению потенциала средних и малых месторождений в северных и арктических районах России, повышению рентабельности предприятий, особенно разрабатываемых в сложных природных, климатических и горнотехнических условиях эксплуатации.

Использование вторичных ресурсов является актуальной задачей современного общества. В горнодобывающей промышленности, металлургии, химии и нефтехимии, строительстве, быту людей[1] [1–5] образуется большой сырьевой ресурс, повторное использование (рециклинг) которого позволяет создать экономические, технические и экологические преимущества в технологии взрывных работ. Физические и химические свойства материалов рециклинга, применяемых в качестве компонентов простейших взрывчатых веществ, обладают большим разнообразием. При их использовании достигается положительный эффект за счет улучшения физико-механических, технологических, адгезивных, морозостойких свойств, физической стабильности гранулитов.

В документах правительства России[2] выделена ключевая особенность при освоении Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) – высокая чувствительность экологических систем к внешним воздействиям. Увеличение добычи и переработки полезных ископаемых, а также расширение транспортных коммуникаций, безусловно, способствуют экономическому развитию и удовлетворению растущих потребностей общества. Однако эти процессы также приводят к значительному увеличению объема отходов, образующихся в горной промышленности, обрабатывающей промышленности и транспортном секторе. Эти отходы представляют собой серьезную угрозу для окружающей среды и здоровья населения. Для правильного понимания и возможности использования техногенных отходов в АЗРФ авторами работ были оценены объемы их образования [6], рассмотрены экологические последствия [7] и факторы снижения экологического риска [8]. В процессе утилизации техногенных металлических отходов с использованием взрывного метода на труднодоступных и слабо освоенных арктических территориях авторы исследования [9] обосновывают допустимые уровни содержания вредных веществ и устанавливают безопасные условия для работы с этими материалами. В другом исследовании [10] выделяются социально-экономические факторы, которые усложняют процесс обращения и переработки отходов в АЗРФ. К таким факторам относятся: низкая численность населения, очаговая структура образования отходов, сложные и дорогостоящие логистические цепочки в условиях Крайнего Севера, а также значительные энергетические затраты, необходимые для утилизации. В работе [11] подчеркивается влияние климатических условий на физико-технические характеристики отходов, а также акцентируется внимание на необходимости поиска оптимальных технологий для их утилизации, что является ключевым аспектом для эффективного управления отходами в арктическом регионе.

В технической литературе можно встретить множество различных подходов к классификации техногенных отходов и технологий их переработки. В исследовании [12] твердые отходы делятся на категории в зависимости от источников их возникновения, и их характеристики описываются с использованием общих, физических и химических параметров. Федеральный классификационный каталог отходов[3] представляет собой актуальный и исчерпывающий каталог отходов, в котором каждому типу присвоены уникальные классификационные коды и наименования. В работе [6] предложена более детализированная классификация техногенных отходов, специфичная для российской Арктики. Она учитывает не только виды добываемых полезных ископаемых, но и расположение объектов, где эти отходы образуются, при этом игнорируя физико-химические и физико-механические свойства отходов. Эта классификация предназначена для решения вопросов, связанных с государственными мерами стимулирования, направленными на эффективное управление отходами в условиях арктического региона, что подчеркивает важность учета местных особенностей при разработке стратегий обращения с отходами.

Во взрывных технологиях техногенные отходы (материалы рециклинга) используют в рецептуре гранулитов – взрывчатых веществ, изготавливаемых на местах проведения работ [13–15]. Гранулиты, в рецептуре которых использованы материалы рециклинга, демонстрируют высокую детонационную способность и экономичность

1 Отходы добычи и обогащения полезных ископаемых (угольной промышленности, черной и цветной металлургии, химической промышленности). Режим доступа: https://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=58 (дата обращения: 23.10.2024); Использование отходов производства: возможности и ограничения. Режим доступа: https://www.pgplaw.ru/analytics-and-brochures/articles-comments-interviews/the-use-of-waste-production-opportunities-and-limitations/ (дата обращения: 09.10.2024); Технологии химического рециклинга набирают обороты. Режим доступа: https://polyprofi.ru/news/tekhnologii_khimicheskogo_retsiklinga_nabirayut_oboroty.html (дата обращения: 14.09.2024).

2 Об основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года: указ Президента РФ от 5 марта 2020 г. №164 (с изменениями и дополнениями); О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г.: указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. №645.

3 Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов: приказ Федеральной службы по надзору в сфере природопользования от 22 мая 2017 г. №242.

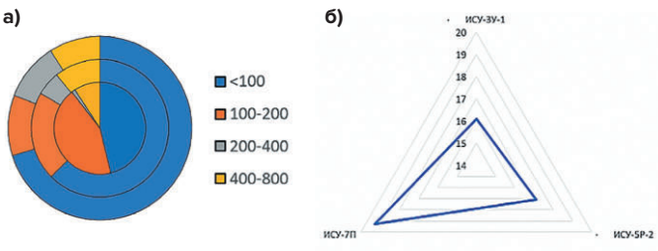

Рис. 1
Гранулометрический состав отбитой горной массы (а) и себестоимость изготовления гранулита (б) при использовании материалов рециклинга

Fig. 1
Particle size distribution of the blasted rock mass (a) and the cost of granulites production (б) using recycled materials

применения [13; 16]. В процессе отбойки горных пород на угольных месторождениях были достигнуты впечатляющие результаты в дроблении материалов. Эти достижения способствуют эффективной и производительной работе горного оборудования, что, в свою очередь, положительно сказывается на общих показателях добычи. Рис. 1 иллюстрирует гранулометрический состав отбитой горной массы (фракции обозначены цветом) и себестоимость изготовления гранулитов. Гранулометрический состав при взрывании АСДТ и гранулитами с твердыми дисперсными горючими веществами (угольный порошок, резиновая крошка) представлен сегментами – внешний кольцевой, промежуточный кольцевой и внутренний круговой соответственно.

Использование материалов рециклинга способствует улучшению взрывчатых свойств и технических характеристик гранулитов, экономичности их применения. Порошковые материалы (углеродсодержащие и углеводородсодержащие вещества) служат твердыми дисперсными горючими веществами, а также выступают модификаторами взрывчатых и физических свойств гранулитов. Порошковые металлы (вторичный алюминий) обеспечивают повышение энергетических характеристик гранулитов. Отработанные нефтепродукты представляют собой экономически эффективные источники топлива, которые могут быть использованы в различных отраслях. Особенно стоит отметить, что их низкозастывающие разновидности обладают уникальными свойствами, позволяющими успешно эксплуатировать их в условиях северных и арктических регионов. Эти топлива сохраняют текучесть при низких температурах, что обеспечивает их применение в суровых арктических условиях, где традиционные горючие материалы могут терять свои эксплуатационные характеристики. Таким образом, отработанные нефтепродукты не только способствуют экономии ресурсов, но и обеспечивают надежность и эффективность в сложных условиях эксплуатации. Исходя из перспективности материалов рециклинга для взрывных технологий в условиях Севера и АЗРФ специалисты Научного совета РАН по проблемам народнохозяйственного использования взрывов (при Отделении наук о Земле) [17] показали одновременную возможность расширения условий применения и получения материалов с новыми улучшенными свойствами.

Материалы и методы

Предлагаемая классификация направлена на улучшение эффективности применения рециклированных материалов в области взрывных технологий. Она обеспечивает более глубокое понимание методов использования отходов в условиях северных регионов и АЗРФ. Эта классификация поможет разработать оптимальные стратегии для переработки и повторного использования отходов, что особенно актуально в условиях ограниченных ресурсов и сурового климата. В результате это может способствовать не только экономии материалов, но и снижению негативного воздействия на окружающую среду, а также повышению безопасности и надежности взрывных работ в сложных природных условиях. Классификационными признаками выступают категории – источник возникновения материалов рециклинга, вид материала и метод его переработки. Данные категории характеризуют рассматриваемые материалы следующим образом:

– получаемые в производственном цикле добычи, обогащения и переработки на горных предприятиях. К данным материалам относят – крупногабаритные шины и резинотехнические изделия при эксплуатации горного транспорта, отработанные нефтепродукты при эксплуатации автотранспорта и средств механизации, угольный порошок при обогащении, промышленная полимерная упаковка и тара;

– образуемые при дизельной генерации электроэнергии в регионах северного завоза, к данным материалам относят отработанные нефтепродукты;

– формируемые в производственном цикле промышленных предприятий, к данным материалам относят кокс;

– создаваемые при утилизации бытовых отходов, к данным материалам относят бытовую полимерную упаковку и бытовую алюминиевую тару.

Систематизация материалов рециклинга для технологии взрывания в графоаналитическом виде представлена в табл. 1. В первой колонке таблицы указаны наименования рециклируемых материалов, их аббревиатуры и физическое состояние. Использование аббревиатур позволяет упростить ссылки на названия материалов, что делает информацию более удобной для восприятия. Во второй колонке, помимо указания источников происхождения рециклируемых материалов, представлен детализированный список этих материалов. Здесь выделены две категории: применяемые и потенциально пригодные для использования. К первой категории относятся такие материалы, как отработанные нефтепродукты, топливная смесь, угольный порошок, коксовая мелочь, резиновая крошка и пластиковая крошка. Ко второй категории отнесены материалы, которые могут быть использованы в будущем, включая морозостойкий мазут (или арктический мазут), пиролизное масло, технический углерод и графеновый порошок. Эта классификация позволяет более четко понимать доступные ресурсы и их возможное применение в различных технологиях переработки.

Результаты и их обсуждение

Регулирование обращения с отходами в РФ включает понятия «отходы, вторичные ресурсы, вторичное сырье» [4]. Согласно письму Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации[5] мы рассматриваем вторичные ресурсы как «…отходы, содержащие полезные фракции, но именно те, которые самостоятельно хозяйствующий субъект определил как отходы», а вторичное сырье рассматривается как «… продукция, полученная в

4 Об отходах производства и потребления: Федеральный закон от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ; Об охране окружающей среды: Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ.

5 О рассмотрении обращения: Письмо Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 12 января 2024 г. № 25-47/442.

Таблица 1
Графоаналитическое описание систематизации материалов рециклинга для технологий взрывания

Table 1
A tabular analytical description of the recycled materials classification for blasting technologies

Наименование материалов рециклинга (аббревиатура)	**Перечень материалов, источник возникновения**
Нефтепродукты	
Нефтепродукты отработанные групп ММО или МИО (НПО)	НПО групп ММО и МИО при эксплуатации карьерного оборудования НПО группы ММО при дизельной генерации электроэнергии в регионах Северного завоза горюче-смазочных материалов
Потенциально пригодный материал	
Пиролизное масло (ПМ)	Продукт утилизации резины при термическом разложении без доступа кислорода (крупногабаритные шины карьерных автосамосвалов, резинотехнические изделия конвейерного транспорта и проветривания шахт, шины бытового и личного автотранспорта)
Морозостойкий мазут (ММ), арктический мазут (АМ)	Продукт утилизации резины при термическом разложении без доступа кислорода с использованием перегретого пара (крупногабаритные шины карьерных автосамосвалов, резинотехнические изделия конвейерного транспорта и проветривания шахт, шины бытового и личного автотранспорта)
Металлическое порошковое горючее	
Вторичные алюминиевые порошки (МГ)	Продукт утилизации бытовых и промышленных отходов – материалов, содержащих алюминий
Порошковое горючее	
Угольный порошок (УП)	Продукт образуется при обогащении или переработке угля
Коксовая мелочь (КМ)	Получается в технологии коксования посредством прокаливания углей под высокой температурой в закрытых сосудах
Резиновая крошка, резиновый гранулят (РК)	Продукт утилизации отработанных крупногабаритных шин карьерного автотранспорта, конвейерного транспорта и изделий проветривания шахт, шины коммерческого и личного автотранспорта
Пластиковая крошка полипропиленовая, полиэтиленовая (ПК)	Продукт утилизации бытовых и промышленных отходов, содержащих пластиковые материалы
Потенциально пригодный материал	
Углерод технический (УТ)	Продукт утилизации резины способом пиролиза (крупногабаритные шины карьерных автосамосвалов, резинотехнические изделия конвейерного транспорта и проветривания шахт, автомобильные шины коммерческого и личного автотранспорта)
Графеновый порошок (ГП)	Продукт утилизации шин автотранспорта, других резинотехнических изделий, пластиков

результате обработки и утилизации отходов…». Принципиальные схемы подготовки материалов рециклинга для технологии взрывных работ, рассматриваемые ниже, учитывают отнесение классифицируемых материалов (см. табл. 1) в категорию вторичных ресурсов или категорию вторичного сырья. Подготовка включает методы:

– очистка *нефтепродуктов отработанных* (НПО) от загрязнения механическими и физико-химическими способами;

– кондиционирование низкотемпературных свойств топливных смесей компаундированием и включением депрессорно-диспергирующих присадок;

– изменение морфологических характеристик порошковых материалов (размер частиц, микрогеометрия поверхности, гранулометрический состав, степень неравноосности частиц).

НПО групп ММО или МИО образуются в процессах горного производства – добычи, транспортирования, обогащения и переработки полезных ископаемых, при эксплуатации энергоустановок ДЭС и установок с силовыми агрегатами ДВС. В ходе эксплуатации нефтепродуктов в различных устройствах и установках они неизбежно подвергаются загрязнению. Эти загрязнения могут возникать по ряду причин и классифицируются как эксплуатационные. К основным категориям эксплуатационных загрязнений нефтепродуктов относятся углеводородные загрязнения, которые формируются в результате взаимодействия с другими углеводородными веществами. Остаточные загрязнения возникают из остатков предыдущих веществ, которые не были полностью удалены из системы. Атмосферные загрязнения связаны с воздействием внешней среды, включая пыль, грязь и другие частицы, присутствующие в воздухе, которые могут оседать на поверхности нефтепродуктов. Контактные загрязнения возникают при взаимодействии нефтепродуктов с материалами оборудования, что может привести к выделению нежелательных химических веществ. Загрязнения появляются в результате физического износа и старения компонентов оборудования, что также может негативно сказаться на качестве нефтепродуктов. В дополнение к этим основным видам, существуют и другие типы загрязнений, которые могут оказывать влияние на эффективность работы нефтепродуктов и их эксплуатационные характеристики [6].

Подготовка нефтепродуктов для гранулитов (рис. *2*) начинается со сбора продуктов в накопительной емкости *1*. На практике селективный сбор нефтепродуктов оказывается сложным, поэтому в накопительной емкости собираются компаунды, содержащие различные нефтепродукты. Нефтепродукты в накопительной емкости содержат воду, механические загрязнения и химические вещества. Далее содержимое подается насосом *2* по трубопроводу *3* в аппарат обезвоживания *4*, после чего направляется на очистку от механических примесей в аппарат *6*. На первой стадии очистки отработанных нефтепродуктов (литера А) из аппаратов удаляются вода (*4а*) из отстойной зоны и осажденный осадок (*5а*) соответственно через выпускные отверстия *5* и *7*, а шлам из накопительной емкости выводится через выпускное отверстие 9. Очищенные от воды и твердых загрязнений нефтепродукты 8 поступают на подготовку гранулита.

Если эксплуатационные загрязнители имеют в составе химические компоненты и соли тяжелых металлов, то другие загрязнители проходят вторую стадию очистки (литера В), включающую физико-химические (адсорбция *10*, коагуляция *12*, ионообменная чистка *14*) методы обработки. Подготовленные НПО (*11, 13, 15*) должны соответствовать

6 Загрязнение топлива и смазочных материалов. Режим доступа: https://ros-pipe.ru/clauses/zagryaznenie_topliva_i_smazochnykh_materialov (дата обращения: 15.09.2025).

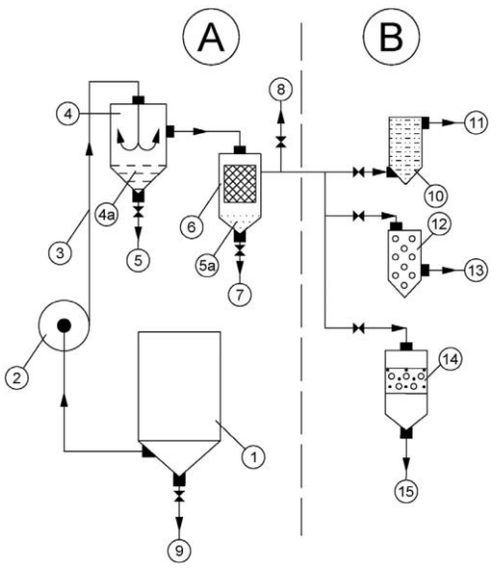

Рис. 2
Схема подготовки НПО для гранулитов

Fig. 2
A schematic diagram of the spent petroleum products preparation for granulites

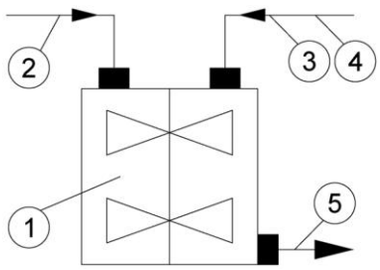

Рис. 3
Схема подготовки топливной смеси для гранулитов

Fig. 3
A schematic diagram of the fuel mixture preparation process for granulites

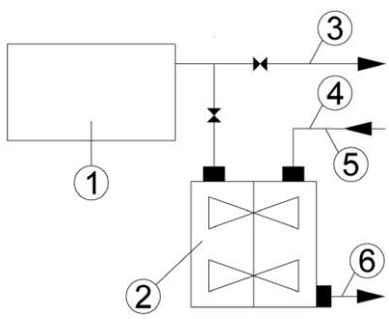

Рис. 4
Схема подготовки потенциально пригодных жидких топливных компонентов для гранулитов

Fig. 4
A schematic diagram of the potentially suitable liquid fuel components preparation for granulites

нормативным документам[7] и требованиям технических условий на гранулиты.

Топливная смесь (ТС) является развитием процесса утилизации НПО в технологии взрывных работ. ТС образуют смешением НПО с дизельным топливом или маслом соляровым в пропорции от 10/90 до 90/10, при этом с уменьшением содержания НПО вязкость ТС снижается. Эффективность ТС при приготовлении гранулитов в условиях Севера и АЗРФ зависит от температурно-вязкостных свойств компонентов. При использовании зимних и арктических марок дизельного топлива ТС приобретает улучшенные низкотемпературные свойства. Дополнительные низкотемпературные качества (более низкое значение предельной температуры фильтруемости и температуры помутнения) получают включением в смесь депрессорно-диспергирующих присадок (ДДП), что отражено в названии – низкотемпературная топливная смесь (НТС).

На рис. 3 показана схема подготовки ТС и НТС из отработанных нефтепродуктов, прошедших одну или две стадии предварительной очистки. В оборудованную мешалками емкость *1* подают прошедшие очистку НПО *2*, в соответствующей пропорции загружают дизельное топливо *3,* компоненты перемешивают до получения однородной консистенции. Для получения НТС одновременно с загрузкой НП подают в емкость депрессорно-диспергирующие добавки *4*. Разгрузку готовой ТС производят из выпускного отверстия *5*.

Подготовка потенциально пригодных жидких топливных компонентов для гранулитов. Пиролизное масло образуется при термическом разложении резины без доступа кислорода. Морозостойкий (арктический) мазут получают термическим разложением резины без доступа кислорода с использованием перегретого пара. Такой мазут обладает улучшенными низкотемпературными характеристиками. По физико-химическим свойствам пиролизное масло и арктический мазут являются перспективными для рецептуры гранулитов. Гранулит с пиролизным маслом защищен патентом [18].

Схема подготовки топливной смеси для гранулита на основе пиролизного масла и морозостойкого (арктического) мазута приведена на рис. 4. Пиролизное масло или арктический мазут хранят в емкости *1*. По патрубку *3* на приготовление гранулита подают топливный компонент с исходными свойствами. Для улучшения вязкостно-температурных свойств топливной смеси в оборудованную мешалками емкость *2* подают пиролизное масло. При смешении с зимними или арктическими марками дизельного топлива *4* получают ТС, имеющую улучшенные низкотемпературные характеристики. При эксплуатации в суровых арктических условиях для получения низкотемпературной топливной смеси (НТС) дополнительно вводят депрессорно-диспергирующие присадки *5*. Готовую ТС или НТС подают через выпускное отверстие 6. Альтернативой пиролизному маслу и морозостойкому мазуту в этой схеме является биодизельное топливо [19], подготовку которого ведут аналогично.

Подготовка порошковых материалов (алюминиевый порошок, угольный порошок, коксовая мелочь, резиновая крошка) для гранулитов. При подготовке порошковых материалов для гранулитов категория отходов играет определенную роль. Вторичные ресурсы, как отход производства, удостоверяются ограниченным составом сведений, напротив, вторичное сырье, как продукция, должно подтверждать соответствие стандартам, техническим условиям, техническим регламентам и т.д.

Вторичные алюминиевые порошки являются продуктом утилизации бытовых и промышленных отходов материалов, содержащих алюминий. Основной метод получения алюминиевого порошка АПВ – распыление расплава алюминия в струе сжатого газа (кислорода и азота). Рассматриваемые алюминиевые порошки в технологии приготовления гранулитов отнесены к категории вторичного сырья.

Угольный порошок изготавливают в процессе обогащения и переработки угля. Коксовую мелочь получают в ходе коксования, которое включает прокаливание углей при высокой температуре в герметичных установках. В технологии проведения взрывных работ угольный порошок, который производится непосредственно на предприятии, классифицируется как вторичный ресурс. В то же время,

7 ГОСТ 21046-2021 «Нефтепродукты отработанные». М.; 2021. 12 с. Режим доступа: https://www.rosa1.ru/upload/iblock/c1b/c1b11c4d38eea08de96ad108d3e42ac7.pdf (дата обращения: 15.09.2025).

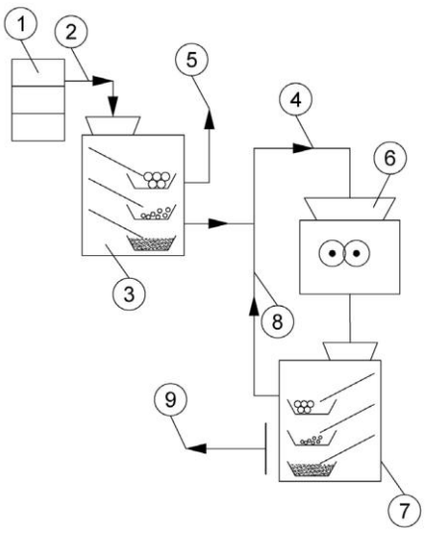

Рис. 5
Общая схема подготовки порошковых материалов

Fig. 5
A general schematic diagram of the powder material preparation

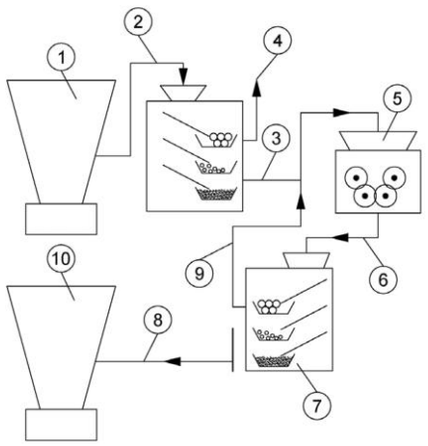

Рис. 6
Схема подготовки порошковых материалов на основе пластика

Fig. 6
A schematic diagram of the plastic-based powder materials preparation

если угольный порошок закупается у сторонних поставщиков, он считается вторичным сырьем. Что касается коксовой мелочи, она также относится к категории вторичных ресурсов, поскольку представляет собой товар, приобретенный у внешних источников.

Резиновая крошка является продуктом утилизации отработанных крупногабаритных шин карьерного автотранспорта и других резинотехнических изделий. В технологии взрывных работ резиновую крошку относят к категории вторичного сырья [8]. При наличии на предприятии (горном) мощностей по получению резиновой крошки ее относят к категории вторичного ресурса.

Составы гранулита с угольным порошком, коксовой мелочью, резиновой крошкой защищены патентом [20]. Для использования в технологии взрывания изменяют морфологические характеристики частиц порошкового материала – размеры, форму, микрогеометрию поверхности и гранулометрический состав [21]. Требования к морфологическим характеристикам порошкового материала определяет техническая документация на изготавливаемую продукцию (гранулит).

Общая схема подготовки порошковых материалов показана на рис. 5. Место технологического хранения порошкового материала обозначено позицией *1*. С помощью транспортирующего устройства *2* порошковый материал подается на предварительный классификатор *3*, на котором производится фракционирование порошка. Крупная фракция *5* отделяется. Более мелкие фракции 4 поступают в дробилку *6*, из которой – в классификатор *7*. Здесь производится разделение на используемые в рецептуре гранулита фракции *9* и направляемые на доизмельчение фракции *8*.

Подготовка порошковых материалов, пригодных для использования в гранулитах, включает технический углерод и графеновый порошок. Технический углерод получается в процессе утилизации отработанных крупногабаритных шин карьерного автотранспорта и других резинотехнических изделий методом пиролиза. Он применяется в качестве твердой горючей добавки, заменяющей часть жидкого топлива в рецептурах гранулитов. Графеновый порошок, также известный как флеш-графен, является продуктом утилизации отработанных шин и других резинотехнических изделий. Его производство основано на технологии быстрого нагрева углеродсодержащих материалов до температуры около 3000 К. В подготовке данных порошковых материалов принципиальных отличий с представленными на рис. 5 не предложено.

Подготовка полипропиленовой и полиэтиленовой пластиковых крошек осуществляется из утилизированных бытовых и промышленных отходов, содержащих пластиковые материалы. В технологии взрывных работ она классифицируется как вторичное сырье. Гранулит с добавлением пластиковой крошки успешно прошел промышленное тестирование [22].

Схема подготовки пластиковых порошковых материалов показана на рис. 6. До поступления на подготовку к использованию в гранулитах пластиковые изделия измельчают до крошки и промывают для удаления бумажных, пленочных покрытий и загрязнений. Сбор и технологическое хранение предварительно подготовленного порошкового материала обозначены позицией *1*. С помощью транспортирующего устройства *2* порошковый материал подается на предварительный классификатор *3*, на котором производится фракционирование порошка. Крупная фракция *4* отделяется. Кондиционные фракции *3* поступают в дробилку *5*, из которой транспортируются устройством *6* в классификатор *7*. Здесь производится разделение на используемые в рецептуре гранулита фракции *8* и направляемые на доизмельчение фракции *9*. Бункер *10* предназначен для хранения порошка.

Заключение

В ходе исследований была установлена экономическая эффективность рециклированных материалов, улучшающих взрывчатые свойства гранулитов. Порошковые вещества, такие как углерод и вторичный алюминий, повышают их энергетические характеристики. Отработанные нефтепродукты благодаря своей текучести при низких температурах являются выгодным источником топлива в арктических условиях.

Предложенная классификация рециклированных материалов оптимизирует их использование во взрывных технологиях и помогает понять методы переработки отходов, что способствует экономии ресурсов и снижению негативного воздействия на окружающую среду. Это также повышает безопасность взрывных работ в сложных климатических условиях.

Систематизация материалов для рециклинга в технологии взрывания, представленная в табличном формате, улучшает понимание доступных ресурсов. Подготовка порошковых материалов включает технический углерод

8 ТУ 2519-001-48697140-00 «Крошка резиновая»; ТУ 38.305-088-2008 «Резиновый порошок»; ТУ 2511-029-01877509-04 «Резина дробленая»; ТУ 38.105590-91 «Крошка резиновая из вулканизационных отходов» и др.

и графеновый порошок, получаемые из утилизированных шин методом пиролиза и быстрого нагрева. Эти добавки успешно тестируются в гранулах, а пластиковые крошки из отходов используются как вторичное сырье.

Проведенный анализ подчеркивает потенциал рециклинга для разработки экологически устойчивых технологий в арктических регионах, где важно минимизировать негативное воздействие на хрупкую экосистему. Интеграция рециклинга может стать ключевым фактором для обеспечения экологической безопасности и рационального использования ресурсов в Арктике.

Список литературы / References

1. Петров И.В. Вторичные ресурсы, образующиеся в горнодобывающей промышленности. В кн.: Скобелев Д.О. (ред.). *Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий*. М.; СПб.: Реноме; 2019. С. 671–705.
2. Новичков С.Б. *Теория и практика переработки отходов алюминия в роторных наклонных печах* [автореф. дис. … д-ра техн. наук]. Иркутск; 2007. 40 с. Режим доступа: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01004112706.pdf (дата обращения: 12.06.2025).
3. Косарева М.А., Стахеев С.Г., Третьякова Н.А. *Основные технологии переработки нефтегазового сырья*. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета; 2022. 110 с. Режим доступа: https://elar.urfu.ru/handle/10995/119582 (дата обращения: 12.06.2025).
4. Войтов И.В. (ред.) *Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 окт. 2016 г.* Минск: Белорусский государственный технологический университет; 2016. 323 с.
5. Румянцева Т.А., Галанин Н.Е. *Химия и технология процессов вторичной переработки нефти*. Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет; 2019. 108 с.
6. Яхяев Д.Б., Воронина Л.В., Дементьева Д.А., Малыгина М.Д. Классификация техногенных отходов в Арктической зоне Российской Федерации. *Отходы и ресурсы*. 2023;10(3):08ECOR323. https://doi.org/10.15862/08ECOR323
Iakhiaev D.B., Voronina L.V., Dementeva D.A., Malygina M.D. Classification of technogenic waste in the Arctic zone of the Russian Federation. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2023;10(3):08ECOR323. (In Russ.) https://doi.org/10.15862/08ECOR323
7. Татаркин А.И., Игнатьева М.Н., Логинов В.Г., Полянская И.Г., Юрак В.В. Экологические границы освоения природно-ресурсного потенциала Арктической Зоны Российской Федерации в социально-экономическом развитии. *Современные производительные силы*. 2015;(3):143–163.
Tatarkin A.I., Ignat'eva M.N., Loginov V.G., Polyanskaya I.G., Yurak V.V. Environmental limits to the development of the natural resource potential of the Arctic Zone of the Russian Federation in the social and economic development. *Sovremennye Proizvoditelnye Sily*. 2015;(3):143–163. (In Russ.)
8. Соколов Ю.И. Риски мусорной экологической катастрофы России. *Проблемы анализа риска*. 2018;15(2):50–63. Режим доступа: https://www.risk-journal.com/jour/article/view/135 (дата обращения: 12.06.2025).
Sokolov Yu.I. The risks of Russia's garbage ecological catastrophe. Issues of Risk Analysis. 2018;15(2):50–63. (In Russ.) Available at: https://www.risk-journal.com/jour/article/view/135 (accessed: 12.06.2025).
9. Седнев В.А., Дроздов Д.А., Сергеенкова Н.А. Методы обеспечения экологической безопасности при утилизации отходов в труднодоступных районах Арктической зоны. Арктика: экология и экономика. 2022;12(3):444–453. Режим доступа: http://www.arctica-ac.ru/article/602/ (дата обращения: 12.06.2025).
Sednev V.A., Drozdov D.A., Sergeenkova N.A. Methods for ensuring environmental safety in waste disposal in hard-to-reach areas of the Arctic zone. Arktika: Ekologiya i Ekonomika. 2022;12(3):444–453. (In Russ.) Available at: http://www.arctica-ac.ru/article/602/ (accessed: 12.06.2025).
10. Николаев В.В., Ипатова Д.А. Реверсивная логистика в системе обращения с отходами на территории Арктической зоны Российской Федерации. Экономический вектор. 2021;(2):21–25. https://doi.org/10.36807/2411-7269-2021-2-25-21-25
Nikolaev V.V., Ipatova D.A. Reverse logistics in the waste management system in the Arctic zone of the Russian Federation. Economic Vector. 2021;(2):21–25. (In Russ.) https://doi.org/10.36807/2411-7269-2021-2-25-21-25
11. Агаханянц П.Ф., Ломтев А.Ю., Примак Е.А., Выучейская Д.С. Территориальные схемы обращения с отходами в российской Арктике: повод для дискуссии. Российская Арктика. 2019;(6):48–54. https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10067
Agakhaniants P.F., Lomtev A.Yu., Primak E.A., Vyucheyskaya D.S. Strategic schemes of waste management in Russian Arctic as a start point for discussion. Russian Arctic. 2019;(6):48–54. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10067
12. Вилсон Д. (ред.) Утилизация твердых отходов. М.: Стройиздат; 1985. – Т. 1. 336 с.
13. Викторов С.Д., Франтов А.Е., Опанасенко П.И., Строгий И.Б., Жариков И.Ф., Лапиков И.Н. Инновационные направления совершенствования простейших ВВ с добавками, возвращаемыми в производственный оборот рециклингом материалов. Уголь. 2020;(11):17–21. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-11-17-21
Viktorov S.D., Frantov A.E., Opanasenko P.I., Strogiy I.B., Zharikov I.F., Lapikov I.N. Innovative ways for improving the cheap explosives using additives made from returned to production recycled materials. Ugol'. 2020;(11):17–21. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-11-17-21
14. Доманов В.П., Варнаков Ю.В., Батраков Д.Н., Варнаков К.Ю. Повышение эффективности действия и безопасности применения углесодержащих гранулитов, предназначенных для ручного и механизированного формирования шпуровых и скважинных зарядов. Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2011;(2):84–89.
Domanov V.P., Varnakov Yu.V., Batrakov D.N., Varnakov K.Yu. Coal containing granulites aimed for manual and mechanized formation of bore-hole charges action efficiency and usage safety increase. Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety). 2011;(2):84–89. (In Russ.)

15. Пыталев И.А., Доможиров Д.В., Швабенланд Е.Е., Прохоров А.А., Пронин В.В. Способ повышения качества подготовки пород к выемке при использовании эмульсионных взрывчатых веществ на карьерах с высокими уступами. Горная промышленность. 2021;(6):62–67. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-62-67
Pytalev I.A., Domozhirov D.V., Shvabenland E.E., Prokhorov A.A., Pronin V.V. A method to improve the quality of rock preparation for extraction with emulsion explosives in open-pit mines with high benches. Russian Mining Industry. 2021;(6):62–67. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-62-67
16. Викторов С.Д., Франтов А.Е., Лапиков И.Н. Результаты сравнительных испытаний гранулитов разного рецептурного состава. *Горный журнал*. 2022;(7):67–71. https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.11
Viktorov S.D., Frantov A.E., Lapikov I.N. Comparative testing of various composition granulites. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(7):67–71. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.11
17. Франтов А.Е., Викторов С.Д., Лапиков И.Н., Вяткин Н.Л., Болотова Ю.Н. Развитие методических подходов при моделировании свойств многокомпонентных гранулитов, применяемых в условиях низких температур и других осложняющих факторов. *Горная промышленность*. 2024;(5S):79–90. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-79-90
Frantov A.E., Viktorov S.D., Lapikov I.N., Vyatkin N.L., Bolotova Yu.N. Development of methodological approaches in modeling the properties of multicomponent granulites used in low temperature conditions and other complicating factors. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):79–90. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-79-90
18. Викторов С.Д., Захаров В.Н., Вартанов А.З., Закалинский В.М., Ефремовцев Н.Н., Франтов А.Е. и др. *Состав взрывчатой смеси*. Патент RU 2666426 C1. Опубл. 07.09.2018. Режим доступа: https://patents.google.com/patent/RU2666426C1/ru (дата обращения: 15.09.2025).
19. Солодухин Е.С., Шушпанов А.Н., Акинин Н.И., Франтов А.Е., Лапиков И.Н. Преимущества применения биодизельного топлива в качестве горючего компонента простейших взрывчатых материалов. *Взрывное дело*. 2024;(145-102):116–135.
Solodukhin E.S., Shushpanov A.N., Akinin N.I., Frantov A.E., Lapikov I.N. The advantages of biodiesel usage as a fuel component in simple explosives. *Explosion Technology*. 2024;(145-102):116–135. (In Russ.)
20. Викторов С.Д., Захаров В.Н., Франтов А.Е., Поставнин Б.Н., Жариков И.Ф., Мингазов Р.Я. и др. *Состав простейшего ВВ и способ его реализующий*. Патент RU 2663037 C2. Опубл.: 01.08.2018. Режим доступа: https://patents.google.com/patent/RU2663037C2/ru (дата обращения: 15.09.2025).
21. Франтов А.Е., Белоусов Ф.С. Исследование некоторых свойств твердых горючих компонентов для простейших взрывчатых веществ. *Инженерная физика*. 2019;(11):51–57. https://doi.org/10.25791/infizik.11.2019.1014
Frantov A.E., Belousov F.S. Research of some properties of solid combustible components for cheap explosives. *Engineering Physics*. 2019;(11):51–57. (In Russ.) https://doi.org/10.25791/infizik.11.2019.1014
22. Франтов А.Е., Мингазов Р.Я., Фадеев В.Ю. Исследование углеводородных материалов, используемых при изготовлении гранулитов. В кн.: *Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: материалы 5-й конференции Международной научной школы акад. РАН К.Н. Трубецкого, г. Москва, 14–18 ноября 2022 г.* М.: ИПКОН РАН; 2022. С. 161–163.

Информация об авторах
Франтов Александр Евгеньевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, член Научного совета РАН по проблемам народнохозяйственного использования взрывов, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: aef1948@gmail.com
Лапиков Иван Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-5106-0335; e-mail: itwent@gmail.com
Белоусов Федор Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-3880-267X
Вяткин Николай Леонтьевич – доктор экономических наук, кандидат технических наук, президент, Национальная организация инженеров-взрывников в поддержку профессионального развития, член Научного совета РАН по проблемам народнохозяйственного использования взрывов, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: nikvyatkin@yandex.ru
Болотова Юлия Николаевна – кандидат технических наук, исполнительный директор, Национальная организация инженеров-взрывников в поддержку профессионального развития, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: bolotovayn@noiv.pro

Информация о статье
Поступила в редакцию: 04.09.2025
Поступила после рецензирования: 27.10.2025
Принята к публикации: 12.11.2025

Information about the authors
Aleksandr E. Frantov – Dr. Sci. (Eng.), Leading Research Associate, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Member of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of the national economic use of blasts, Moscow, Russian Federation; e-mail: aef1948@gmail.com
Ivan N. Lapikov – Cand. Sci. (Eng.), Chief Research Associate, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-5106-0335; e-mail: itwent@gmail.com
Fedor S. Belousov – Cand. Sci. (Eng.), Chief Research Associate, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-3880-267X
Nikolai L. Vyatkin – Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Eng.), President, National Organization of Explosive Engineers in Support of Professional Development, Member of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of the national economic use of blasts, Moscow, Russian Federation; e-mail: nikvyatkin@yandex.ru
Yuliya N. Bolotova – Cand. Sci. (Eng.), Executive Director, National Organization of Explosive Engineers in Support of Professional Development, Moscow, Russian Federation; e-mail: bolotovayn@noiv.pro

Article info
Received: 04.09.2025
Revised: 27.10.2025
Accepted: 12.11.2025