



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный горный университет»
(ФГБОУ ВО «УГГУ»)

Куйбышева ул., д. 30, Екатеринбург, 620144, ГСП. Тел./факс: (343) 257-25-47 / 251-48-38

E-mail: office@ursmu.ru, http://www.ursmu.ru

ОКПО 02069237, ОГРН 1036603993777, ИНН/КПП 6661001004/667101001



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «УГГУ»

Симисинов Д.И.

2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

на диссертационную работу Новикова Юрия Витальевича

«Повышение эффективности рудоподготовки на основе учета влияния отрицательных температур на механизм разрушения минерального сырья», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых

Актуальность для науки и практики

Рудоподготовка является одним из наиболее энергоемких этапов технологии обогащения полезных ископаемых, и уровень энергозатрат на дробление и измельчение существенно влияет на себестоимость конечной продукции. Для предприятий, расположенных в районах Крайнего Севера характерны отрицательные среднегодовые температуры, которые способны изменять физико-механические свойства горных пород и, как следствие, влиять на механизм их разрушения, гранулометрический состав продуктов дробления и энергетические показатели процесса. Учет температурного фактора при выборе режимов и параметров дезинтеграции, а также при прогнозировании удельной энергоемкости разрушения представляется научно и практико-значимой задачей, направленной на повышение эффективности замкнутых схем рудоподготовки.

Содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений, содержит 171 страницу текста, в том числе 71 рисунок и 9 таблиц. Список литературы включает 203 наименования. Результаты исследования отражены в

8 научных публикациях, включая 3 статьи в изданиях из Перечня ВАК РФ, 1 статью, входящую в реферативную международную базу данных Scopus, а также 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, отражена научная новизна и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор и анализ научно-технической литературы по механическому разрушению горных пород и влиянию температурных воздействий на их свойства, рассмотрены методы оценки прочности, энергоемкости и микроструктурных изменений, а также подходы к моделированию трещинообразования (теории Гриффита и Ирвина, критерии Мора-Кулона и др.).

Во второй главе приведены физико-механические и минералогические особенности исследуемой породы и методика лабораторных испытаний, включая определение коэффициента Протоджаконова, прочности при одноосном сжатии и растяжении, энергоемкости разрушения, гранулометрического состава и удельной поверхности, а также параметров сцепления и угла внутреннего трения в диапазоне температур от +20 °С до -196 °С.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований, выполнено построение кругов Мора и расчет параметров сцепления и угла внутреннего трения, изменения интерпретированы в рамках критерия Мора-Кулона. Приведены результаты микроскопического анализа поверхности разрушения и показано изменение механизма разрушения при отрицательных температурах. С применением формулы Дж. Ирвина оценены упругопластические характеристики фронта трещины, полученные выводы подтверждены дискретно-элементной моделью.

В четвертой главе разработана математическая модель для прогнозирования удельной энергоемкости механического разрушения руды как функции температуры, влажности и объема (размера) куска. В качестве инструмента использован метод опорных векторов (SVR) с радиально-базисным ядром, обеспечивший точность прогноза $R^2 \approx 0,895$; применен метод SHAP для оценки вклада факторов.

В пятой главе выполнено моделирование схемы рудоподготовки с учетом изменений гранулометрического состава после первой стадии дробления при влиянии отрицательных температур. Показано перераспределение циркуляционных нагрузок (в отдельных узлах до +80-110 т/ч) и рост энергоемкости измельчения. Описан созданный программный модуль и предложены рекомендации по оптимизации режимов работы оборудования в холодный период.

В заключении сформулированы обобщенные выводы и подтверждена научная состоятельность положений, выносимых на защиту.

Новизна исследований, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научная новизна работы заключается в установлении причинно-следственной связи между изменением гранулометрического состава разрушенной горной породы при понижении температуры и уменьшением пластичности фронта движения трещины, а также в получении и верификации зависимости удельной энергоемкости разрушения от температуры, объема и влажности руды с использованием разработанной модели на основе метода опорных векторов (SVR).

Анализ положений, выносимых на защиту, показывает следующее:

Положение 1. Установленная зависимость изменения физико-механических характеристик породы при понижении температуры (рост прочности при одноосном сжатии, коэффициента крепости и удельной энергоемкости разрушения при одновременном снижении прочности на растяжение и сдвиг) имеет системный характер и подтверждена комплексом стандартных испытаний и анализом гранулометрического состава продуктов разрушения. Практически это означает изменение степени раскрытия и укрупнение продуктов дробления в холодный период, что непосредственно влияет на циркуляционные нагрузки в замкнутых схемах измельчения.

Положение 2. Выполненная оценка по формуле Дж. Ирвина показала существенное уменьшение удельной пластической деформации при охлаждении руды с $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (с $2,68 \cdot 10^6$ до $1,37 \cdot 10^5$), что интерпретировано как сужение пластической зоны у фронта трещины и переход к более хрупкому механизму разрушения. Данное объяснение является важным развитием представлений о низкотемпературной трещиностойкости минерального сырья, его обоснованность усилена подтверждением дискретным моделированием процесса трещинообразования.

Положение 3. Выявленная нелинейная зависимость удельной энергоемкости разрушения от температуры, влажности и объема (размера) куска, а также показанное влияние понижения температуры на укрупнение гранулометрического состава дробленого продукта обеспечивают научно обоснованный инструмент для прогнозирования энергозатрат и оценки изменения циркуляционных нагрузок. Практическая ценность положения подтверждается разработанной моделью SVR ($R^2 \approx 0,895$), использованием интерпретации факторов методом SHAP и выполненным технико-экономическим моделированием схемы рудоподготовки.

Достоверность и обоснованность результатов исследований

Достоверность результатов обеспечивается корректной постановкой задач и применением комплекса взаимодополняющих методов исследования, включая стандартные методики определения прочности горных пород и коэффициента крепости (в соответствии с ГОСТ 21153.1-75, ГОСТ 21153.3-85, ГОСТ 21153.8-88), проведение испытаний в контролируемых температурных условиях, использование поверенного испытательного и аналитического оборудования (в том числе универсальной электромеханической испытательной машины INSTRON 5989 и

двухлучевого сканирующего микроскопа ЛВ-4500), применение статистических методов обработки данных, а также сопоставление экспериментальных выводов с результатами численного моделирования и верификации построенных моделей.

Значимость для науки и производства (практики) полученных автором диссертации результатов

Значимость результатов для науки состоит в уточнении представлений о механизмах разрушения минерального сырья при отрицательных температурах и в формировании теоретической базы для учета температурного фактора при описании трещинообразования и прочностных характеристик. Практическая значимость определяется разработкой методики прогнозирования удельной энергоемкости механического разрушения на основе SVR, созданием программного модуля для расчета кругов Мора-Кулона и оценки энергозатрат дробления с учетом температуры, влажности и гранулометрического состава (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025614350 от 20.02.2025), а также выполненным моделированием схемы рудоподготовки, показавшим рост циркуляционной нагрузки и энергоемкости измельчения в холодный период.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в формулировании цели и задач исследования, выполнении обзора научно-технической информации, планировании и проведении экспериментальных и теоретических исследований, построении и верификации математической и дискретно-элементной моделей, анализе и обработке полученных результатов, формулировании выводов и рекомендаций, а также подготовке публикаций и докладов по теме диссертации.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при:

- проектировании и оптимизации режимов дробления и измельчения на предприятиях, работающих в условиях отрицательных температур, с учетом изменения прочностных и энергетических характеристик руды;
- расчете и прогнозировании удельной энергоемкости разрушения минерального сырья по температуре, влажности и крупности (объему) куска для выбора рациональных параметров оборудования и снижения циркуляционной нагрузки в замкнутых схемах;
- разработке и внедрении программных средств поддержки принятия решений при управлении процессами рудоподготовки и повышении энергоэффективности технологических схем;
- подготовке специалистов и проведении дальнейших исследований по низкотемпературной механике разрушения горных пород и геотермомеханике.

Апробация результатов исследования

Основные положения и результаты исследования докладывались и обсуждались на научных мероприятиях и отражены в публикациях автора. Всего по теме диссертации опубликовано 8 работ, включая статьи в изданиях из Перечня ВАК

РФ и Scopus, а также зарегистрированы 3 программы для ЭВМ. Полученные результаты прошли апробацию в форме устных докладов, публикаций статей и тезисов.

Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе имеются следующие замечания, не снижающие ее общей положительной оценки:

1. При изучении влияния влажности на физико-механические свойства материала сравниваются характеристики, полученные для обезвоженных образцов и образцов с исходной влажностью, однако, нигде в работе не приведено фактическое значение влажности образцов.

2. Разработанный программный комплекс при прогнозировании зависимости удельной энергоемкости от температуры демонстрирует общую тенденцию увеличения энергозатрат при снижении температуры (рис. 65 на с. 30 диссертации), при этом не отражая полученные в ходе исследований сведения о снижении удельной энергоемкости (рис. 20 на с. 77 диссертации) и удельного расхода энергии на разрушение (рис. 50 на с. 96 диссертации) при температуре -5°C , выбивающиеся из общей тенденции, но имеющие важное значение в решении задачи снижения энергопотребления.

3. В работе недостаточно раскрыт вопрос масштабирования результатов исследований на реальные схемы рудоподготовки. Целесообразно более четко определить подходы и критерии переноса выявленных закономерностей на производственные процессы и обозначить сложности и особенности, связанные с масштабированием.

4. Известно, что существенным недостатком обучаемых моделей является риск ее переобучения. Рассмотрены ли автором варианты выявления и предотвращения переобучения разработанной модели?

5. Для более убедительного обоснования экономической эффективности возведения утепленного ангара для складирования руды в зимний период следовало бы привести расчет затрат на его строительство и эксплуатацию.

6. В тексте главы 5 неверно указаны ссылки на разделы, что затрудняет восприятие работы. Например, на с. 139 указано: «Полученные результаты будут использованы в экономической оценке (см. п. 5.3), где...». При этом ссылка должна быть на п. 5.6 диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Новикова Юрия Витальевича «Повышение эффективности рудоподготовки на основе учета влияния отрицательных температур на механизм разрушения минерального сырья», представленная на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых, рассмотрена, коллективно обсуждена и одобрена на заседании кафедры обогащения полезных ископаемых ФГБОУ ВО «УГГУ» (Протокол № 3 от 25.12.2025 г.).

В целом, диссертационная работа Новикова Юрия Витальевича «Повышение эффективности рудоподготовки на основе учета влияния отрицательных температур

Диссертационная работа соответствует требованиям паспорта специальности 2.8.9. «Обогащение полезных ископаемых», а также критериям, установленным пунктами 9-14 Положения о присуждении ученых степеней (постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 в действующей редакции). Автор диссертации, Новиков Юрий Витальевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. «Обогащение полезных ископаемых».

Shirley

Я, Морозов Юрий Петрович, даю согласие на обработку своих персональных данных в документах, связанных с работой диссертационного совета.

ННОГО СОВЕТА.

Булга

Я, Бекчурина Екатерина Александровна, даю согласие на обработку своих персональных данных в документах, связанных с работой диссертационного совета.

Beif

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный горный университет» (ФГБОУ ВО «УГГУ»).

Адрес: 620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, д. 30.
E-mail: gmf.opi@ursmu.ru; тел.: +7 (343) 283-03-65.

Handwritten signature: *Handwritten signature*