

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ПФИЦ УрО РАН,

Академик РАН, д.т.н., проф.

А.А. Барях

2021 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук
на диссертационную работу Кузнецова Николая Николаевича на тему
«Исследование энергоемкости разрушения скальных горных пород с целью оценки их
удароопасности (на примере месторождений Кольского региона)»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Актуальность темы диссертации

В ходе интенсивной добычи полезных ископаемых в скальных массивах с преобладающим действием тектонических напряжений нередко сталкиваются с проблемой динамических проявлений горного давления от шелушения и стреляния до горных ударов и техногенных землетрясений. В связи с этим возникает необходимость предварительно проводить оценку удароопасности массива пород отрабатываемых месторождений.

Одним из главных факторов, приводящих к динамическим разрушениям в массиве, является способность горных пород к хрупкому разрушению. Для изучения этой особенности пород проводят лабораторные испытания образцов, по результатам которых определяют их деформационные и энергетические параметры.

На данный момент большинство методов оценки склонности горных пород к удароопасности (динамическим разрушениям) основываются на результатах определения и сопоставления их деформационных характеристик, таких как модуль упругости и модуль спада. Также предлагаются критерии, позволяющие выполнять такую оценку на основании сравнительного анализа величин накопленной и выделившейся в процессе разрушения энергии деформирования образцов. Однако выполнение этих оценок в

настоящее время сдерживается отсутствием промышленного изготовления испытательных установок с повышенной жёсткостью, что необходимо для получения полного графика деформирования горных пород. В связи с этим возникает потребность в разработке метода, позволяющего определять склонность пород к динамическим разрушениям по результатам испытаний на обычных прессах по стандартным методикам без определения запредельных характеристик.

Также вопросы накопления и выделения энергии горными породами и определение их склонности к динамическим разрушениям при переходе от одноосного напряженного состояния к трехосному нуждаются в дальнейшем изучении с применением современного оборудования и испытательных установок.

В связи с этим тема диссертации Кузнецова Н.Н., посвященная изучению удароопасности скальных горных пород с позиции энергоемкости их разрушения, является актуальной научной задачей.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа Кузнецова Н.Н. направлена на разработку нового критерия оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям с позиции энергоемкости их разрушения.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 9 таблиц, 63 рисунка и 1 приложение. Библиографический список включает 160 наименований.

В введении диссертации представлены актуальность работы, объект и методы исследования, сформулированы цель, идея, задачи, новизна, научная и практическая значимость, научные положения, выносимые на защиту, а также приводятся сведения о публикациях, достоверности и апробации.

В первой главе проведен анализ существующих методов исследования процессов энергообмена в массиве горных пород и на образцах. Рассмотрены взаимосвязи между процессами энергообмена и удароопасным состоянием участков месторождений полезных ископаемых. Приведены и проанализированы основные критерии оценки склонности пород к горным ударам. Проведенный анализ позволил установить, что наиболее востребованный подход к оценке удароопасности горных пород, принятый в нормативных документах РФ, основывается на сопоставлении деформационных характеристик образцов до и за пределом прочности, а именно модуля упругости и модуля спада. Показано, что реализация этого подхода сдерживается отсутствием на данный момент так

называемых «жестких» прессов, необходимых для получения запредельных характеристик образцов.

Во второй главе представлены результаты испытаний образцов скальных горных пород месторождений Кольского региона. В условиях одноосного напряженного состояния определены основные физические свойства пород, такие как пределы прочности при одноосном сжатии и растяжении, модуль упругости, коэффициент Пуассона и критическая удельная энергия деформирования. Анализ полученных данных позволил установить, что скальные породы с величиной критической удельной энергии ниже $0,05 \text{ МДж}/\text{м}^3$ разрушались в статическом режиме. В случаях, когда критическая энергия превышала величину $0,05 \text{ МДж}/\text{м}^3$, то разрушение пород происходило в динамической форме с разлетом осколков и сильным взрывоподобным звуком. Наиболее интенсивное разрушение установлено для пород с величиной критической энергии деформирования свыше $0,25 \text{ МДж}/\text{м}^3$. В условиях трехосного напряженного состояния определен характер изменения значений пределов прочности и критической удельной энергии образцов скальных пород при увеличении бокового давления от 10 до 30 МПа. Установленную величину критической удельной энергии деформирования равную $0,05 \text{ МДж}/\text{м}^3$ можно использовать как пороговое значение для предварительного разделения пород на склонные и не склонные к динамическим разрушениям.

В третьей главе представлен разработанный упрощенный критерий оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям, основанный на анализе допредельных диаграмм деформирования образцов при одноосном сжатии и сопоставлении величин расчетной идеально упругой и реальной энергии их деформирования. Установлено, что для не склонных к динамическим разрушениям пород график деформирования до предела прочности при одноосном сжатии имеет вогнутый вид, а разница значений расчётной идеально упругой и реальной энергии деформирования больше 10%. В случаях, когда график деформирования образцов до предела прочности близок к прямолинейному, а разница значений реальной энергии деформирования меньше расчётной идеально упругой энергии на величину до 10% или равна нулю, а также, если значения реальной энергии превышают значения идеально упругой, то породы являются склонными к разрушениям в динамической форме. Выполнено сопоставление результатов оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям по предлагаемому автором критерию и критерию А.Н. Ставрогина, основанному на сопоставлении величин модуля спада и модуля упругости. Показано, что в обоих случаях склонными к динамическим разрушениям оказались уртит и апатит-нефелиновая руда, а не склонным – карбонатит. Предлагаемый упрощенный критерий оценки склонности

скальных горных пород к динамическим разрушениям позволит уйти от определения их запредельных характеристик на «жестких» прессах.

В четвертой главе приведены результаты оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям в условиях трехосного сжатия. Выявлено, что для скальных пород, склонных к динамическим разрушениям, характерно быстрое выделение накопленной в условиях трехосного сжатия упругой энергии (менее 40 с), а критическая удельная энергия деформирования будет в два и более раз превышать остаточную энергию в образцах после их разрушения. Для несклонных к динамическим разрушениям пород время выделения энергии в условиях трехосного сжатия будет более длительным (около 200 с и выше), а разница между величинами критической и остаточной энергии будет близка к нулю. Установлено, что с переходом от условий одноосного сжатия к трехосному и при выравнивании значений компонент тензора напряжений уменьшается скорость выделения накопленной в процессе нагружения энергии, а также снижается склонность пород к разрушениям в динамической форме. Предложен алгоритм оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям в условиях одноосного и трехосного сжатия.

В заключении приведены научные и практические результаты работы.

В приложении представлен нормативный документ «Регламент по обоснованию устойчивых параметров борта карьера и отвалов участка Гакман Юкспорского месторождения», в котором использованы результаты работы автора.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности

Содержание диссертации соответствует пунктам 1, 3 и 13 паспорта специальности 25.00.20 - «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»:

- «Напряженно-деформированное состояние массивов горных пород и грунтов в естественных условиях и его изменение во времени, в том числе в связи с проведением горных выработок, строительством сооружений, газовых и нефтяных скважин, эксплуатацией месторождений»;
- «Изучение свойств минералов, пород и грунтов в условиях различных физических полей, физических состояний и воздействий. Направленное изменение свойств и состояния минералов, горных пород и грунтов и их массивов, горной массы воздействием механических, тепловых, электромагнитных и других физических полей и флюидов при решении инженерных задач добычи и переработки полезных ископаемых, освоении подземного пространства и строительстве»;

- «Изучение напряженно-деформированного состояния и процессов разрушения горных пород методами математического моделирования и лабораторного эксперимента».

Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научная новизна исследования Кузнецова Н.Н. заключается в установлении порогового значения критической удельной энергии деформирования для скальных горных пород, на основании которого их можно предварительно разделять на склонные и несклонные к динамическим разрушениям. Автором предложен критерий оценки склонности скальных пород к динамическим разрушениям, позволяющий уйти от определения их запредельных характеристик, получаемых в ходе испытания образцов на «жестких» прессах. Установлено, каким образом изменяется характер деформирования скальных горных пород, их физические свойства и склонность к динамическим разрушениям при переходе от условий одноосного сжатия к трехосному.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в работе, подтверждаются большим количеством полученных экспериментальных данных и их статистической обработкой, сопоставимостью результатов испытаний с результатами, полученными другими исследователями.

Значимость результатов для науки и производства

Научная значимость работы заключается в установлении зависимости между характером разрушения образцов скальных горных пород при одноосном сжатии и величиной их критической удельной энергии деформирования. Определено, что при переходе от условий одноосного сжатия к трехосному изменяется характер деформирования скальных горных пород и уменьшается их склонность к динамическим формам разрушения.

Практическая значимость исследования заключается в разработке упрощенного критерия оценки склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям, основывающегося на анализе графиков деформирования образцов скальных пород при одноосном сжатии до предела прочности и сопоставлении величин их накопленной фактической и расчетной идеально упругой энергий деформирования.

Полученные результаты являются достоверными и подтверждаются представительным объемом статистических данных.

Результаты исследований и основные научные положения работы докладывались на XV и XVII Межрегиональных научно-практических конференциях студентов,

аспирантов и молодых ученых (Апатиты, 2012 и 2014), на II Международной конференции горнопромышленного комплекса «Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона» (Кировск, 2012), на V и VI школах молодых ученых ГоИ КНЦ РАН (Апатиты, 2013 и 2014), на международном геомеханическом коллоквиуме EUROCK 2015 (Зальцбург, 2015), на X Международной школе-семинаре «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» (Апатиты, 2016), на Европейском симпозиуме EUROCK 2017 (Острава, 2017), на Европейском симпозиуме по геомеханике EUROCK 2018 (Санкт-Петербург, 2018), на третьей Международной конференции «Свойства горных пород при динамических нагрузках» RocDyn-3 (Тронхейм, 2018), на XIII Всероссийской молодежной научно-практической конференции "Проблемы недропользования" (Екатеринбург, Апатиты, Хабаровск, 2019 г.), были изложены в научно-исследовательских отчетах ГИ КНЦ РАН.

Результаты исследований также отражены в 41 научной публикации, из них 9 работ опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 11 - в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, и 2 патента на изобретения.

Замечания по диссертационной работе

1. Неудачно сформулирован п. 2 научной новизны работы, касающийся увеличении предела прочности пород и, как следствие, критической удельной энергии деформирования с ростом бокового давления. Данная тенденция известна достаточно давно и нашла свое отражение еще в работах К. Мора и Т. Кармана.

2. Несмотря на достаточно представительный обзорный материал, приведенный в диссертации, указывающий, что при оценке удароопасности необходимо рассматривать энергетический баланс подводимой и расходуемой энергии, автором не проводился сопоставительный анализ накопленной нагружающим прессом упругой энергии и остаточной энергоемкостью образцов горных пород в момент перехода к динамической форме разрушения.

3. В дополнении к предыдущему замечанию необходимо отметить, что в работе недостаточно изучен вопрос влияния жесткости нагружающей рамы пресса на характер разрушения образцов скальных пород при одноосном сжатии. Автор ограничивается сравнением результатов испытаний, проведенных только на двух прессах MTS 816 с коэффициентами жесткости 1,1 ГН/м и 3 ГН/м. Кроме того сравнение выполнено для двух типов пород: крепких хрупких и имеющих ярко выраженные пластические свойства. С нашей точки зрения, интерес представляют результаты сравнительных испытаний пород, занимающих промежуточное по свойствам положение.

Заключение по работе

В целом указанные замечания не снижают значимости работы. Диссертация Кузнецова Н.Н. на тему «Исследование энергоемкости разрушения скальных горных пород с целью оценки их удароопасности (на примере месторождений Кольского региона)», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной самостоятельной квалификационной работой, в которой представлен новый научно-обоснованный подход к оценке склонности скальных горных пород к динамическим разрушениям с позиции их энергоемкости. Автором диссертации получены результаты, которые имеют научную и практическую ценность. Работа обладает внутренней целостностью и имеет логичную структуру, написана научным языком. Результаты выполненных автором исследований прошли научную и практическую аprobацию и могут быть рекомендованы к использованию в горнодобывающих регионах и на предприятиях России, осуществляющих добычу полезных ископаемых.

Автореферат диссертации полностью отражает содержание работы, а также полученные научные результаты и положения, выносимые на защиту.

По уровню решения научной задачи диссертационная работа соответствует требованиям, установленным пп. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Кузнецов Николай Николаевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.20 - «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Отзыв ведущей организации рассмотрен на заседании ученого совета Горного института Уральского отделения Российской академии наук («ГИ УрО РАН») – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН) 27 августа 2021 г. (Протокол № 8).

Заведующий лабораторией геотехнологических
процессов и рудничной газодинамики,
доктор технических наук
E-mail: ssa@mi-perm.ru, тел. (342) 216-58-42



С.С. Андрейко

Старший научный сотрудник лаборатории
физических процессов освоения георесурсов,
кандидат технических наук
E-mail: ivpan@mi-perm.ru, тел. (342) 216-37-03

И.Л. Паньков

Согласны на обработку персональных данных.

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук. Адрес: 614990, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13а. Тел.: +7 (342) 212-60-08; e-mail: psc@permsc.ru, официальный сайт <http://permsc.ru/ru/>