

Развитие методических подходов при моделировании свойств многокомпонентных гранулитов, применяемых в условиях низких температур и других осложняющих факторов

А.Е. Франтов^{1,3}✉, С.Д. Викторов^{1,3}, И.Н. Лапиков¹, 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 Национальная организация инженеров-взрывников в поддержку профессионального развития, г. Москва, Российская Федерация

³ Научный совет РАН по проблемам народнохозяйственного использования взрывов, Москва, Российская Федерация
✉ aef1948@gmail.com

Резюме: Рассмотрены вопросы моделирования свойств многокомпонентных гранулитов для применения в условиях низких температур и других осложняющих факторов. Использован методический подход, основанный на выделении совокупности основных и опосредованных признаков, характеризующий моделируемые многокомпонентные простейшие взрывчатые вещества как сложный объект с существенными особенностями, отличительными свойствами, качественными и количественными характеристиками, технологическими показателями. Для изменения свойств многокомпонентных гранулитов составлен алгоритм решения задачи, структурно разделяющий варьируемые показатели и параметры в процессах изготовления и применения. Показаны особенности используемых сырьевых компонентов и ограничения при применении в условиях низких температур. Показано влияние физических, механических, структурных и других характеристик ингредиентов гранулитов на взрывчатые свойства, технические и технологические аспекты производства. Приведена номенклатура материалов рецилинга, образуемых в процессах горных работ, обогащения и переработки минерального сырья, и показана сравнительная эффективность гранулитов с учетом стоимостных показателей используемых материалов. Предложен метод десульфурации при взрывании многокомпонентных гранулитов, направленный на нейтрализацию диоксида серы в продуктах взрыва. Рассмотрены природные и климатические факторы, экономико-географические характеристики размещения месторождений, геокриологические условия и характеристики мерзлых пород, горно-геологические и горнотехнические условия разработки, оказывающие влияние на ведение взрывных работ в мерзлоте.

Ключевые слова: простейшие взрывчатые вещества, аммиачная селитра, нефтепродукты, дизельное топливо, твердое горючее, коксовая мелочь, угольный порошок, детонационная способность

Для цитирования: 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>

Development of methodological approaches in modeling the properties of multicomponent granulates used in low temperature conditions and other complicating factors

A.E. Frantov^{1,3}✉, S.D. Viktorov^{1,3}, I.N. Lapikov¹, 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 questions of modelling the properties of multicomponent granulates to be used in conditions of low temperatures and other complicating factors. A methodical approach is used which is based on identifying a set of basic and indirect features that characterize the modelled multicomponent simple explosives as a complex object with essential features, distinctive properties, qualitative and quantitative characteristics, and technological indicators. An algorithm to modify

the properties of multicomponent granulites was developed in order to solve the problem. This algorithm structurally separates the varying indicators and parameters in the manufacturing and application processes. Specific features of the used raw material components are shown as well as limitations in low-temperature applications. The effects of physical, mechanical, structural and other characteristics of granulite components on the explosive properties are shown, as well as the technical and technological aspects of production. The material mix of recycling materials formed in the processes of mining, concentration and processing of mineral raw materials is provided and the comparative efficiency of granulites is shown with account of cost indicators of the materials used. A method of desulphurisation during explosion of multi-component granulites is proposed which is aimed at neutralization of sulphur dioxide in the blast products. Natural and climatic factors, economic and geographical characteristics of the field location, geocryological conditions and characteristics of the permafrost soils are considered, as well as mining, geological and technical conditions of the development that affect blasting operations in the permafrost soils.

Keywords: simple explosives, ammonium nitrate, petroleum products, diesel fuel, solid fuel, coke fines, coal powder, detonation capacity

For citation: 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>

Введение

Качествами простейших взрывчатых веществ, обуславливающими широкое использование в процессах и операциях физико-технической, физико-химической и комбинированной геотехнологии, являются эффективность действия, простота приготовления и заряжания, безопасность применения¹. К недостаткам следует отнести сравнительно низкую физическую стабильность и водоустойчивость. Гранулированные взрывчатые вещества являются основным типом для горнодобывающей промышленности благодаря возможности комплексной механизации работ при осуществлении операций складирования, транспортирования и заряжания. Исходя из требований времени была проведена работа по доработке структуры, иерархии уровней, формализации показателей модели, что легло в основу прогнозирования возможности использования гранулитов в условиях низких температур и других осложняющих факторов.

Простейшие взрывчатые вещества – обзорная часть

К простейшим взрывчатым веществам (ВВ) относятся смеси, не содержащие взрывчатых компонентов, на основе кристаллической аммиачной селитры с горючими добавками – торфом, древесной мукой, мхом, измельченной сосновой корой, отходами хлопка, имеющие название «динамоны» [1]. С середины 1960-х годов в СССР производство динамонов было основано на трехкомпонентном составе, куда входили аммиачная селитра, соляровое масло и алюминиевая пудра. К недостаткам динамонов следует отнести расслаивание зарядов, гигроскопичность и недостаточную эффективность, даже металлизированных составов.

Простейшими гранулированными взрывчатыми веществами являются смеси, приготавливаемые на основе гранулированной аммиачной селитры с жидкими или легкоплавкими нефтепродуктами, структурирующими и горючими добавками. В англоязычной литературе про-

стейшие взрывчатые вещества имеют название – cheap explosives; в литературе на немецком языке – einfachste Sprengstoffe, Sprengstoff einfachster Zusammensetzung; в литературе на французском языке – explosifs bon marche; в литературе на испанском языке – explosivos simplisimos, substantias explosives simplicimas.

Простейшие взрывчатые вещества указанного типа в английской транскрипции обозначают аббревиатурой AN-FO (Ammonium Nitrate Fuel Oil), в русской транскрипции аббревиатурой – АС-ДТ (аммиачная селитра-дизельное топливо). Основным преимуществом двухкомпонентных взрывчатых веществ типа АС-ДТ является простота технологии изготовления, которая сводится к простому механическому перемешиванию твердой и жидкой фаз. В Российской Федерации простейшие гранулированные взрывчатые вещества объединены под общим названием «гранулиты», для которых разработана широкая номенклатура двух-, трех- и многокомпонентных смесей, изготавливаемых в заводских условиях и на местах ведения взрывных работ. В дальнейшем изложении в настоящей работе слово «гранулит» будет использован как термин. Отличительными чертами технологии использования гранулитов являются низкая стоимость, безопасность в обращении, приготовление на местах ведения работ, низкая трудоемкость заряжания.

Совокупность свойств гранулитов рассмотрена в работе [2], где предложен концептуальный подход в моделировании свойств многокомпонентных гранулитов. В рамках представленного подхода была создана описательная модель, обладающая структурными особенностями и включающая содержательные показатели в области рецептуры, процесса производства и технологии применения. Однако с целью прогнозирования использования гранулитов в условиях низких температур и других осложняющих факторов возникла необходимость доработки структуры, формализации классификационных признаков и аспектов моделирования, которая рассматривается в настоящей работе.

Материалы и методы.

Подходы к выбору и построению модели

При изготовлении гранулитов используются сырьевые компоненты – кристаллические окислители (промышленные виды аммиачной селитры), жидкие горючие компоненты (дизельные топлива, минеральные масла), дисперсные добавки (металлические порошки), а также материалы

¹ Mining Explosives Market Insights, 2031. Available at: <https://www.transparencymarketresearch.com/mining-explosives-market.html> (accessed: 30.04.2022); 1 Industrial Explosives Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report, by Type [High Explosives and Blasting Agents] and End-use Industry: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2020–2027: Available at: <https://www.alliedmarketresearch.com/industrial-explosives-market> (accessed: 11.06.2022); Global-Civil-Explosives-Market-Research-Report-2016-2026-440479. Available at: www.theresearchinsights.com/reports (accessed: 11.07.2023); The World's Largest Customer and Supplier Intelligence Company. Available at: www.industryarc.com/Report/18222/ (accessed: 11.07.2023).

рециклинга, образуемые в процессах горных работ, обогащения и переработки минерального сырья. Количество применяемых ингредиентов измеряется десятками единиц, каждый из которых обладает комплексом свойств, придающих направленность в обеспечении безопасности и надежности взрывания, эффективности применения, минимизации негативного воздействия на окружающую среду в условиях низких температур и других осложняющих факторов. Реализация выбора наиболее оптимального рецептурного состава гранулитов для рассматриваемых условий применения представляет сложную научно-техническую задачу².

Одновременно с решением вопросов проектирования рецептуры, прогнозирования поведения простейших взрывчатых веществ при применении по назначению в имеющейся модели [2] были выявлены недостатки, заключающиеся в ограниченном числе отношений оригинала и модели, описании сугубо технических сторон объекта. Так, например, модель не содержит совокупности элементов, направленных на прогнозирование поведения объекта в условиях низких температур и других осложняющих факторов, или понимания связей, возникающих при актуальных вызовах (цивилизационных, политических), или влияния социальных отношений.

Теория систем и системного анализа определяет возможность представления объектов в виде совокупности свойств (признаков) – системообразующих и факультативных [3–5]. Для многокомпонентного гранулита свойства, тождественные указанным выше, представлены характеристическими признаками:

а) основными

- рецептура компонентного состава;
- технологичность изготовления;
- экономичность применения;
- экологичность ведения работ;
- условия использования;

б) опосредованными

- технические и технологические уязвимости;
- цивилизационные политические, социальные и другие вызовы.

Формализация и фиксация основных характеристических признаков построены на основе общепринятых и специальных терминов, применяемых в рассматриваемой области знаний и имеющих смысловое или численное значение. Терминологическое дерево основных характеристических признаков включает описание особенностей, отличительных свойств, качественных и количественных характеристик, показателей многокомпонентных простейших ВВ, которое может быть представлено в виде:

- **рецептура компонентного состава** – кристаллический окислитель, жидкое и твердое горючее. Различие технологических свойств гранулированной селитры, нефтепродуктов и порошкового горючего. Методы стабилизации технологических свойств кристаллического окислителя. Характеристики нефтепродуктов, влияющие на безопасность изготовления и применения гранулитов, – температура вспышки, предельная температура фильтруемости, помутнения или застывания и др. Для твердых углеродсодержащих материалов, углеводородных полимеров и металлических порошков характеристи-

ками являются пористость, адгезионные свойства, размер, форма и структура частиц и другие показатели;

- **технологичность изготовления** – сбалансированность состава, чувствительность к механическим воздействиям, структурные особенности гранулированных видов селитры, пути повышения плотности заряжания, теплоты взрыва, увеличения объемной концентрации энергии, управление плотностью и водоустойчивостью;
- **экономичность применения** – использование кристаллического окислителя с низкой стоимостью – селитры по ГОСТ 2 марки А и марки Б как основного компонента гранулита, применение в рецептуре материалов рециклинга, образуемых в процессах горных работ, обогащения и переработки минерального сырья, а также вторичного использования продуктов утилизации бытовых и промышленных отходов, содержащих алюминий;
- **экологичность ведения работ** – кислородный баланс, ядовитые газы, такие как оксид углерода CO, оксиды азота NO, NO₂, N₂O₄, диоксид серы SO₂, дигидросульфид H₂S; способы нейтрализации вредных веществ;
- **условия использования** – технологические особенности изготовления и применения гранулитов на взрывных работах при действии неблагоприятных природно-климатических факторов, наличии многолетнемерзлых пород с учетом размещения сырьевой базы в северных и арктических районах РФ.

Описание опосредованных характеристических признаков охватывает выработку понятий, терминов с учетом раскрытия влияния на использование гранулитов в условиях Севера и АЗ РФ:

- технических и технологических уязвимостей – гибкость состава, складская логистика, потребность в энергоресурсах;
- цивилизационных, политических, социальных и других вызовов – трансформация природных богатств в экологию, нулевой углеродный след, приоритеты деятельности правительства, социальная стабильность общества.

На основе рассмотренных представлений предложен алгоритм модельного решения задачи (рис. 1), направленный на детальное раскрытие основных характеристических признаков и описание опосредованных признаков.

В рамках разрабатываемого подхода к моделированию свойств многокомпонентных гранулитов, применяемых в условиях осложняющих факторов (воздействие неблагоприятных природно-климатических факторов и геокриологических условий), авторы опираются на результаты собственных исследований, на которые даны ссылки в [2]. В настоящем материале данные собственных исследований приводятся без ссылок на публикации, за исключением новых публикаций.

Анализ свойств признака **«рецептура компонентного состава»** включает описание особенностей сырьевых компонентов гранулитов – технологических свойств и характеристик кристаллических окислителей, низкотемпературных свойств и показателей нефтепродуктов и физико-механических свойств твердых горючих добавок.

Для изготовления гранулитов используется кристаллический окислитель на основе промышленных видов гранулированной аммиачной селитры: по ГОСТ 2 марки А и Б (рис. 2, а) и пористой (рис. 2, б, в). Гранулометрический со-

² НОИВ: сплав науки, производства, безопасности [Интервью Н.Л. Вяткина]. Глобус: геология и бизнес. 18 марта 2024 г. Режим доступа: <https://www.vnedra.ru/lyudi/intervyu/noiv-splav-nauki-proizvodstva-bezopasnosti-24158/> (дата обращения: 11.09.2024).



Рис. 1
Алгоритм модельного решения задачи модернизации гранулиатов в условиях Севера и Арктики

Fig. 1
An algorithm of model solution to the problem of granulate enhancement for the Northern and Arctic conditions

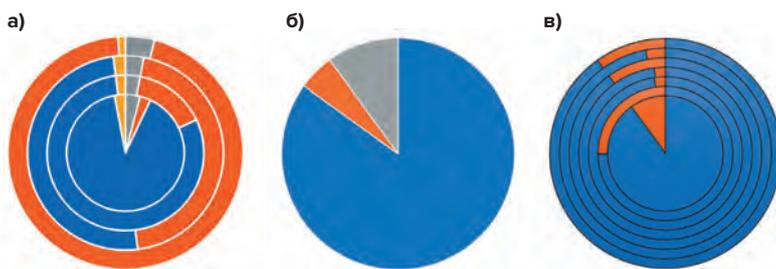


Рис. 2
Фракционный состав промышленных видов гранулированной аммиачной селитры

Fig. 2
Particle size distribution of industrial types of granulated ammonium nitrate

став аммиачной селитры оценивается по параметрам [6]: размеру выделяемого класса крупности, количеству выделяемых фракций, процентному весовому содержанию фракции данного размера.

Промышленные виды аммиачной селитры имеют различия в технологических свойствах и характеристиках, которые проявляются в показателях фракций крупности; прочности, плотности и пористости гранул; впитывающей и удерживающей способности и др.

На свойства промышленных видов аммиачной селитры влияют модифицирующие добавки [2; 6], обеспечивающие связывание свободной влаги, влияние на процесс полиморфных превращений селитры (стабилизирующие добавки), образование центров кристаллизации, порообразование, кондиционирование (обработка антислеживающими реагентами). Для условий Севера и АЗ РФ выбор вида кристаллического окислителя очень важен ввиду того, что промышленные виды селитры обладают разными физико-механическими характеристиками (прочностью гранул, слеживаемостью и др.). Гранулы селитры с добавками (сульфатными, сульфатно-фосфатными, нитратов кальция и магния) обладают более высокой прочностью гранул, что

способствует лучшей сохранности селитры при транспортировании, погрузочно-разгрузочных операциях, хранении. В противовес этому, другие добавки (магний-кальциевые, порообразующие) способствуют снижению прочности гранул, что делает такую селитру менее пригодной к условиям Севера и АЗ РФ. Известно, что свойства селитры (адгезия с нефтепродуктами, фракционный состав) влияют на параметры смешения компонентов и его взрывчатые характеристики.

Количественное сравнение по градациям фракционного состава (выход основного класса крупности, выход более узкого основного класса крупности, выход минимального и максимального классов крупности) промышленных видов аммиачной селитры позволяет оценивать технологические свойства гранулиатов.

Селитра по ГОСТ 2–2013 различается содержанием классов крупности. На рис. 2, а фракции классов крупности выделяются: ■ – фракция менее 1 мм; ■ – фракция 1–2 мм; ■ – фракция 2–4 мм; ■ – фракция более 4 мм. Круговая диаграмма в центральной части рисунка и следующие от неё вдоль радиуса кольцевые диаграммы относятся, соответственно, к марке А, марке Б высшего сорта, марке Б первого сорта и марке Б второго сорта. Выход фракций по маркам селитры ГОСТ 2–2013 приведен в процентах и показан в скобках через слэш: марка А – (4/ 3/90/3); марка Б, высший сорт – (3/15/80/2); марка Б, первый сорт – (4/45/50/2); марка Б, второй сорт – (4/95/0/1). Анализ рис. 2, а показывает, что для селитры марки А содержание основного класса (1–3 мм) составляет 93%, для марки Б высшего сорта содержание основной фракции (1–4 мм) составляет 95%. При этом для марки Б интервал между основной фракцией и более узкой фракцией (2–4 мм) для высшего сорта составляет 15 и 45% для первого сорта. Выход минимального класса крупности (менее 1 мм) для обеих марок А и Б составляет 3–4%.

Промышленные виды пористой селитры также различаются по классам крупности. Показатели пористой селитры по ТУ 2143-073-05761643-2013 показаны на рис. 2, б: ■ – фракция 1–2 мм (выход фракции 85%); ■ – фракция менее 1 мм (выход фракции 5%); ■ – фракция более 2 мм (выход 10%). Анализ рис. 2, б показывает, что данной селитры выход основного класса крупности (1–2 мм) составляет $\geq 85\%$, максимального (2 мм) – 10% и минимального (1 мм) $\leq 5\%$.

Показатели других промышленных видов пористой селитры представлены на рис. 2, в. На круговой диаграмме фракции классов крупности показаны: ■ – фракция 1–3 мм; ■ – фракция менее 1 мм и более 3 мм. В центральной части диаграммы расположены данные селитры по ТУ 2143-639-00209023-99 – (90/10), кольцевые диаграммы от центра вдоль радиуса соответствуют видам селитры: по ТУ 2143-036-00203789-2003 – (75/25), по ТУ 113-03-0203789-16-93 марки «П» – (98/2), по ТУ 113-03-0203789-16-93 марки «ПМ» – (98/2), по ТУ 113-03-635-96 – (90/10), по ТУ 113-03-635-96 – (97/3), по ТУ 2143-029-00203795-2005 – (90/10). Цифры в скобках через слэш после номера ТУ указывают выход в процентах класса крупности.

Таким образом, можно заключить, что селитра по ТУ 2143-073-054761643-2013 имеет выход основного класса крупности (1–2 мм) $\geq 85\%$, максимального (2 мм) – 10% и минимального (1 мм) $\leq 5\%$. Селитра по ТУ 2143-639-00209023-99 представлена содержанием основного класса (1–4 мм) – 95%, более узкого класса крупности (1–3 мм) – 90%, суммарным выходом минимального (менее 1 мм) и максимального (более 3 мм) классов крупности – 10%. Значения средних показателей выхода основного класса крупности 1–3 мм для селитры по ТУ 113-03-0203789-16-93 и по ТУ 113-03-635-96 находятся на уровне селитры пористой по ТУ 2143-639-00209023-99. Содержание классов крупности менее 1 мм и более 3 мм для селитры по ТУ 2143-029-00203795-2005 также не отличается от селитры по ТУ 2143-639-00209023-99. Показатели фракционного состава селитры по ТУ 2143-036-00203789-2003 МП характеризуются выходом основного класса (1–3 мм) – 75%, классов крупности менее 1 мм и более 3 мм – 25%. Увеличенное содержание минимального (менее 1 мм) и максимального (более 3–4 мм) классов крупности создает предпосылки для более плотной упаковки гранул при зарядании, что положительно влияет на объемную концентрацию энергии заряда гранулиита.

Технологические добавки, используемые при производстве селитры, могут существенно влиять на прочность гранул. Так, для селитры по ГОСТ 2–2013 марки Б высшего сорта с сульфатной и сульфатно-фосфатной добавками статическая прочность в пересчете на гранулу составляет – 10 Н, с добавками нитратов кальция и магния – 8 Н. В промышленных видах пористой селитры использование стабилизирующих (магний-кальциевых) и порообразующих добавок приводит к снижению статической прочности в пересчете на гранулу до 4–5 Н. Рассмотренные физико-механические характеристики необходимо учитывать для условий Севера и АЗ РФ, более прочная селитра хорошо выдерживает транспортировку, перевалочные операции и хранение, менее прочная имеет склонность к слеживанию и менее приспособлена к транспортировке, перевалочным операциям и хранению.

Исследование компонентного состава гранулитов, изготавливаемых на пунктах приготовления и специализированных предприятиях, показало наличие широкого ассортимента нефтепродуктов, используемых в качестве

горючей добавки – разнообразные виды дизельных топлив, масел (индустриальных, приборных, моторных), отработанных вторичных нефтепродуктов. Также используются легкоплавкие нефтепродукты, выполняющие одновременно роль гидрофобизирующих добавок³.

Низкотемпературные свойства нефтепродуктов характеризуются показателями – предельная температура фильтруемости (ПТФ), температура помутнения или застывания. Рассматриваемые характеристики существенно влияют на свойства гранулитов в условиях низких температур. На рис. 3, а приведены показатели ПТФ по маркам для топлива по ГОСТ 32511–2013: – марка Л, – марка Е, – марка З, – марка А. Показатели для топлива по ГОСТ 32511–2013 показаны по классам на рис. 3, б: – класс 0, – класс 1, – класс 2, – класс 3, – класс 4.

Предельная температура фильтруемости топлива, представленная на лепестковых диаграммах, выявляет тренды изменения низкотемпературных свойств по маркам, сортам и классам топлива, что способствует правильному их выбору с учетом транспортирования, хранения и применения в технологии производства гранулитов. Это демонстрируют рис. 3, а, рис. 3, б, а также рис. 3, в, на котором приведены показатели топлива по ГОСТ 55475–2013: ■ – зимнее –32, ■ – зимнее –38, ■ – арктическое –44, ■ – арктическое –48, ■ – арктическое –52 °С.

Распределение значений вязкости (рис. 3, а – рис. 3, в) показывает различие по маркам и классам дизельных топлив. В категории вязкость масла соотношение величин является важным для выбора при применении в рассматриваемых условиях. Отработанные нефтепродукты показаны на рис. 3, г: ■ – группа «ММО», ■ – «МИО».

При использовании топлив в условиях Севера и АЗ России для изготовления гранулитов следует учитывать тренды изменения ПТФ, основанные на критериях – градации климатических условий применения («зимнее», «арктическое» и др.), количество градаций, величина регламентируемого показателя, различие величины регламентируемого показателя между градациями климатических условий [7]. Это позволяет показать различие низкотемпературных характеристик топлива с учетом имеющегося ассортимента (марок, классов и сортов):

- для топлива по ГОСТ 305–2013 имеется одна градация с интервалом между «арктическим» видом (–45 °С) и «зимним» видом (–35 °С), составляющим –10 °С;

- для топлива по ГОСТ 32511–2013 имеется один «арктический» вид (–44 °С) и четыре «зимних» вида (от –38 до –20 °С) с различием между показателями –6 °С;

- для топлива по ГОСТ 55475–2013 имеется три «арктических» вида (от –52 до –44 °С) с интервалами –4 °С и два «зимних» вида (от –38 до –32 °С) с интервалами –6 °С. Рассматриваемые показатели топлив определяют нижнюю температурную границу возможности применения при изготовлении гранулитов. Они влияют на эксплуатационные характеристики технологического оборудования – перекачивающего, фильтрационного, перемешивающего, смесительно-зарядного.

Вязкость нефтепродуктов имеет нелинейную зависимость от температуры. Исследование вязкостно-температурных свойств компаунда отработанных масел подтвердило нелинейный характер зависимости. Экспериментальные данные показаны на рис. 4, аппроксимация

³ ГОСТ 21987–76 «Вещества взрывчатые промышленные. Гранулиты». Режим доступа: https://rososts.ru/file/gost/71/100/gost_21987-76.pdf (дата обращения: 09.09.2024).

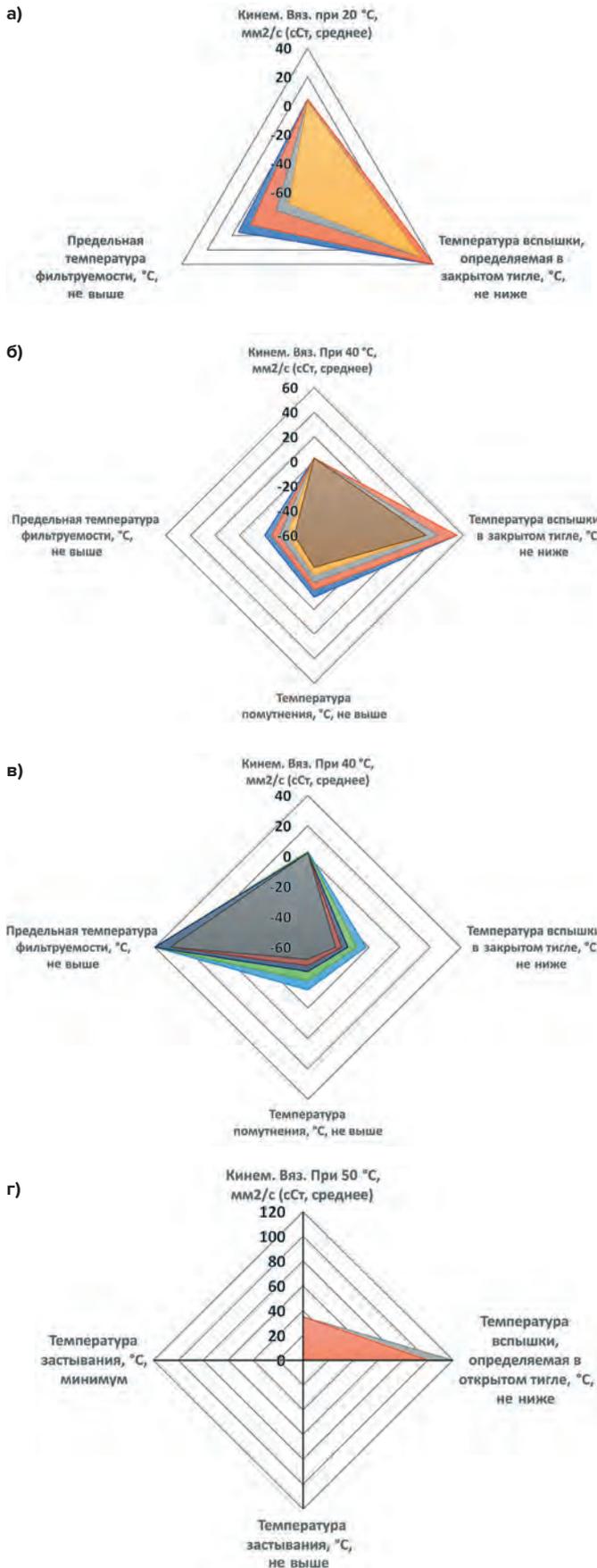


Рис. 3
 Вязкость, предельная температура фильтруемости, температура помутнения и застывания нефтепродуктов, используемых в рецептуре гранулитов

Fig. 3
 Viscosity, maximum filtration temperature, turbidity and solidification of petroleum products used in the formulation of granulates

которых полиномиальной зависимостью четвертой степени $y=0,0009x^4-0,1003x^3+3,7661x^2-62,932x+602,42$ позволяет сделать прогноз величины вязкости компаунда при низких температурах. В диапазоне температур от +50 °С до 0 °С вязкость меняется от 43 до 533 сП, в диапазоне от 0 °С до -20 °С вязкость растет до 2145–2213 сП. Представленные данные в существенной мере влияют на организацию работ в северных и арктических зонах России.

При изготовлении гранулитов осуществление операций с нефтепродуктами производится путем перекачивания, фильтрации, распыления форсунками, перемешивания. В условиях сурового климата с целью улучшения параметров работы системы подачи жидкого горючего в смесительно-зарядной машине целесообразно осуществлять кондиционирование низкотемпературных свойств нефтепродуктов депрессорно-диспергирующими присадками [7]. Влияние концентрации присадки на вязкость моторного масла демонстрирует рис. 5.

Для веществ разной химической природы (углеродсодержащих материалов, углеводородных полимеров, металлических порошков), используемых в рецептуре гранулитов ИСУ, экспериментально установлены свойства, оказывающие влияние на технологические и взрывчатые показатели. С учетом формы и размера частиц, коэффициента их анизодиаметричности проведена оценка характеристик адгезионной связи с поверхностью гранул аммиачной селитры. Оценке сыпучести необходимо придавать должное внимание при применении мобильных смесительно-заряд-

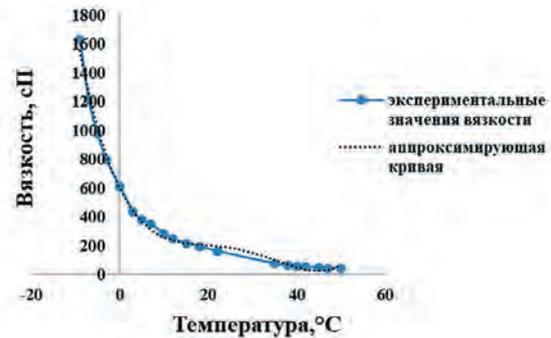


Рис. 4
 Вязкостно-температурная кривая компаунда отработанных масел

Fig. 4
 Viscosity vs. temperature curve of the waste oil compound

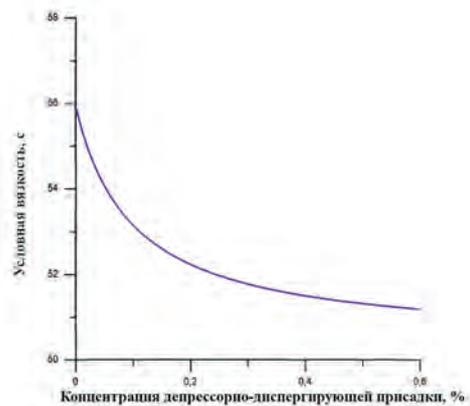


Рис. 5
 Зависимость вязкости моторного масла от концентрации депрессорно-диспергирующей присадки

Fig. 5
 Dependence of the engine oil viscosity on the concentration of the pour-point depressant and dispersant additive

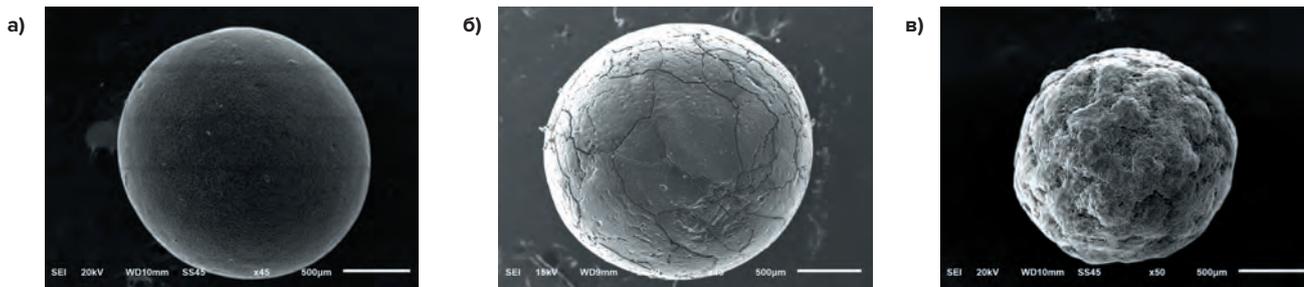


Рис. 6
Вид гранул промышленных видов кристаллического окислителя:
а – аммиачная селитра по ГОСТ 2–2013 марки Б,
б – селитра по ГОСТ 2 «поризованная»;
в – пористая селитра по ТУ 20.15.33-073-05761643-2022

Fig. 6
A view of industrial types of crystalline oxidising agent granules:
а – Grade B ammonium nitrate according to GOST 2-2013,
б – porous salt pter according to GOST 2;
в – porous salt pter according to TU 20.15.33-073-05761643-2022

ных машин в условиях сурового климата при зарядании скважин гранулированными, содержащими отработанные НП или твердые углеродсодержащие материалы. Состав гранулированного материала с использованием материалов рециклинга в качестве горючих твердых добавок (резиновой крошки, коксовой мелочи и угольного порошка) защищен патентом РФ [8].

Анализ свойств признака «технологичность изготовления» содержит рассмотрение сырьевых компонентов игданита для выявления влияния их характеристик на взрывчатые свойства, технические и технологические аспекты производства. Это направлено на достижение сбалансированности состава и чувствительности к механическим воздействиям, основано на учете структурных особенностей промышленных видов селитры и способствует обеспечению требуемой плотности зарядания, теплоты взрыва, объемной концентрации энергии, водостойчивости зарядов.

В контексте моделирования рецептуры гранулированных рассматриваются характеристики гранулированной аммиачной селитры как компонента, влияющего на энергетические, взрывчатые и технологические показатели. При этом выделяются такие аспекты [6], как эффективность в энергетическом отношении (низкая масса продуктов взрыва), безопасность в обращении (низкая чувствительность к механическим и ударно-волновым воздействиям), способность к перемещению под действием собственного веса (сыпучесть материала), организованность структуры сыпучего материала (дискретность, полидисперсность, неупорядоченность, низкая модалность размеров частиц) [6].

Особенностью рассматриваемого признака является физическая стабильность гранулированного окислителя, основанная на способности кристаллического окислителя впитывать и удерживать нефтепродукты в количестве, соответствующем стехиометрическому соотношению. Такими качествами обладают промышленные виды пористой селитры с показателями впитывающей 8–12% и удерживающей 5–5,6% способности. При использовании селитры со сниженной способностью принимать и удерживать нефтепродукты применяют методы повышения адгезии за счет введения порошковых добавок кристаллического окислителя и твердого горючего, изменения кристаллической структуры и морфологии гранул селитры при термической обработке («поризации»). В испытаниях образцы «поризованной» селитры достигали показателя удерживающей способности 4,75–8,5%. На рис. 6 показаны фотографии аммиачной селитры, сделанные на электронном микроскопе при увеличении x45–x60 (рис. 6, а и в – образцы, полученные

от АО «Минерально-химическая компания ЕвроХим»). Пористая селитра по ТУ 20.15.33-073-05761643-2022 имеет идентичные показатели с селитрой по ТУ 2143-073-054761643-2013.

Альтернативой методу «поризации» является технология физической стабилизации ВВ за счет создания временной пористости путем подогрева гранул АС и вдавливания в образовавшиеся микротрещины дизельного топлива под давлением сжатого воздуха. После остывания и закрытия микротрещин дизельное топливо остается в гранулах.

Модельные исследования при насыщении окрашенным нефтепродуктом гранул кристаллического окислителя с высокой и сниженной впитывающей и удерживающей способностью выявили существенные различия в поглощении нефтепродукта. На рис. 7 приведены данные по насыщенности окрашивания в процессе смешения селитры с окрашенным дизельным топливом, которые характеризуют степень восприимчивости разных видов селитры пропитке жидкими нефтепродуктами.

Материалы рециклинга обеспечивают более низкие показатели чувствительности к механическим и тепловым воздействиям гранулированного окислителя. На рис. 8 приведены показатели чувствительности к удару и трению, а также температура вспышки гранулированного ИСУ с резиновой крошкой в сравнении с гранулированным заводского изготовления (марки М).

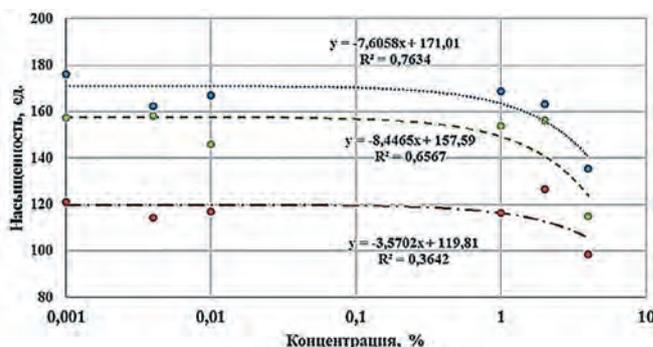


Рис. 7
Насыщенность окрашивания разных видов селитры в процессе смешения:
● – ГОСТ 2–2013;
● – ТУ 2143-073-054761643-2013;
● – ТУ 2143-036-00203789-2003 МП

Fig. 7
Colouring intensity of salt pter of different types in the mixing process:
● – GOST 2-2013;
● – TU 2143-073-054761643-2013;
● – TU 2143-036-00203789-2003 MP

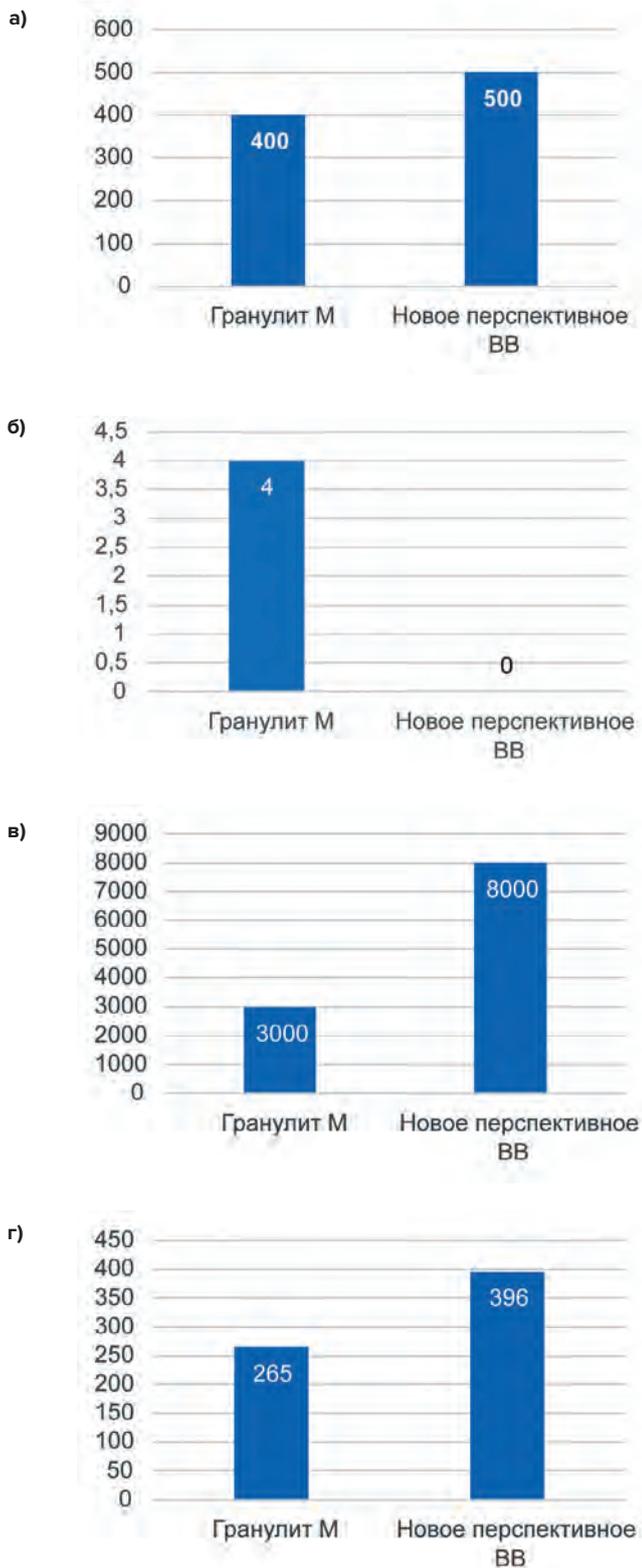


Рис. 8
Показатели чувствительности к механическим и тепловым воздействиям гранулиита с резиновой крошкой и гранулиита заводского изготовления (по ГОСТ 21987–76):
а – нижний предел чувствительности к удару;
б – частота взрывов;
в – чувствительность к трению;
г – температура вспышки

Fig. 8
Indices of sensitivity to mechanical and thermal effects of granulate with rubber particles and factory-made granulate (according to GOST 21987-76):
а – lower limit of the impact sensitivity;
б – blast frequency;
в – friction sensitivity;
г – flash point

Исследование графеновых порошков марок RG-S и RG-T на модельных составах гранулитов с соотношением компонентов (в массовых частях): кристаллический окислитель (0,95) – жидкий нефтепродукт (0–0,05) – графеновый порошок (0,05–0) показало, что частота взрывов в приборе №1 по ГОСТ 4545–88 составила 0%. Это указывает на возможность использования графеновых порошков в качестве модификаторов чувствительности к механическим воздействиям.

Повышение энергетических характеристик гранулитов достигается введением металлических добавок, в качестве которых используется первичный алюминий (пудры, порошки, крупки), вторичный алюминий, в том числе получаемый из продуктов утилизации бытовых и промышленных отходов, а также силикоалюминий, ферросилиций [9]. Для придания гранулитам водоустойчивости используются желатинизирующие, гидрофобизирующие (например, стеарат кальция или стеарат цинка) и другие гидрофобные добавки, не допускающие проникновения воды внутрь заряда. Изменение плотности заряда гранулитов достигается добавками и технологией заряжания. Низкоплотные заряды ($\rho = 0,5–0,55 \text{ г/см}^3$) получают при добавлении вспененного полистирола, которые применяются как низкобризантное взрывчатое вещество для специальных работ. Для отбойки крепких пород используют алюминизированные гранулиты, например, марки А6 (теплота взрыва 4500 кДж/кг), для которого при пневматическом заряжении плотность достигает значения $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$, а объемная концентрация энергии 5400 кДж/дм³.

Анализ свойств признака «экономичность применения» основан на данных по стоимостным показателям составляющих гранулит сырьевых компонентов – кристаллического окислителя, нефтепродуктов и материалов рециклинга, образуемых в процессах горных работ, обогащения и переработки минерального сырья, а также вторичного использования продуктов утилизации промышленных и бытовых отходов.

Как компонент селитра по ГОСТ 2 за счет низкой стоимости является наиболее экономичным окислителем в составе гранулитов. Использование в гранулитах марки ИСУ материалов рециклинга позволяет существенно снизить себестоимость изготовления. Номенклатура материалов рециклинга, используемого при изготовлении гранулитов, включает:

- гранулят и крошку, получаемые при переработке отработанных шин крупногабаритных карьерных автосамосвалов и резинотехнических изделий конвейерного транспорта;
- пылевидные фракции угля, образующиеся при добыче, обогащении или переработке угля;
- некондиционные фракции коксовой мелочи, образующиеся в процессе прокаливания углей в технологии коксования;
- полимерная крошка, получаемая при переработке полимерной тары и упаковки химических компонентов гранулитов, а также бытовых полимерных предметов;
- отработанные нефтепродукты – моторные и гидравлические масла, образующиеся в процессе эксплуатации транспортного, погрузочного и других видов горного оборудования;
- вторичный алюминий, получаемый при переработке бытовых предметов, лома конструкционного алюминия.

Таблица 1

Взрывчатые характеристики гранулитов ИСУ с резиновой крошкой

Table 1

Explosive characteristics of ISU granulates with rubber particles

ВВ	Характеристики для зарядов диаметром 150 мм			
	Скорость детонации	Устойчивость детонации	Полнота детонации	Скорость детонации*)
Гранулит ИСУ	3500–3700 м/с	Детонация полная	Пробитие стального свидетеля Δ=10 мм	4200 м/с

*) в скважинном заряде диаметром 250 мм

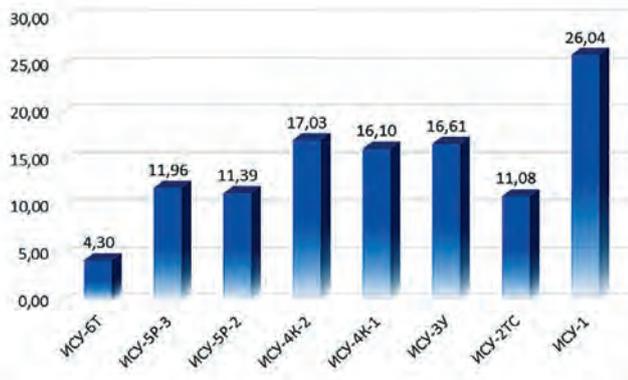


Рис. 9
Выгода относительно себестоимости 1 т гранулата ИСУ-7П, %

Fig. 9
Profit in relation to the cost price of 1 ton of ISU-7P granulate, %

Гранулиты ИСУ, разработанные с использованием материалов рециклинга, обладают высокими взрывчатыми характеристиками (табл. 1). Экономическая эффективность гранулитов ИСУ оценивалась себестоимостью изготовления с использованием соответствующих компонентов. Рис. 9 показывает «выгоду при применении», определяемую разностью в себестоимости изготовления гранулата ИСУ-7П (принятого за базовый показатель) и сравниваемых марок гранулитов ИСУ. Себестоимость изготовления определялась на момент их разработки в 2018 г. Наиболее весома разница в себестоимости для гранулата марки ИСУ-1 с нефтепродуктами отработанными (выгода 26%). Частичная замена в рецептуре гранулитов дизельного топлива на уголь (марка ИСУ-3У) и коксовую мелочь (марка ИСУ-4К) снижают выгоду до 16–17%. Применение резиновой крошки дает выгоду в себестоимости изготовления порядка 11%.

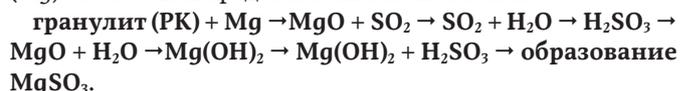
Использование в рецептуре гранулитов топливных смесей (на основе смесей нефтепродуктов отработанных и дизельного топлива) или смесей на основе резиновой крошки и дизельного топлива позволяет получить выгоду порядка 11%. При использовании поризованной селитры выгода составляет порядка 4%.

Анализ свойств признака «экологичность ведения работ» включает рассмотрение аспектов взрывных работ, направленных на снижение экологической нагрузки на окружающую среду в условиях низких температур, нейтрализацию диоксида серы SO₂ в продуктах детонации гранулата, применение ингредиентов (биотопливо из водорослей) с минимальным содержанием серы.

Составляющей анализируемых данных является нали-

чие в продуктах детонации ядовитых газов, таких как оксид углерода CO, оксиды азота NO, NO₂, N₂O₄, диоксид серы SO₂, дигидросульфид H₂S. Образование ядовитых газов тесно связано с кислородным балансом. При нулевом кислородном балансе углерод и водород, входящие в состав окислителя и горючего, окисляются до высших оксидов и образуется минимальное количество ядовитых газов. При недостатке кислорода в продуктах взрыва содержится оксид углерода, при избытке кислорода в продуктах взрыва содержатся оксиды азота. Основные горючие компоненты гранулитов содержат в составе серу и ее соединения. Содержание серы колеблется: в дизельном топливе (ДТ) от 10 до 2000 мг/кг, в базовых маслах – от 0,2 до 1,1%, коксовой мелочи – от 0,5 до 2%, резиновом грануляте – от 1 до 2%, угольном порошке – от 2,8 до 4,5%.

Нейтрализация диоксида серы SO₂, содержащегося в продуктах детонации гранулата, осуществляется добавками карбонатов кальция или магния, металлическим магнием или другими способами. Например, в части десульфурации многокомпонентного гранулата (с резиновой крошкой РК) реакция с добавкой металлического магния (Mg) может быть представлена схематически:



Неординарным подходом производства гранулитов в северных и особенно в прибрежных арктических зонах России может явиться использование биотоплива, получаемого из водорослей. Положительный опыт такой технологии имеется [10]. Таким образом также решается вопрос с выбросами серы на взрывных работах.

Анализ свойств признака «условия использования» включает рассмотрение особенностей ведения взрывных работ в условиях низких температур и других осложняющих факторов с учетом влияния на процессы и операции взрывных работ (транспортирование и хранение компонентов; изготовление, зарядание и взрывание гранулитов).

Рецептура гранулитов определяет детонационные параметры, показатели устойчивости распространения взрывного процесса, надежность инициирования и безотказность взрывания зарядов [11]. В условиях действия осложняющих факторов указанные параметры наряду с водоустойчивостью, агрессивностойкостью, сыпучестью являются ключевыми для обеспечения эффективного и безопасного ведения взрывных работ. При моделировании в данном контексте изложения выделение особенностей, характеризующих использование гранулитов при добыче минерального сырья на Севере и в Арктической зоне РФ, осуществлено на основе рассмотрения важных аспектов

природных и климатических условий рассматриваемой территории, экономико-географической характеристики размещения месторождений, геокриологических условий и характеристик мерзлых пород, горно-геологических и горнотехнических характеристик ведения взрывных работ в мерзлоте и других факторов [12–17].

Месторождения твердых полезных ископаемых Севера и АЗ России находятся на территориях, расположенных преимущественно в двух климатических поясах – арктическом и субарктическом. Минимальная температура воздуха на континентальной части может опускаться ниже $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ при продолжительности периода с отрицательными температурами воздуха, достигающего 225–235 дней. Для океанической части арктического пояса характерна «продолжительная холодная зима с очень сильными ветрами» [17], средняя годовая температура воздуха колеблется в пределах минус $11\text{--}13,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. В условиях низких температур окружающего воздуха снижение подвижности нефтепродуктов затрудняет выполнение технологических операций (перекачивания, фильтрации, распыления форсунками, перемешивания и др.) при изготовлении и применении гранулитов. Это оказывает влияние на физико-механические характеристики гранулита (переход от сыпучей консистенции через ряд форм к твердой), что отражается на эксплуатационных характеристиках смесительно-зарядного оборудования [12; 17].

Материковая часть Арктики располагает запасами минеральных ресурсов: медно-никелевых руд, платиноидов, редких металлов и редкоземельных элементов, золота, алмазов, вольфрама, ртути, олова, черных металлов, агрохимических руд и других ископаемых. Ресурсы в этой части России размещены территориально неравномерно, удалены от основных транспортных магистралей, а сама транспортная инфраструктура не имеет недостаточного развития. Так, территориальное размещение месторождений золота охватывает Чукотскую АО, Якутию, Красноярский край, Ямало-Ненецкий АО, Мурманскую область. Для других минерально-сырьевых ресурсов также присутствует неравномерное размещение, что можно проиллюстрировать примерами размещения месторождений: Павловского серебросодержащего свинцово-цинковых руд на острове Южный архипелага Новая Земля, Томторского редкометалльного в Оленекском улусе Якутии, Африкандского редкоземельного в Мурманской области, платинового месторождения «Федорова тундра» в центральной части Кольского полуострова, оловянно-вольфрамового месторождения «Пыркварские штокверки» в северной части Чукотки, россыпных месторождений алмазов якутской Арктики [18].

Рассмотрение экономико-географических аспектов при моделировании свойств гранулитов включает оценку особенностей поставки компонентов гранулитов (аммиачной селитры и нефтепродуктов) с учетом таких факторов, как географическая удаленность месторождений, неразвитость инфраструктуры арктических и северных территорий, логистика доставки грузов. Доставка грузов характеризуется сложностью и многозвенностью транспортных схем, сезонностью навигации, многочисленностью перевалок грузов, связанной с хранением на перевалочных пунктах прерывистостью доставки.

Транспортная схема доставки аммиачной селитры в Северо-Восточные районы включает транспорт: железная

дорога – водный (море) – автомобильный [12]. Количество перевалок по некоторым транспортным схемам доходит до восьми, а длительность промежуточного хранения в пунктах перевалки в районах Чукотки доходит до 4–5 мес. При многочисленных перегрузках страдает целостность упаковки груза, аммиачная селитра увлажняется и меняет физико-механические характеристики (разрушаются гранулы, материал слеживается). При моделировании свойств гранулитов необходимо учитывать воздействие неблагоприятных факторов транспортного процесса и применять промышленные виды аммиачной селитры, характеризующиеся повышенной прочностью, меньшей увлажняемостью и слеживаемостью.

Осуществление доставки нефтепродуктов в арктические и северные территории производят северным, сибирским и дальневосточным вариантами, включающими транспортные схемы с использованием железнодорожного, водного (море, река), автомобильного (автозимник) транспорта [19–21]. Доставка производится на значительные расстояния: от Ачинского НПЗ до административного центра Чокурдах (Аллаиховский улус Якутии) почти 6500 км с многочисленными перевалками, местами хранения нефтепродуктов. С учетом различий в низкотемпературных характеристиках топлив, применяемых в рецептуре гранулитов, это осложняет доставку, хранение и применение при изготовлении на горных предприятиях.

В северных условиях наблюдается повсеместное распространение мерзлых пород ⁵. На Северо-Востоке России по данным ⁶ [12; 17] мощность мерзлотной толщи составляет 200–600 м, достигая величины 1300 м в горных районах северного Забайкалья (хребет Удокан). С позиции разрушения взрывом при оценке горных пород выделяются разновидности: мерзлые (многолетнемерзлые или сезонномерзлые), морозные, сыпуче-мерзлые, талые. Ввиду недостаточной изученности вопроса разрушения скальных и полускальных мерзлых пород взрывом при оценке категории мерзлых пород по взрываемости, кроме используемых в классификации показателей – коэффициент крепости пород, трещиноватость пород, блочность массива, должен рассматриваться показатель – криогенная текстура пород. В скальных и полускальных мерзлых породах в зависимости от их генезиса и начальной трещиноватости криогенные текстуры представлены трещинными и трещинно-жильными формами в изверженных, метаморфических породах или пластово-трещинными, пластово-поровыми, пластово-карстовыми формами в осадочных скальных и полускальных породах ⁷. Содержание льда в невыветрелых слаботрещиноватых гранитах и базальтовых породах составляет 1–2%, в песчаниках, аргиллитах, известняках и выветрелых породах повышается до 10–15% ⁸. Морозные скальные породы имеют отрицательную температуру и не содержат лед. В мерзлых дисперсных грунтах (малольдистых и льдистых песчаных, глинистых и крупнообломочных) содержание льда не превышает 40%. «Прочность грунта в мерзлом состоянии во много раз больше прочности того же грунта в немёрзлом

⁵ Мёрзлые грунты. Большая российская энциклопедия. Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/miorzlye-grunty-92a817> (дата обращения: 10.09.2024); ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация». Режим доступа: <http://gost.gtsilver.ru/Data/738/73839.pdf> (дата обращения: 10.09.2024); РГ-17. Методы геокриологических исследований. 10. Изучение многолетнемерзлых горных пород

⁶ Мёрзлые грунты. Большая российская энциклопедия. Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/miorzlye-grunty-92a817> (дата обращения: 10.09.2024)

⁷ РГ-17. Методы геокриологических исследований. 10. Изучение многолетнемерзлых горных пород

⁸ Мёрзлые грунты. Большая российская энциклопедия. Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/miorzlye-grunty-92a817> (дата обращения: 10.09.2024)

⁴ Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Арктической зоны РФ на 03.15.2021 г.

состоянии. В меньшей степени это проявляется в скальных грунтах. С понижением температуры прочность мерзлых пород возрастает.» ... «Морозные породы практически не меняют своих свойств при переходах температуры через 0 °С как в ту, так и в другую сторону»⁹.

При рассмотрении горно-геологических и горнотехнических аспектов разработки месторождений в условиях низких температур в контексте моделирования свойств гранулитов следует учитывать ряд специфических особенностей, заключающихся в следующем. Предпосылками эффективного взрывания с использованием гранулитов является учет геокриологических условий, включающих параметры: мощность и строение массива мерзлых пород, разновидности мерзлых пород, температура, льдистость, влажность пород, криогенная текстура пород, температурная зависимость механических и прочностных свойств пород, распространение мерзлоты и др. параметры [22]. Необходимо учитывать, что месторождения Севера и АЗ РФ отличается большое разнообразие горно-геологических, горнотехнических и геокриологических условий разработки.

Увеличение прочности пород при понижении температуры (при разной степени смерзания) приводит к возрастанию удельной энергоёмкости взрывного разрушения [12; 15; 22; 23]. Для условий Севера и Арктики РФ с учетом классификации горных пород по удельной энергоёмкости взрывного разрушения [24–26] при возрастании крепости пород за счет смерзания энергоёмкость взрывного разрушения определяется более высокой категорией, чем для немерзлых пород. В шпуровых и скважинных зарядах необходимый запас энергии при взрывании мерзлых пород разной степени смерзания создают за счет изменения теплоты взрыва гранулита и объемной концентрации энергии при заряджании.

Рассмотрение опосредованных признаков

Актуальная экономическая и геополитическая конъюнктура, характер размещения минерально-сырьевых ресурсов Арктического региона России, уровень развития технологий извлечения из недр полезных ископаемых определяют необходимость совершенствования признаков, дополняя их опосредованными. На данном этапе построения модели изменения свойств многокомпонентных простейших ВВ определяются общие понятия опосредованных признаков. Формализация понятий опосредованных признаков затрагивает технологические и технические процессы, цивилизационные, социальные и политические аспекты:

- **технические и технологические уязвимости** надёжности работы аппаратного исполнения средств механизации приготовления и заряджания скважин; сложности организации системы транспортно-складской логистики; условий генерирования и потребления энергоресурсов;
- **цивилизационные, политические, социальные и другие вызовы** направлены на учет различных факторов. В плоскости цивилизационных вызовов следует учитывать влияние неравномерности размещения минеральных ресурсов в литосфере, региональные различия России в ресурсообеспеченности. В политической плоскости это внутренняя ситуация

в государстве, внешнеполитическое взаимодействие и интеграционные процессы между государствами, деятельность совместных предприятий и зарубежных партнеров. В социальной плоскости должно рассматриваться влияние общественных связей, выполнение социальных обязательств, действие моральных стимулов.

Заключение

Простейшие взрывчатые вещества – гранулиты – являются безопасным и эффективным инструментом разрушения горных пород в технологических процессах открытых и подземных горных работ. Представленный подход в моделировании открывает возможности проектирования эффективных рецептур многокомпонентных гранулитов для использования в регионах без развитой инфраструктуры, в районах с суровым климатом, при разработке месторождений со сложными горно-геологическими и горнотехническими особенностями.

Технологические свойства гранулитов (сбалансированность состава, плотность заряджания) определяются характеристиками основных компонентов – впитывающей и удерживающей способностью кристаллического окислителя, гранулометрическим составом, вязкостью нефтепродуктов. При отрицательных температурах нефтепродукты изменяют свою подвижность и становятся малопригодными при выполнении технологических операций (перекачивание, фильтрация, распыление форсунками, перемешивание и др.).

Управление взрывчатыми свойствами гранулитов возможно за счет изменения гранулометрических показателей кристаллического окислителя при высокой модальности гранул по размерам, что способствует увеличению объемной концентрации энергии. Наряду с этим использование металлических горючих позволяет в достаточно широких пределах изменять теплоту взрыва и таким образом обеспечивать требуемые параметры при отбойке горных пород. Для ведения специальных видов взрывных работ (контурное взрывание, щадящая отбойка) в состав гранулитов вводится низкоплотная добавка, обеспечивающая снижение плотности заряджания и уменьшение бризантного действия. Повышение водоустойчивости достигается введением желатинизирующих или гидрофобизирующих технологических добавок.

Использование рецептурных компонентных добавок: твердых горючих и металлических порошков, нейтрализующих ядовитые газообразные продукты, исключающих опасное взаимодействие с сульфидными рудами и других, позволяет гранулитам отвечать на все вызовы по отношению к природным, горно-геологическим и горнотехническим условиям месторождений, а также особенностям производственных процессов различных способов и методов добычи.

Применение в рецептуре гранулитов материалов рециклинга, образуемых в процессах горных работ, обогащения и переработки минерального сырья, а также вторичного использования промышленных отходов, позволяет сократить издержки при изготовлении и существенно продвинуться в решении вопросов защиты окружающей среды. Концептуальный характер этих вопросов особенно важен при ведении взрывных работ в северных и арктических районах России.

⁹ Мёрзлые грунты. Большая российская энциклопедия. Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/miorzlye-grunty-92a817> (дата обращения: 10.09.2024)

Список литературы / References

1. Красельщик В.Д., Яременко Н.Е., Шетлер Г.А. *Динамоны*. М.: Стройиздат; 1943. 96 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/K0Dc9aW1wvsmT> (дата обращения: 10.00.2024).
2. Викторов С.Д., Франтов А.Е., Лапиков И.Н. Моделирование свойств многокомпонентных простейших взрывчатых веществ. *Взрывное дело*. 2023;(140-97):19–35. <https://doi.org/10.18698/0372-7009-2023-9-2>
Viktorov S.D., Frantov A.E., Lapikov I.N. Modeling of multicomponent cheap explosives properties. *Explosion Technology*. 2023;(140-97):19–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/0372-7009-2023-9-2>
3. Зубенко Ю.Д. *Системный анализ*. Донецк: ДонГТУ; 1995. 166 с.
4. Волкова В.Н., Денисов А.А. *Теория систем*. М.: Высшая школа; 2006. 511 с.
5. Григорьев А.В. Вербальная модель предметной области для интеллектуальных САПР. *Научные труды Донецкого государственного технического университета. Серия «Вычислительная техника и автоматизация»*. 2000;20:171–180. Режим доступа: <https://masters.donntu.ru/2010/fknt/shaydt/library/article3.htm> (дата обращения: 10.09.2024).
Grigoriev A.V. A verbal model of the subject area for intellectual CAD systems. *Nauchnye Trudy Donetskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya «Vychislitel'naya Tekhnika i Avtomatizatsiya»*. 2000;20:171–180. (In Russ.) Available at: <https://masters.donntu.ru/2010/fknt/shaydt/library/article3.htm> (accessed: 10.09.2024).
6. Frantov A.E., Lapikov I.N. Evaluation of technological parameters of cheap explosives' components in terms of using in northern and arctic regions of Russia. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2656(1):020009. <https://doi.org/10.1063/5.0106797>
7. Frantov A.E., Viktorov S.D., Lapikov I.N. Comparison of oil products as components of granulites for Siberia, extreme North and the Arctic areas. *Eurasian Mining*. 2023;(2):70–75. <https://doi.org/10.17580/em.2023.02.15>
8. 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 С2. Заявл. 23.12.2016; опубл. 01.08.2018, Бюл. №22.
9. Викторов С.Д., Франтов А.Е., Лапиков И.Н. Развитие потенциала простейших взрывчатых веществ в России. *Безопасность труда в промышленности*. 2021;(8):7–14. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-8-7-14>
Viktorov S.D., Frantov A.E., Lapikov I.N. Development of the potential for the cheap explosives in Russia. *Occupational Safety in Industry*. 2021;(8):7–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-8-7-14>
10. Shushpanova D.V., Kapralova D.O. Life-cycle assessment of kelp in biofuel production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1079:072023; <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/7/072023>
11. 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>
12. Егупов А.А. *Взрывные работы в условиях многолетней мерзлоты*. М.: Недра; 1981. 103 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/19438> (дата обращения: 10.09.2024).
13. Дроговейко И.З. *Разрушение мерзлых грунтов взрывом*. М.: Недра; 1981. 245 с.
14. Савинков В.Д. *Разработка эффективных средств и методов взрывной отбойки в условиях отрицательных температур и высокогорья: автореф. дис. ... канд. техн. наук*. Бишкек; 1999. 23 с.
15. Фраш Г.Б. *Взрывные работы в сезонно-мерзлых грунтах*. М.: Недра; 1990. 112 с.
16. Балбачан И.П. *Взрывные работы в мерзлых грунтах*. М.: ЦНИЭИуголь; 1979. 35 с.
17. Емельянов Б.И. (ред.) *Техника и технология подготовки многолетнемерзлых пород к выемке*. М.: Недра; 1978. 280 с.
18. Белов С.В., Скрипниченко В.А. Пространственная организация национальной экономики при освоении месторождений цветных металлов в западной части российской Арктики. *Арктика и Север*. 2023;50:5–22. <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2023.50.5>
Belov S.V., Skripnichenko V.A. Spatial organization of the national economy in the development of nonferrous metal deposits in the Western part of the Russian Arctic. *Arctic and North*. 2023;50:5–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2023.50.5>
19. Делашова Н.М. Особенности нефтепродуктообеспечения арктических и северных территорий Республики Саха (Якутия). *Современная научная мысль*. 2017;(6):150–159.
Delahova A.M. Features of oil products provision of arctic and northern territories of the Republic of Sakha (Yakutia). *Modern Scientific Thought*. 2017;(6):150–159. (In Russ.)
20. Соколов Ю.И. Риски северного завоза. *Проблемы анализа риска*. 2019;16(4):32–47. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-4-32-47>
Sokolov Yu.I. Risks of northern delivery. *Issues of Risk Analysis*. 2019;16(4):32–47. (In Russ.)
21. Лебедев М.П., Слепцов О.И., Кобылин В.П., Шадрин А.Л. Проблемы завоза органического топлива и роль АСММ в условиях Крайнего Севера. *Энергия: экономика, техника, экология*. 2012;(2):12–17.
Lebedev M.P., Slepsov O.I., Kobyl'in V.P., Shadrin A.L. On effects of geocryological conditions on the processes of underground mining of ore deposits of the North. *Energiia: Ekonomika, Tekhnika, Ekologiya*. 2012;(2):12–17. (In Russ.)

22. Иудин М.М. О влиянии геокриологических условий на процессы подземной разработки рудных месторождений Севера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(S10):97–100.
Iudin M.M. Regarding the effects of geocryological conditions on the underground mining of ore deposits of the North. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011;(S10):97–100. (In Russ.)
23. Жариков С.Н., Шеменёв В.Г., Кутуев В.А. Об особенностях производства буровзрывных работ в условиях Севера. *Проблемы недропользования*. 2017;(3):30–36. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.03.030>
Zharikov S.N., Shemennev V.G., Kutuev V.A. On the peculiarities of production drilling and blasting operations in the North. *Problems of Subsoil Use*. 2017;(3):30–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.03.030>
24. Демидюк Г.П. (ред.). *Техника и технология взрывных работ на рудниках*. М.: Недра; 1978. 238 с.
25. Болотова Ю.Н. *Разработка сейсмобезопасных методов взрывания горных пород в приконтурной зоне железорудных карьеров: дис. ... канд. техн. наук*. Белгород; 2023. 146 с.
26. Белин В.А., Вяткин М.Н., Болотова Ю.Н., Чабан В.С., Умрихин Э.А. Новые технологии взрывного дела на службе горных предприятий России. Итоги 21-й международной конференции АНО НОИВ. *Взрывное дело*. 2021;(133-90):5–29.
Belin V.A., Vyatkin M.N., Bolotova Yu.N., Chaban V.S., Umrikhin E.A. Results of the 21st International conference of ANO “National organization of explosive engineers”. New technologies of explosive business in the service of mining enterprises of Russia. *Explosion Technology*. 2021;(133-90):5–29. (In Russ.)

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 (ИПКОН РАН), член Научного совета РАН по проблемам народнохозяйственного использования взрывов, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: aef1948@gmail.com

Викторов Сергей Дмитриевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, профессор, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН), член Научного совета РАН по проблемам народнохозяйственного использования взрывов, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: victorov@mail.ru

Лапиков Иван Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-5106-0335>; e-mail: itwent@gmail.com

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, член Научного совета РАН по проблемам народнохозяйственного использования взрывов, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: bolotovayn@noiv.pro

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

Sergey D. Viktorov – Dr. Sci. (Eng.), Leading Research Associate, Professor, 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: victorov@mail.ru

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

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, 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: bolotovayn@noiv.pro

Article info

Received: 17.08.2024

Revised: 02.10.2024

Accepted: 12.10.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.08.2024

Поступила после рецензирования: 02.10.2024

Принята к публикации: 12.10.2024