

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 03 ноября 2016 года публичной защиты диссертации Ефимова Виктора Прокопьевича «Разработка методов определения физических параметров, характеризующих разрушение хрупких материалов» по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

На заседании присутствовали 21 из 26 членов диссертационного совета, из них 8 докторов наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела:

1. Христенко Юрий Федорович, заместитель председателя диссертационного совета	д-р техн. наук	01.02.04
2. Васенин Игорь Михайлович, заместитель председателя диссертационного совета	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
3. Пикущак Елизавета Владимировна, ученый секретарь диссертационного совета	канд. физ.-мат. наук	01.02.05
4. Архипов Владимир Афанасьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
5. Биматов Владимир Исмагилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
6. Бубенчиков Алексей Михайлович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
7. Бутов Владимир Григорьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
8. Герасимов Александр Владимирович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
9. Глазунов Анатолий Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
10. Глазырин Виктор Парфирьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
11. Зелепугин Сергей Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
12. Крайнов Алексей Юрьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
13. Люкшин Борис Александрович	д-р техн. наук	01.02.04
14. Макаров Павел Васильевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
15. Прокофьев Вадим Геннадьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
16. Скрипняк Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
17. Смоляков Виктор Кузьмич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
18. Тимченко Сергей Викторович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
19. Черепанов Олег Иванович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
20. Шрагер Геннадий Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
21. Якутенок Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05

Заседание провёл заместитель председателя диссертационного совета доктор технических наук, старший научный сотрудник Христенко Юрий Федорович.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 21, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить В.П. Ефимову учёную степень доктора физико-математических наук.

Заключение диссертационного совета Д 212.267.13
на базе федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Министерства образования и науки Российской Федерации
по диссертации на соискание ученой степени доктора наук
аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 03.11.2016 г., № 291

О присуждении **Ефимову Виктору Прокопьевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация **«Разработка методов определения физических параметров, характеризующих разрушение хрупких материалов»** по специальности **01.02.04** – Механика деформируемого твердого тела принята к защите 05.07.2016 г., протокол № 264, диссертационным советом Д 212.267.13 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 203-161 от 08.02.2008 г.).

Соискатель **Ефимов Виктор Прокопьевич**, 1959 года рождения.

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук **«Определение трещиностойкости по разрушению компактного образца расклиниванием»** по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела защитил в 1993 году, в диссертационном совете, созданном на базе Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

Работает в должности старшего научного сотрудника лаборатории разрушения горных пород и механики взрыва в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций.

Диссертация выполнена в лаборатории разрушения горных пород и механики взрыва Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институте горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций.

Научный консультант – доктор физико-математических наук, **Шер Евгений Николаевич**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория разрушения горных пород и механики взрыва, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Аннин Борис Дмитриевич, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, советник РАН

Стефанов Юрий Павлович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности, ведущий научный сотрудник

Сукнёв Сергей Викторович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория механики геоматериалов, заведующий лабораторией

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук**, г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном **Гольдштейном Робертом Вениаминовичем** (член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, лаборатория механики прочности и разрушения материалов и конструкций, заведующий лабораторией), **Осипенко Николаем Михайловичем** (кандидат технических наук, лаборатория механики прочности и

разрушения материалов и конструкций, старший научный сотрудник), **Перельмутером Михаилом Натановичем** (доктор физико-математических наук, лаборатория механики прочности и разрушения материалов и конструкций, старший научный сотрудник), указала, что актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью определения величин, которые характеризуют прочностные свойства конкретных материалов в зависимости от времени их действия или скорости нагружения для проведения расчетов по разрушению, определению ресурса конструкции при известных или планируемых напряжениях. Главными достижениями автора являются следующие результаты: разработан и апробирован метод определения параметров уравнения долговечности, основанный на регистрации зависимости прочности горных пород от скорости нагружения; предложен метод оценки безопасного напряжения в модели разрушения С.Н. Журкова; определены (впервые) на одних и тех же горных породах величины начальной энергии активации разрушения при сжатии, растяжении и изгибе, которое показало, что эффективная величина начальной энергии активации разрушения не зависит от вида напряженного состояния; разработан алгоритм расчета прочности на растяжение по результатам испытаний на изгиб с учетом структуры среды; предложена модификация способа обработки результатов испытаний на растяжение методом «бразильской пробы» с применением нелокальных критериев разрушения, повышающая достоверность испытаний по сравнению со стандартным бразильским тестом; оптическим методом каустики откалибрована методика определения трещиностойкости, основанная на регистрации двух параметров разрушения: длины трещины и усилия внедрения инструмента. Предложенные методы позволяют получать величины прочности горных пород и хрупких сред на растяжение более простыми и менее затратными способами по сравнению со стандартными испытаниями на одноосное однородное растяжение, что важно при исследовании закономерностей деформирования и прочности указанных материалов и сред и проведении экспресс-диагностики.

Соискатель имеет 44 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации – 27 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 18 (из них 18 статей в журналах, переводные версии которых индексируются Web of Science или

Scopus), в сборнике статей – 1, в сборниках материалов всероссийских конференций и семинаров – 8. Общий объем публикаций – 11 п.л., авторский вклад – 8,54 п.л.

Наиболее значительные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук:

1. **Ефимов В. П.** Метод определения трещиностойкости хрупких материалов расклиниванием / В. П. Ефимов, Е. Н. Шер // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1996. – № 1. – С. 32–36. – 0,31 / 0,16 п.л.

в переводной версии журнала: Efimov V.P. Cleavage method of determining the crack resistance of brittle materials / V.P. Efimov, E.N. Sher // Journal of Mining Science – 1996. – Vol. 32, is. 1. – P. 26–30. – DOI: 10.1007/BF02046574.

2. **Ефимов В. П.** Определение динамической трещиностойкости органического стекла / В. П. Ефимов, Е. Н. Шер // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т. 42, № 5. – С. 217–225. – 0,56 / 0,28 п.л.

в переводной версии журнала: Efimov V.P. Dynamic crack resistance of acrylic plastic / V. P. Efimov, E. N. Sher // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2001. – Vol. 42, is. 5. – P. 918–924. – DOI: 10.1007/BF02562511.

3. **Ефимов В. П.** Исследование длительной прочности горных пород в режиме постоянной скорости нагружения / В. П. Ефимов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 6. – С. 37–44. – 0,5 п.л.

в переводной версии журнала: Efimov V. P. Investigation into the long term strength of rock under loading with a constant rate / V. P. Efimov // Journal of Mining Science – 2007. – Vol. 43, is. 6. – P. 600–606. – DOI: 10.1007/s10913-007-0065-8.

4. **Ефимов В. П.** Оценка безопасного напряжения в концепции прочности С.Н. Журкова / В. П. Ефимов, В. С. Никифоровский // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 3. – С. 51–56. – 0,38 / 0,19 п.л.

в переводной версии журнала: Efimov V. P. Safe stress assessment in the strength concept by Zhurkov / V. P. Efimov, V. S. Nikiforovsky // Journal of Mining Science – 2010. – Vol. 46, is. 3. – P. 260–264. – DOI: 10.1007/s10913-010-0033-6.

5. **Ефимов В. П.** Испытания горных пород в неоднородных полях растягивающих напряжений / В. П. Ефимов // Прикладная механика и техническая физика. – 2013. – Т. 54, № 5. – С. 199–209. – 0,69 п.л.

в переводной версии журнала: Efimov V. P. Rock tests in nonuniform fields of tensile strength / V. P. Efimov // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2013. – Vol. 54, is. 5. – P. 857–865. – DOI: 10.1007/BF02562511.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На автореферат поступило 4 положительных отзыва. Отзывы представили: 1. **А.М. Коврижных**, д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой общепрофессиональных дисциплин Новосибирского высшего военного командного училища Министерства обороны Российской Федерации, и **В.А. Сарайкин**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., доцент кафедры общепрофессиональных дисциплин Новосибирского высшего военного командного училища Министерства обороны Российской Федерации, *без замечаний*. 2. **А. Л. Исаков**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Изыскания, проектирования и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения, г. Новосибирск, *с вопросом* о формулировке цели работы: зачем нужно было развивать существующие методы определения характеристик динамической прочности хрупких сред, и что именно требовало в них улучшения или расширения функциональных возможностей? 3. **А. П. Андриевский**, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем освоения недр Института химии и химической технологии СО РАН Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН», *без замечаний*. 4. **М. А. Леган**, д-р техн. наук, доц., старший научный сотрудник лаборатории статической прочности Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, *с замечаниями*: Предельное напряжение σ_{tens} определено методом «бразильской пробы», т.е. при сложном напряженном состоянии, поэтому оно не обязано быть равным пределу прочности материала σ_p при одноосном растяжении, что и показывает таблица 9. В большинстве случаев оценки $\sigma_p > \sigma_{tens}$. В связи с этим

близость оценки предела прочности, полученной по тому или иному критерию, к предельному напряжению $\sigma_{\text{тенс}}$ не является преимуществом критерия. В диссертациях В.П. Ефимова и М.А. Легана в качестве третьего параметра β в градиентном критерии использовано отношение структурного параметра δ к диаметру отверстия. Однако согласно статьям М.А. Легана в журнале «Прикладная механика и теоретическая физика» (№ 4 в 1993 г. и № 5 в 1994 г.) параметр β в градиентном критерии представляет собой параметр аппроксимации, который можно определить из условия наилучшего описания экспериментальных данных для исследуемого материала.

В отзывах отмечается, что исследования, посвященные разработке методов определения характеристик длительной прочности твердых материалов и, в частности, горных пород, имеют большое практическое значение для проектирования, строительства и безопасной эксплуатации инженерных конструкций и сооружений. Достоверный прогноз прочности строительных и горных сооружений требует глубокого понимания природы разрушения твердых сред и знания физико-механических свойств использованных материалов. К важным и новым результатам работы следует отнести оценку безопасного напряжения в модели разрушения Журкова С.Н., вывод о независимости начальной энергии активации разрушения для горных пород от вида напряженного состояния. Соискателем развиты и апробированы методы оценки прочностных характеристик горных пород с учетом временных факторов. Физические параметры разрушения горных пород, получаемые с помощью предложенной методики определения параметров уравнения долговечности твердых сред, могут быть использованы при расчете ресурса горных сооружений в организациях, занимающихся разработкой и проектированием горных предприятий. Эти параметры позволяют оценивать характеристики длительной прочности горных сооружений, в частности, целиков. Развитые методики определения прочности на растяжение и трещиностойкости могут найти применение на горных предприятиях, шахтах, разрезах как более дешевые способы определения необходимых характеристик разрушения горных пород.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что в сферу интересов **Б. Д. Аннина** входят моделирование процессов ползучести, деформирования и длительной прочности материалов и элементов конструкций; в сферу интересов **Ю. П. Стефанова** входят математическое моделирование упругого и неупругого поведения твердых сред в условиях сложного нагружения и численное решение задач механики деформируемого твердого тела; в сферу интересов **С. В. Сукнёва** входят разработка методов экспериментального исследования возникновения и развития трещин в образцах горных пород, разработка критериев разрушения геоматериалов в условиях неоднородного поля напряжений; **Институт проблем механики им. Ю.А. Ишлинского РАН** – ведущий российский институт в области механики деформируемого твердого тела, в котором ведутся исследования в области разработки моделей, методов расчета и экспериментального исследования процессов разрушения материалов и элементов конструкций.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

обоснован, разработан и апробирован метод определения параметров уравнения долговечности Журкова С.Н. для хрупких материалов и горных пород. Главное его содержание – определение зависимости прочности испытываемой среды от скорости нагружения в диапазоне от 10^{-3} до $5 \cdot 10^2$ МПа/с;

дан анализ возможных неточностей определения параметров уравнения долговечности, которые встречаются при испытании сред, обладающих слабо выраженной зависимостью прочности от скорости нагружения. *Обоснован* способ оценки начальной энергии разрушения из независимых механических испытаний на трещиностойкость, который позволяет отсеять сомнительные значения начальной энергии активации разрушений;

разработан экспресс-метод определения предела прочности на одноосное растяжение по результатам измерений изгибной прочности горных пород;

предложен способ обработки результатов испытаний по модифицированному методу «бразильской пробы» для определения предела прочности на одноосное

растяжение в квазистатических условиях нагружения. Модификация метода «бразильской пробы» введением концентратора напряжений в виде осевого отверстия позволяет расширить рамки его применения на породы с выраженными пластическими свойствами и значительно улучшить качество испытаний;

разработана методика определения трещиностойкости горных пород для трещин отрыва в статическом и динамическом режиме. Методика основана на регистрации одновременно двух параметров при разрушении образца квадратного сечения: разрушающего усилия $F(t)$ и длины трещины $L(t)$.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

в работе получены результаты фундаментального характера, которые вносят вклад в расширение существующих представлений о закономерностях процесса разрушения твердых сред, а именно:

получена оценка безопасного напряжения в модели разрушения Журкова С.Н., уровень безопасного напряжения составляет приблизительно 20 % величины временной прочности на растяжение;

установлен факт независимости начальной энергии активации разрушения от вида напряженного состояния для горных пород с прочностью на сжатие более 130 МПа;

показана возможность согласования величин прочности, полученных при разных испытаниях при использовании нелокальных критериев прочности.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

определены зависимости прочности от скорости нагружения в диапазоне от 10^{-3} до $5 \cdot 10^2$ МПа/с для ряда горных пород различной крепости, в дальнейшем эти данные могут быть использованы при расчете длительной прочности в рамках других моделей, которые нацелены на оценку ресурса горных сооружений;

разработана методика определения параметров уравнения долговечности, которая для описания разрушения позволяет воспользоваться кинетической концепцией прочности, развитой школой Журкова С.Н. Для ряда горных пород с её помощью определены константы, входящие в уравнение долговечности;

разработана методика определения прочности на одноосное растяжение по результатам испытаний на изгиб, с учетом структуры горных пород и хрупких сред;

разработана методика определения трещиностойкости горных пород и с её помощью определены величины критического коэффициента интенсивности напряжений ряда горных пород и хрупких материалов для трещин отрыва.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Полученные результаты могут быть использованы при проведении научно-исследовательских работ в следующих ведущих академических институтах и университетах: Институт проблем комплексного освоения недр РАН (г. Москва), Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (в том числе Московский государственный горный университет), Горный институт УрО РАН (г. Пермь), Институт механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь), Институт горного дела УрО РАН (г. Екатеринбург), Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН (г. Якутск), Институт горного дела ДВО РАН (г. Хабаровск), Институт физико-технических проблем севера имени В.П. Ларионова СО РАН (г. Якутск), Институт геомеханики и освоения недр НАН Кыргызской Республики (г. Бишкек), Новосибирский государственный технический университет, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова (г. Якутск), а также в других НИИ и вузах, в которых занимаются моделированием процесса разрушения хрупких сред и горных пород.

Оценка достоверности результатов исследований выявила:

- совпадение расчетных характеристик с измеренными в эксперименте;
- использование эталонных датчиков и апробированной регистрирующей аппаратуры, тарированной по эталонным приборам;
- удовлетворительное совпадение полученных характеристик с данными других авторов или справочников;
- совпадение результатов, полученных независимыми экспериментальными методами;
- применение апробированных методов статистической обработки экспериментальных данных.

Новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

- получена оценка безопасного напряжения в модели разрушения С.Н. Журкова. Под безопасным напряжением в этой концепции подразумевается напряжение, при котором материал изделия или конструкции не разрушится никогда. Уровень безопасного напряжения составляет приблизительно 20 % величины временной прочности на растяжение;

- разработана и апробирована методика для определения параметров уравнения долговечности, основанная на регистрации зависимости прочности горных пород от скорости нагружения;

- для ряда горных пород определены величины начальной энергии активации разрушения при сжатии, растяжении и изгибе, и доказан факт независимости начальной энергии активации разрушения от вида напряженного состояния для прочных горных пород с прочностью на сжатие свыше 130 МПа;

- разработан алгоритм определения прочности на растяжение по результатам испытаний на изгиб, который позволяет реализовать на его основе экспресс-методику определения прочности на растяжение для горных пород;

- предложена модификация способа обработки результатов испытаний дисков с отверстием с применением нелокальных критериев разрушения, повышающая достоверность испытаний на растяжение методом «бразильской пробы» по сравнению со стандартным бразильским тестом;

- предложенная методика определения трещиностойкости для трещин отрыва, основанная на регистрации механических параметров при разрушении компактного образца, верифицирована оптическим методом каустики.

Личный вклад автора заключается в: анализе и обобщении результатов предыдущих исследований, постановке проблемы и задач, выборе методов и разработке методик исследований; планировании и разработке схем испытаний, конструировании и изготовлении технических средств и оснастки для проведения экспериментальных исследований; проведении описанных в работе испытаний образцов горных пород и хрупких сред на одноосное сжатие, изгиб и растяжение, а также испытаний на трещиностойкость в статическом и динамическом режиме; обработке результатов испытаний, в проведении расчетов искомых величин

по полученным данным; проведении анализа возможных ошибок при использовании данных модельных представлений и выработке способов оценки искомых параметров из независимых механических испытаний; разработке модели расклинивания компактного плоского образца, основанной на анализе метода податливостей; разработке методик: определения начальной энергии активации разрушения U_0 и структурного параметра γ – постоянных, входящих в уравнение долговечности твердых сред; определения трещиностойкости хрупких материалов; определения прочности на растяжение по результатам испытаний на изгиб; постановке и реализации оптического метода «каустики», позволяющем определять коэффициент интенсивности напряжений; участии в подготовке публикаций по выполненной работе, апробации результатов исследования на научных конференциях и семинарах.

Диссертация отвечает критериям Положения о присуждении ученых степеней, установленным для диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, и, в соответствии с пунктом 9, является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена важная научная и практическая проблема развития методов испытаний, направленных на получение физических и механических параметров, характеризующих разрушение хрупких сред и горных пород, имеющая важное хозяйственное значение.

На заседании 03.11.2016 г. диссертационный совет принял решение присудить **Ефимову В. П.** ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человека, из них 8 докторов наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 21, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета

03 ноября 2016 г.



Христенко Юрий Федорович

Пикушак Елизавета Владимировна