

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента

Николаевой Надежды Валерьевны

на диссертацию 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

### **1. Актуальность темы диссертации**

Дробление и измельчение минерального сырья относятся к наиболее энергоёмким и затратным операциям горно-обогатительного производства, что сказывается на себестоимости получения рудных концентратов. При разработке месторождений, расположенных в районах Крайнего Севера и Арктики, следует учитывать влияние отрицательных температур на физико-механические свойства пород, что может привести к росту удельной энергоёмкости разрушения, ухудшению гранулометрического состава продуктов и увеличению циркуляционной нагрузки на стадии измельчения. В условиях необходимости расширения минерально-сырьевой базы за счёт вовлечения в переработку месторождений, расположенных в экстремальных климатических зонах, разработка научно-обоснованных подходов к учёту влияния низких температур при выборе оборудования, режимов и схем рудоподготовки является важной научно-технической задачей, имеющей большое практическое значение для развития горной промышленности, а актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

## **2. Степень обоснованности, достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность и достоверность основных положений диссертации подтверждаются корректной постановкой цели и задач, использованием комплекса стандартизованных лабораторных методов испытания горных пород в соответствии с ГОСТами и стандартными методиками тестирования прочностных свойств, а также применением современных методов математического моделирования и численного анализа.

В работе использован комплекс экспериментально-теоретических исследований, включающий испытания на прочность при одноосном сжатии и растяжении, определение коэффициента крепости по методике М.М. Протодьяконова, оценка удельной энергоёмкости разрушения с использованием методики индекса Бонда, анализ гранулометрического состава продуктов дробления и расчёт удельной поверхности, построение кругов Мора–Кулона для оценки углов внутреннего трения и сцепления, дискретно-элементное моделирование процесса разрушения, разработка математической модели прогнозирования энергоёмкости на основе метода опорных векторов.

Новизна работы определяется тем, что установлены закономерности изменения полного набора физико-механических характеристик минерального сырья в диапазоне температур от +20°C до –20°C, получены количественные соотношения между температурой, влажностью и удельной энергоёмкостью разрушения, дано физическое объяснение причин изменения гранулометрического состава на основе анализа сужения пластической зоны фронта трещины при охлаждении, разработана и верифицирована математическая модель на основе метода опорных векторов (SVM) ( $R^2 \approx 0,895$ ), пригодная для практических расчётов на промышленных объектах.

### **3. Соответствие диссертации критериям, установленным «Положением о порядке присуждения учёных степеней»**

Научная новизна и практическая значимость проведённого исследования связаны с развитием представлений о механизмах разрушения минерального сырья в условиях отрицательных температур, а также методологических подходов к оптимизации технологических процессов рудоподготовки в холодном климате.

Полученные результаты обладают достаточной полнотой, логической последовательностью, подтверждены экспериментальными данными, расчётами и моделированием, и могут быть использованы при проектировании и эксплуатации горно-обогатительных предприятий.

Исследование имеет следующие квалификационные признаки:

- установлена зависимость физико-механических характеристик горной породы от температуры: при понижении температуры с  $+20^{\circ}\text{C}$  до  $-20^{\circ}\text{C}$  прочность при одноосном сжатии и коэффициент крепости увеличиваются, удельная энергоёмкость возрастает, в то время как прочность на растяжение и прочность на сдвиг снижаются, что приводит к увеличению размера дроблёного продукта;
- с использованием формулы Ирвина показано уменьшение удельной пластической деформации, которую материал способен поглощать перед фронтом трещины, при охлаждении с  $+20^{\circ}\text{C}$  до  $-20^{\circ}\text{C}$  с  $2,68 \times 10^6$  до  $1,37 \times 10^5$ . Это позволило предположить, что происходит сужение пластической зоны фронта трещины, и данный результат подтверждён дискретно-элементным моделированием;
- предложена нелинейная математическая зависимость удельной энергоёмкости разрушения от трёх основных факторов: температуры, влажности и размера куска, что позволяет объяснить наблюдаемое увеличение размера продуктов дробления при отрицательных



температурах. Выявлено, что фактор типа руды оказывает наибольшее влияние на энергоёмкость;

- разработана и верифицирована математическая модель на основе метода опорных векторов (SVM) с радиально-базисным ядром, обеспечивающая высокую точность прогноза удельной энергоёмкости ( $R^2 \approx 0,895$ ), что позволяет использовать модель в промышленных условиях;
- разработаны три программных модуля, зарегистрированные как программы для ЭВМ (Свидетельства о государственной регистрации № 2024667378, № 2024669046, № 2025614350), предназначенные для расчёта кругов Мора–Кулона, оценки энергозатрат на дробление.
- выполнено компьютерное моделирование технологической схемы рудоподготовки, которое показало, что снижение температуры перерабатываемой руды приводит к перераспределению циркуляционной нагрузки в замкнутых схемах измельчения, при этом в отдельных узлах циркуляция возрастает на 80–110 т/ч. Сформулированы практические рекомендации по адаптации режимов работы оборудования.

Таким образом, диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 2.8.9 Обогащение полезных ископаемых, и содержит решения актуальной научно-технической задачи.

#### **4. Личный вклад автора**

Личный вклад соискателя заключается в формулировке цели и задач исследования, выполнении обзора научно-технической информации, планировании и проведении экспериментальных и теоретических исследований, обработке и интерпретации результатов, разработке

математической модели и программных модулей, а также в подготовке публикаций и докладов по теме диссертации.

## **5. Полнота публикаций**

Основные результаты диссертационной работы отражены в 8 научных публикациях, в том числе в 3 статьях в изданиях из Перечня ВАК РФ, в 1 статье, индексируемой в международной реферативной базе данных Scopus, подтверждены 3 свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ (№ 2024667378, № 2024669046, № 2025614350). Материалы исследования апробированы на научных конференциях различного уровня.

## **6. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты диссертационного исследования целесообразно использовать при проектировании и оптимизации предприятий минерально-сырьевого сектора, в том числе:

- при проектировании дробильно-измельчительных отделений горно-обогатительных предприятий, расположенных в районах Крайнего Севера и Арктики, для выбора оборудования и режимов работы;
- для оперативного управления работой дробилок и мельниц в холодный период с целью предупреждения увеличения циркуляционной нагрузки;
- разработанную SVM-модель и программные модули рекомендуется применять для оперативной оценки ожидаемой энергоёмкости разрушения при изменении температуры, влажности и гранулометрического состава питания.

Результаты могут быть интегрированы в системы поддержки принятия решений и автоматизированные системы управления

технологическими процессами горно-обогатительных предприятий. Полученные закономерности могут быть учтены при разработке технологических регламентов и инструкций по эксплуатации оборудования в условиях холодного климата.

## **7. Общие замечания и вопросы**

1. Хотя во введении подчёркивается, что исследований по влиянию отрицательных температур мало, но в главе 1 этому направлению уделено совсем небольшое место. Обзор сконцентрирован на классических теориях прочности и общих работах по термическим воздействиям (нагрев).
2. Температурный диапазон ( $-20...+20$  °C) узок для заявленной области применения. Для реальных арктических условий температуры  $-30...-40$  °C и ниже являются обычными. Не приведено пояснение, почему взят за основу именно такой диапазон. Хотя также был использован жидкий азот ( $-196$  °C) для охлаждения, но при этом нигде не сказано, до какой температуры был заморожен образец. Таким образом, не рассмотрены механизмы разрушения (полное промерзание влагосодержащих пор, хрупкое разрушение связующих фаз и т.п.) при температурах менее 20 °C.
3. Влажность руды входит в модель как один из ключевых факторов, но не описано, как задавался и контролировался уровень влажности – насыщение, увлажнение, естественная влажность, не приведены данные о вариации влажности по образцам и т.д. Без этого невозможно корректно интерпретировать влияние влажности на прочность и энергоёмкость, поскольку физический смысл параметра «влажность» в низкотемпературном диапазоне принципиально меняется.
4. Экспериментально показан рост прочности при сжатии и коэффициента крепости и снижение прочности при растяжении и сдвиге при



охлаждении, однако не приведено экспериментально-теоретическое обоснование влияния текстуры и трещиноватости породы на эту зависимость, не сопоставлены результаты с прогнозами теории Гриффитса и статистического подхода (изменение параметров распределения прочности при снижении  $T$ ). В итоге выводы остаются верными, но скорее описательными, чем механистически обоснованными.

5. Формула Ирвина и вывод по пластической деформации используются без достаточного раскрытия. Утверждение об уменьшении удельной пластической деформации перед фронтом трещины с ростом хрупкости при охлаждении – достаточно интересный вывод, но сама формула Ирвина и её адаптация к руде описаны схематично, не приведены исходные параметры и промежуточные расчёты. Все это вызывает сложности при проверке полученных данных и их интерпретации.
6. SEM-исследования новообразованных поверхностей демонстрируют различия во фрагментации при разных  $T$ , но отсутствует количественная морфометрия (фрактальная размерность поверхности, распределение размеров сколов, параметры шероховатости), не проведен анализ вида поверхности на энергоёмкость процесса. С помощью микроскопического исследования можно было обосновать изменение механизма разрушения.
7. Выбор SVM с радиально-базисным ядром оправдан плохой работой линейной регрессии. Однако в тексте присутствуют утверждения о «вкладе» отдельных факторов (тип руды, температура, влажность, объем куска) в энергоёмкость, как будто речь идет о линейной модели с коэффициентами. Также не описаны формально использованные методы оценки важности признаков (Permutation Importance, SHAP, частные зависимости и т.п.), не приведены ни сами метрики важности, ни их доверительные интервалы.

8. Исследование демонстрирует существенное влияние температуры на гранулометрический состав продуктов дробления и энергоёмкость процесса. Было бы интересно более подробно рассмотреть роль фазовых переходов воды (лёд↔вода) в порах и на поверхностях зёрен в контексте наблюдаемых изменений механических свойств. Частично эта информация содержится в разделе 1.6, однако детализированный анализ механизма льдообразования и его влияния на прочность и энергоёмкость при различных уровнях влажности мог бы значительно усилить физическое обоснование результатов.
9. При моделировании технологической схемы получены значительные изменения циркуляционной нагрузки (до 80–110 т/ч). Для более полного понимания результатов было бы ценно пояснить, какие допущения принимались относительно износа рабочих органов дробилок при низких температурах, изменения геометрических параметров (щелей, размеров) при охлаждении, а также как эти факторы могут влиять на полученные результаты.

Высказанные замечания носят дискуссионный и рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

## **8. Заключение**

В целом диссертационная работа Новикова Юрия Витальевича выполнена на актуальную тему, отличается научной новизной и практической значимостью, характеризуется достаточной степенью обоснованности и достоверности результатов. Оформление работы соответствует действующим требованиям, а автореферат даёт полное представление о структуре, содержании и основных научных положениях диссертации. С учётом изложенного считаю, что диссертация «Повышение эффективности рудоподготовки на основе учета влияния отрицательных



температур на механизм разрушения минерального сырья» соответствует критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, а её автор Новиков Юрий Витальевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9 – Обогащение полезных ископаемых.

Даю согласие на обработку моих персональных данных.

Официальный оппонент:

Доцент кафедры обогащения полезных ископаемых Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», к.т.н., доцент

«13» 01 2026 г.

 Николаева Надежда Валерьевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2; тел. 8(812)328-82-85.  
e-mail: nikolaeva\_nv@pers.spmi.ru



Подпись   
Веряю:   
Начальник управления делопроизводства  
контроля документооборота

Е.Р. Яковлева  
13.01.2026