МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

_____

Павлов Илья Алексеевич

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ УМЕРЕННОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

2.8.6 Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель д.ф.-м.н., доцент Винников Владимир Александрович

Москва, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ КВАЗИХРУПКИХ СРЕД. ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ НЕОДНОРОДНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ 9

1.1 Разрушение горных пород и представления о прочности 9

1.2 Развитие кинетических представлений о прочности 14

1.3 Неоднородное поле напряжений 20

1.4 Практическая применимость коэффициента трещиностойкости 28

1.5 Использование коэффициента трещиностойкости в моделировании 31

1.6 Влияние теплового воздействия на изменение коэффициента трещиностойкости горных пород 33

Выводы 35

ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБОРУДОВАНИЕ 37

2.1 Рекомендации ISRM 37

2.2 Государственные стандарты определения коэффициента трещиностойкости других материалов 38

2.3 Используемая методика 38

2.4 Лабораторная установка для исследования трещиностойкости при тепловом воздействии 40

2.5 Требования к образцам 46

Выводы 50

ГЛАВА 3 ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД РАЗНОГО ГЕНОТИПА ПРИ УМЕРЕННОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ 51

3.1 Температурный градиент 51

3.2 Изменение коэффициента трещиностойкости при умеренном тепловом воздействии горных пород разного генезиса 57

3.3 Изменение коэффициента трещиностойкости при умеренном тепловом воздействии горных пород разной зернистости 65

Выводы 69

ГЛАВА 4 ВЛИЯНИЕ ФЛЮИДОНАСЫЩЕНИЯ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ИЗВЕСТНЯКОВ ПРИ УМЕРЕННОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ 70

Выводы 74

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 75

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 77

ПРИЛОЖЕНИЕ А 94

ПРИЛОЖЕНИЕ Б 114

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Процесс разрушения горных пород является ключевым процессом добычи и переработки полезных ископаемых. Механизм разрушения по своей природе представляет собой процесс зарождения и развития трещин. На сегодняшний день в горном и нефтегазовом деле активно используются технологии, сущность которых сводится к образованию трещин. Одной из таких технологий является гидроразрыв пласта, применяемый в нефте- и газодобыче для интенсификации продуктивности скважин; в горном деле – для снижения опасных напряжений в массиве в окрестностях горных выработок, для извлечения метана из угольных пластов. В строительстве эта технология применяется при сооружении подземных хранилищ и захоронении отходов. Расчет этого процесса основывается на положениях механики разрушения, и одной из необходимых для проведения такого расчета величин является величина коэффициента трещиностойкости Учет этой величины, помимо прочего, позволит более точно прогнозировать геомеханическое состояние массивов горных пород при ведении в них взрывных работ, может способствовать снижению рисков плохой взрывной проработки массивов, что приведет к более рациональному расходу взрывчатых веществ, а, значит, и уменьшению издержек.

В настоящее время отечественные стандарты с описанием методики определения коэффициента трещиностойкости K_{IC} горных пород отсутствуют. В то же время, параметр K_{IC} входит практически во все сервисные пакеты моделирования. Как правило значение параметра принимают по умолчанию 1 МПа·м^{0,5}. На сегодняшний день вопрос влияния температурного воздействия на способность горных пород сопротивляться росту трещин при действии на них механической нагрузки в научной литературе освещен мало, в основном изучались процессы температурного выветривания. Однако этот фактор имеет ключевое значение при строительстве подземных резервуаров. Факт линейной

корреляции коэффициента трещиностойкости и степени предварительно оказанных термических воздействий на горные породы подтверждается различными исследователями. Более того, эмпирические данные говорят об изменчивости такой корреляции. При испытаниях образцов песчаника методом трехточечного изгиба коэффициент трещиностойкости с повышением температуры предварительного нагрева от 20 °С до 400 °С повышался, однако при дальнейшем повышении температуры предварительного нагрева от 400 °С до 800 °С показатель постепенно снижался.

Таким образом, экспериментальное выявление закономерностей изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от генезиса горной породы, а также насыщенности её флюидом при умеренном (до 100 °С) тепловом воздействии, которому и посвящено данное диссертационное исследование, является актуальной научной задачей.

Целью данного исследования является установление закономерности изменения степени влияния температурного поля на значение коэффициента трещиностойкости горных пород в зависимости от их генезиса, а также насыщенности флюидом порового пространства для повышения точности моделирования различных геомеханических процессов.

Основная идея работы заключается в получении статистических данных, а также поиске закономерностей изменения коэффициента трещиностойкости при умеренном тепловом воздействии на горные породы различного генезиса.

Основные научные положения и их новизна:

1. Установлено, что снижение величины коэффициента трещиностойкости в температурном диапазоне 20 – 100 °С в основном определяется генезисом породы. Снижение составило: 5,38 – 59,02 % для метаморфических, 17,95 – 28,27 % для магматических и 23,84 % для осадочных горных пород, при этом скорость снижения коэффициента трещиностойкости при нагревании в температурном диапазоне от 20 °С до

60 °С больше, чем при температурном диапазоне от 60 °С до 100 °С у гранита, известняка, белого мрамора, средне- и крупнозернистого серых мраморов, и наоборот у горных пород габбро и мелкозернистого серого мрамора.

2. Выявлена тенденция снижения величины коэффициента трещиностойкости при температурном воздействии в диапазоне 20 – 100 °С для серых мраморов, отличающихся размером структурных элементов: снижение величины коэффициента трещиностойкости с ростом температуры составило для мелко-, средне- и крупнозернистого материала 5,38 %, 59,02 % и 44,52 % соответственно.

3. Доказано, что насыщение образцов известняка флюидом не влияет или влияет несущественно на коэффициент трещиностойкости в температурном диапазоне 20 – 40 °С и приводит к снижению коэффициента трещиностойкости при умеренном тепловом воздействии в температурном диапазоне 60 – 100 °С. Коэффициент трещиностойкости насыщенных образцов известняка меньше коэффициента трещиностойкости ненасыщенных при 60 °С на 2,4 %, при 80 °С на 1,1 %, при 100 °С на 2,36 %.

Обоснованность и достоверность выдвинутых положений и выводов подтверждается:

- использованием апробированных на горных породах методик экспериментальных исследований;
- непротиворечивостью полученных в ходе экспериментов данных законам физики, теории прочности, а также данным, опубликованными в научной литературе;
- большим объемом экспериментального материала, собранного и обработанного с использованием стандартных методов математической статистики.

Новизна работы заключается в:

- применении и реализации методики определения коэффициента трещиностойкости при трехточечной схеме нагружения образца в виде балки

с пропилом при различных температурах в насыщенных и ненасыщенных флюидом образцах;

- установлении общих тенденций изменения способности горных пород разных генотипов сопротивляться росту трещин при тепловом воздействии.

Методы исследований включали анализ и обобщение литературных источников; экспериментальные лабораторные исследования процесса зарождения и развития трещин на образцах горных пород, а также факторов, влияющих на их развитие; при обработке результатов экспериментов – методы математической статистики.

Научное значение работы состоит в установлении полученных экспериментальным путем температурных зависимостей величин коэффициента трещиностойкости горных пород и выявлении закономерностей изменения этих величин для горных пород различного генезиса и различной заполненности флюидами их порового пространства в условиях умеренного теплового воздействия.

Практическая значимость результатов исследования заключается в получении экспериментальным путем актуальных значений коэффициента трещиностойкости горных пород различного генезиса при умеренном тепловом воздействии, что актуально для расчетов устойчивости массивов и процессов разрушения при проведении добычных работ на больших глубинах. Результаты диссертационной работы в части температурных зависимостей величины коэффициента трещиностойкости осадочных пород приняты к использованию ООО «Газпром геотехнологии» и будут учтены при проектировании объектов подземного хранения.

Апробация работы. Результаты испытаний и основные положения диссертационного исследования были представлены и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции «Ашировские чтения» (Самара, ФГБОУ ВО «СамГТУ», 26 сентября 2023 г.); Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2024» (Москва, НИТУ «МИСИС», 29.01-02.02 2024 г.); LXVII Международной конференции «Актуальные

проблемы прочности» (Екатеринбург, ФГБОУ ВО «УГГУ», 2-5 апреля 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 4 статьи, в том числе 2 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и двух приложений, изложенных на 116 страницах текста, включает 34 рисунка, 13 таблиц, список источников из 145 наименований.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ КВАЗИХРУПКИХ СРЕД. ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ НЕОДНОРОДНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

1.1 РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОЧНОСТИ

Прочность твердой среды (горных пород) является ключевым фактором при проектировании любой выработки, а процесс разрушения твердого тела сложным, не имеющим единого теоретического обоснования. С позиции механики сплошной среды, при решении задачи разрушения, не рассматривается сам механизм разрушения. В данном случае процесс рассматривается с точки зрения строго сформулированных моделей, применяемых к некоторым классам материалов, а сам материал как сплошная изотропная среда. Первые исследования по механике разрушения, как науки, использующей при описании процесса разрушения законы и методы механики сплошной среды [1], связывают с такими учеными, как Galileo Galilei, Hooke R., Coulomb Ch. A., Saint-Venan A. B., Mariotte E., Mohr C. O., Tresca H. E.. Их труды посвящены исследованиям деформационных свойств и построением критериев прочности [2]. В рамках данного подхода на основе эмпирических данных определяются функции из комбинации напряжений или деформаций, называемых предельными. В случае достижение напряжения или деформации в любой точке тела определенных величин, происходит разрушение. Описываемая комбинация подбирается так, чтобы наиболее удачным образом описать конкретные экспериментальные данные и является предметом теорий прочности. Такой феноменологический подход, при котором описание разрушения происходит без учета процесса распространения разрушения в объеме, оправдан в тех случаях, когда развитие дефектов, приводящее к потере несущей способности материала, происходит в узкой околокритической зоне. Первой реализацией такого подхода является

критерий наибольших нормальных напряжений, согласно которому разрушение происходит тогда, когда наибольшее из нормальных напряжений в любой точке тела достигает некоторой предельной отметки, определенной из опытов на растяжение. Гипотеза максимального главного напряжения была сформулирована Галилео Галилеем [3]. Затем был сформулирован критерий наибольших линейных деформаций, критерий Мариотта. Согласно данному критерию, разрушение происходит тогда, когда наибольшее относительное удлинение элемента достигает предельного значения, определенного из опытов на простое растяжение. Стоит понимать, что упомянутые выше критерии удовлетворительно описывают процесс разрушения хрупких материалов. Следующий критерий, называемый критерием Кулона-Треска, гласит, что начало процесса разрушения происходит тогда, когда наибольшее касательное напряжение достигло критического, предельного значения, определенного из опытов на простое растяжение [4]. Наконец, логическим завершением феноменологического подхода выступает теория прочности Кулона-Мора. Теория Кулона заключается в том, что прочность тела на сдвиг по площадке определяется суммой сцепления и нормального напряжения с учетом угла внутреннего трения. Теория прочности, сформулированная Mohr C. O., основывается на умозаключении о том, что разрушение тела обусловлено действием сразу нормальных и касательных напряжений. Эти напряжения связаны между собой и могут быть определены путем сложения векторов, представляются в виде соответствующих кругов предельных напряжений, где каждому частному значению напряженного состояния соответствует свой круг. Таким образом, можно определить опытным путем для разного вида напряженных состояний предельные круги и построить множество кругов на одной диаграмме. Кривая, огибающая такие круги, представляет собой набор точек, характеризующих предельное напряженное состояние горной породы. Именуется такая кривая огибающей Мора или паспортом прочности. Изучение критериев разрушения (теорий прочности)

по-прежнему сохраняет основное практическое значение при расчетах на прочность.

Важным шагом в развитии представлений о процессе разрушения твердого тела является рассмотрение последнего не как единой сплошной среды, а как атомно-молекулярной системы. К началу XX века в физике имелись не только прямые доказательства существования атомов, но и некоторые их характеристики (строение, масса, размер) [5]. Твердое тело представлялось теперь не некой сплошной средой, а четко организованной структурой с составными элементами. Стал возможным расчет теоретической прочности материала на основе знаний об энергии связей структурных элементов [6]: то действительно предельное значение нагрузки, которое способна выдержать идеальная конструкция из атомов с уже известной прочностью связей элементов. Однако рассчитанные теоретически пределы прочности оказались в десятки, а то и сотни раз выше экспериментальных. Причину такого несоответствия Griffith A. A. объяснил тем, что падение прочности твердых тел происходит по причине наличия в них местных неоднородностей – разного размера трещин, которые в свою очередь являются эффективными концентраторами напряжений, снижая прочность материала [7]. Критерием начала процесса разрушения является достижение в вершинах трещины критических напряжений, эквивалентных теоретически рассчитанной прочности материала. Для достижения критической концентрации напряжений и роста трещины требуется энергия, значительно меньшая, чем для разрушения бездефектного тела. При этом рост трещины сопровождается освобождением упругой энергии, которая расходуется на образование новых поверхностей. В качестве модели Griffith A. A. рассмотрел растяжение плитки с трещиной и показал, что разрушение определяется ростом одной «магистральной» трещины за счет концентрации напряжений в ее устье [8]. В своем труде работу, которую необходимо совершить для образования новых поверхностей, автор именует как «поверхностное натяжение материала» (англ. – the surface tension of the material). Таким

образом, в целях повышения совершенства структуры тела и значительного повышения его прочности необходимо устранить дефекты или, по крайней мере, уменьшить их количество. На эту тему широко известны исследования А. Ф. Иоффе, М. В. Кирпичевой и М. А. Левитской, направленные на определение прочности кристаллов каменной соли, в ходе которых поверхностный слой, содержащий дефекты, был растворен в циркулирующей горячей воде [9]. Было обнаружено, что прочность кристалла, поверхностный слой которого растворен, кратно превышает его техническую прочность, уступая значениям теоретически рассчитанной прочности лишь в несколько раз. Данные опыты были подвергнуты критике в связи с тем фактом, что соль в горячей воде обладает пластическими деформациями и приводит к упрочнению, критики также полагали, что предел упругости при этом уменьшается [10]. В свою очередь А. Ф. Иоффе показал, что предел упругости соли в воде и сухом воздухе с точностью до 1 % совпадает, при этом соль в сухом состоянии рвется хрупко, в воде – после пластической деформации. Таким образом, полученные значения, ввиду упрочнения при пластических деформациях соли в мокром состоянии характеризуют не прочность монокристалла, а скорее величину связей в мелкокристаллическом агрегате, проведенные опыты также дают возможность сделать вывод о высокой степени влияния состояния поверхности образца каменной соли на прочность при его разрыве [11]. Теоретически рассчитанные значения прочности в дальнейшем были получены для многих других материалов. Так, в работах Физико-технического института в области прочности неорганических стекол, начатых в начале 30-ых годов прошлого столетия С. Н. Журковым, были получены значения прочности, предсказанные теоретически, для тонких стеклянных волокон [12].

Следующий виток развития представлений о процессе разрушения связан с учетом влияния воздействия внешних факторов на внутреннюю структуру материала. Использование такого подхода обусловлено накопленным внушительным экспериментальным материалом, посвященным

изучению зависимостей прочности материала от степени термического воздействия, от длительности нагрузки, от скорости нагружения и условий испытания. Наблюдаемое явление снижения прочности при термическом воздействии, при продолжительном и циклическом напряжении, называемое статической усталостью, не согласовывалось с механическим представлением о процессе разрушения, что послужило стимулом к развитию механической концепции. Исследования на данную тему сформировали новое ответвление механики сплошной среды – теории ползучести. Теория ползучести изучает влияние времени на величину деформации и напряжения, в то время как теория пластичности ставит задачу определения напряжений и деформаций без учета временной составляющей [13]. Термином «ползучесть» можно назвать всю совокупность явлений, которые можно объяснить, допустив, что зависимость между напряжениями и деформациями содержит время, явно или посредством некоторых операторов [14].

Воздействие внешних факторов, а также продолжительность такого воздействия очевидно влекут за собой внутренние изменения среды, поэтому, для оценки прочностных параметров, необходимо иметь численную оценку степени такого воздействия. С точки зрения влияния внешних факторов, примечательны исследования Orowan E., посвященные изучению влияния влаги на прочность твердой среды [15]. Объектом исследования выступали образцы стекла, фактором воздействия на поверхностный слой, содержащие гриффитсовы трещины, выступала влага, снижающая поверхностную энергию разрушения. Однако впоследствии, при постановке опытов в вакуумной и инертной средах, было выяснено, что теория имеет ограниченный характер. С точки зрения исследований, ставящих целью объяснение зависимости прочности от времени, являются исследования Murgatroid J. B. [16-17]. В качестве материала для образцов выступало стекло, имеющее двухфазное строение. Согласно теории Murgatroid J. B., при воздействии нагрузки, требуется время на перераспределение напряжений в среде: происходит релаксация напряжений в вязкопластичной зоне и рост напряжений в упругой

зоне. Разрушение материала происходит с течением времени, когда величина напряжения в упругих областях достигает предела прочности. Данная теория носит очевидное ограничение и применима для материалов, обладающих вязкопластическими свойствами. Позднее, советские ученые Ю. Н. Работнов [18] и Л. М. Качанов [19] в рамках модели ползучести введут понятие «поврежденность», которое связывало прочность материала с влиянием внешних факторов и временем, то есть давало возможность оценки их воздействия на среду. Модели разрушения, основанные на континуальном рассмотрении среды, имеют практическую ценность и успешно развиваются по сей день [20-22]. Однако ввиду того, что накопление рассеянных микродефектов с течением времени является случайным процессом, а численно охарактеризовать степень нарушенности, используя статические методы, сложно, так как условия возникновения и развития дефектов известны нам лишь в самых грубых чертах [2], такие модели не могут дать исчерпывающего объяснения временной и температурной зависимости прочности широкого класса твердых сред. Проблемы разрушения могут быть решены только на основе выяснения механизмов развития дефекта [23].

1.2 РАЗВИТИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРОЧНОСТИ

Снижение прочности материала с ростом термического воздействия, а также с ростом времени воздействия механической нагрузки указывает на общую причину зависимости предела прочности от этих параметров. В тот момент, когда атомно-молекулярное строение материала уже учитывалось при определении его прочностных свойств, за причину такой зависимости было взято тепловое движение атомов в твердой среде. Разрушение стало рассматриваться как процесс, а прочность, как характеристика процесса разрушения от образования зон ослабления вплоть до достижения критического момента – разрыва сплошности. В первую очередь была изучена способность материала разрушаться при небольших нагрузках при том или ином времени их воздействия. Данное время приобрело название

«долговечность» и впоследствии стало ключевой кинетической характеристикой разрушения. В процессе исследований выяснилось, что в значительной степени решающее влияние на долговечность материала при заданной нагрузке имеет его температура. Температура является мерой интенсивности теплового движения атомов, таким образом выявленная зависимость определила роль влияния теплового движения на процесс разрушения. Соображения о роли влияния температуры на прочностные и деформационные характеристики высказывались на тот момент уже давно [24, 25]. Очевидно, что атомы, составляющие кристаллическую решетку твердого тела, находятся в непрерывном движении (колебании) в окрестности своего устойчивого энергетического положения, а сообщение энергии такой системе приведет к их большей подвижности, что неизбежно повлияет на степень устойчивости нагруженной системы в целом. Оценки показали, что общее тепловое состояние твердого тела, когда атомы совершают небольшие колебания, влияние средних колебаний на прочность весьма мало, однако надо понимать, что тепловое движение атомов в твердом теле не исчерпывается средними небольшими колебаниями. Неотъемлемым свойством теплового процесса и следствием хаотического движения атомов является флуктуация энергии. Частота флуктуации резко возрастает с ростом температуры. Вопреки изначальным представлениям, внешняя статическая нагрузка не является причиной разрыва межатомных связей, их разрыв происходит именно по причине флуктуации энергии. Внешняя нагрузка приводит к натяжению связей атомов кристаллической решетки, уменьшая величину энергии ее разрыва, к самому же разрыву приводит резкое повышение значения энергии атома. Учитывая вышеизложенное, процесс разрушения твердого тела, как системы связанных атомов, колеблющихся около положения равновесия, под действием внешней силы представляется как непрерывный процесс накопления разрывов связей (микродефектов) [26]. Данный этап разрушения сводится к нелокализованному накоплению микродефектов во всем объеме нагруженного образца. Данное явление было обнаружено в виде помутнения

полимерных пленок [27]. Дальнейшее изучение этой фазы разрушения с привлечением оптических методов показало, что разрушение твердых тел происходит посредством множественного накопления зародышевых трещин, а также то, что размер этих трещин задается структурой среды [28]. Момент прохождения фазы нелокализованного разрушения является не очевидным. Более того, такой подход противоречит механической картине разрушения, согласно которой любой дефект вне зависимости от его малости является концентратором напряжений, а значит будет происходить рост дефекта при внешнем воздействии. Другими словами, с позиции механического подхода, процесс трещинообразования локализован в области зародышевых трещин. Рассмотрение же процесса образования трещин с точки зрения термодинамики неравновесных систем, коей является твердое тело под нагрузкой, в котором образуются новые трещины с выделением энергии, приводит к выводу, что эволюция таких систем происходит с максимальной скоростью уменьшения свободной энергии [29], образование зародышевых трещин происходит во всем объеме среды. Таким образом, рассмотрение процесса разрушения с точки зрения термофлуктуационного подхода предполагает нелокализованные разрушения на этапе зарождения трещин [30].

Выводы о термофлуктуационном механизме разрыва связей являются физической основой процесса разрушения, но не исчерпывают всего содержания данного процесса, ведь разрушение завершается образованием отдельных обломков изначально единого образца путем образования одной или нескольких трещин. Согласно вышеизложенной термофлуктуационной теории, случайный характер тепловых флуктуаций приводит к нелокализованному образованию стабильных микродефектов в виде зародышевых трещин. Стабильность таких микродефектов можно объяснить гетерогенностью строения твердых тел. С течением времени в объеме образца накапливаются разно ориентированные, не коррелирующие между собой зародышевые трещины, при этом, ввиду хаотичности их образования, возможны флуктуации их концентрации в объеме среды. Достижение

критической концентрации таких микродефектов в любой точке твердого тела неминуемо приводит к их объединению и образованию макродефекта в виде трещины [31, 32], стремительный рост которой в конечном счете приводит к разрушению, а требуемое для данного процесса время и является долговечностью. Таким образом, процесс трещинообразования был разделен на две стадии: первая – процесс нелокализованного накопления микродефектов (формирование будущих трещин); вторая – стадия момента коррелированного накопления за счет поглощения крупной трещиной термоактивно зарождающихся зародышевых трещин, то есть начало локализованного разрушения, заканчивающегося атермическим распространением трещины [33].

Согласно кинетической модели, разрушение кристаллической решетки твердого тела происходит при значениях напряжений меньших прочности отдельных связей. Более того, флуктуации могут приводить к разрыву связей и в ненагруженном состоянии, однако в таком случае разрывы или вакансии быстро восстанавливаются. В нагруженном состоянии восстановление (рекомбинация) связей атомов кристаллической решетки происходит медленнее. Таким образом, произошел радикальный пересмотр представлений о механике разрушения нагруженного твердого тела.

При этом такой подход имеет естественные ограничения, связанные с развитием физики, как науки. Показательным примером может служить вопрос о механизме разрушения при низких температурах. Согласно кинетической теории, тепловые колебания с понижением температуры должны затухать, вплоть до полной остановки. При такой картине термофлуктуационный механизм разрыва связей невозможен ввиду отсутствия флуктуации энергии. Таким образом должна появиться возможность исследования статического случая разрушения, при котором разрушение неподвижной атомной конструкции происходит под действием внешней нагрузки. Однако в действительности же имеют место так называемые нулевые квантовые колебания, то есть колебания атомов не

прекращаются даже при достижении абсолютного нуля температуры. Такие колебания являются прямым следствием принципа неопределенности, отражающего неадекватность нашего представления об атоме, как о частице с неопределенными координатами и импульсом. Поэтому, даже при абсолютном температурном нуле возможны флуктуации энергии и разрушение межатомных связей. Таким образом, изменение температуры влияет на течение процесса разрушения, но не способно изменить его физическую природу, исключив влияние хаотичного теплового движения атомов. Учитывая все вышесказанное, изменение температуры, как правило, оказывает более сильное влияние на величину предела текучести по сравнению с пределом прочности, поэтому при низких температурах наблюдается переход материала из пластичного состояния в хрупкое. Первой наглядной демонстрацией такого перехода стала опубликованная в 1924 году схема А. Ф. Иоффе, полученная испытаниями кристаллов хлористого натрия [9]. В дальнейшем схема А. Ф. Иоффе была подтверждена испытаниями многих материалов. Исследования горных пород показали, что с понижением температуры ниже 273К основная их часть увеличивает свою прочность [34-36]. Однако такое поведение присуще не всем горным породам. Так, экспериментально установлено, что прочность отдельных представителей горных пород снижается с понижением температуры [37, 38].

Под руководством академика АН СССР С. Н. Журкова в середине XX века получила развитие кинетическая концепция прочности, основанная представлениях о термофлуктуационной природе разрушения твердых тел [39]. В 60-х годах прошлого столетия была создана Всемирная организация — Международный конгресс по разрушению (International Congress of Fracture). Главным результатом систематического изучения кинетической, термофлуктуационной теории природы прочности стало установление эмпирической зависимости долговечности образца от напряжения и температуры на основе результатов экспериментов в широком интервале значений одноосного растяжения. Величина прочности, измеряемая при

определенной скорости нагружения, утратила смысл критериальной величины и стала табулированной характеристикой разрушения, связанной с прочностью материала в других временных условиях нагружения некоторым соотношением, основой которого в конечном счете является формула Журкова [41]:

$$\tau = \tau_0 \exp(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}) \quad (1.1)$$

где величина τ_0 порядка периода тепловых колебаний атомов или молекул, U_0 – начальная энергия активации разрушения, γ – структурно чувствительный параметр, размерности объема. Накопленный к настоящему моменту экспериментальный материал говорит о справедливости определенных зависимостей для разных материалов: металлов и сплавов [40-42], полимеров [43-46], кристаллах [47], стекла [48], композитных материалов [49].

Множитель типа $exp(\frac{U_0-\gamma\sigma}{kT})$, называемый распределением Больцмана, описывает скорость протекания таких физических процессов как диффузия, различного рода фазовые переходы и является характерным для описания кинетических, термофлуктуационных процессов. Увеличение температуры приводит к катализированию данных процессов, получивших название термоактивируемых. Согласно описанию выше, посредством флуктуации элементы системы способны преодолевать энергетический барьер U, образуя вакансии. Роль нагрузки заключается в снижении данного барьера.

Подытоживая вышеизложенное, нельзя не отметить факт довольно полной теоретической проработки различных аспектов модели термофлуктуационного разрушения и большим экспериментальным материалом, подтверждающим ее справедливость. Данная модель не способна ответить на все вопросы, связанные с разрушением, однако применение этих знаний на практике безусловно является очень полезным. Исследования, направленные на изучение влияния термического воздействия на прочность материала образца проводятся и по сей день [37, 50], в том числе влияние

тепловых ударов с формированием значительного температурного градиента [51]. Также, как и определение необходимой концентрации микродефектов в единице объема для запуска процесса разрушения с определением необходимых критериев [52].

Одной из общих особенностей в рассмотренных выше моделях разрушения является временной фактор этого процесса. Справедливость данных моделей определялась посредством постановки экспериментов с формированием в образцах однородного поля напряжения при их разрушении. Эксперименты в основном производились на гладких образцах правильной формы при одноосном растяжении для лучшего освещения в теоретическом плане кинетической термофлуктуационной концепции разрушения, когда воздействие сторонних факторов на процесс разрушения сведено к минимуму. На практике же в большинстве случаев разрушения происходит при формировании неоднородного поля напряжений. По этой причине в рамках данного исследования использовались такие образцы и схема нагружения, при которых формируется именно такой вид напряжений.

1.3 НЕОДНОРОДНОЕ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ

Исследование зоны концентрации напряжений образцов, выполненных из металлов, позволило обнаружить тот факт, что пластическое деформирование в вершине трещины наступает при напряжениях, превышающих предел текучести, полученный при испытаниях гладких образцов с однородным распределением напряжений [53-57]. Это явление также наблюдается и при испытаниях на изгиб образцов в форме балок. Повышение прочности материала в зоне концентрации напряжений наблюдается при усталостном разрушении металлов. Более того, подобный эффект был обнаружен у материалов, которым свойственен хрупкий и квазихрупкий характер разрушения. Разрушение образцов, выполненных из таких материалов как чугун, графит, бетон, композитные материалы, пенополистирол, горные породы [58] происходит при более высоких

значениях локального напряжения, чем при испытаниях на прочность гладких образцов, в ходе которых формируется однородное поле напряжений.

Описанные выше несоответствия позволяют сделать вывод о том, что для того, чтобы судить о прочности тела, недостаточно обладать решением теории упругости или пластичности о концентрации напряжений в зоне трещин или надпилов. Важны еще критерии прочности, описанные выше, начиная с которых развитие представлений о прочности материала началось. Ими устанавливается момент исчерпания несущей способности материала согласно той или иной трактовке в точке или всего тела в целом. Важной особенностью формулировки таких критериев является то, что в своем составе они содержат некоторые постоянные материала (механические характеристики), определяемые эмпирическим путем. К таковым относятся механические характеристики, такие как предел текучести, истинная прочность, сопротивление разрыву и т. д.

Лежащий в основе механики разрушения критерий зарождения и начала распространения трещины не следует из уравнений равновесия и движения механики сплошной среды, является дополняющим уравнения теории упругости краевым условием при решении задачи о предельном равновесии тела, содержащего трещину. За предельное состояние равновесия принято считать то состояние среды, когда разрез, имитирующий трещину, имеет возможность распространения в объеме тела под влиянием внешних воздействий.

Наличие надреза (трещины) предполагает формирование неоднородного поля напряжений в объеме образца. С позиции применения теорий прочности разрушение хрупких тел с трещиной происходит при конечных фиксированных нагрузках. В то же время, решение задачи о концентрации напряжений около надрезов или трещин при фиксированном значении прочности материала с позиции теории упругости, предполагающей сингулярность, приводит к бесконечно малой величине напряжений, необходимых для разрушения в самой опасной точке. В дальнейшем

определение конечных разрушающих напряжений привело к формированию линейной упругой механики разрушения.

Определение конечных значений предельных нагрузок позволило сформулировать критерии начала распространения трещины. На основе энергетических соображений такой критерий был сформулирован Griffith A. A. [7].

Суть данного критерия заключается в том, что при наличии в упругом теле разреза, его рост (увеличение поверхности) возможен при сообщении такого количества энергии, которое необходимо для обеспечения разрыва материала перед вершиной разреза. Эту работу также называют работой разрушения. Образование свободной поверхности сопровождается релаксацией напряжений, а, следовательно, и к уменьшению деформаций, что в свою очередь приводит к соответствующему выделению упругой энергии. Иными словами, выдвинутая теория основана на концепции энергетического баланса: расходуемая работа на образование новых поверхностей скомпенсирована работой внешних сил и изменением упругой энергии тела. Пренебрегая другими возможными потоками энергии, согласно закону сохранения энергии, можно записать следующее выражение [1]:

$$\delta\Gamma = G\delta S \tag{1.2}$$

где $\delta\Gamma$ – работа разрушения, необходимая для образования новой поверхности разрыва площадью δS, G – поток энергии в вершину трещины, отнесенный к единице площади трещины, иными словами интенсивность освобождающейся упругой энергии.

В своей работе Griffith A. A. полагал, что величина совершаемой работы при образовании единицы новой поверхности, равна силе поверхностного натяжения твердой среды. Поверхностной энергии твердой среды был придан смысл характеристики среды, имеющей ту же физическую природу, что и для жидкости.

Впоследствии, Orowan E. [59] и Irwin G. R. [60, 61] сформулировали концепцию квазихрупкого разрушения, согласно которой энергия,

необходимая для образования новых поверхностей в процессе роста трещины, в первую очередь связана с работой пластической деформации объемов материала, расположенного перед фронтом трещины. При условии малости линейных размеров данной области по сравнению с длиной трещины, поток упругой энергии можно определить, руководствуясь только упругим решением. Таким образом энергия, расходуемая на разрушение есть ничто иное, как работа пластической деформации.

Такой подход при рассмотрении процесса разрушения позволил сделать концепцию Griffith A. A. более практически значимой. Наличие существенных остаточных деформаций в зоне фронта распространения трещины, предопределило переход от идеального материала, процесс разрушения которого рассматривался как сугубо хрупкий, к квазихрупкому разрушению, что более соответствовало реальному процессу разрушения конструкций, тем самым открывая возможность для применения теории Griffith A. A. при решении инженерных задач. Ввиду того, что энергия $\delta\Gamma$ имеет поверхностную природу, можно записать [1]:

$$\delta\Gamma = 2\gamma\delta S, \tag{1.3}$$

где γ – интенсивность поверхностной энергии, расходуемой на разрушение.

Определение потока энергии в вершину трещины реализуется посредством проведения разреза, продолжающего плоскость образующейся трещины, на поверхности которого действуют разно направленные изменяющиеся напряжения, возникающие в сплошной среде при действии внешнего воздействия. Так, при распространении трещины на единицу длины и отдалении поверхностей описываемого разреза друг от друга, работа сил $\sigma_y dx$ на перемещениях характеризует искомый поток энергии [1]:

$$G = -\lim_{\alpha\to 0}\frac{1}{2\alpha}\int^{\alpha}\sigma_y 2v dx \tag{1.4}$$

Схематично продвижение трещины показано на рисунке 1.1.

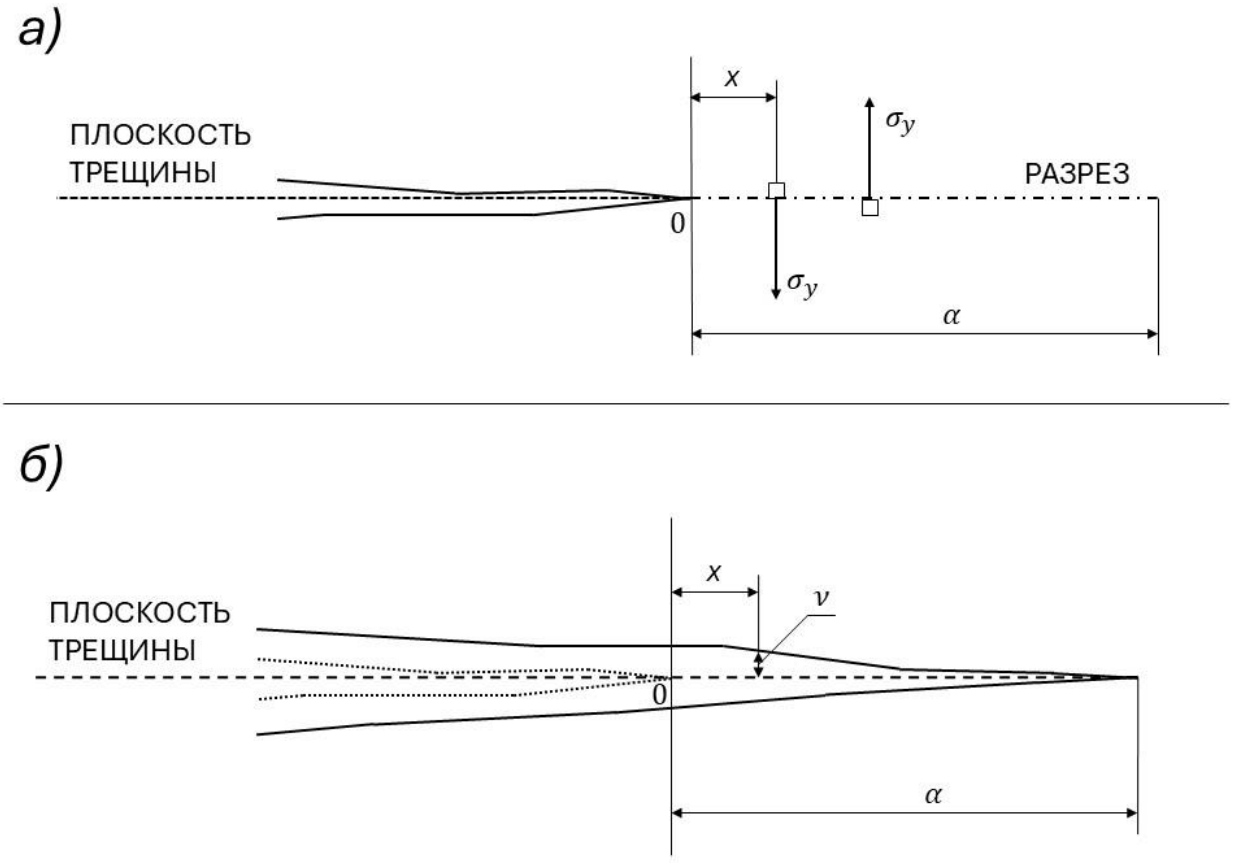

Рисунок 1.1 – Продвижение фронта трещины на единицу длины: *а)* до продвижения; *б)* после продвижения

После асимптотического анализа выражений напряжений и смещений в окрестности вершины трещины получаем в случае плоской деформации [1]:

$$G = (1-\nu^2)\frac{K^2}{E} \tag{1.5}$$

в случае плоского напряженного состояния

$$G = \frac{K^2}{E} \tag{1.6}$$

В представленных выше выражениях K есть коэффициент концентрации напряжений. Преобразование энергетического критерия разрушения в силовой определяет начало развития трещины при условии достижения коэффициентом интенсивности напряжений критической величины. В результате можно сформулировать два эквивалентных критерия разрушения, при которых рост трещины возможен:

1) интенсивность высвобождающейся энергии достигает критического значения $G_c = \delta\Gamma / \delta S = const$;
2) коэффициент интенсивности напряжений достигает критической величины $K_c = const$.

Таким образом энергетический критерий начала распространения трещины в объеме тела имеет вид [1]:

$$G = G_c \tag{1.7}$$

силовой критерий:

$$K = K_c \tag{1.8}$$

где G_c – удельная (эффективная) работа разрушения, а K_c – критический коэффициент интенсивности напряжений. Помимо представленных наименований, эти величины еще называют вязкостью разрушения.

Согласно анализу, представленному Griffith A. A., начало разрушения (роста трещины) связано не с достижением в опасной точке растягивающим напряжением предела прочности, а с достижением в окрестности опасной точки критического распределения напряжений. Как подчеркивалось выше, процесс разрушения условно можно разделить на два этапа: зарождения трещины и ее развития. Критерии прочности описывают как условия зарождения трещины, так и условия ее роста. Сформулированный Irwin G. R. силовой критерий прочности фактически является первым применением нелокального подхода для формулировки критерия разрушения.

В рамках описания процесса разрушения с позиции механики сплошной среды материал наделяется свойством сопротивляться росту трещин. Репрезентативным параметром данной способности выступает коэффициент интенсивности напряжений, именуемый коэффициентом трещиностойкости, при достижении критического значения которого в локальной зоне формируется такое напряжение, при котором происходит разрушение материала (рост трещины). Коэффициент трещиностойкости (показатель

вязкости) горных пород пропорционален сопротивлению породы силам, стремящимся разъединить ее частицы. Общепризнанного метода определения вязкости не существует [62].

Помимо описанных, на сегодняшний день существует целый ряд нелокальных критериев прочности [63]. Все они призваны объяснить явление превышения фактической прочности материала с неоднородным полем напряжений над рассчитанной с применением традиционных локальных критериев прочности.

В 1927 году Maxwell J. C. были выражены компоненты напряжений и перемещений тремя функциями, между которыми были установлены дифференциальные соотношения. Однако им не были представлены общие выражения, представляющие собой решение уравнений теории упругости [64]. Одним из первых попытку представить практичное, не предполагающее больших вычислений, решение предпринял Попкович П. Ф. [65, 66]. Получили распространение так называемые интегральные критерии разрушения. Сущность интегральных критериев прочности заключается в сопоставлении усредненных значений напряжений на структурном элементе, расположенном близ опасной точки, с временным пределом прочности, определяемом на образцах с образованием однородного поля напряжений. Критическим состоянием при использовании такого подхода считается превышение усредненного напряжения над пределом прочности на растяжение. Развитие интегральный подход получил в работах Новожилова В. В. [67, 68] и других [69-73]. В иностранной литературе интегральные критерии прочности, именуемые еще критериями прочности по средним напряжениям, обозначаются как (average stress fracture criterion) ASFC (или ASC).

Существует также целый спектр градиентных критериев прочности, основой которых является градиентная мера изменения поля напряжений на характерном структурном элементе. Данный критерий базируется на результатах эмпирически определенных зависимостей пределов прочности,

текучести от градиента главного напряжения [74, 75]. Соответственно, выбор наиболее подходящей конкретной формы градиентного критерия происходит исходя из полученных экспериментальных данных материалов в определенных условиях нагружения.

Согласно описанию выше, механические свойства материала в зоне концентрации напряжений существенно отличаются от стандартных значений, определенных в условиях однородного напряженного состояния. Существуют модели, в которых такие зоны концентраций напряжений при описании процесса разрушения именуются зонами предразрушения. В зарубежной литературе такие модели получили название FPZ (fracture process zone). Зоной предразрушения также может именоваться область с отличающимися от основного объема среды характеристиками. Зона предразрушения также может быть выражена в виде нанесенной фиктивной трещины, такие модели в иностранной литературе имеют название FCFC (fictitious crack fracture criterion). Ввиду сложности реализации вычислений с использованием упомянутых моделей, зачастую задачу упрощают и определяют напряжение в некоторой точке, удаленной от опасной точки на определенное расстояние. Определенное посредством такого подхода напряжение именуется эквивалентным $\sigma_Э$, а удаление точки определения напряжения от точки максимума регламентировано характерным размером для исследуемого материала d. Параметр d полагается новой константой материала, ввиду его малости, напряжения на границе зоны предразрушения считаются приблизительно равными напряжениям, полученным из решения линейно-упругой задачи [76]. Данный критерий в научной литературе может именоваться как критерий прочности по граничным напряжениям, однако чаще всего используется название критерий прочности по напряжениям в точке или просто критерий напряжений в точке, в зарубежной литературе обозначается аббревиатурой PSC (point stress criterion) [77-80].

1.4 ПРАКТИЧЕСКАЯ ПРИМЕНИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ

Прочность материала в механике разрушения связывается с энергией его разрушения, модулем упругости и размером дефекта структуры. Как было отмечено выше, последний является сначала концентратом напряжений, а затем, как следствие, очагом разрушения тела под нагрузкой. Механизм разрушения вне зависимости от его технического исполнения неизменен – зарождение и развитие трещин в материале, важными характеристиками которого являются твердость, модуль Юнга, вязкость разрушения [81].

В результате технического прогресса становится возможным возведение все более сложных зданий и сооружений, добыча трудноизвлекаемых ресурсов во все более осложняющихся горно-геологических условиях [82]. Процесс разрушения представляет интерес для изучения как с точки зрения его недопущения, так и его провоцирования. С точки зрения недопущения разрушения оценка параметров механического поведения горных пород представляет интерес при использовании горных пород в строительстве в качестве компонента для формирования композитов [83, 84] или непосредственно строительного материала, в горном деле – при расчете устойчивости горных выработок [85]. Для обеспечения надежности и предотвращения разрушения необходима оценка механического поведения горных пород. Важной особенностью катастрофического разрушения сооружений, в том числе горных выработок, является внезапность его наступления. Остро стоит вопрос прогноза и оценки рисков катастрофических разрушений, правильного расчета ресурса горных сооружений с учетом нагрузок в процессе их эксплуатации [85, 86]. Изучение процесса разрушения с целью повышения его эффективности связано, в первую очередь, со сферой добычи полезных ископаемых.

Ключевым процессом добычи и переработки полезных ископаемых является разрушение горных пород [87]. Важным вопросом является изучение

процесса разрушения с точки зрения повышения эффективности его реализации [88]. В добывающей промышленности широко применяются методы, сущность которых сводится к стимулированию развития дефектов (трещин) [89]. Так, одним из наиболее эффективных способов создания сети трещин [90] и улучшения проницаемости пласта для интенсификации добычи углеводородов на завершающей стадии разработки [91], а также добычи трудноизвлекаемых запасов из низкопроницаемых продуктивных пластов нетрадиционных коллекторов [92] является гидроразрыв (ГР). В горном деле технология гидроразрыва используется для снижения опасных напряжений в массиве в окрестностях горных выработок [93], она также применятся для извлечения метана из угольных пластов [94]. Помимо прочего, нельзя не отметить, что в последнее время все большую перспективу приобретают геотермальные энергетические ресурсы в силу своей экологичности, где также применяется технология ГРП [95]. Учет величины такой прочностной характеристики позволяет более точно прогнозировать геомеханическое состояние массивов горных пород при проведении в них взрывных работ, может способствовать снижению рисков плохой взрывной проработки массивов, что приведет к более рациональному расходу взрывчатых веществ, а значит уменьшению издержек. Ключевыми факторами, влияющими на вышеописанные процессы, являются рост существующих трещин и появление новых. Данные факторы зависят от способности материала сопротивляться росту трещин, репрезентативным параметром такой способности является коэффициент трещиностойкости (вязкости разрушения) K_{IC}.

Коэффициент трещиностойкости широко используется для описания процесса разрушения квазихрупких материалов [96].

Согласно описанию выше, разрушение материала происходит в две стадии, при этом смена стадии происходит при условии достижения критической концентрации зародышевых трещин в единице объема среды. Невзирая на очевидно многофакторную кинетику образования трещин, во многих работах показано, что решающую роль в переходе от зародышевых

трещин к устойчивым трещинам играет именно концентрационный критерий [97].

В целях определения значения статического коэффициента интенсивности напряжений K_C, исследования могут производиться с использованием разных схем нагрузки, в соответствии с чем раскрытие трещины в твердом теле может происходить тремя разными способами. При отрывных напряжениях с приложением нагрузки перпендикулярно плоскости трещины, возникает трещина «отрыва» (I тип). При осуществлении плоского сдвига, когда нагрузка приложена параллельно плоскости трещины вдоль пути ее распространения (перпендикулярно фронту трещины), формируется трещина «сдвига» (II тип). Испытания, предполагающие такую схему нагрузку, при которой нагрузка прикладывается параллельно плоскости трещины и фронту трещины, перемещения берегов трещины параллельны ее направляющей кромке, образуется трещина «среза» (III тип). В общем случае трещину можно описать одним из вышеупомянутых типов или их комбинацией. Модели типов трещин изображены на рисунке 1.2.

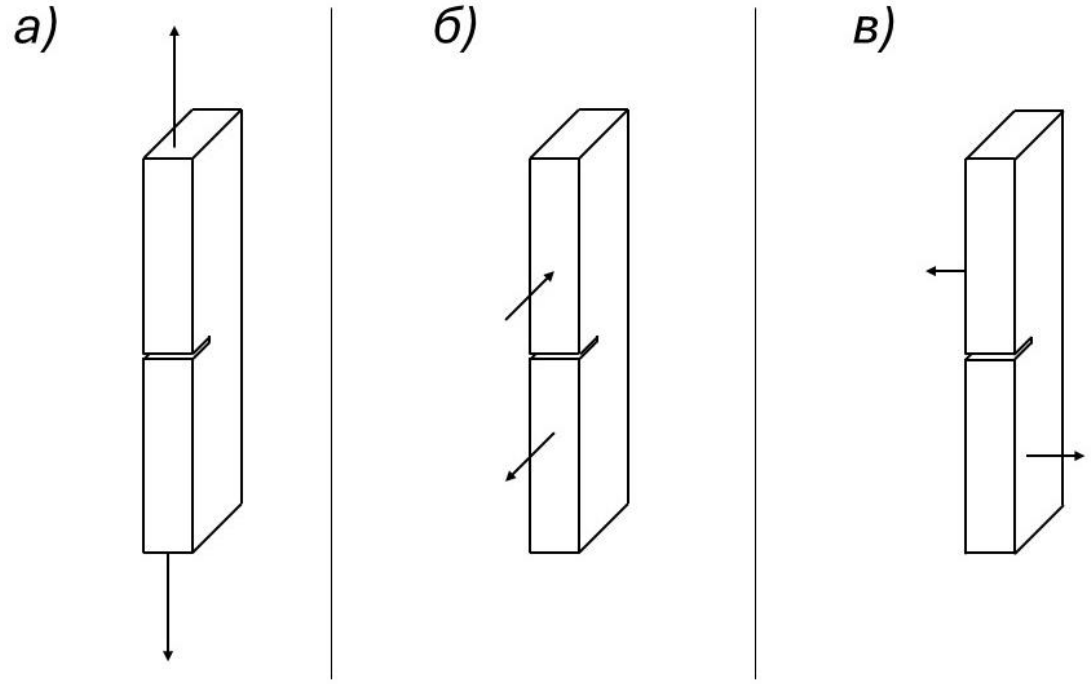

Рисунок 1.2 – Типы трещин: *а)* I тип – трещина отрыва; *б)* II тип – трещина поперечного сдвига; *в)* III тип – трещина продольного сдвига

В соответствии с типом трещины, различают следующие статические коэффициенты интенсивности напряжений: K_{IC} при I типе трещин, K_{IIC} при II типе трещин, K_{IIIC} при III типе трещин.

1.5 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ В МОДЕЛИРОВАНИИ

В инженерных задачах, связанных с расчетом и моделированием напряженно-деформированного состояния массива, моделированием гидравлического разрыва пласта, расчетом параметров механики разрушения каких-либо материалов необходимо учитывать макро- и микротрещины, а также способность материала сопротивляться их зарождению и развитию. Использование современного программного обеспечения для моделирования вышеописанных процессов на сегодняшний день является неотъемлемой частью основных геотехнических мероприятий, а также позволяет обосновать выбор параметров для эффективного осуществления горных работ, внедрения новых технологий [98]. Неправильная оценка НДС может привести к дорогостоящим авариям [99] и гибели людей. Расчет НДС в прикладных пакетах программного обеспечения основывается на механике трещин, одной из характеристик которой является значение коэффициента трещиностойкости.

В настоящее время отечественные стандарты с описанием методики определения коэффициента трещиностойкости K_{IC} горных пород отсутствуют. В то же время, являясь свойством материала, параметр K_{IC} входит практически во все сервисные пакеты моделирования [100, 101]. При отсутствии результатов лабораторных исследований, направленных на определение значения коэффициента трещиностойкости, параметр по умолчанию принимают 1 МПа·м^{0,5} [102].

При оценке трещиностойкости материала в различных пакетах программного обеспечения, а также указании трещиностойкости материала в качестве характеристики используют разные термины. В частности,

трещиностойкость характеризуют такие параметры как: K_C – критический коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины; δ_C – критическое раскрытие трещины, определяющее смещение берегов трещины возле ее вершины; G_C – критическая скорость освобождения упругой энергии; γ_0 – эффективная поверхностная энергия (ее эквиваленты, встречающиеся в литературе: удельная энергия диссипации, энергия разрушения); J_C – интеграл, определяющий сопротивление материала росту трещины с энергетических позиций, разрушение которых может протекать и нехрупким образом. Такое разнообразие величин обусловлено наличием разных подходов характеристики процесса разрушения в механике деформируемого тела. Критический коэффициент K_C является силовой характеристикой разрушения, критическое раскрытие трещины является аналогом деформационных критериев прочности, оставшиеся величины описывают процесс разрушения с точки зрения энергетической составляющей.

Программное обеспечение, применяемое для моделирования дизайна ГР пласта, использует напрямую или косвенно параметры трещиностойкости. Из наиболее распространенных пакетов программного обеспечения продукт FracSolver представляет из себя интегрированное решение для планирования ГР пласта на основе геомеханической и петрофизической моделей. Функционал данного пакета включает в себя расчет трещиностойкости и дальнейшее учитывание этих данных при генерации оптимальной программы закачки смеси в пласт по параметрам, моделировании ГР пласта [103].

Математические модели развития трещин при реализации ГР пласта, применяемые в настоящее время, имеют ограниченные возможности при решении важных задач разработки, связанных с динамикой развития трещин по причине использования в них двумерных постановок, заведомо заданных геометрических моделей трещин, отсутствия корректного учета геомеханических эффектов и так далее [104]. По этой причине происходит совершенствование данных моделей посредством использования различных критериев, описывающих процесс трещинообразования [105]. Также

уделяется внимание проблеме моделирования распространения трещины гидроразрыва в пласте, обладающем неоднородной трещиностойкостью с целью исследования течения жидкости и эволюции трещины [106].

В области решения задач механики разрушения активно используется программное обеспечение ANSYS Mechanical и Mechanical APDL. На примере данного программного обеспечения, которое способно с помощью различных методологий оценить трещиностойкость материала, представлены этапы расчета характеристик, с помощью которых возможно оценить способность среды сопротивляться росту трещин. Определение параметров трещиностойкости может быть реализовано в три этапа:

- моделирование конструкции, содержащей трещину или зоны близ трещины;
- упругопластический или статический упругий расчет полей напряжений, деформаций и перемещений;
- определение параметров трещиностойкости.

Возможен также и иной алгоритм, состоящий из двух этапов. Его использование обусловлено несопоставимо малыми геометрическими параметрами зародышевых трещин по сравнению с размерами образца, что делает невозможным построение корректной сеточной модели. Влияние зародышевых трещин на поля макроскопических напряжений и деформаций пренебрежимо мало. Поэтому сперва рассчитывается НДС без зародышевых трещин. Следующим шагом моделируется область, содержащая трещину, на границах которой прикладываются напряжения в виде распределенных деформаций или напряжений, определенных из решения макрозадачи в зоне с прогнозируемыми или существующими зародышевыми трещинами.

1.6 ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Техническое развитие на сегодняшний день позволяет вести добычу полезных ископаемых с больших глубин, где существует температурный

градиент. Вентиляция подземных горных выработок приводит к понижению температуры горных пород окружающего массива. Так, исследования, направленные на определение влияния различных коэффициентов конвективной теплопередачи на изменение термостойкости горных пород показали, что охлаждение массива с формированием в нем температурного градиента оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние массива и приводит к увеличению вероятности образования трещин [107]. Совершенствование техники бурения газовых и нефтяных скважин способствует увеличению их глубины вплоть до 10000 метров, что создает потребность умения учитывать влияние температурного фактора как в процессе бурения, так и в другие периоды жизни скважины. Это связано с тем, что по мере углубления забоя температура окружающих пород постоянно растет, достигая с некоторой глубины таких значений, при которых начинает оказывать существенное влияние на те или иные процессы, происходящие в скважине [108].

Статический коэффициент трещиностойкости, являясь постоянной материала, тем не менее зависит от воздействия факторов окружающей среды (внешних факторов) [109, 110], а также от скорости их изменения [51, 111]. В рамках данного исследования речь идет об изменении температуры естественных условий залегания горных пород с увеличением глубины, что влечет изменение механических свойств. На сегодняшний день вопрос влияния температурного воздействия на способность горных пород сопротивляться росту трещин при действии на них механической нагрузки в научной литературе освещен мало. В основном работы посвящены изучению процессов температурного выветривания. Так, в одной из работ авторы исследуют изменение проницаемости гранита с разными размерами зерен после процессов термического растрескивания [112]. Существует множество трудов, описывающих изменение свойств материала, подвергавшихся предварительному тепловому воздействию [113-115]. Такое поведение горных пород связано с структурными изменениями материала и в приведенных

исследованиях фиксируются постфактум. Этот фактор также имеет ключевое значение при строительстве глубоких хранилищ, например, для захоронения высокоактивных ядерных отходов [116]. Факт линейной корреляции вязкости разрушения и степени предварительно оказанных термических воздействий на примере различных горных пород подтверждается научными трудами [117-119]. Более того, эмпирические данные говорят об изменчивости такой корреляции. При испытаниях образцов песчаника методом трехточечного изгиба вязкость разрушения с повышением температуры предварительного нагрева от 20 ºС до 400 ºС возрастала, однако при дальнейшем повышении температуры предварительного нагрева от 400 ºС до 800 ºС этот показатель постепенно снижался [120].

При рассмотрении данного вопроса нельзя не упомянуть о системах поддержания пластового давления, совершенствование которых для повышения эффективности извлечения ресурсов идет и по сей день. Речь идет о появлении и развитии таких технологий, как термическое заводнение [121]. Несмотря на то, что эффект термического воздействия в первую очередь направлен на снижение вязкости нефти, вмещающие породы также подвергаются нагреву, что неизбежно оказывает влияние на их свойства [122]. Вышеописанное также обусловливает важность оценки трещиностойкости пород-коллекторов, подверженных термическому воздействию.

ВЫВОДЫ

Согласно изложенным ключевым этапам развития представлений о прочности, можно сделать вывод о том, что коэффициент интенсивности напряжений (коэффициент трещиностойкости) положен в основу данных представлений, начиная еще с момента становления линейной упругой механики разрушения и играет важную роль в современных теориях прочности.

Анализ литературных источников показал, что несмотря на превращение процесса моделирования в одно из основных мероприятий при

проектировании разных видов горных работ, определение коэффициента трещиностойкости, входящего во многие сервисные пакеты моделирования, практически не проводилось. Выявление закономерностей влияния теплового поля на изменение коэффициента трещиностойкости проводилось лишь с точки зрения предварительного воздействия. Помимо прочего, отсутствует государственный стандарт, регламентирующий порядок определения коэффициента трещиностойкости.

Таким образом, проведенный обзор литературных источников позволил сделать вывод о том, что представленные в данной работе исследования представляются перспективными, а тема – актуальной. Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующих методов определения коэффициента трещиностойкости различных материалов, в том числе горных пород и выбрать наиболее пригодный для горных пород метод.
2. Разработать специальную установку к лабораторной испытательной машине LFM-50kH для определения трещиностойкости образцов, выполненных в форме балки (90 мм×20 мм×10 мм) с пропилом в средней части глубиной 7 мм, обеспечивающую возможность формирования теплового поля непосредственно во время испытаний.
3. Установить зависимости коэффициента трещиностойкости от величины температурного воздействия для горных пород различного генезиса.
4. Установить зависимости коэффициента трещиностойкости от величины температурного воздействия при насыщении порового пространства осадочных горных пород флюидом.

ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБОРУДОВАНИЕ

В настоящее время отечественные стандарты с описанием методики определения коэффициента трещиностойкости K_{IC} горных пород отсутствуют. В таких условиях существует возможность либо адаптации государственных стандартов, разработанных для других материалов (например, металлов), либо использования рекомендаций международных научных сообществ, одним из которых является Международное общество по механике горных пород (ISRM).

2.1 РЕКОМЕНДАЦИИ ISRM

ISRM были выделены несколько методов с целью унификации результатов измерения. В 1988 году были опубликованы следующие два метода: первый предполагает изгиб цилиндрического керна с пропилом V-образной формы перпендикулярно оси цилиндра, другой – раскрытие специальными захватами короткого цилиндра с V-образным пропилом вдоль оси керна [123]. В 1995 году был предложен метод, сущность которого заключается в сжатии цилиндрического образца с V-образным пропилом [124]. Четвертый метод, разработанный в 2013 году, предполагает изгиб полукруглых образцов с пропилом [125].

Несмотря на то, что данные методы были выделены с целью унификации результатов, некоторые расхождения получаемых значений трещиностойкости все же наблюдаются [126-128]. Здесь важно отметить, что в целях определения значения коэффициента трещиностойкости успешно применяются и стандарты, предназначенные для иных материалов [129].

2.2 ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СТАНДАРТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ДРУГИХ МАТЕРИАЛОВ

На сегодняшний день в Российской Федерации отсутствуют стандарты с описанием методики определения коэффициента трещиностойкости горных пород. Однако существуют стандарты для других материалов, таких, как металл [130] и бетон [131].

Государственный стандарт испытания бетона предполагает изготовление образцов в виде прямоугольного параллелепипеда с квадратным поперечным сечением и пропилами с двух сторон перпендикулярно оси образца с последующим нагружением образцов по трехточечной схеме согласно [131]. Для поиска значений коэффициента трещиностойкости у металлов изготавливают образцы в виде прямоугольного параллелепипеда с пропилом, имитирующим трещину, с одной стороны, поперечным сечением в виде прямоугольника и предполагает также трехточечную схему нагрузки образца согласно [130].

Каждый из вышеописанных способов подразумевает не только особые требования к условиям подготовки и геометрическим параметрам образцов, но и предполагает разработку соответствующего оборудования для реализации исследований

2.3 ИСПОЛЬЗУЕМАЯ МЕТОДИКА

Помимо рекомендованных ISRM методов, в разное время было предложено множество способов определения статического коэффициента трещиностойкости, в частности, в этих целях успешно используются стандартные методики для металлов и керамики [132].

Экспериментальная схема определения коэффициента трещиностойкости у металлов основана на подходах линейной механики упругого разрушения, что используется при моделировании разрушения металлических, керамических и др. материалов, в том числе и горных пород

[133]. Стоит также отметить, что в последнее время испытания на трехточечный изгиб широко используются в разных целях [134], в том числя для косвенного определения прочности на растяжение или стойкость к изгибу, создаются новые приспособления для реализации таких исследований [90, 135-137].

Помимо прочего, применяемая в данном стандарте форма образцов с нанесением пропила в средней части обладает своими преимуществами. Ввиду наличия сложности в применимости экспериментальных данных на практике. Полученные в лабораторных условиях свойства характеризуют исследованную среду в объеме образца, что не будет соответствовать свойствам массива из тех же горных пород. По этой причине существует разделение на локализованное и нелокализованное разрушение. Массив, имея большую, чем образец, трещиноватость, а также иные дефекты, выступающие зонами концентрации напряжения, будет иметь локализованный характер разрушения [98]. В то время как механические испытания образца в лабораторных условиях дают усредненные по объему образца параметры, что соответствует нелокализованному характеру разрушения [138]. Таким образом, нанесенный надрез будет имитировать краевую трещину, выступающую, в свою очередь, в роли концентратора напряжений, тем самым приближая лабораторные условия проведения эксперимента к натурным (в массиве).

Испытания считаются завершенными в момент, когда образец полностью разрушается с образованием магистральной трещины. Фиксируется максимальная нагрузка, которую образец выдержал, прежде чем хрупко разрушиться.

По результатам испытаний производится расчет критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC}. Согласно требованиям ГОСТ 25.506.85 он определяется по формуле [130]:

$$K_{IC} = \frac{6 \times P_C \times l^{1/2}}{t \times b} \times Y_4^{'} \quad (2.1)$$

где P_c – разрушающая нагрузка, Н; l – глубина пропила, м; t – толщина образца, м; b – ширина образца, м.

Безразмерный коэффициент Y_4' определяется геометрическими параметрами образца следующим образом:

$$Y_4^{'} = 1,93 - 3,07 \times \left(\frac{l}{b}\right) + 14,53 \times \left(\frac{l}{b}\right)^2 - 25,11 \times \left(\frac{l}{b}\right)^3 + 25,8 \times \left(\frac{l}{b}\right)^4 \quad (2.2)$$

2.4ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Основой системы является универсальная электромеханическая испытательная машина серии LFM с максимальной нагрузкой 50 кН производства компании Walter+Bai AG (Швейцария). У данной машины есть система предварительного нагружения, позволяющая отслеживать динамику роста трещин до достижения критических нагрузок. Также данная система позволяет проводить испытания образцов при многократном нагружении, что очень важно с точки зрения образования и развития усталостных трещин в исследуемом материале. Данная особенность является также полезной с точки зрения обнаружения микродефектов в структуре образца, скопление которых в одной зоне чревато образованием области концентраций напряжений и связано с последствиями перенесенных нагрузок. Такое явление называется «эффектом памяти» [139]. Предназначенная для осуществления трехточечной нагрузки установка крепится к траверсам испытательной машины. Установка помещена в теплоизолирующий кожуха и формировать тепловое поле посредством нагревательных элементов и. Описываемая установка требует изготовления образцов в виде балок прямоугольной формы длиной (L) 90 мм, шириной (b) 20 мм и толщиной (t) 10 мм с пропилом, имитирующим краевую трещину в середине образца глубиной (h) 7 мм, шириной (e) не более 1.2 мм, чертеж образца представлен на рисунке 2.1.

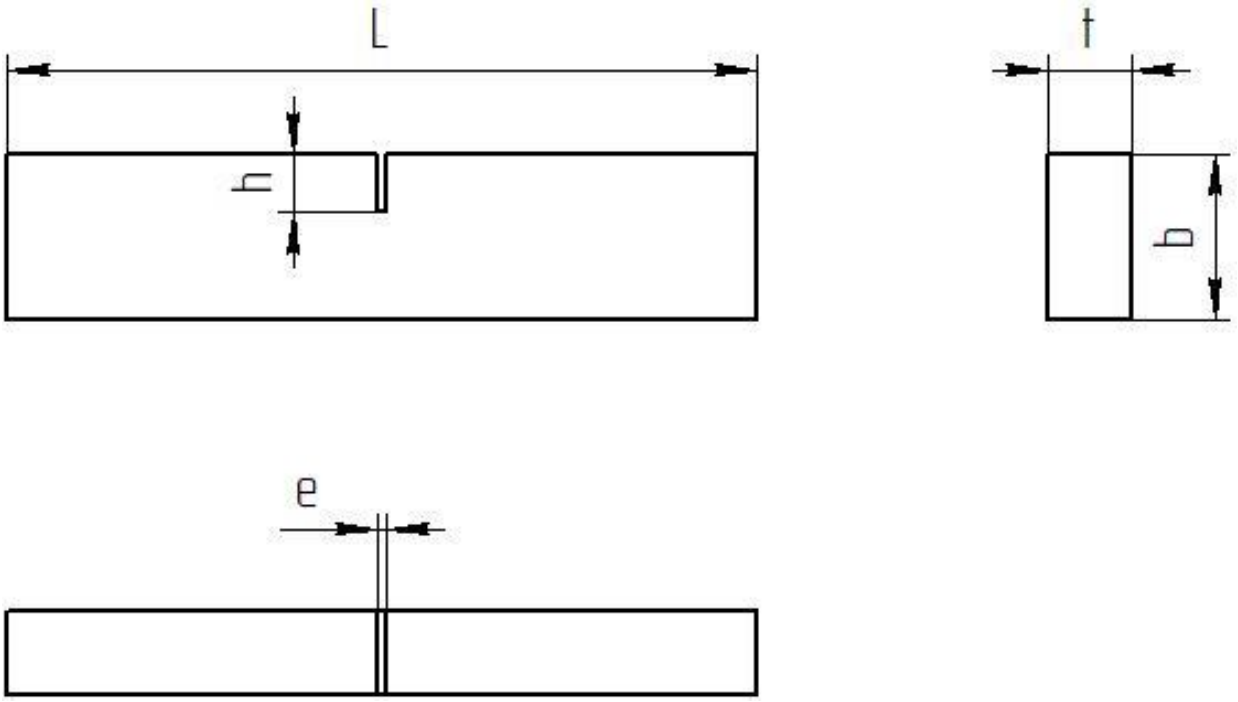

Рисунок 2.1 – Чертеж образца для прочностных испытаний по трехточечной схеме нагрузки

Принципиальная схема системы изображена на рисунке 2.2.

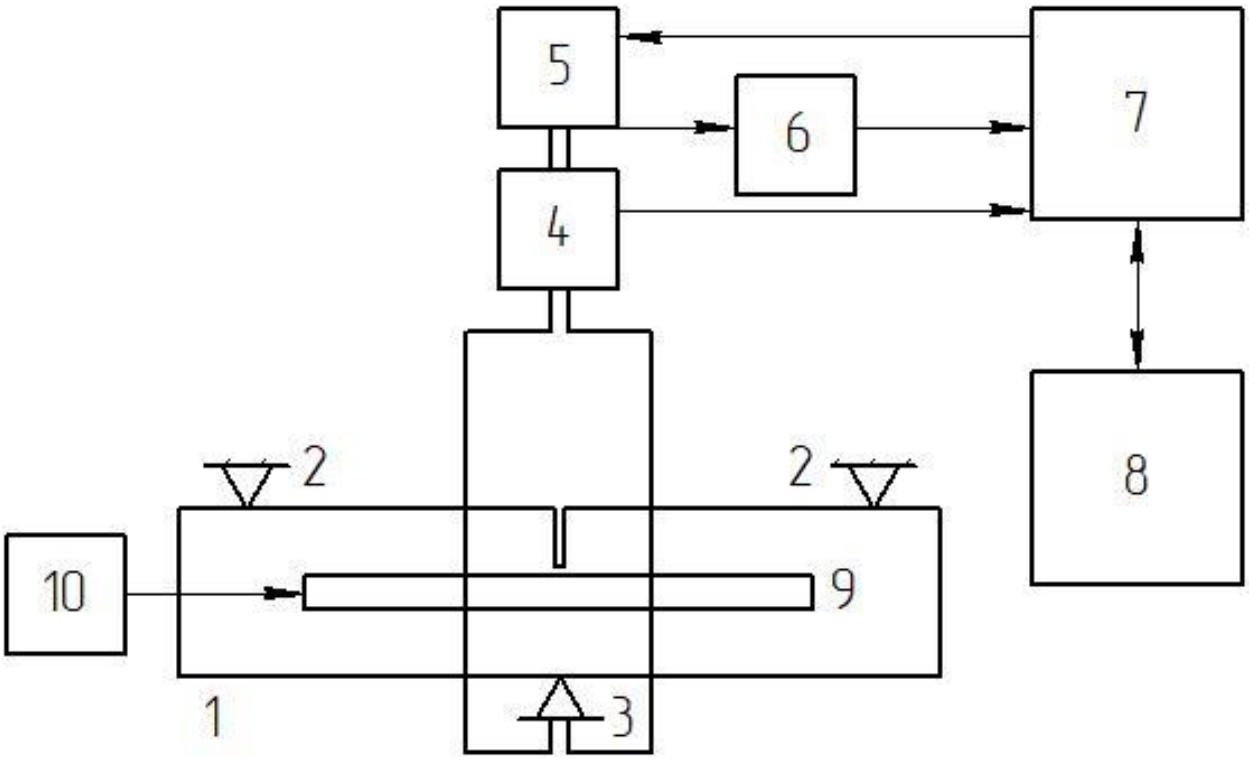

Рисунок 2.2 – Схема лабораторной установки трехточечной нагрузки с нагревом для испытания образцов-балок с надрезом горных пород

Образец 1 помещается в пространство между опорами 2 и 3. Опоры 2 являются статичными и крепятся к нижней траверсе испытательной машины

посредством специального приспособления, нагрузка подается через опору 3 вверх, которая крепится к верхней траверсе, соединенной механически через измеритель силы 4 с блоком нагружения 5 и датчиком перемещения верхней траверсы 6. Электрические выходы датчиков 4 и 6 соединены с измерительными входами блока управления 7, который в свою очередь соединен с блоком нагружения 5. Блок управления 7 передает фиксируемые данные перемещения и нагрузки на компьютер 8, с данного компьютера осуществляется управление процессом нагрузки. В процессе проведения эксперимента, на компьютере 8 отображаются данные датчиков в виде графика, показывающим зависимость деформации (величины смещения верхней траверсы) от оказываемой нагрузки, измеряемой с точностью 0,01 кН. Система также включает в себя нагревательные элементы 9, выполненные из керамики и имеющие форму вогнутых пластин, которые расположены с двух сторон от испытываемого образца для обеспечения равномерного нагрева. Лабораторный автотрансформатор 10, подключенный к нагревательным элементам 9, позволяет регулировать напряжение подаваемого тока, тем самым можно управлять режимом нагрева в реальном времени. Контроль нагрева возможен посредством мультиметра, выведенного за пределы теплоизолирующего кожуха, с помещенной на образец термопарой через специальные отверстия в основании установки. При осуществлении испытаний предварительно подготавливаются специальные тестовые образцы, изучаются температурные режимы описываемых горных пород. В таких образцах высверливается отверстие, в которое помещается дополнительная термопара, другая термопара располагается на поверхности образца. С помощью таких экспериментов устанавливается время, требуемое для прогрева образца до нужной температуры при разных значениях напряжения переменного тока в сети, а также напряжение в сети, необходимое для поддержания определенной температуры в камере. Чертеж установки без теплоизолирующего кожуха представлен на рисунке 2.3. На рисунке 2.4 изображен чертеж установки с теплоизолирующим кожухом.

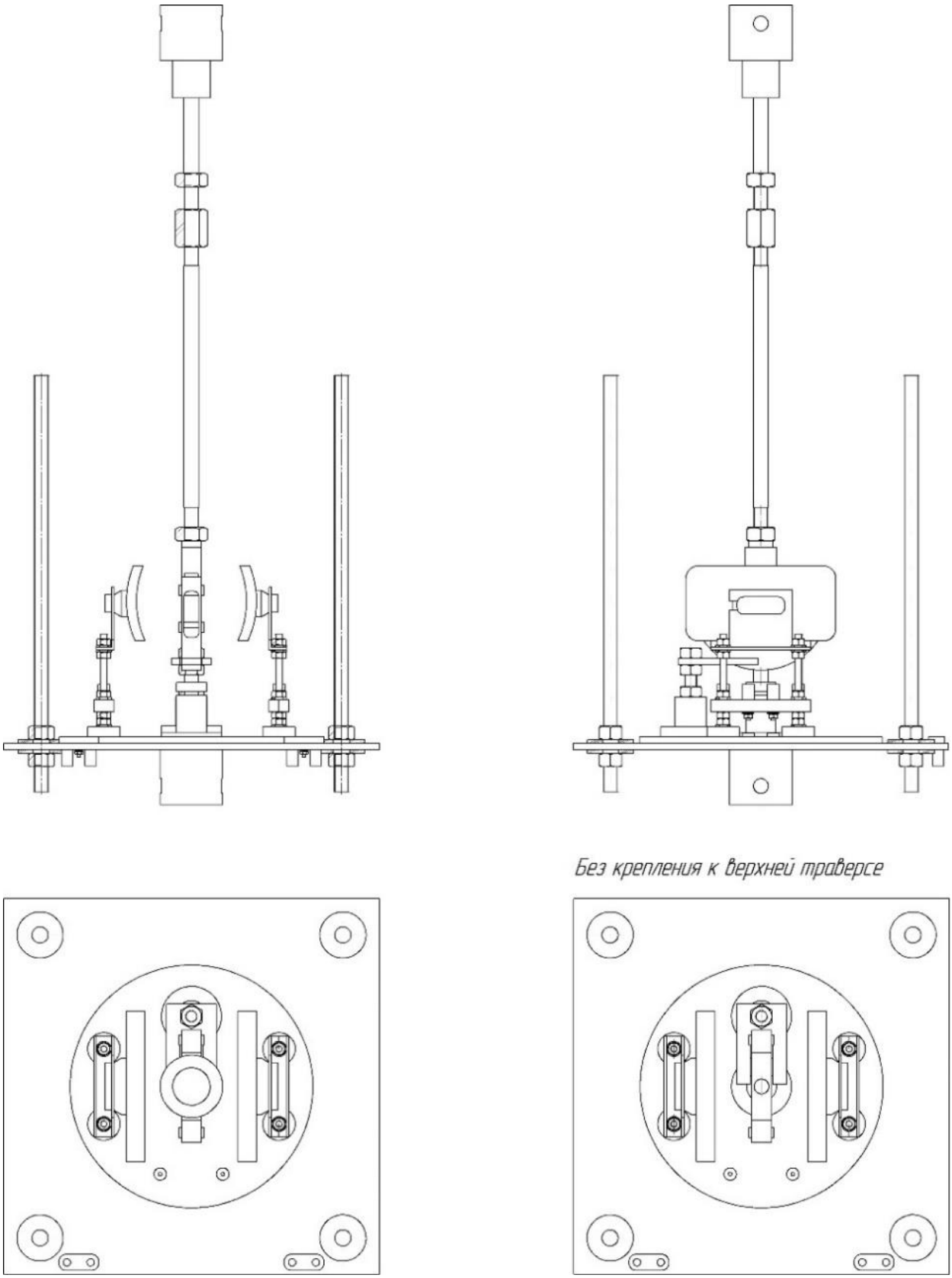

Рисунок 2.3 – Чертеж установки без теплоизолирующего кожуха

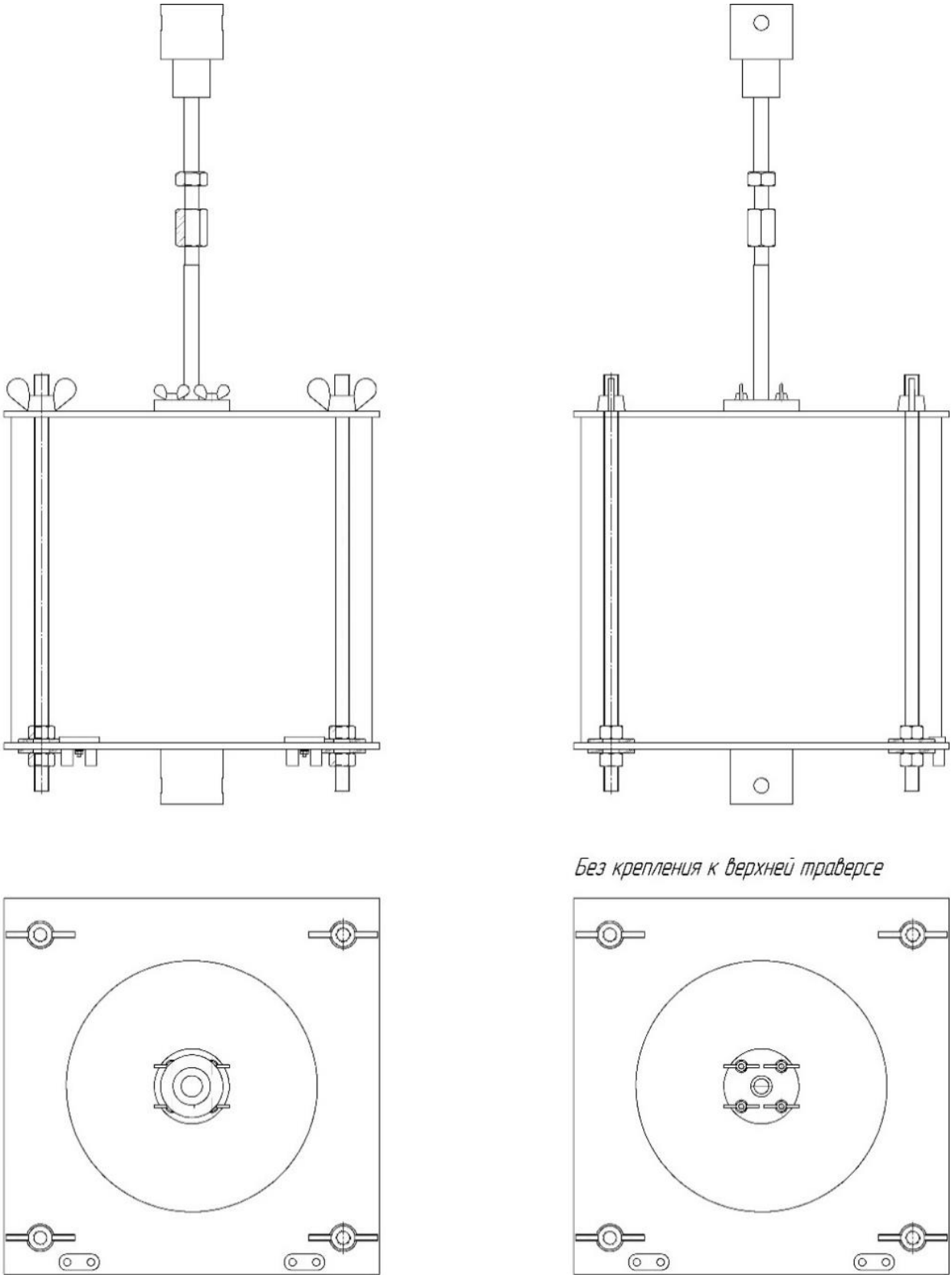

Рисунок 2.4 – Чертеж установки с теплоизолирующим кожухом

На рисунке 2.5 показан вид установки без теплоизолирующего кожуха с помещенным в прихват образцом гранита, на рисунке 2.6 продемонстрирован вид установки с теплоизолирующим кожухом.

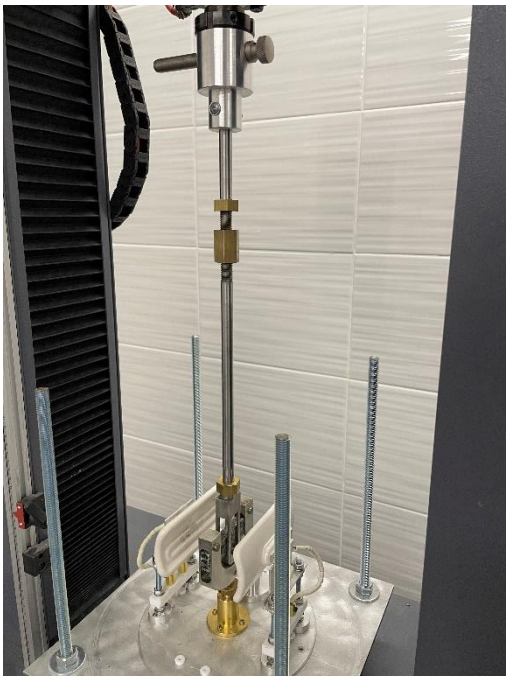

Рисунок 2.5 – Вид установки без защитного кожуха с помещенным образцом в прихваты

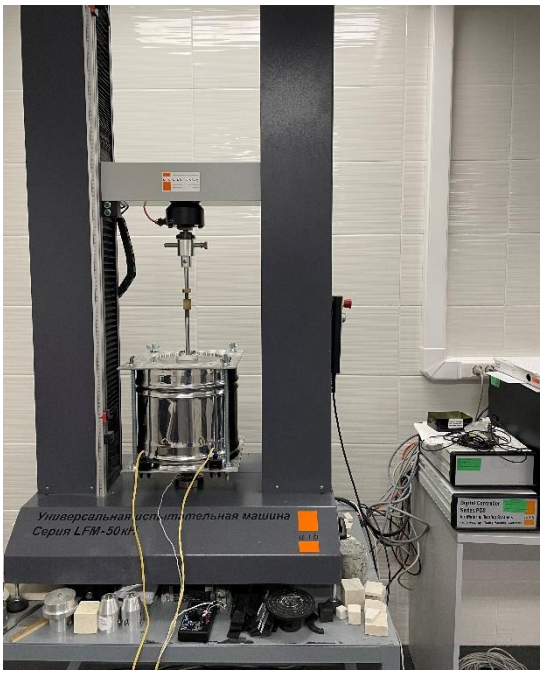

Рисунок 2.6 – Вид установки с установленным теплоизолирующим кожухом во время испытаний с термическим воздействием

Регистрация данных с датчиков производится в стандартном программном обеспечении (ПО) DION Pro и позволяет отображать взаимосвязь смещения верхней траверсы и прилагаемой нагрузки. Одновременно возможно представление данных в текстовом формате, что заметно облегчает работу со сторонним ПО для анализа результатов эксперимента. Подробное описание лабораторной установки также представлено в [140].

Вид помещенного в захваты образца представлен на рисунке 2.7.

Рисунок 2.7 – Образец известняка, помещенный в захваты установки

2.5ТРЕБОВАНИЯ К ОБРАЗЦАМ

В данном разделе обосновывается корректность применения требований ГОСТ 25.506.85 [130] к геометрическим параметрам образцов путем определения среднего размера зерен и сопоставления его с геометрическими параметрами образца.

В данных исследованиях образцы изготавливались из магматических, метаморфических и осадочных горных пород, а именно: габбро (Другорецкое месторождение, Карелия), гранит (Топское месторождение, Украина), известняк (месторождение Сарыташ, Кыргызстан), белый мрамор (Коелгинское месторождение, Челябинская область), а также три вида серого мрамора с различным размером зерен (мелкозернистый и среднезернистый Уфалейского месторождения, Челябинская область, и крупнозернистый Полевского месторождения, Свердловская область).

Выбор образцов связан, в первую очередь, с морфологическими особенностями горных пород. Особую важность имеет структура горных пород, а именно, размер зерен минералов, слагающих породу, а также пористость. Так, минимальный размер характерного размера образца,

удовлетворяющий стандарту ISRM [124], должен быть соотнесен со средним размером зерен в породе в соотношении не менее 1:10.

Для обоснования выбора геометрии образцов необходимо иметь данные о крупности зерен в представленных материалах. В этих целях были подготовлены аншлифы для последующего определения размеров зерен. Изображение зерен, а также их характерные размеры представлены на рисунках 2.8 и 2.9.

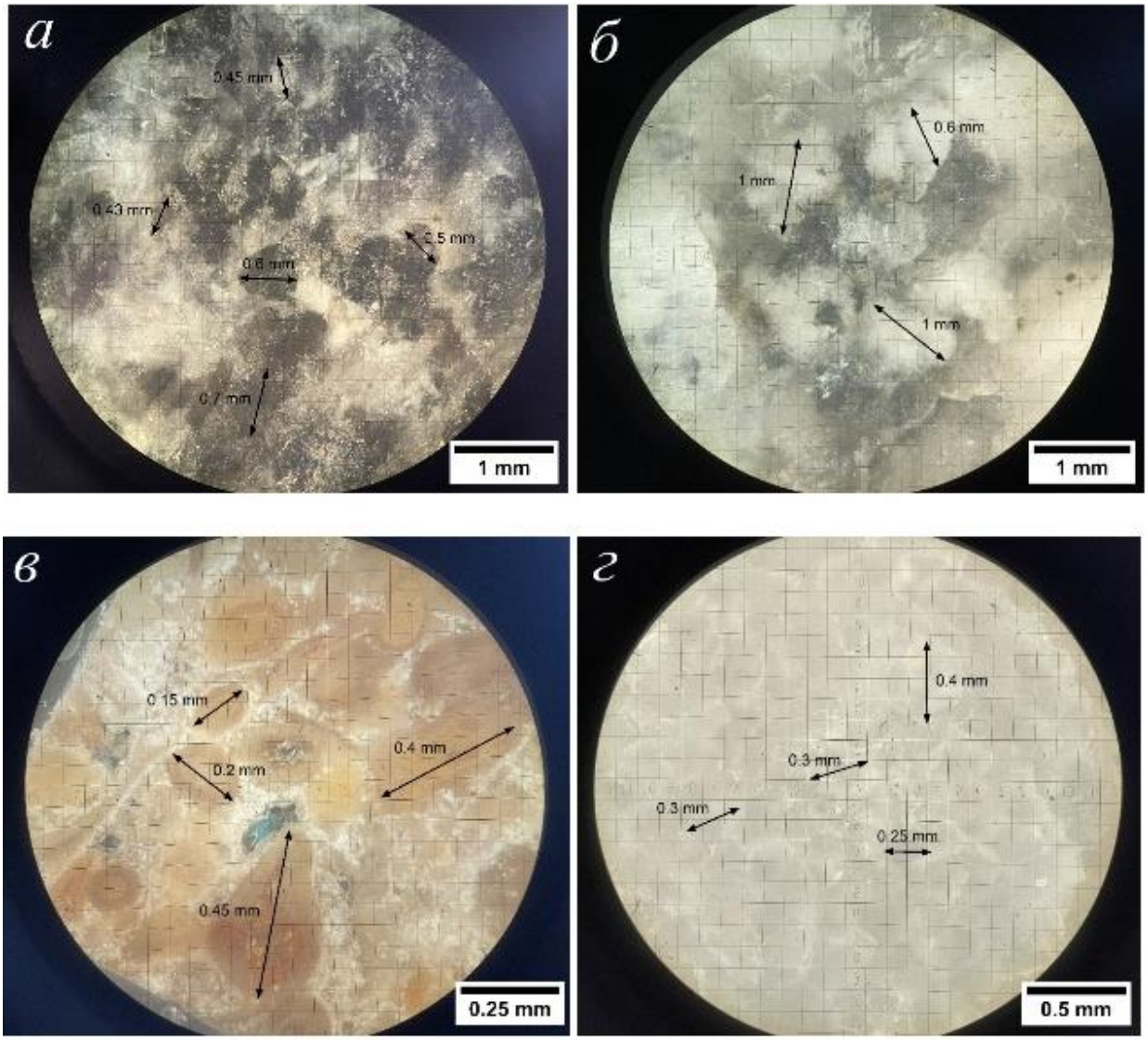

Рисунок 2.8 – Изображения аншлифов с нанесенными масштабом и размером зерен: *а* – габбро; *б* – гранит; *в* - известняк; *г* – белый мрамор

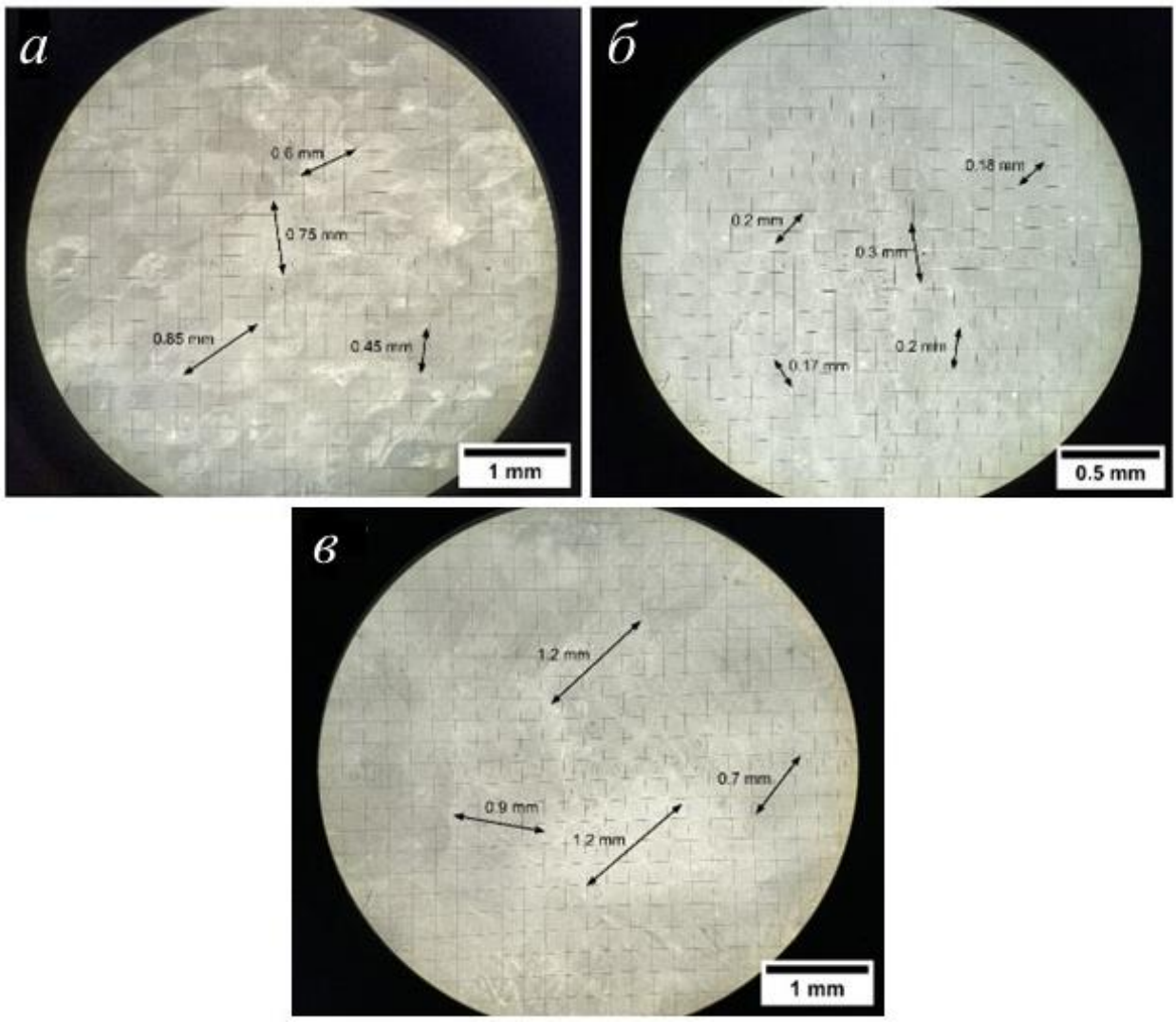

Рисунок 2.9 – Изображения аншлифов с нанесенными масштабом и размером зерен: *а* - серый мрамор (среднезернистый); *б* – серый мрамор (мелкозернистый); *в* – серый мрамор (крупнозернистый)

Сами горные породы подбирались таким образом, чтобы представить вариативность с точки зрения генезиса и крупности зерен. Монолитность образцов после многоэтапной механической подготовки контролировалась проведением замеров скорости распространения в них продольных волн с помощью ультразвукового дефектоскопа.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что средний размер зерен любого материала не превысил 1 мм. Средний размер зерен составил: габбро – 0,54 мм, гранита – 0,86 мм; известняка – 0,3 мм; белого мрамора – 0,31 мм; серого мрамора среднезернистого – 0,67 мм,

мелкозернистого – 0,21 мм, крупнозернистого – 0,95 мм. Таким образом крупности зерен каждого материала достаточно для того, чтобы использовать методику подготовки образцов согласно ГОСТ 25.506.85, так как средний размер зерен каждого материала более, чем в 10 раз уступает наименьшему геометрическому параметру образца, подготовленного согласно рекомендациям указанного стандарта

В качестве породы-коллектора для изготовления образцов с целью установления зависимости коэффициента трещиностойкости от насыщенности образца флюидом был выбран известняк.

В качестве флюида использовался авиационный керосин ТС-1 в силу его относительно малой вязкости и высокой проникающей способности. Процесс насыщения осуществлялся вакуумной камере МТ 40 4D (рис.2.10).

Рисунок 2.10 – Вакуумная камера МТ 40 4D

ВЫВОДЫ

Определена методика проведения испытаний. Подобрано, спроектировано и создано оборудование для осуществления поставленных задач данного исследования. Анализ взаимосвязи мощности тока в сети и температуры на поверхности и внутри образца показал, что с увеличением скорости нагрева провоцируется больший температурный градиент в образце, что влечет снижение прочностных характеристик в силу формирования напряжений.

Обоснована применимость геометрии образца из представленных материалов путем сопоставления размеров их структурных единиц с минимальным размером образца.

ГЛАВА 3 ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД РАЗНОГО ГЕНОТИПА ПРИ УМЕРЕННОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

3.1 ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГРАДИЕНТ

Данный раздел содержит результаты проведенных испытаний, направленных на установление температурных режимов, характеризующих скорость прогревания образца с целью предотвращения негативного влияния температурного градиента на свойство пород сопротивляться росту трещин. Как было отмечено, повышение температуры существенно влияет на прочностные свойства и деформируемость горных пород [141]. Повышение температуры образца приводит к формированию трещин различного раскрытия на границе минеральных зерен ввиду различного термического расширения. Согласно описанной в главе 1.2 кинетической концепции, образование зародышевых трещин происходит во всем объеме среды. Исследования тепловых ударов на прочностные свойства горных пород реализуются, как правило, посредством охлаждения в воде. При повторяющихся многократно циклах нагревания и стремительного охлаждения образцов, происходит снижение прочности на сжатие и растяжение, происходит все большее раскрытие трещин и увеличение пор, приводящее к увеличению скорости поглощения воды [142]. При этом важно понимать, что влажность будет также оказывать влияние на способность образца сопротивляться разрушению. В рамках данных исследований все образцы были тщательным образом высушены, дабы избежать влияния указанного фактора. Для реализации экспериментов по исследованию формируемого посредством нагрева температурного градиента, были изготовлены специальные образцы, геометрические параметры которых идентичны тем, что использовались в испытаниях для определения критического коэффициента интенсивности напряжений, но дополнительно имели просверленное отверстие в торце образца глубиной 7 мм (s) и

диаметром 1 мм (d), куда и помещалась одна из термопар. Также одна термопара крепилась на одной из граней образца в зоне надпила с целью измерения температуры на поверхности в зоне непосредственного воздействия нагревательных элементов. Чертеж образца для данных исследований приведен на рисунке 3.1.

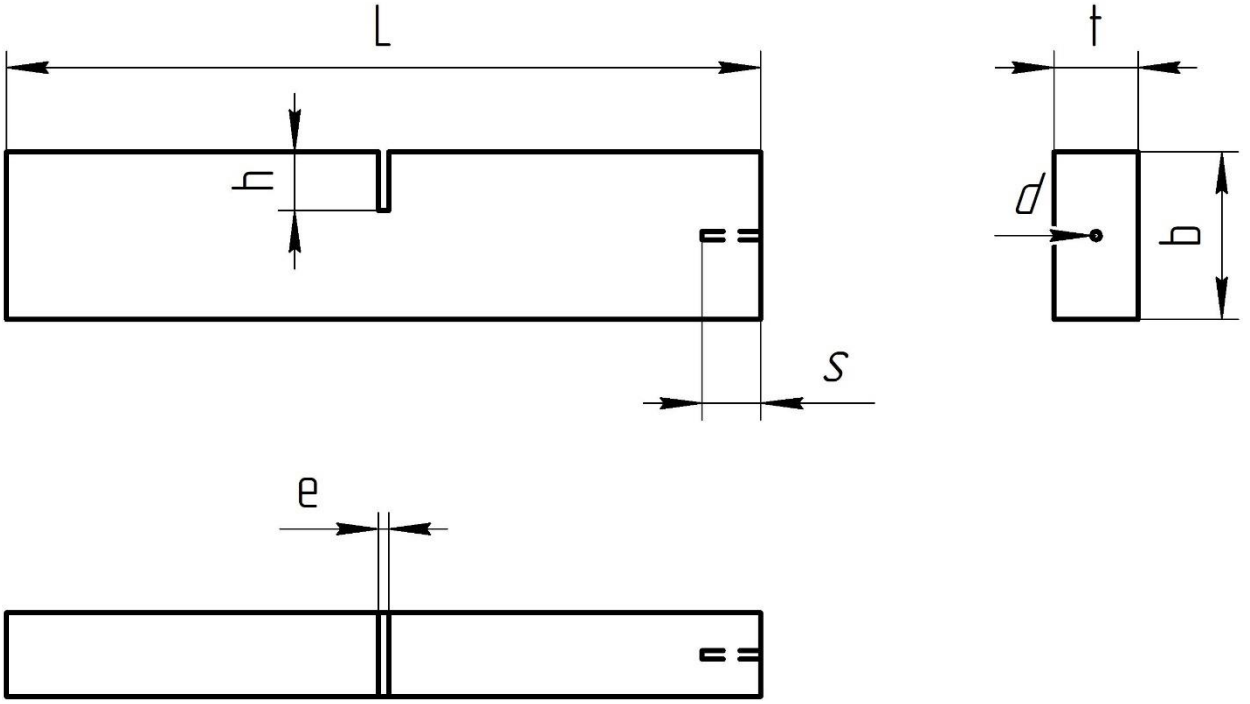

Рисунок 3.1 – Образец для исследования температурного градиента

В первоначальный момент каждый образец и все элементы установки находились при комнатной температуре. Затем, после сборки экспериментальной установки, на лабораторном трансформаторе устанавливалось напряжение, подаваемое на нагревательные элементы в камере. На рисунках 3.2 – 3.8 представлены результаты замеров температуры на поверхности образца (сплошные линии) и внутри образца – посредством помещения термопары в просверленное с торца отверстие (пунктирные линии) разных горных пород, фиксация температуры производилась каждые 30 секунд наблюдений при напряжениях 50 В (линии обозначены синим цветом), 100 В (линии обозначены зеленым цветом) и 150 В (линии обозначены черным цветом).

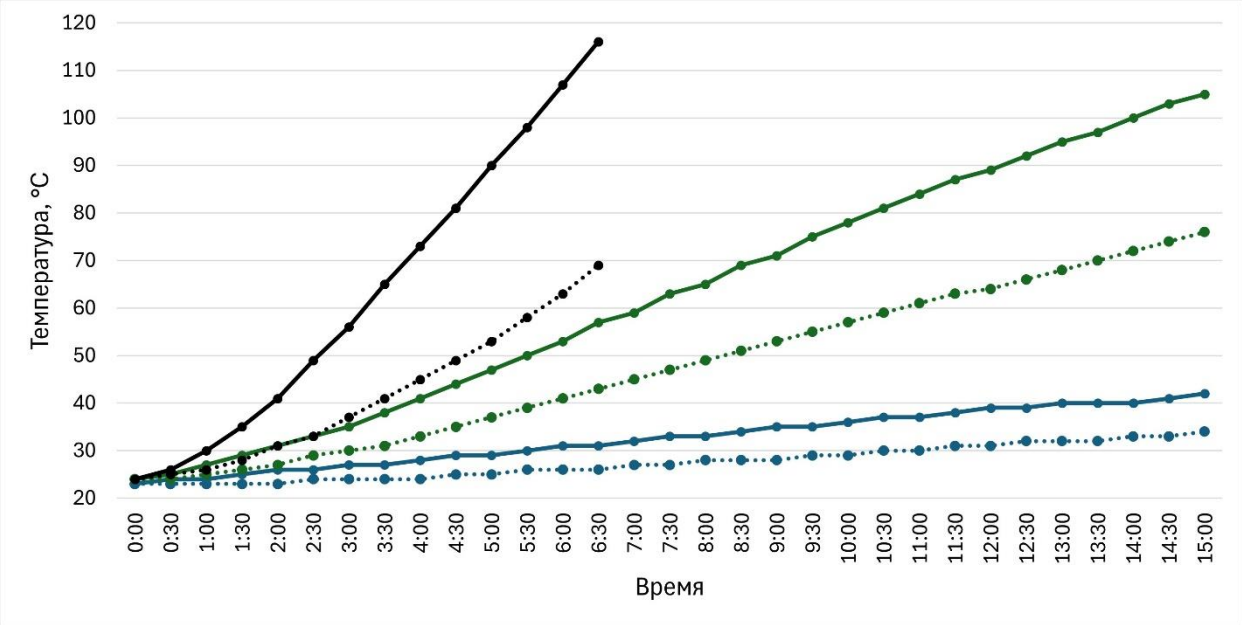

Рисунок 3.2 – Изменение температуры образца габбро на поверхности и внутри образца при разных значениях напряжения, подаваемого на нагревательные элементы

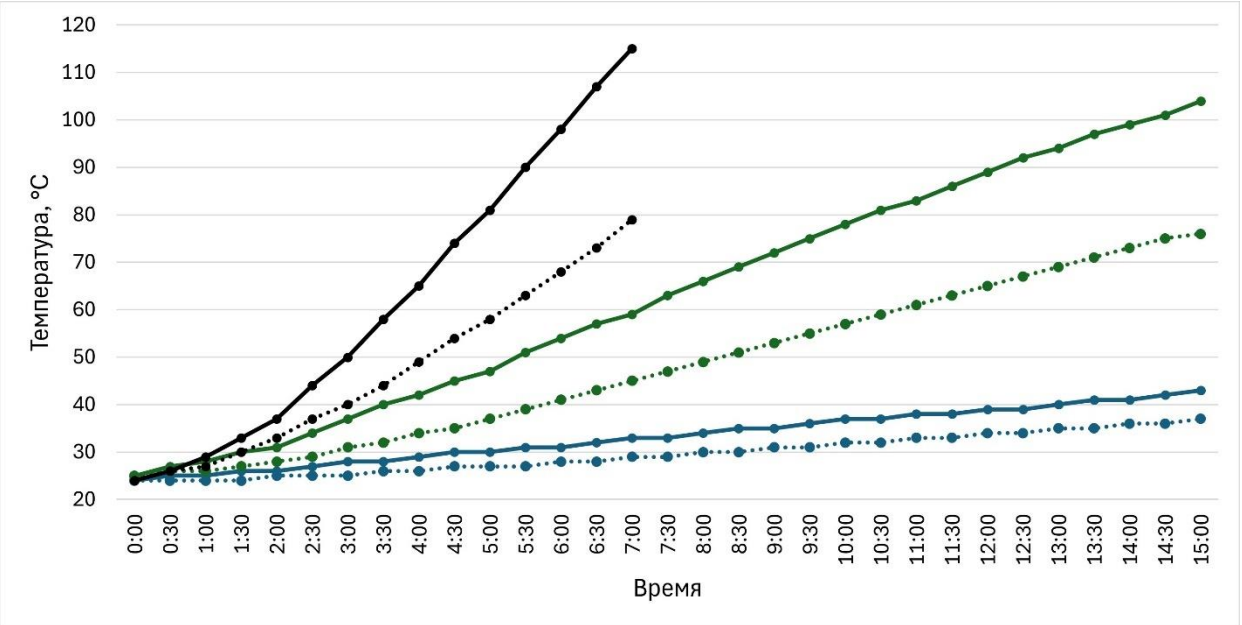

Рисунок 3.3 – Изменение температуры образца гранита на поверхности и внутри образца при разных значениях напряжения, подаваемого на нагревательные элементы

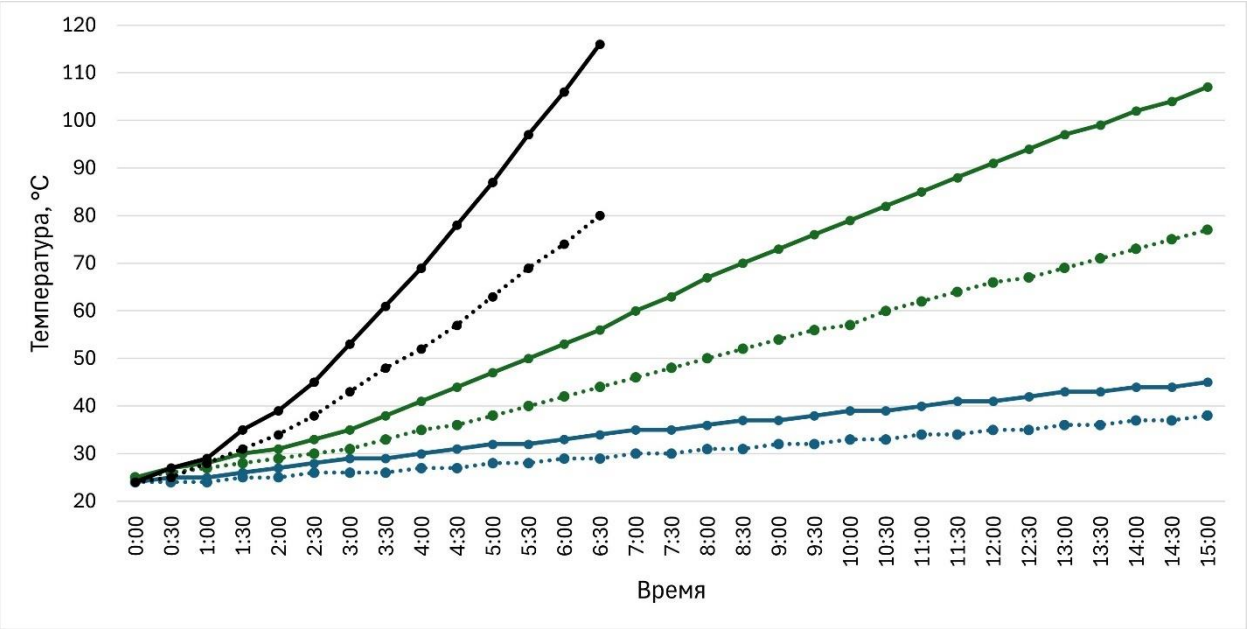

Рисунок 3.4 – Изменение температуры образца известняка на поверхности и внутри образца при разных значениях напряжения, подаваемого на нагревательные элементы

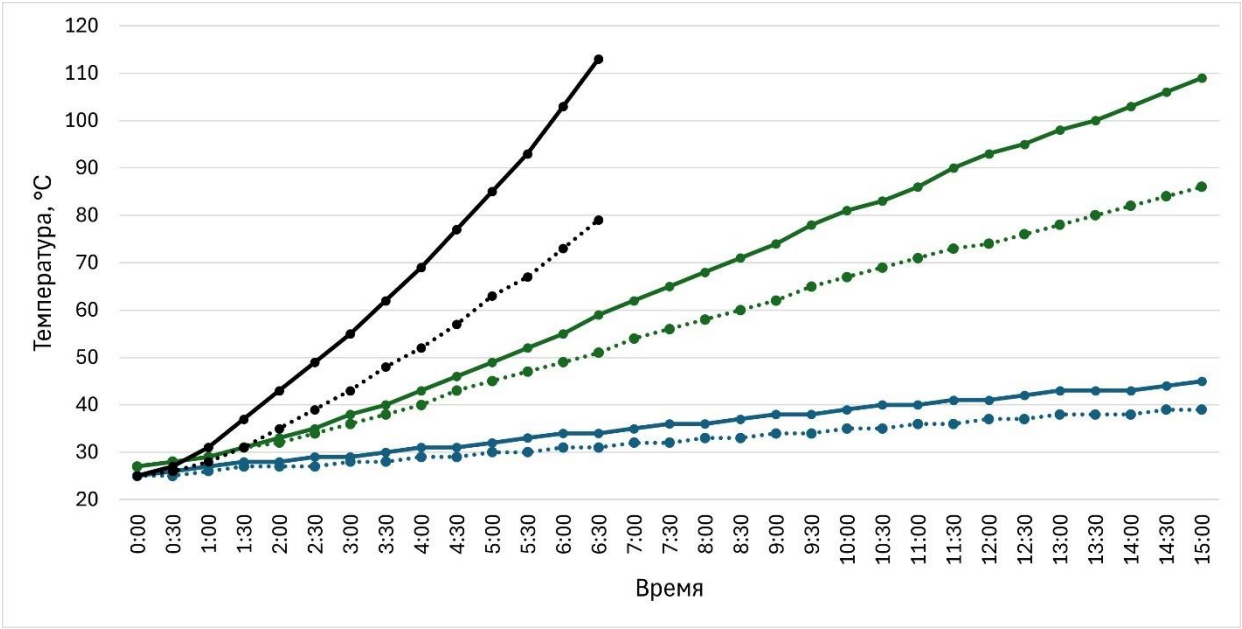

Рисунок 3.5 – Изменение температуры образца белого мрамора на поверхности и внутри образца при разных значениях напряжения, подаваемого на нагревательные элементы

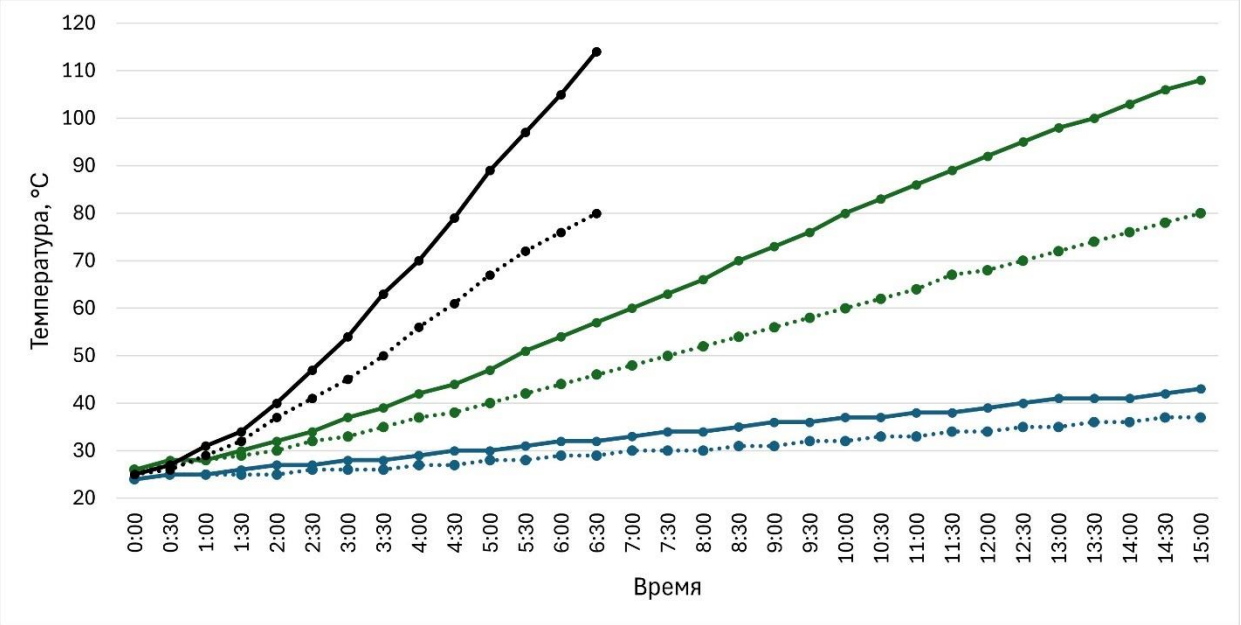

Рисунок 3.6 – Изменение температуры образца серого мрамора среднезернистого на поверхности и внутри образца при разных значениях напряжения, подаваемого на нагревательные элементы

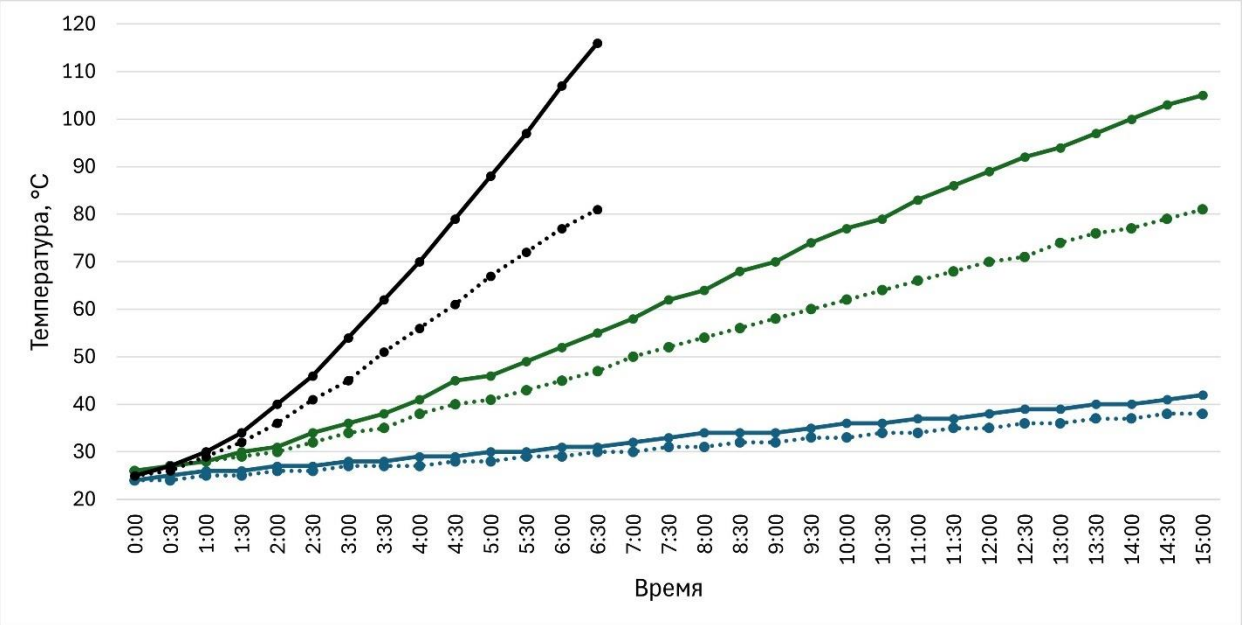

Рисунок 3.7 – Изменение температуры образца серого мрамора мелкозернистого на поверхности и внутри образца при разных значениях напряжения, подаваемого на нагревательные элементы

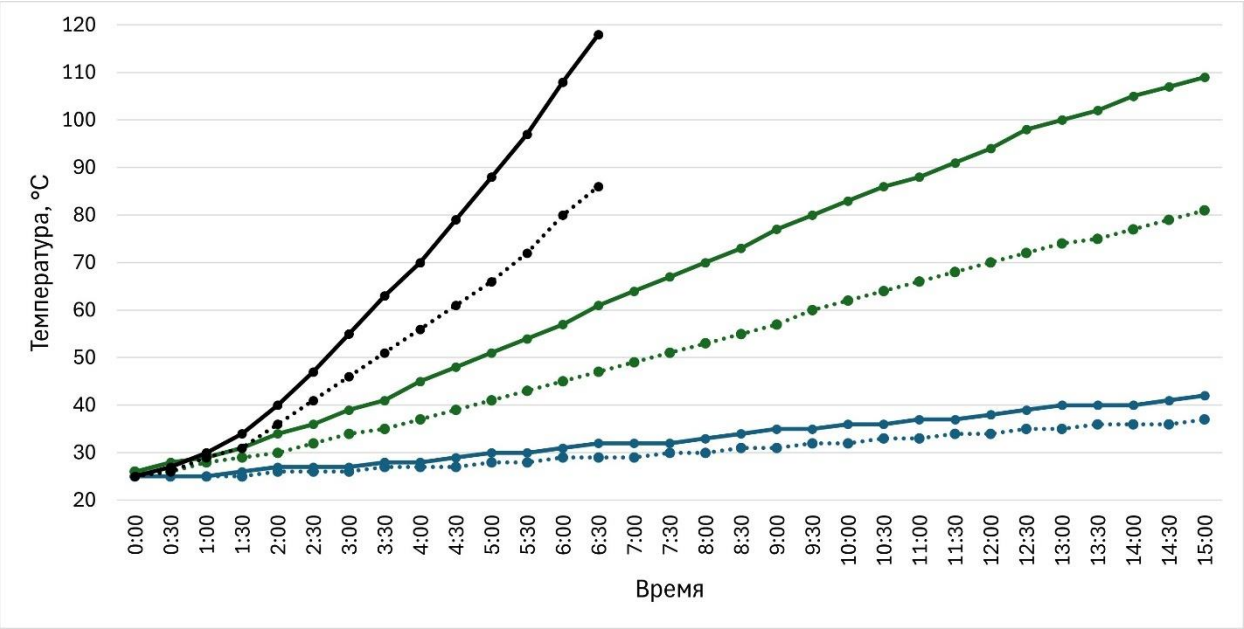

Рисунок 3.8 – Изменение температуры образца серого мрамора крупнозернистого на поверхности и внутри образца при разных значениях напряжения, подаваемого на нагревательные элементы

Приведенные результаты свидетельствуют о несущественном влиянии генотипа образца на формируемый температурный градиент в разных частях образца. При напряжении в сети 150 В формируется существенный температурный градиент, в среднем составляющий 36,3 ºС, поэтому исследования при более высоком напряжении не производились. Превалирующим фактором, влияющим на формирование температурного градиента, является геометрия образца. В ходе испытаний нагрев образца прекращался при достижении температуры 110 – 120 °С, так как дальнейшее ее увеличение является нецелесообразным ввиду ограниченности температурного диапазона проводимых экспериментов, а также использования в конструкции фторопласта, температура плавления которого составляет 260 °С и может достигаться локально отдельными элементами приспособления. За оптимальный с точки зрения достижения необходимых температур, в рамках которых проводились эксперименты, был взят режим нагрева, при котором в сеть с нагревательными элементами подается электрический ток напряжением 100 В. Из приведенных результатов главным образом использовалось ориентировочное время достижения образцом той

или иной температурной отметки при определенном значении напряжения в сети. В ходе осуществления дальнейших испытаний нагрев прекращался по достижении поверхностью образца температуры, превышающей температуру данного этапа испытаний, после чего выжидалось время, необходимое для приведения образца в термодинамическое равновесие.

3.2 ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ УМЕРЕННОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ГОРНЫХ ПОРОД РАЗНОГО ГЕНЕЗИСА

Данный раздел содержит результаты экспериментов, целью которых является установление закономерности изменения коэффициента трещиностойкости при умеренном тепловом воздействии для горных пород разного генезиса. В рамках данных исследований было проведено 259 экспериментов, на рисунке 3.9 изображены образцы, задействованные в исследованиях.

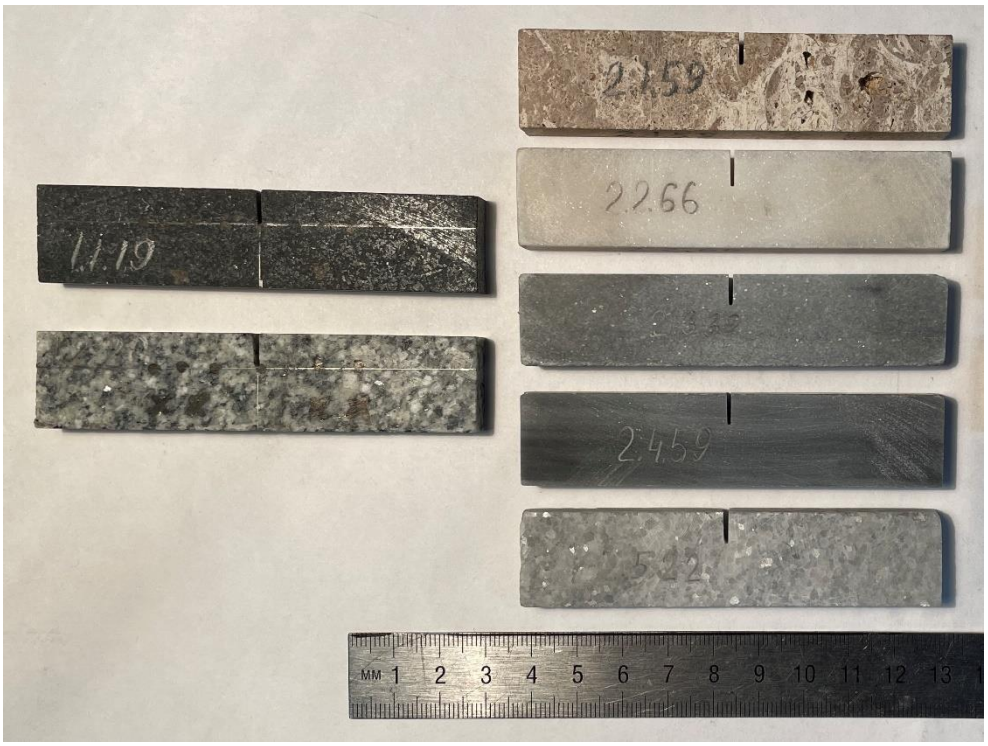

Рисунок 3.9 – Подготовленные в соответствии с ГОСТ 25.506.85 образцы

Измерения проводились при температурах 20, 40, 60, 80 и 100 градусов Цельсия. Общие результаты с усредненными значениями определяемых

параметров представлены в таблице 3.1. Все результаты проведенных исследований указаны в Приложении А.

Таблица 3.1 – Результаты испытаний образцов разного генезиса

Образец	Температура, ºС	P_c^*, Н	K_{IC}^*, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации, %
Габбро	20	539,18	2,49	3,62
Гранит		358,84	1,76	8,09
Известняк		201,12	0,94	8,65
Мрамор белый		90,51	0,44	20,77
Мрамор серый (среднезернистый)		192,11	0,96	8,16
Мрамор серый (мелкозернистый)		293,19	1,44	10,57
Мрамор серый (крупнозернистый)		138,01	0,69	6,14
Габбро	40	521,95	2,46	4,67
Гранит		364,28	1,73	17,60
Известняк		185,28	0,87	17,07
Мрамор белый		80,18	0,39	15,50
Мрамор серый (среднезернистый)		133,95	0,66	5,74
Мрамор серый (мелкозернистый)		284,31	1,41	6,16
Мрамор серый (крупнозернистый)		124,86	0,63	11,76
Габбро	60	471,27	2,40	3,79
Гранит		278,49	1,37	14,08
Известняк		171,10	0,81	16,95
Мрамор белый		68,12	0,34	14,56
Мрамор серый (среднезернистый)		109,61	0,54	8,47
Мрамор серый (мелкозернистый)		283,30	1,42	9,36
Мрамор серый (крупнозернистый)		99,21	0,47	8,47

* - приведены усредненные значения по анализируемой серии испытаний

Продолжение таблицы 3.1 – Результаты испытаний образцов разного генезиса

Образец	Температура, ºС	P_c*, Н	K_{IC}*, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации, %
Габбро	80	481,22	2,36	1,44
Гранит		309,81	1,49	7,40
Известняк		171,31	0,81	16,37
Мрамор белый		62,63	0,30	13,20
Мрамор серый (среднезернистый)		81,96	0,41	14,96
Мрамор серый (мелкозернистый)		258,44	1,30	6,98
Мрамор серый (крупнозернистый)		98,23	0,46	11,37
Габбро	100	419,18	2,04	7,19
Гранит		275,63	1,26	9,27
Известняк		151,94	0,72	20,72
Мрамор белый		50,16	0,24	6,31
Мрамор серый (среднезернистый)		78,11	0,39	3,98
Мрамор серый (мелкозернистый)		275,38	1,37	5,68
Мрамор серый (крупнозернистый)		79,05	0,38	7,82

* - приведены усредненные значения по анализируемой серии испытаний

На рисунках 3.10 – 3.16 результаты представлены в виде графиков зависимостей коэффициента трещиностойкости от температуры образца при испытании. Каждая точка на графике является средним значением K_{IC}, полученном в серии экспериментов. Для характеристики выборок на графики добавлен размах в виде линии, соединяющей максимально и минимально полученное значение коэффициента трещиностойкости в каждой из них. На каждом графике представлено уравнение линии тренда изменения коэффициента трещиностойкости, а также коэффициент детерминации.

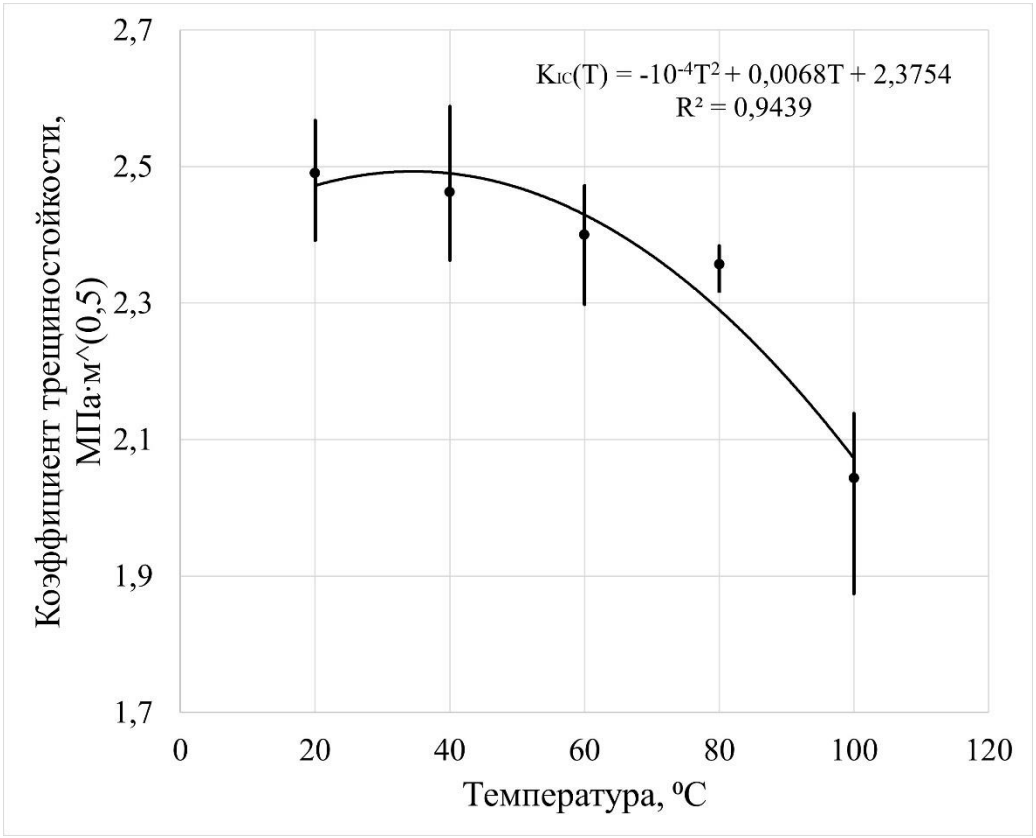

Рисунок 3.10 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов габбро

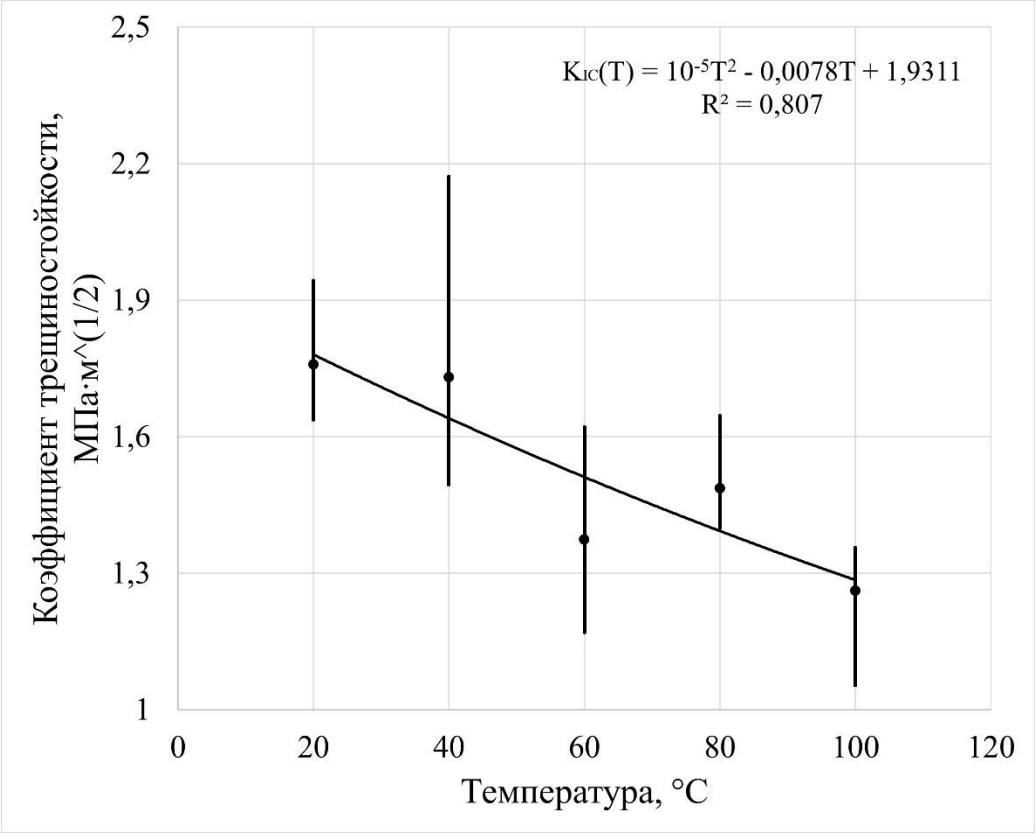

Рисунок 3.11 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов гранита

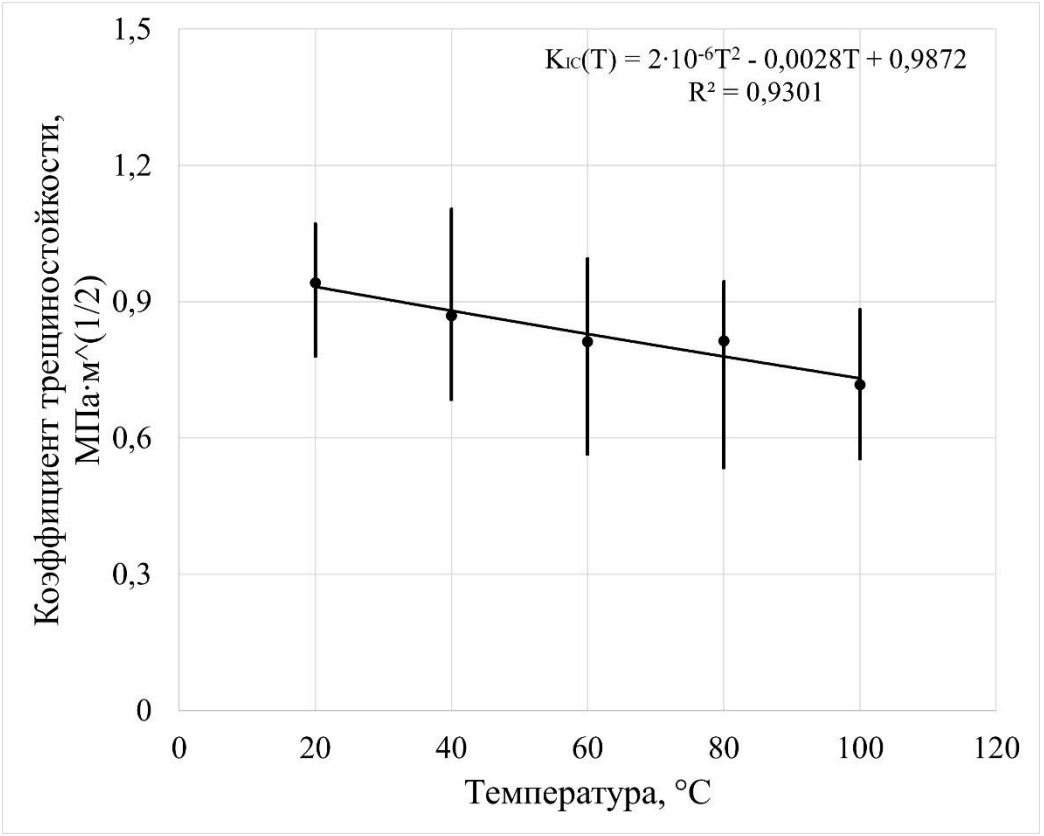

Рисунок 3.12 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов известняка

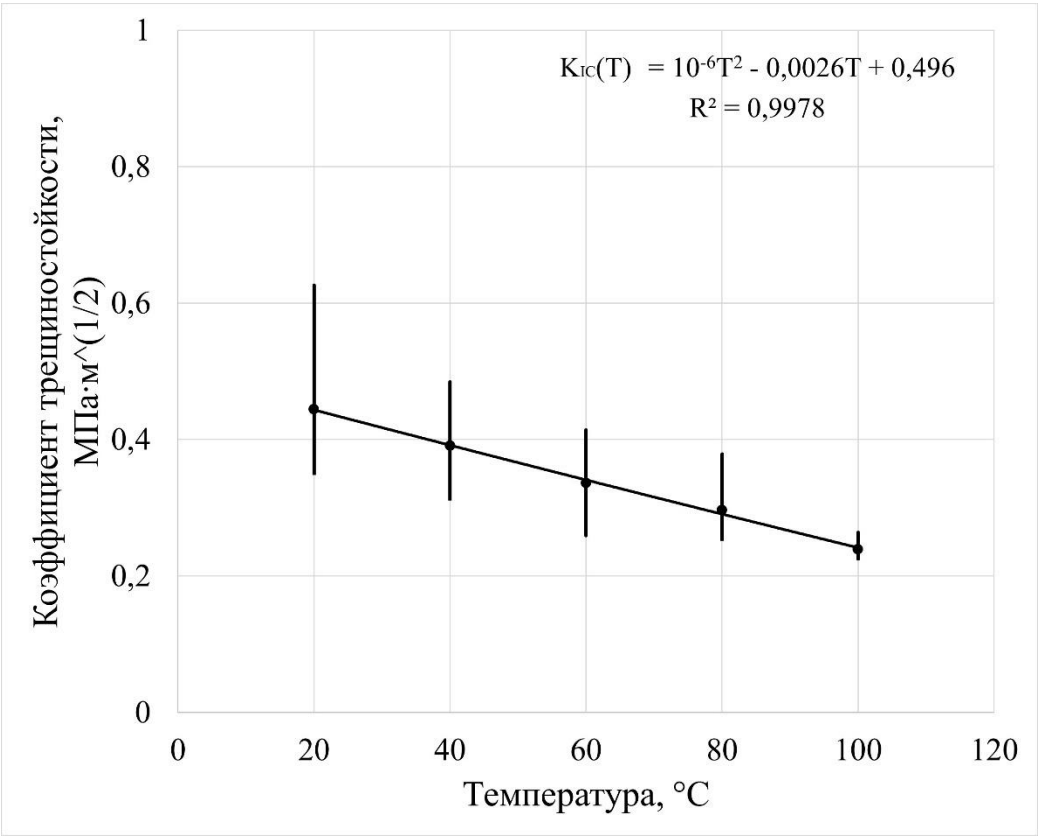

Рисунок 3.13 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов мрамора белого

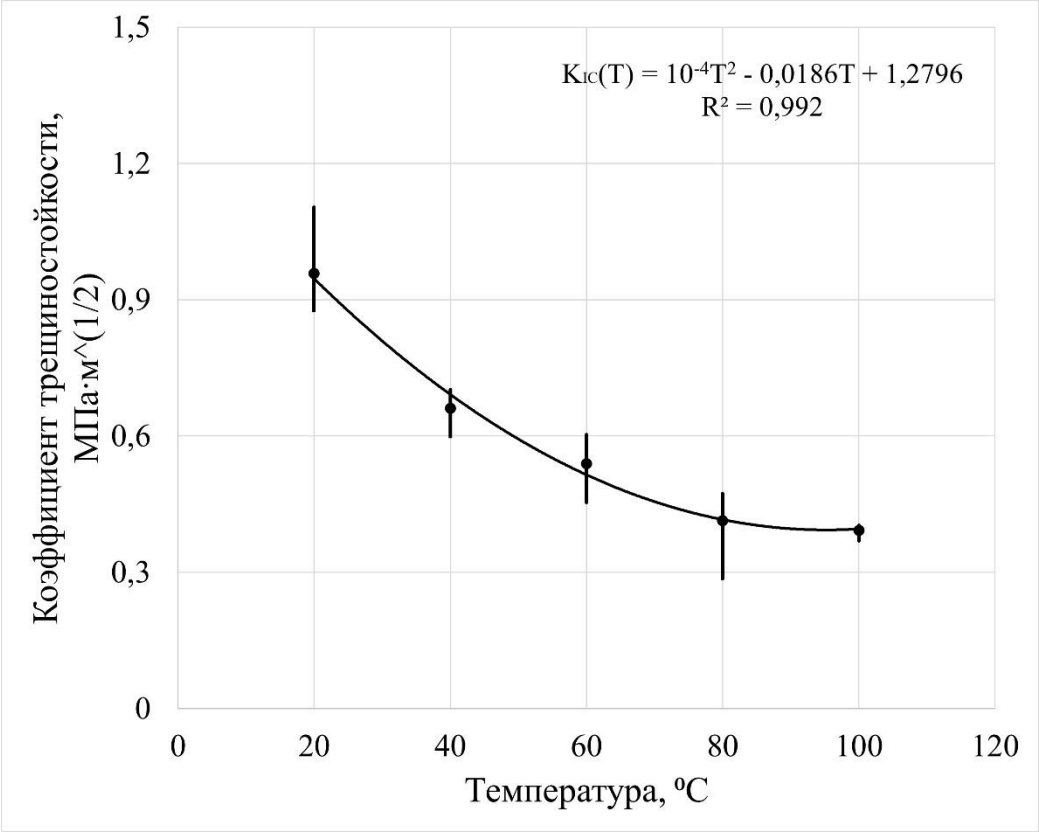

Рисунок 3.14 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов серого мрамора среднезернистого

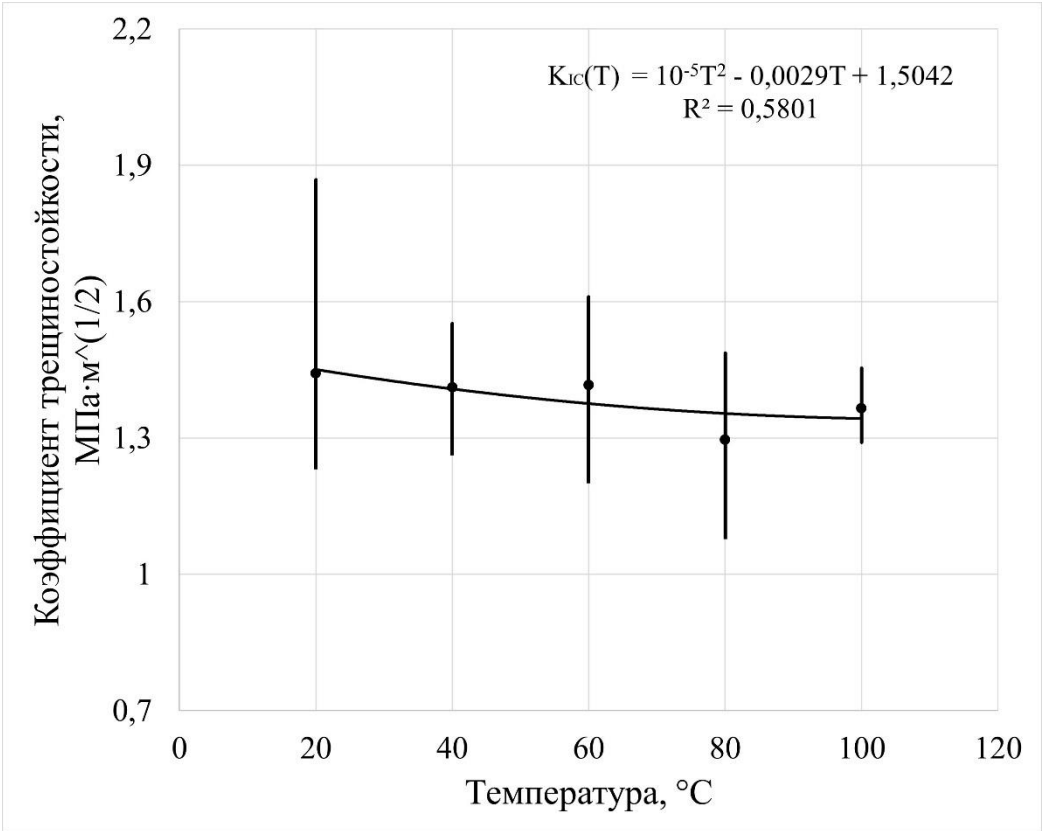

Рисунок 3.15 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов серого мрамора мелкозернистого

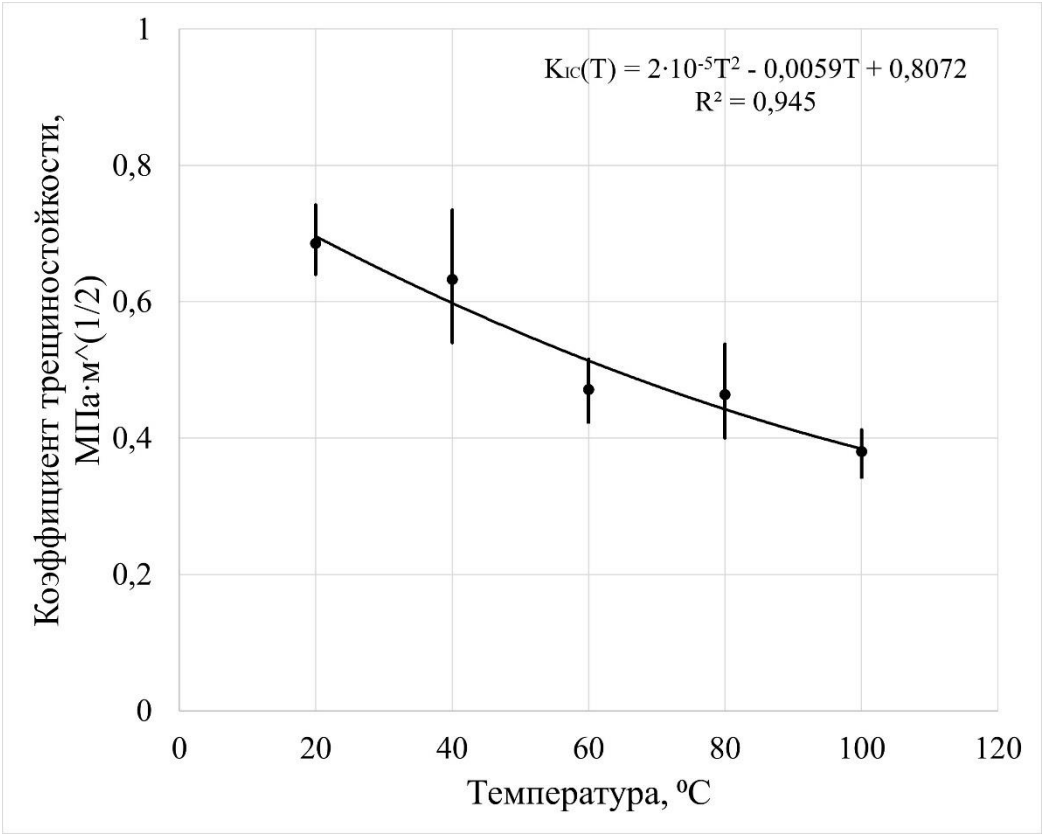

Рисунок 3.16 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов серого мрамора крупнозернистого

Согласно приведенным результатам, можно выделить общие характерные черты, присущие испытываемым образцам горных пород. В первую очередь, это снижение статического коэффициента трещиностойкости с ростом температуры для образцов горных пород всех генотипов, что полностью согласуется с ранее полученными результатами [143]. Тренд данного снижения для всех пород одинаков (линии трендов вогнуты), за исключением небольшого отклонения (выгнутости) линии тренда изменения K_{IC} образцов габбро – имеющих самое высокое значение коэффициента трещиностойкости на всех этапах теплового воздействия из всех испытанных пород. Непостоянный темп снижения коэффициента трещиностойкости с ростом температуры характерен для образцов всех горных пород. Так, были сопоставлены снижения значения коэффициента трещиностойкости относительно его значения при температуре 20 °С на двух температурных интервалах: при нагревании от 20 °С до 60 °С и от 60 °С до 100 °С (табл. 2).

Таблица 3.2 – Снижение K_{IC}^{*} горных пород в процентах при нагревании в температурных диапазонах относительно полученного при нормальных условиях (20°C)

Генотип горной породы	Название горной породы	Температурный диапазон	
		20-60°C	60-100°C
Магматическая горная порода	Габбро	3,64%	14,31%
	Гранит	21,88%	6,39%
Осадочная горная порода	Известняк	13,80%	10,04%
Метаморфическая горная порода	Мрамор белый	24,19%	22,00%
	Мрамор серый (среднезернистый)	43,68%	15,34%
	Мрамор серый (мелкозернистый)	1,79%	8,33%
	Мрамор серый (крупнозернистый)	31,28%	13,24%

* сравнение производилось по усредненным значениям анализируемой серии испытаний

Согласно представленным в таблице данным видно, что скорость снижения коэффициента трещиностойкости образцов гранита, известняка, белого мрамора, а также средне- и крупнозернистого серых мраморов выше в температурном диапазоне 20 – 60 °C. При дальнейшем увеличении температуры в интервале до 100 °C скорость снижения значения коэффициента уменьшается. Данное наблюдение характеризует восприимчивость перечисленных горных пород к тепловом воздействию на первых этапах, то есть указывает на большую интенсивность разрушения связей между структурными элементами в указанном температурном диапазоне по отношению к сравниваемому.

Обратную тенденцию изменения скорости снижения коэффициента трещиностойкости при нагревании в указанных температурных интервалах имеют габбро и серый мелкозернистый мрамор. Здесь нельзя не отметить структурные особенности данных горных пород, а именно то, что в своем генотипе они обладают наименьшим размером структурных элементов по сравнению с иными исследуемыми.

Среди всех исследуемых горных пород наименьшую восприимчивость к изменению температуры от 20 °С до 100 °С с точки зрения изменения коэффициента трещиностойкости демонстрируют образцы мелкозернистого серого мрамора с снижением значения показателя лишь на 5,38 %, наибольшую – среднезернистый серый мрамор с снижением значения показателя на 59,02 %. У остальных исследуемых горных пород аналогичный показатель составил 17,95 % у габбро, 23,84 % у известняка, 28,27 % у гранита, 44,52 % у крупнозернистого серого мрамора и 46,19 % у белого мрамора.

Проведенные исследования позволили сформулировать первое научное положение: установлено, что снижение величины коэффициента трещиностойкости в температурном диапазоне 20 – 100 °С в основном определяется генезисом породы. Снижение составило: 5,38 – 59,02 % для метаморфических, 17,95 – 28,27 % для магматических и 23,84 % для осадочных горных пород, при этом скорость снижения коэффициента трещиностойкости при нагревании в температурном диапазоне от 20 °С до 60 °С больше, чем при температурном диапазоне от 60 °С до 100 °С у гранита, известняка, белого мрамора, средне- и крупнозернистого серых мраморов, и наоборот у горных пород габбро и мелкозернистого серого мрамора.

3.3 ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ УМЕРЕННОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ГОРНЫХ ПОРОД РАЗНОЙ ЗЕРНИСТОСТИ

Данный раздел посвящен описанию результатов экспериментов, направленных на установление зависимости коэффициента трещиностойкости от среднего размера зерна при умеренном тепловом воздействии.

В рамках данных исследований было поставлено 128 экспериментов. В качестве материала для анализа использовались данные экспериментов раздела 3.2. На образцы оказывалось тепловое воздействие, измерения проводились при температурах 20, 40, 60, 80 и 100 градусов Цельсия.

Результаты испытаний серого мрамора представлены в таблице 3.3. Результаты всех испытаний представлены в Приложении А.

Таблица 3.3 – Результаты испытаний серого мрамора с разной крупностью зерен [144]

Образцы серого мрамора	Температура, °С	Разрушающее усилие P_c^*, Н	Коэффициент трещиностойкости K_{IC}^*, МПа·м^{0,5}	Коэффициент вариации*, %
Мелкозернистые	20	293,19	1,44	10,57
Среднезернистые		192,11	0,96	8,16
Крупнозернистые		138,01	0,69	6,13
Мелкозернистые	40	284,31	1,41	6,16
Среднезернистые		133,95	0,66	5,74
Крупнозернистые		124,86	0,63	11,76
Мелкозернистые	60	283,30	1,42	9,36
Среднезернистые		109,61	0,54	8,47
Крупнозернистые		99,21	0,47	8,47
Мелкозернистые	80	258,44	1,30	6,98
Среднезернистые		81,96	0,41	14,96
Крупнозернистые		89,90	0,46	11,37
Мелкозернистые	100	275,38	1,37	5,68
Среднезернистые		78,11	0,39	3,98
Крупнозернистые		79,05	0,38	7,82

* - приведены усредненные значения по анализируемой серии испытаний

Было установлено, что при повышении температуры коэффициент трещиностойкости уменьшается у всех образцов. Более того, изменение K_{IC} для всех образцов происходит по одному тренду. Это хорошо видно при графическом представлении результатов (рис. 3.17, 3.18, 3.19). Каждая точка на графике является средним значением K_{IC}, полученном в серии экспериментов. Для характеристики выборок на графики добавлен размах в виде линии, соединяющей максимально и минимально полученное значение коэффициента трещиностойкости в каждой из них. На каждом графике представлено уравнение линии тренда изменения коэффициента трещиностойкости, а также коэффициент детерминации.

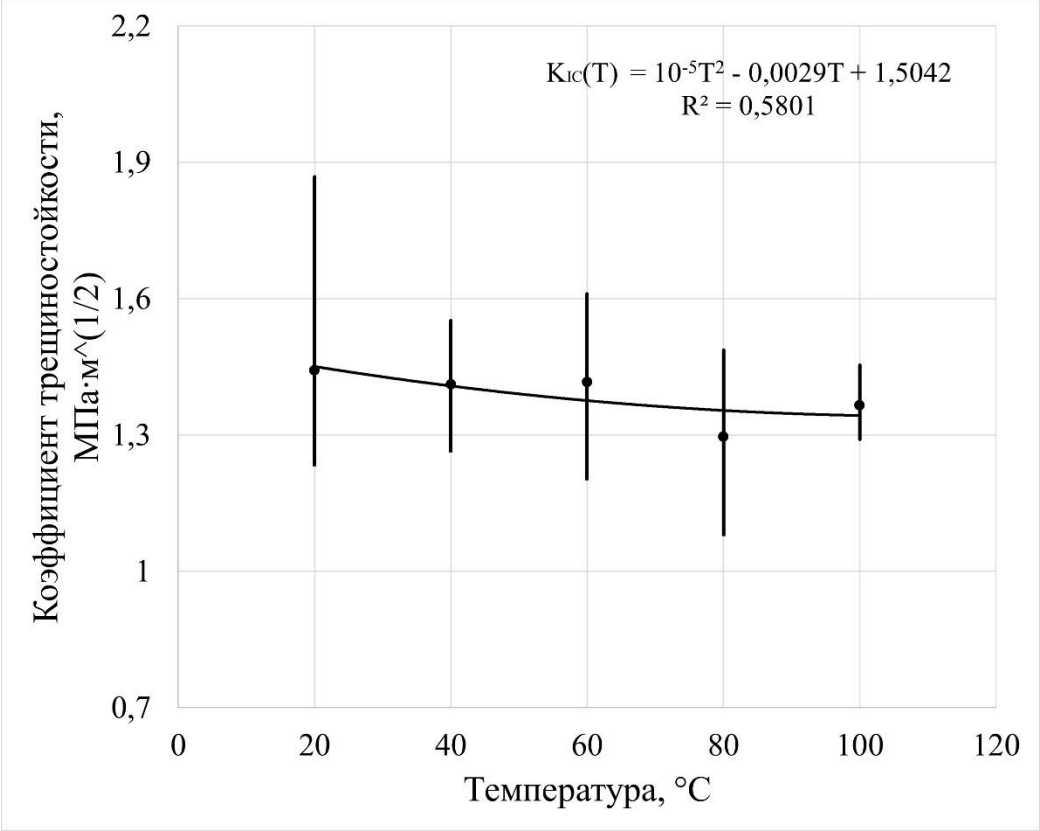

Рисунок 3.17 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов серого мрамора мелкозернистого

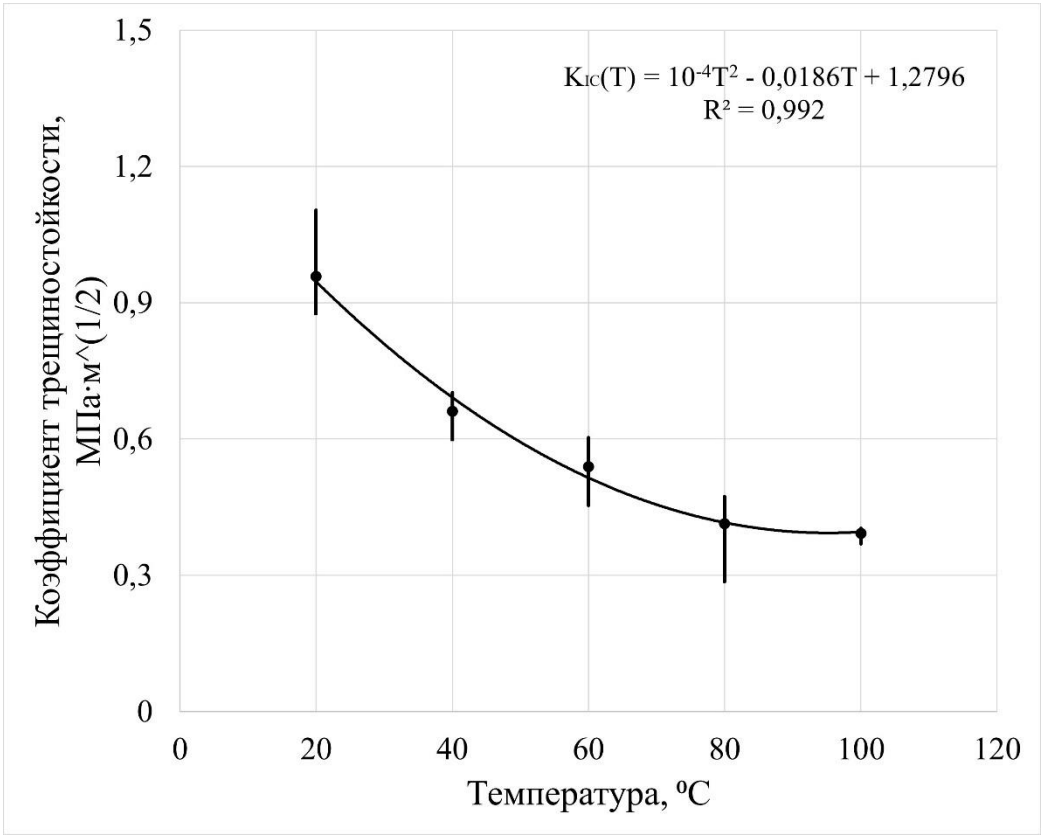

Рисунок 3.18 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов серого мрамора среднезернистого

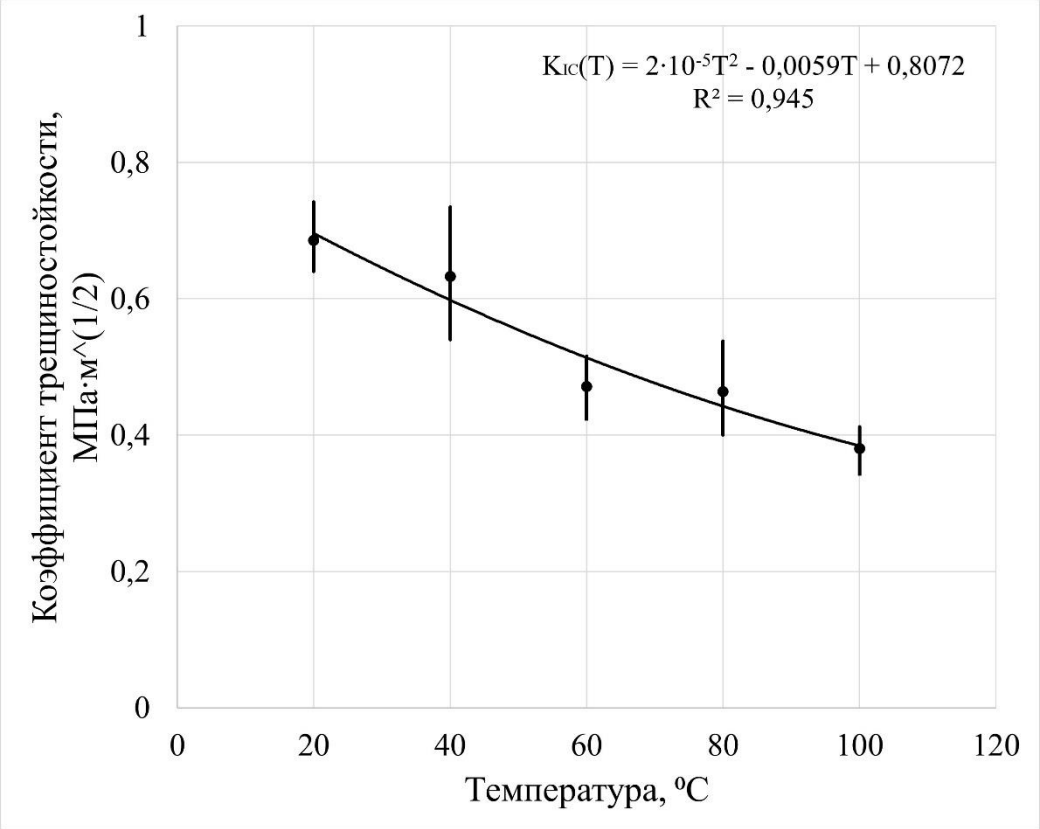

Рисунок 3.19 – Линия тренда изменения коэффициента трещиностойкости в зависимости от температуры образцов серого мрамора крупнозернистого

Приведенные данные позволяют проанализировать особенности изменения коэффициента серых мраморов разной зернистости. Так, материал с меньшим размером зерен в лице среднезернистого серого мрамора лучше сопротивляется росту трещин при комнатной температуре, чем крупнозернистый, однако при нагревании до 100 °С эта способность у данных материалов становится одинаковой. Коэффициент трещиностойкости мелкозернистого серого мрамора существенно выше средне- и крупнозернистого при всех указанных температурных отметках, а общее снижение коэффициента при нагревании от 20 °С до 100 °С гораздо менее существенно.

ВЫВОДЫ

Основываясь на результатах исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выявлена закономерность снижения величины коэффициента трещиностойкости независимо от генезиса пород от 5,38 % до 59,02 % в температурном диапазоне 20 – 100 °С.

2. Установлено, что снижение величины коэффициента трещиностойкости в температурном диапазоне 20 – 100 °С в основном определяется генезисом породы. Снижение составило: 5,38 – 59,02 % для метаморфических, 17,95 – 28,27 % для магматических и 23,84 % для осадочных горных пород, при этом темп снижения коэффициента трещиностойкости при нагревании в температурном диапазоне от 20 °С до 60 °С больше, чем при температурном диапазоне от 60 °С до 100 °С у гранита, известняка, белого мрамора, средне- и крупнозернистого серых мраморов, и наоборот у горных пород габбро и мелкозернистого серого мрамора.

3. Выявлена закономерность снижения величины коэффициента трещиностойкости при температурном воздействии в диапазоне 20 – 100 °С для серых мраморов, отличающихся размером структурных элементов: снижение величины коэффициента трещиностойкости с ростом температуры составило для мелко-, средне- и крупнозернистого материала 5,38 %, 59,02 % и 44,52 % соответственно.

Таким образом было сформулировано второе научное положение: выявлена тенденция снижения величины коэффициента трещиностойкости при температурном воздействии в диапазоне 20 – 100 °С для серых мраморов, отличающихся размером структурных элементов: снижение величины коэффициента трещиностойкости с ростом температуры составило для мелко-, средне- и крупнозернистого материала 5,38 %, 59,02 % и 44,52 % соответственно.

ГЛАВА 4 ВЛИЯНИЕ ФЛЮИДОНАСЫЩЕНИЯ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ИЗВЕСТНЯКОВ ПРИ УМЕРЕННОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В данной главе представлены результаты экспериментов, целью которых является установление закономерностей изменения коэффициента трещиностойкости известняков при умеренном тепловом воздействии в зависимости от заполнения пор образца флюидом. В качестве флюида использовался авиационный керосин ТС-1, заполнение пор происходило в вакуумной камере, образцы испытывались без покрытия. В рамках данных исследований было проведено 309 экспериментов, на рисунке 4.1 представлены подготовленные для данного вида испытаний образцы известняка.

Рисунок 4.1 – Подготовленные образцы известняка

Исследование проводилось при температурах 20, 40, 60, 80 и 100 градусов Цельсия. Усредненные результаты экспериментов представлены в таблице 4.1. Результаты всех испытаний представлены в Приложении А.

Таблица 4.1 – Усредненные результаты экспериментов для ненасыщенного и насыщенного флюидом известняка [145]

Образец известняка	Температура, °С	Разрушающее усилие P_c^*, Н	Коэффициент трещиностойкости K_{IC}^*, МПа·м^{0,5}	Коэффициент вариации*, %
Ненасыщенный	20	226,45	1,08	5,83
Насыщенный		223,21	1,09	8,45
Ненасыщенный	40	214,26	1,04	7,28
Насыщенный		214,78	1,04	11,24
Ненасыщенный	60	214,14	1,05	5,95
Насыщенный		208,14	1,02	13,64
Ненасыщенный	80	206,61	1,00	11,79
Насыщенный		201,42	0,98	18,76
Ненасыщенный	100	204,78	1,00	13,87
Насыщенный		194,44	0,98	23,65

* - приведены усредненные значения по анализируемой серии испытаний

Из приведенных в таблице данных видно, что коэффициент вариации значений коэффициента трещиностойкости насыщенных образцов известняка выше коэффициента вариации значений параметра ненасыщенных образцов известняка на всех этапах умеренного теплового воздействия, что косвенно свидетельствует о влиянии флюидонасыщения образцов известняка на значение коэффициента трещиностойкости.

Полученные результаты свидетельствуют о тенденции к снижению коэффициента трещиностойкости известняка при нагревании от 20 °С до 40 °С, влияние насыщенности пор при нагревании в данном температурном диапазоне мало и или отсутствует вовсе. Коэффициент трещиностойкости при нагреве в данном температурном диапазоне снизился на 3,68 % и 4,22 % у ненасыщенных и насыщенных известняков соответственно. При дальнейшем проведении экспериментов в температурном диапазоне от 60 °С до 80 °С коэффициент трещиностойкости насыщенных образцов известняка демонстрирует более стабильное снижение (снижение относительно предыдущей температурной отметки проведения испытаний) коэффициента трещиностойкости, чем ненасыщенных образцов. Тем не менее, полученные средние значения коэффициента трещиностойкости насыщенных образцов

известняка при температурном воздействии 60 ºС и выше оказываются ниже значений коэффициента трещиностойкости ненасыщенных образцов известняка при том же тепловом воздействии. Эта разница составляет для 60 °С – 2,4 %, для 80 °С – 1,1 % и для 100 °С – 2,36 %. Проведенный анализ по статистическому критерию проверки гипотез о равенстве средних значений коэффициентов трещиностойкости показал, что при уровне значимости более 0,5 средние значения коэффициентов трещиностойкости насыщенных и ненасыщенных известняков в температурном диапазоне испытаний 60 – 100 °С являются статистически различимыми. Изменения коэффициентов трещиностойкости насыщенных и ненасыщенных известняков хорошо видны на рисунке 4.2 по линиям трендов. Каждая точка на графике является средним значением K_{IC}, полученном в серии экспериментов. Для характеристики выборок на графики добавлен размах в виде линий с выступами соответствующего цвета, соединяющими минимально и максимально полученное значение коэффициента трещиностойкости в каждой из них. На графике также представлены уравнения линий трендов изменения коэффициента трещиностойкости, а также коэффициент детерминации.

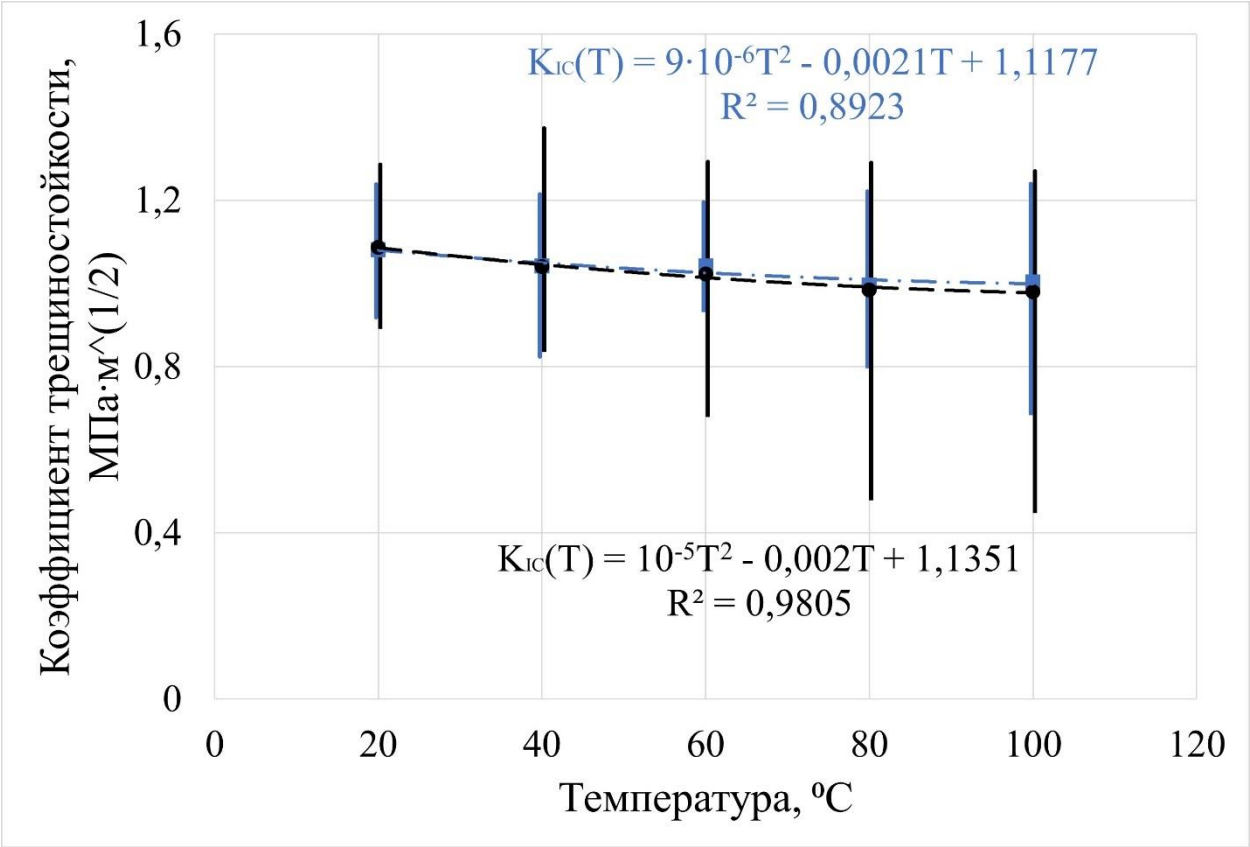

Рисунок 4.2 – Значения коэффициента трещиностойкости, а также линии трендов его изменения в зависимости от температуры ненасыщенного (синий цвет, значения помечены квадратными точками, а тренд пунктиром с точкой) и насыщенного (черный цвет, значения помечены круглыми точками, а тренд пунктиром) известняка

Из рисунка 4.2 видно, что наблюдается одинаковый тренд снижения коэффициента трещиностойкости известняков в ненасыщенном и насыщенном состояниях. Более того, тренд снижения коэффициента трещиностойкости насыщенных и ненасыщенных образцов известняка с ростом температуры согласуется с трендами снижения коэффициента трещиностойкости с ростом температуры большинства других горных пород в ранее проведенных исследованиях, результаты которых представлены в главе 3.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о влиянии флюидонасыщенности образцов известняка на коэффициент трещиностойкости при умеренном тепловом воздействии. Максимальное снижение коэффициента трещиностойкости ненасыщенных образцов известняка достигается при нагревании до 80 °C и составляет 7,95 %,

максимальное снижение коэффициента трещиностойкости насыщенных образцов достигается при температуре нагрева 100 °С и составляет 9,86 %.

ВЫВОДЫ

В главе 4 были представлены результаты проведенных лабораторных испытаний с целью определения влияния флюидонасыщенности образцов известняка на их коэффициент трещиностойкости при умеренном (до 100 °С) тепловом воздействии. Насыщение пор образцов известняка происходило в вакуумной камере авиационным керосином ТС-1. Испытания проводились до образования магистральной трещины по трехточечной схеме нагрузки при температурных отметках 20 °С, 40 °С, 60 °С, 80 °С и 100 °С. Количество экспериментов, имеющих несоответствие пороговым условиям, составило менее 5 % от общего количества.

Согласно результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Исследования воздействия теплового поля на способность образцов сопротивляться росту трещин показали снижение этой способности с повышением температуры для всех образцов известняка. Тренд снижения K_{IC} образцов известняка согласуется с трендами, полученными для большинства других горных пород в ранее проведенных исследованиях.

2. Результаты свидетельствуют о более низкой способности насыщенных флюидом образцов известняка сопротивляться росту трещин, чем ненасыщенных.

На основе результатов, представленных в данной главе, было сформулировано третье научное положение: доказано, что насыщение образцов известняка флюидом не влияет или влияет несущественно на коэффициент трещиностойкости в температурном диапазоне 20 – 40 °С и приводит к снижению коэффициента трещиностойкости при умеренном тепловом воздействии в температурном диапазоне 60 – 100 °С. Коэффициент трещиностойкости насыщенных образцов известняка меньше коэффициента трещиностойкости ненасыщенных при 60 °С на 2,4 %, при 80 °С на 1,1 %, при 100 °С на 2,36 % .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на основании выполненных автором экспериментальных исследований содержится решение актуальной научной задачи выявления закономерностей изменения коэффициента трещиностойкости горных пород при умеренном термическом воздействии в зависимости от их генезиса, размеров зерен и влияния флюидонасыщенности, что имеет важное значение для моделирования геомеханических процессов и процессов трещинообразования.

Основные научные результаты работы и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Разработано и успешно применено специальное оборудование для осуществления лабораторных испытаний по методике ГОСТ 25.506.85 с возможностью оказания термического воздействия на образец непосредственно в момент проведения эксперимента.
2. Выявлена закономерность снижения величины коэффициента трещиностойкости при температурном воздействии в диапазоне 20 – 100 °С для серых мраморов, отличающихся размером структурных элементов: снижение величины коэффициента трещиностойкости с ростом температуры составило для мелко-, средне- и крупнозернистого материала 5,38 %, 59,02 % и 44,52 % соответственно.
3. Установлено, что снижение величины коэффициента трещиностойкости в температурном диапазоне 20 – 100 °С в большей степени определяется генезисом породы. Снижение составило: 5,38 – 59,02 % для метаморфических, 17,95 – 28,27 % для магматических и 23,84 % для осадочных горных пород, при этом темп снижения коэффициента трещиностойкости при нагревании в температурном диапазоне от 20 °С до 60 °С больше, чем при

температурном диапазоне от 60 °С до 100 °С у гранита, известняка, белого мрамора, средне- и крупнозернистого серых мраморов, и наоборот у горных пород габбро и мелкозернистого серого мрамора.

4. Экспериментально установлено, что влияние насыщения порового пространства осадочных горных пород при температурах 20 – 40 °С на коэффициент трещиностойкости мало или отсутствует.
5. Экспериментально установлено влияние насыщения порового пространства осадочных горных пород при нагревании в температурном диапазоне 60 – 100 °С на коэффициент трещиностойкости. Коэффициент трещиностойкости насыщенных образцов известняка меньше коэффициента трещиностойкости ненасыщенных при 60 °С на 2,4 %, при 80 °С на 1,1 %, при 100 °С на 2,36 %.
6. Результаты диссертационной работы в части температурных зависимостей величины коэффициента трещиностойкости осадочных пород приняты к использованию ООО «Газпром геотехнологии» и будут учтены при проектировании объектов подземного хранения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Партон В. З., Морозов Е. М. Механика упругопластического разрушения. – 2 изд., перераб. и доп. // М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы. 1985. С. 5, 141.
2. Качанов Л. М. Основы механики разрушения // М.: Наука. 1974. С. 9.
3. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. // М.: Мир. 1984. С. 608.
4. Coulomb Ch. A. Essai. Sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l’architecture // Mémoire de Mathématiques et de Physique, présentés â l’Académie Royale des Sciences, par divers savans, et lûs dans ses Assemblées. Anneé 1733 Paris, de l’Imprimerie Royale. 1776. p. 343–382
5. Быков, Г. В. История классической теории химического строения // М.: Издательство АН СССР. 1960. С. 223.
6. Кобеко П. П. Аморфные вещества. Физико-химические свойства простых и высокомолекулярных аморфных тел // Изд-во АН СССР. 1952. С. 432
7. Griffith A. A. The phenomenon of rupture and flow in solids // Phil. Trans. Roy. Soc., № A. 1920. Vol. 221. p.p. 163-198
8. Griffith A.A. The theory of rupture. Proc. Ict. Int. Congr. Appl. Mech. // Delft. 1924. p. 55-63.
9. Иоффе А. Ф., Кирпичева М. В., Левитская М. А. Деформация и прочность кристаллов // Журнал русского физико-химического общества. Часть физическая. 1924. № 56. С. 489-503. DOI: 10.3367/UFNr.0093.196710e.0303
10. Ewald W., Polanyi M. Plastizität und Festigkeit von Steinsalz unter Wasser. // Z. Physik 28. 1924. pp. 29–50. DOI: 10.1007/BF01327165
11. Александров А. П., Журков С. Н. Явление хрупкого разрыва // М.: Изд. ГТТИ. 1933.
12. Пух В. П., Байкова Л. Г., Киреенко М. Ф., Тихонова Л. В., Казанникова Т. П., Синани А. Б. Прочность неорганических стекол в связи с их атомной

структурой // XV Петербургские чтения по проблемам прочности посвященные 100-летию со дня рождения академика С. Н. Журкова. 12-14 апреля 2005 г. Сборник тезисов. / Спб. 2005. С. 7.

13. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. // М.: «Машиностроение». 1975. С. 8-9.
14. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций // М.: Наука, 1966, С. 9.
15. Чувствительность механических свойств к действию среды: Избр. доклады на междунар. симпозиуме // Пер. с англ. Б. Д. Сумма и В. Ю. Траскина ; Под ред. Е. Д. Щукина. Москва: Мир. 1969. С. 352.
16. Murgatroid J. B. Mechanism of brittle rupture. // Nature. 1944. Vol. 154. № 3897. pp. 51-52.
17. Murgatroid J. B., Sykes R.F. Mechanism of brittle rupture. // Nature. 1945. Vol. 156. №3972. pp. 716-717.
18. Работнов Ю. Н. О механизме длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 5–7.
19. Качанов Л. М. О времени разрушения в условиях ползучести // Известия АН СССР. Отделение технических наук. 1958. С. 26–31.
20. Мухамедиев Ш. А. О дискретном строении геосреды и континуальном подходе к моделированию ее движения // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 347–381. doi: 10.5800/GT-2016-7-3-0213
21. Жабко А. В. Континуальная концепция сдвиговой дезинтеграции твердых тел // Известия УГГУ. 2019. № 3(55). С. 111-123. DOI 10.21440/2307-2091-2019-3-111-123
22. Разрушение горных пород и минералов: Сборник материалов конференции и школы молодых ученых и студентов, Екатеринбург, 04–07 апреля 2023 года. // Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. С. 85. EDN QQSOFJ

23. Xie H., Li L., Peng R., Ju Y. Energy analysis and criteria for structural failure of rocks // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2009. Vol. 1, Iss. 1. pp. 11-20. DOI: 10.3724/SP.J.1235.2009.00011
24. Bock A. Ueber das Verhältniss der Quercontraction zur Längendilatation bei Stäben von verschiedenen Metallen als Function der Temperatur // Annalen der Physik. 1894. Т. 288. №. 8. С. 609-620.
25. Писаревский М. Методика динамического определения модулей упругости и сдвига при разных температурах // Заводская лаборатория. 1938. Т. 7. № 6. С. 708-712.
26. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей // АН СССР. 1975. С. 27
27. Haward R. N. The extension and rupture of cellulose acetate and celluloid // Transactions of the Faraday Society. 1942. Vol. 38. pp. 394-403. DOI: 10.1039/TF9423800394
28. Гелазов М. А., Куксенко В. С., Слуцкер А. И. Фибриллярная структура и субмикроскопические трещины в ориентированных кристаллических полимерах // Физика твердого тела. 1970. Т. 12. №. 1. С. 100.
29. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах // М.: Мир. 1979. С. 51-57.
30. Petrov V.A., Vladimirov V.I., Orlov A.N. A Kinetic Approach to Fracture of Solid I. General Theorie // Phisica Status Solidi (b). 1970. Vol. 42, Isssue 1. pp. 197-206. DOI: 10.1002/pssb.19700420121
31. Журков С. Н., Куксенко В. С., Слуцкер А. И. Образование субмикроскопических трещин в полимерах под нагрузкой // Физика твердого тела. 1969. Т. 11, №. 1. С. 296-302.
32. Ботвина Л. Р., Болотников А. И., Синев И. О. Иерархия микротрещин при циклическом и статическом нагружении // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22. №6. С. 24-36. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-16003
33. Томилин Н. Г. Кинетика формирования очага разрушения в горных породах // XV Петербургские чтения по проблемам прочности

посвященные 100-летию со дня рождения академика С. Н. Журкова. 12-14 апреля 2005 г. Сборник тезисов. / Спб. 2005. С. 9.

34. Цитович Н. Механика мерзлых грунтов // М.: Высш. Школа. 1973. С. 446.
35. Ржевская С. Прочность горных пород. Горная энциклопедия в 5 томах. // М.: Изд-во "Советская энциклопедия". 1989. Т.4. С. 270.
36. Бурштейн Л., Курочкин А. Исследование физико-механических свойств мерзлых коренных пород. Тепловые и механические процессы при разработке полезных ископаемых. // М.: Наука. 1965. С. 98-106.
37. Курилко А., Новопашин М. Исследование влияния температуры на прочность горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2005. № 2. С. 32-36.
38. Курилко А. Исследование морозостойкости кимберлитов // Наука и образование. 2005. № 1. С. 61-69.
39. Ковшов А. Г. Кинетическая, термофлуктуационная природа разрушения поверхностей трения твердых тел при изнашивании // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22. № 3. С. 37-43. DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-3-37-43
40. Журков С. Н., Бетехтин В. И. Закономерности разрушения металлов с различным типом кристаллической решетки // Физика металлов и металловедение. 1967. Т. 24, №. 5. С. 940-944.
41. Журков С. Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестник АН СССР. 1968. №. 3. С. 46-52.
42. Слуцкер А. И. Характеристики элементарных актов в кинетике разрушения металлов // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. № 9. С. 1606-1613.
43. Кессених Р. М., Петров А. В. К вопросу о температурно-временной зависимости механической прочности полимеров // Известия ТПУ. 1975. Т. 222. С. 30-39.

44. Рахимов С. Ш. О роли тепловой флуктуации в разрушении твердых тел // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2021. №1. С. 331-340.
45. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел.// М.: «Наука». 1974. С. 190-228.
46. Журков С. Н., Абасов С. А. Температурная и временная зависимость прочности полимерных волокон // Высокомолекулярные соединения. 1961. Т. 3. №. 3. С. 1991-1997.
47. Журков С. Н. Дилатонный механизм прочности твердых тел //Физика твердого тела. 1983. Т. 25, №. 10. С. 3119-3123.
48. Feih S., Manatpon K., Mathys Z., Gibson A. G., Mouritz A. P. Strength degradation of glass fibers at high temperatures // Journal of materials science. 2009. Т. 44. С. 392-400.
49. Петров, М. Г. Анализ прочности и долговечности однонаправленного стеклопластика с позиций кинетической концепции разрушения // Механика композиционных материалов и конструкций. 2003. Т. 9, № 3. С. 376-397. EDN JWOPUT.
50. Курилко А. Экспериментальные исследования влияния циклов замораживания-оттаивания на физико-механические свойства горных пород // Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН». 2004. С. 153. EDN QKFJRH
51. Липатов Н. В. Влияние теплового удара на прочностные свойства горных пород: экспериментальное исследование термической усталостной прочности // Доклады Академии Наук Высшей Школы Российской Федерации. 2020. №4 (49). С. 32-40. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-32-40
52. Арутюнян А. Р. Формулировка критерия усталостной прочности композиционных материалов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2020. Т. 7 (65), № 3. С. 511–517. DOI: 10.21638/spbu01.2020.313

53. Timoshenko S., Dietz W. Stress Concentration Produced by Holes and Fillets // Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. 1925. Vol. 47. pp. 199-220. DOI: 10.1115/1.4058357
54. Серенсен С. В. Прочность металла и расчет деталей машин // М.-Л., ОНТИ НКТП. 1937. С. 60-66.
55. Новопашин М. Д., Иванов А. М. Расчет несущей способности элементов конструкций при неравномерном распределении напряжений // Повышение хладостойкости и несущей способности конструкций: сборник научных трудов. Якутск: Якутский филиал Издательства СО РАН. 1987. С. 18-23. EDN KQLLXP.
56. Балдин В. А., Потапов В. Н., Фадеев А. А. О сопротивлении стали деформированию при неравномерном распределении напряжений // Строительная механика и расчет сооружений. 1982. №. 5. С. 23-26.
57. Новопашин М. Д., Сукнев С. В., Иванов А. М. Упругопластическое деформирование и предельное состояние элементов конструкций с концентраторами напряжений // Новосибирск: "Наука". 1995. С. 112. EDN WBSYPT.
58. Новопашин М. Д., Курилко А. С. Исследование особенностей деформирования и разрушения геоматериалов в условиях неоднородных температурных и силовых полей и их приложение в геотехнологиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № S16. С. 83-92. EDN: MUOGWP.
59. Orowan E. Symposium on internal stresses in metals and alloys // Institute of Metals, London. 1948. p. 451.
60. Irwin G. R. Analysis of Stresses and Strain Near the End of Crack Traversing Plate // Journal of Applied Mechanics. 1957. № 4. P. 361-364.
61. Irwin G. R. Fracture dynamics. Fracturing of metals. // American Society for Metals, Cleveland. 1948. p. 147-166.
62. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. // М.: Недра, 1978. С. 230.

63. Сукнев С. В. Нелокальные и градиентные критерии разрушения квазихрупких материалов при сжатии //Физическая мезомеханика. 2018. Т. 21, №. 4. С. 22-32.
64. Нейбер Г. Концентрация напряжений. – М.-Л.: Гостехиздат, 1947, с. 30
65. Ионов В. Н., Мальцев Л. Е. Частично ортогональные корректирующие тензоры напряжений // Изв. вузов. Матем. 1973. № 4 (131). С. 21–26
66. П. Ф. Папкович Выражение общего интеграла основных уравнений теории упругости через гармонические функции // Известия Академии наук СССР. VII серия. Отделение математических и естественных наук. 1932. № 10. С. 1425–1435.
67. Новожилов В. В. О необходимом и достаточном критерии хрупкой прочности. // ПММ. 1969. Т. 33, № 2. С. 212-222.
68. Новожилов В. В. К основам теории равновесных трещин в упругих телах // ПММ. 1969. Т. 33, №. 5. С. 797-812.
69. Daniel I. M. Behavior of graphite/epoxy plates with holes under biaxial loading: Deformation and failure of graphite/epoxy plates with holes under biaxial tension were studied experimentally and the strength related to prediction based on an average stress criterion and on tensor polynomial criterion for the lamina // Experimental Mechanics. 1980. Vol. 20. pp. 1-8.
70. Whitney J. M., Nuismer R. J. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations // Journal of composite materials. 1974. Vol. 8., №. 3. pp. 253-265.
71. Seweryn A. Brittle fracture criterion for structures with sharp notches // Engineering Fracture Mechanics. 1994. Vol. 47, №. 5. pp. 673-681.
72. Seweryn A. A non-local stress and strain energy release rate mixed mode fracture initiation and propagation criteria // Engineering fracture mechanics. 1998. Vol. 59, №. 6. pp. 737-760.
73. Корнев В. М. Интегральные критерии хрупкой прочности трещиноватых тел с дефектами при наличии вакансий в носике трещины. Прочность

компактированных тел типа керамик // Прикладная механика и техническая физика. 1996. Т. 37, №. 5. С. 168-177.

74. Серенсен С. В., Крамаренко О. Ю. Конструкционная прочность глобулярного чугуна // Вестник машиностроения. 1959. №. 1. С. 75-84.
75. Серенсен С. В., Стреляев В. С., Болотников Б. И. Определение расчетных характеристик прочности стеклопластиков в зонах концентрации напряжений // Проблемы прочности. 1972. №. 10. С. 3-9.
76. Сукнев С. В. Нелокальные критерии разрушения. Критерий напряжений в точке // Наука и образование. 2008. №1. С. 27-32.
77. Lajtai E. Z. Effect of tensile stress gradient on brittle fracture initiation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1972. Vol. 9, №. 5. pp. 569-578.
78. Nesetova V., Lajtai E. Z. Fracture from compressive stress concentrations around elastic flaws //International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1973. Vol. 10, №. 4. pp. 265-284.
79. Carter B. J., Lajtai E. Z., Yuan Y. Tensile fracture from circular cavities loaded in compression // International journal of fracture. 1992. Vol. 57. pp. 221-236.
80. Whitney J. M., Nuismer R. J. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations // Journal of composite materials. 1974. Vol. 8, №. 3. pp. 253-265.
81. Трубецкой К.Н., Потапов М. Г., Виницкий К.Е., Мельников Н.Н. и др. Открытые горные работы. Справочник. // М.: Горное бюро, 1994.
82. Грищенко А. И. Семенов А.С., Мельников Б.Е. Моделирование процессов деформирования и разрушения керна при его извлечении с больших глубин // Записки Горного института. 2021. Т.248. С.243-252. DOI:10.31897/PMI.2021.2.8
83. Макридин Н. И., Максимова И. Н., Соколова Ю. А., Суров И. А. Анализ трещиностойкости гранита и известняка с позиций механики разрушения // Academia. Архитектура и строительство. 2014. №3.

84. Хафизова Э. Н., Панченко Ю. Ф., Панченко Д. А. Применение технологических отходов дробления горных пород при разработке составов цементных бетонов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2021. Т.18, № 6(82). С. 790-799. DOI 10.26518/2071-7296- 2021-18-6-790-799
85. Ревва В. Н. Прогнозирование устойчивости кровли в окрестности горной выработки с позиции механики разрушения // ЖТПМ. 2017. №1 (58).
86. Ефимов, В. П. Влияние скорости нагружения на трещиностойкость горных пород с позиций кинетической термофлуктуационной концепции разрушения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 2. С. 57-63.
87. Першин Г. Д., Пшеничная Е. Г., Мажитов А. М. Энергетические критерии квазихрупкого разрушения горных пород в технологических процессах их добычи и первичной переработки // Горная промышленность. 2022. № 2. С. 84–89. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-84-89
88. Макаров П. В., Смолин И. Ю., Перышкин А. Ю., Кульков А. С., Бакеев Р. А. Экспериментальное и численное изучение катастрофической стадии разрушения горных пород и горных массивов // Физическая мезомеханика. 2020. №5 (23). С. 43-55. DOI 10.24411/1683-805X-2020-15004
89. Экономидес М., Олини Р., Валько П. Унифицированный дизайн гидроразрыва пласта: от теории к практике // Москва-Ижевск: Институт компьютерных технологий. 2007. С. 25.
90. Шевцова, А. А. Методика лабораторных исследований поведения трещины гидроразрыва, инициированной закачкой жидкостей в широком диапазоне их вязкостей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № S8. С. 3-17. – DOI 10.25018/0236_1493_2023_7_8_3
91. Андреева С. В., Сулейманов Э. Д., Кулбаева Д. Р., Трофимчук А. С., Хабибуллин Г. И., Грищенко В. А. Подходы к извлечению остаточных

запасов нефти на поздней стадии разработки в условиях сложного геологического строения на примере Северо-Салымского месторождения // Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 2. С. 15–21. DOI: 10.24412/2076-6785-2024-2-15-21

92. Оксенойд Е. Е., Поповская В. Г., Печерин Т. Н., Демичев П. С. Динамика освоения трудноизвлекаемых запасов баженовско-абалакского нефтегазоносного комплекса на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // Геология нефти и газа. 2022. № 2. С. 95–104. DOI: 10.31087/0016-7894-2022-2-95-104
93. Клишин В. И., Опрук Г. Ю., Гоголин В. А., Связев С. И. Сохранение целика и подготовительного штрека за счет разупрочнения кровли вышележащей лавы направленным гидроразрывом // Уголь. 2023. № 4. С. 23-30. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-4-23-30
94. Ушаков С. Ю., Леконцев Ю. М., Сажин П. В., Мезенцев Ю. Б. Теоретическое обоснование дебита метана из угольного пласта после гидроразрыва // Уголь. 2022. №5 (1154). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-5-72-75
95. Tan P., Pang H., Jin Y., Zhou Z. Experiments and analysis of hydraulic fracturing in hot dry rock geothermal reservoirs using an improved large-size high-temperature true triaxial apparatus // Natural Gas Industry B. 2024. Vol. 11, Iss. №1. p.p. 83-94. DOI: 10.1016/j.ngib.2024.01.002
96. You W., Tubing Y., Dengdeng Z., Qiang L., Yongjun C. Research on the effect of thermal treatment on the crack resistance curve of marble using notched semi-circular bend specimen // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2022. Vol. 119, № 103344. DOI: 10.1016/j.tafmec.2022.103344
97. Куксенко В. С., Орлов Л. Г., Фролов Д. И. Концентрационный критерий укрупнения трещин в гетерогенных материалах // Механика композитных материалов. 1979. №. 2. С. 195-201.
98. Трофимов В. А., Кубрин С. С., Филиппов Ю. А., Харитонов И. Л. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния

вмещающего массива и пологого мощного угольного пласта при завершении отработки выемочного столба // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 8. С. 42–56. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-42-56.

99. Хлопцов Д. В., Винников В. А. Определение давления горных пород на крепь скважины // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 8. С. 74-82. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-74-82

100. Кольчугин А. Н., Зиганшин Э. Р., Морозов В. П., Быстров Е. С., Королев Э. А., Гильфанов С. И. Геомеханические и литологические характеристики отложений верейского горизонта среднего карбона в связи с прогнозированием применения технологии гидроразрыва пласта, на примере Ивинского месторождения юго-востока Татарстана // Георесурсы. 2022. Т. 24, № 4. С. 65–74. DOI: 10.18599/grs.2022.4.5

101. Новокрещенных Д. В., Распопов А. В. Направления повышения эффективности гидроразрыва пласта в карбонатных отложениях месторождений Республики Коми и Ненецкого автономного округа // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2020. Т.20, №2. С.175–181. DOI: 10.15593/2224-9923/2020.2.7

102. Кашников Ю. А., Ашихмин С. Г., Кухтинский А. Э., Шустов Д. В. О связи коэффициентов трещиностойкости и геофизических характеристик горных пород месторождений углеводородов // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 83—90. DOI:10.31897/PMI.2020.1.83

103. Сайт ООО «ГеоНавТех» [Электронный ресурс] – https://geonaft.ai/technologies/fracsolver/

104. Савенков Е. Б., Борисов В. Е. Математическая модель развития трещины гидроразрыва пласта в трехмерной пороупругой среде // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2018. № 1. С. 5–17. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.1.01

105. Савенков Е. Б., Борисов В. Е., Критский Б. В. ГРП в "расширенной" постановке: математическое моделирование // Neftegaz.RU. 2019. №6. С. 89-90.

106. Киселев А. Б., Кайжуй Л., Смирнов Н. Н., Пестов Д. А. Моделирование течения жидкости в трещине гидроразрыва неоднородно трещиностойкого пласта в плоско-трехмерной постановке // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2021. № 2. С. 155-28. DOI 10.31857/S0568528121020055. EDN TQDGAV.

107. Wu X., Guo Q., Li P., Ren F., Zhang J., Cai M. Investigating the effect of temperature changes on the physical field of surrounding rock in a deep gold mine // Advances in Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 2021. №. 1. ID: 8490864. DOI: 10.1155/2021/8490864

108. Есьман Б. И., Дедусенко Г. Я., Яишникова Е. А. Влияние температуры на процесс бурения глубоких скважин // М.: Гостоптехиздат. 1962. С. 51.

109. Сюндюков А. В., Сагитов Д. К. Факторы влияния на развитие трещин авто-ГРП // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2023. №1. С. 73-84. DOI: 10.31660/0445-0108-2023-1-73-84

110. Zhao Y., Zhang L., Liao J., Wang W., Liu Q., Tang L. Experimental study of fracture toughness and subcritical crack growth of three rocks under different environments // International Journal of Geomechanics. 2020. Vol. 20, №. 8. p. 04020128. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001779

111. Копытов А. И., Масаев Ю. А., Масаев В. Ю. Исследование влияния физических свойств горных пород на прочностные показатели породных обнажений // Вестник КузГТУ. 2023. №4 (158). С. 92-101. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-4-92-101

112. Feng Z., Zhao Y., Liu D. Permeability Evolution of Thermally Cracked Granite with Different Grain Sizes // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2021. Vol. 54. p.p. 1953-1967. DOI:10.1007/s00603-020-02361-3

113. Shihao Y., Qiang S., Pengfei L., Jishi G., He Z. Fracture properties and dynamic failure of three-point bending of yellow sandstone after subjected to

high-temperature conditions // Engineering Fracture Mechanics. 2022, vol. 256, № 108366. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2022.108366

114. Gan F., Chun Z., Xiaochuan W., Shibin T. Thermal effects on prediction accuracy of dense granite mechanical behaviors using modified maximum tangential stress criterion // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2023. Vol. 15. 1734-1748.
115. Hongyuan Z., Zaobao L., Wanqing S., Tao F., Guangze Z. Mechanical property and thermal degradation mechanism of granite in thermal-mechanical coupled triaxial compression // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2022. Vol. 160. 105270. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2022.105270
116. Peng K., Lv H., Zou O., Wen Z., Zhang, Y. Evolutionary characteristics of mode-I fracture toughness and fracture energy in granite from different burial depths under high-temperature effect // Engineering Fracture Mechanics. 2020. Vol. 239. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.107306
117. Gan F., Xiaochuan W., Yong K., Zetian Z. Effect of thermal cycling-dependent cracks on physical and mechanical properties of granite for enhanced geothermal system // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2020. Vol. 134. 104476. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104476.
118. Guo Q., Su H., Liu J., Yin Q., Jing H., Yu L. An experimental study on the fracture behaviors of marble specimens subjected to high temperature treatment // Engineering Fracture Mechanics. 2020. Vol. 225. № 106862. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2019.106862
119. Ouchterlony F. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1988. Vol. 25, Iss. 2. p.p. 71-96.
120. Черепецкая Е. Б., Безруков В. И. Оценка коэффициента трещиностойкости при циклическом воздействии температурными полями // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. №1. С. 49–58. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_49.

121. Ситников, С. В., Гурьянов М. О., Бабицкая К. И. Регулирование энергетического состояния залежи в условиях высокой трещиноватости, расчлененности пласта и вязкости нефти // Ашировские чтения. 2021. Т. 1, № 1(13). С. 365-368.

122. Жуков, В. С. Изменения упругих свойств коллекторов нефти и газа при росте температуры // Геофизические исследования. 2021. Т. 22, № 2. С. 62-81. DOI 10.21455/gr2021.2-4. – EDN KJEJMC.

123. Su H., Jing H., Yu L., Yin Q., Han G. Mode I fracture behaviour of sandstone after heat treatment // Géotechnique Letters. 2017. Vol. 7(1). p.p. 47–52. DOI: 10.1680/jgele.16.00136

124. Fowell R. J. Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1995. Vol. 32, Iss. 1. p.p. 57-64. DOI: 10.1016/0148-9062(94)00015-U

125. Kuruppu M. D., Obara Y., Ayatollahi M. R., Chong K. P., Funatsu T. ISRM-Suggested Method for Determining the Mode I Static Fracture Toughness Using Semi-Circular Bend Specimen // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2013. Vol. 47, Iss. 1. p.p. 267-274. DOI: 10.1007/s00603-013-0422-7

126. Tutluoglu L., Keles C. Mode I fracture toughness determination with straight notched disk bending method // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2011. Vol. 48, Iss. 8. p.p. 1248-1261. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2011.09.019

127. Cui Z-d., Liu D-a., An G-m., Sun B., Zhou M., Cao F-q. A comparison of two ISRM suggested chevron notched specimens for testing mode-I rock fracture toughness // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2010. Vol. 47, Iss. 5. pp. 871-876. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2009.12.015

128. Dai F., Wei M.D., Xu N.W., Zhao T., Xu Y. Numerical investigation of the progressive fracture mechanisms of four ISRM-suggested specimens for

determining the mode I fracture toughness of rocks // Computers and Geotechnics. 2015. Vol. 69. pp. 424-441. DOI: 10.1016/j.compgeo.2015.06.011

129. Schmidt R. A. Fracture-toughness testing of limestone // Experimental Mechanics. 1976. Vol. 16. pp. 161–167.

130. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Издательство стандартов. 1985. 163-164 с.

131. ГОСТ 29167-91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Издательство стандартов. 1991. С. 2-3.

132. Ulusay R. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014 // Springer. 2015. Vol. 74. p.p. 1499-1500. DOI 10.1007/978-3-319-07713-0

133. Schmidt R. A. Fracture-toughness testing of limestone // Experimental Mechanics. 1976. Vol. 16. p.p. 161–167.

134. Макаров П. В., Еремин М. О., Костандов Ю. А. Определение времени предразрушения для образцов из габбро в модели накопления повреждений // Физическая мезомеханика. 2013. №5.

135. Дерюгин Е. Е., Богданов А. А., Определение трещиностойкости образцов с шевронным надрезом с использованием трехточечного изгиба // Письма в ЖТФ. 2021. Том 47, выпуск 20. С. 35–37. DOI: 10.21883/PJTF.2021.20.51612.18936

136. Jianping Z., Yulin L., Xiaoyan Z., Zhihong Z., Tingzheng W. The effects of thermal treatments on the subcritical crack growth of Pingdingshan sandstone at elevated high temperatures // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018. Vol. 51. p.p. 3439-3454. DOI: 10.1007/s00603-018-1527-9

137. Fan X., Lin H., Cao R. Bending properties of granite beams with various section-sizes in three-point bending tests // Geotechnical and Geological Engineering. 2019. Vol. 37. p.p. 1-11. DOI: 10.1007/s10706-018-0504-0

138. Efimov, V. P. Effect of loading rate on fracture toughness within the kinetic concept of thermal fluctuation mechanism of rock failure // Journal of Mining Science. 2016. Vol. 52, No. 2. p.p. 274-278. – DOI 10.1134/S1062739116020406

139. Павлов И. А., Саватеева Е. В. Исследование процесса трещинообразования в образцах гетерогенных сред комплексом методов // Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2017): сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 27–29 ноября 2017 г. — Томск: Изд-во ТПУ. 2017. С. 268-269.

140. Павлов И. А., Винников В. А., Павлов К. А. Лабораторная установка для исследования трещиностойкости пород-коллекторов // Ашировские чтения. 2023. Т. 2, № 15. С. 13-23.

141. Yan-jun S., Xin H., Jiang-qiang Y., Shao-fei W., Chun-hu Z. Thermal cracking characteristics of high-temperature granite suffering from different cooling shocks // International Journal of Fracture. 2020. Vol. 225. p.153–168. DOI: 10.1007/s10704-020-00470-2.

142. Yu L., Peng H-W., Zhang Y., Li G. Mechanical test of granite with multiple water–thermal cycles // Geotherm Energy. 2021. Vol. 9, № 2. DOI: 10.1186/s40517-021-00186-z.

143. Винников, В. А., Павлов И. А. Изменение коэффициента трещиностойкости горных пород при умеренном тепловом воздействии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. № 3. С. 5-16. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_3_0_5.

144. Павлов И. А. Изменение коэффициента трещиностойкости серого мрамора с разным размером зерен при умеренном тепловом воздействии // Актуальные вопросы прочности: Сборник тезисов LXVII Международной конференции, Екатеринбург, 02–05 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет. 2024. С. 326-327.

145. Павлов И. А. Влияние флюидонасыщения на трещиностойкость известняков при умеренном тепловом воздействии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 6 (специальный выпуск 1 behaviour 6). С. 3–13. DOI 10.25018/0236_1493_2024_6_16_3.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты испытаний образцов

Методика проведения экспериментов описана в разделе 2.3.

В таблицах представлены результаты всех испытаний, проведенных в рамках диссертационного исследования. Сноски у значений следует понимать следующим образом:

[1] – результат эксперимента не был учтен ввиду недопустимого отклонения плоскости образованной трещины относительно нанесенного надпила, имитируеющего краевую трещину;

[2] – были нарушены условия проведения эксперимента.

[*] – расчет коэффициента вариации производился без учета несостоявшихся экспериментов.

Таблица А1 – Результаты испытаний габбро

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}*, %
1.1.3	20	506,85	2,392	3,62
1.1.4		571,40	2,568	
1.1.5		539,30	2,513	
1.1.6[1]		500,15	2,360	
1.1.7	40	514,20	2,363	4,67
1.1.8		524,90	2,588	
1.1.9		526,75	2,437	
1.1.10[1]		585,75	2,807	
1.1.11	60	492,80	2,430	3,79
1.1.12[1]		499,80	2,522	
1.1.13		481,00	2,472	
1.1.14		440,00	2,298	
1.1.15[1]	80	471,05	2,464	1,44
1.1.16		491,30	2,384	
1.1.17		466,95	2,319	
1.1.18		485,40	2,368	
1.1.19	100	413,40	2,118	7,19
1.1.20		452,30	2,138	
1.1.21		391,85	1,874	
1.1.22[1]		399,25	1,850	

Таблица А2 – Результаты испытаний гранита

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}^*, %
1.2.3	20	381,45	1,796	8,07
1.2.7		337,15	1,655	
1.2.10		325,35	1,638	
1.2.11		391,40	1,943	
1.2.4	40	393,20	1,826	17,60
1.2.5		320,15	1,496	
1.2.6[1]		435,25	2,172	
1.2.8		379,50	1,868	
1.2.9	60	337,05	1,622	14,08
1.2.12		265,90	1,289	
1.2.13		283,85	1,414	
1.2.14		227,15	1,170	
1.2.15	80	293,95	1,399	7,41
1.2.16		306,85	1,435	
1.2.17		334,90	1,646	
1.2.18		303,55	1,465	
1.2.19	100	238,00	1,131	9,28
1.2.20		285,55	1,357	
1.2.21[1]		205,65	1,055	
1.2.22		303,35	1,296	

Таблица А3 – Результаты испытаний известняка

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}^*, %
2.1.1	20	218,05	1,013	8,65
2.1.2		214,00	0,957	
2.1.3		198,50	0,919	
2.1.4		189,30	0,868	
2.1.5		202,55	0,929	
2.1.6[1]		135,95	0,624	
2.1.7		215,10	0,989	
2.1.8		171,70	0,782	
2.1.9[1]		139,25	0,645	
2.1.10		218,40	1,072	
2.1.41		185,10	0,892	
2.1.42		188,95	0,910	
2.1.44		210,70	1,025	

Продолжение таблицы А3 – Результаты испытаний известняка

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}^*, %
2.1.11	40	228,75	1,042	17,07
2.1.12		180,85	0,824	
2.1.13[1]		316,45	1,476	
2.1.14		190,80	0,869	
2.1.15[1]		132,65	0,614	
2.1.16		164,70	0,758	
2.1.17		193,35	0,881	
2.1.18		238,35	1,104	
2.1.19		152,05	0,697	
2.1.20		192,25	0,932	
2.1.46		169,85	0,829	
2.1.47		224,30	1,091	
2.1.21	60	203,30	0,930	16,94
2.1.22		216,20	0,994	
2.1.23		186,65	0,875	
2.1.24		211,80	0,960	
2.1.25		150,20	0,730	
2.1.26		150,90	0,783	
2.1.27		214,30	0,976	
2.1.28		194,35	0,903	
2.1.29		155,70	0,762	
2.1.30		153,45	0,691	
2.1.50		115,50	0,566	
2.1.52		151,30	0,759	
2.1.53		171,90	0,840	
2.1.54		119,90	0,592	
2.1.31	80	216,15	0,994	16,37
2.1.32		174,65	0,891	
2.1.33		193,35	0,904	
2.1.34		109,40	0,537	
2.1.35		187,10	0,850	
2.1.36		203,35	0,944	
2.1.37		188,25	0,874	
2.1.38		198,90	0,915	
2.1.39[1]		223,95	1,071	
2.1.40		163,20	0,737	
2.1.55		129,85	0,638	
2.1.56		158,65	0,783	
2.1.57		177,75	0,880	

Продолжение таблицы А3 – Результаты испытаний известняка

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}^*, %
2.1.58	100	179,55	0,882	20,72
2.1.59		113,45	0,556	
2.1.60		172,35	0,865	
2.1.61		172,35	0,869	
2.1.62		155,15	0,648	
2.1.63		129,30	0,571	
2.1.64		141,45	0,627	

Таблица А4 – Результаты испытаний белого мрамора

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}^*, %
2.2.1	20	72,60	0,354	2,08
2.2.2		117,60	0,619	
2.2.3		121,95	0,570	
2.2.4		100,60	0,496	
2.2.5		92,50	0,455	
2.2.6		114,95	0,626	
2.2.7		95,85	0,471	
2.2.8		70,75	0,367	
2.2.9		84,00	0,401	
2.2.10		92,90	0,457	
2.2.41		94,30	0,424	
2.2.42		73,35	0,352	
2.2.43		78,50	0,379	
2.2.44		76,25	0,360	
2.2.57		88,80	0,428	
2.2.58		73,30	0,353	
2.2.11	40	89,55	0,406	15,50
2.2.12		80,35	0,374	
2.2.13		81,45	0,406	
2.2.14[1]		103,90	0,528	
2.2.15[1]		117,15	0,589	
2.2.16		94,35	0,485	
2.2.17		90,25	0,477	
2.2.18		71,50	0,344	
2.2.19[1]		107,60	0,561	
2.2.20[1]		59,30	0,272	
2.2.45		66,00	0,314	
2.2.46[1]		100,30	0,523	
2.2.47		68,20	0,325	
2.2.48		80,00	0,388	

Продолжение таблицы А4 – Результаты испытаний белого мрамора

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}^*, %
2.2.21	60	50,15	0,259	14,56
2.2.22		73,45	0,354	
2.2.23		78,60	0,414	
2.2.24		75,65	0,381	
2.2.25		71,20	0,344	
2.2.26[1]		90,05	0,477	
2.2.27		65,30	0,322	
2.2.28		76,40	0,381	
2.2.29		63,50	0,312	
2.2.30		80,80	0,373	
2.2.49[1]		42,40	0,199	
2.2.50		56,85	0,276	
2.2.51		57,45	0,291	
2.2.52[1]		88,40	0,440	
2.2.31[1]	80	77,00	0,386	13,20
2.2.32		72,20	0,348	
2.2.33		58,95	0,275	
2.2.34		58,55	0,286	
2.2.35		57,85	0,281	
2.2.36[1]		72,95	0,381	
2.2.37		73,70	0,379	
2.2.38		68,50	0,317	
2.2.39[1]		80,65	0,408	
2.2.40		57,50	0,269	
2.2.53		58,60	0,267	
2.2.54		58,55	0,255	
2.2.55		65,60	0,318	
2.2.56		58,95	0,268	
2.2.59	100	46,80	0,225	11,68
2.2.60		50,10	0,243	
2.2.61		50,85	0,254	
2.2.62		57,10	0,264	
2.2.63		50,45	0,227	
2.2.64		48,65	0,234	
2.2.65		36,10	0,174	
2.2.66		47,15	0,227	

Таблица А5 – Результаты испытаний серого мрамора среднезернистого

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}^*, %
2.3.1	20	201,70	1,009	8,16
2.3.2		177,05	0,892	
2.3.3		184,70	0,924	
2.3.4		203,90	1,035	
2.3.5		183,65	0,926	
2.3.6		200,95	0,969	
2.3.7		180,30	0,878	
2.3.8		219,00	1,104	
2.3.9		177,75	0,881	
2.3.10	40	161,15	0,798	5,75
2.3.11		131,65	0,662	
2.3.12		140,20	0,702	
2.3.13		139,45	0,701	
2.3.14		135,70	0,654	
2.3.15		124,65	0,601	
2.3.16		64,55	0,313	
2.3.17		132,05	0,645	
2.3.18		37,25	0,170	
2.3.19[1]	60	42,80	0,208	8,47
2.3.20		111,40	0,546	
2.3.22		115,05	0,538	
2.3.23		121,35	0,603	
2.3.24[1]		160,80	0,817	
2.3.25		116,15	0,564	
2.3.26		102,10	0,521	
2.3.27		112,80	0,551	
2.3.28		88,40	0,453	
2.3.29	80	55,65	0,286	14,96
2.3.30		79,20	0,391	
2.3.31		91,00	0,440	
2.3.32[1]		39,05	0,198	
2.3.33		87,70	0,452	
2.3.34		79,60	0,419	
2.3.35[1]		50,10	0,250	
2.3.36		85,50	0,435	
2.3.37		95,05	0,473	
2.3.38[1]	100	49,05	0,237	3,98
2.3.39		72,20	0,369	
2.3.40		79,20	0,397	
2.3.41		77,40	0,400	
2.3.42		83,65	0,403	
2.3.43[1]		94,35	0,467	

Таблица А6 – Результаты испытаний серого мрамора мелкозернистого

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}^*, %
2.4.1	20	281,10	1,350	10,57
2.4.2		282,60	1,373	
2.4.3		313,95	1,571	
2.4.4		287,35	1,424	
2.4.5		287,75	1,340	
2.4.6		278,90	1,396	
2.4.7		377,00	1,868	
2.4.8		268,90	1,332	
2.4.9		296,60	1,401	
2.4.10		275,55	1,352	
2.4.41		249,55	1,236	
2.4.42		283,15	1,403	
2.4.43		319,60	1,616	
2.4.44		291,25	1,468	
2.4.57		304,65	1,509	
2.4.11	40	280,00	1,397	6,16
2.4.12		277,40	1,328	
2.4.13		269,65	1,336	
2.4.14		274,05	1,395	
2.4.15		302,45	1,499	
2.4.16		313,20	1,552	
2.4.17		270,75	1,328	
2.4.18		291,40	1,395	
2.4.19		291,80	1,515	
2.4.20		259,35	1,267	
2.4.45[1]		357,60	1,808	
2.4.46		287,55	1,405	
2.4.47		274,25	1,410	
2.4.48		304,15	1,518	
2.4.21	60	252,30	1,229	9,36
2.4.22		316,50	1,611	
2.4.23		306,15	1,558	
2.4.24		305,10	1,480	
2.4.25		245,65	1,205	
2.4.26		287,35	1,448	
2.4.27		247,90	1,262	
2.4.28		300,60	1,553	
2.4.29		281,80	1,434	
2.4.30		272,20	1,410	
2.4.49		312,70	1,549	
2.4.50		264,10	1,277	
2.4.51		273,70	1,356	
2.4.52		300,20	1,462	

Продолжение таблицы А6 – Результаты испытаний серого мрамора мелкозернистого

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}*, %
2.4.31	80	282,20	1,487	7,13
2.4.32		256,35	1,324	
2.4.33		261,90	1,279	
2.4.34		249,75	1,291	
2.4.35		216,95	1,083	
2.4.36		237,95	1,259	
2.4.37		253,05	1,266	
2.4.38		255,65	1,254	
2.4.39		282,90	1,359	
2.4.40		247,55	1,202	
2.4.53		276,00	1,367	
2.4.54		261,65	1,306	
2.4.55		277,50	1,375	
2.4.56		258,75	1,299	
2458	100	285,40	1,453	5,68
2459		275,20	1,406	
2460		280,40	1,310	
2461		260,50	1,291	

Таблица А7 – Результаты испытаний серого мрамора крупнозернистого

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}*, %
2.5.1	20	134,70	0,640	6,14
2.5.2		136,15	0,681	
2.5.3		146,15	0,742	
2.5.4[1]		98,15	0,497	
2.5.5		135,05	0,681	
2.5.6	40	133,55	0,673	11,76
2.5.7		145,75	0,734	
2.5.8		112,55	0,595	
2.5.9		120,30	0,621	
2.5.10		112,15	0,540	
2.5.11	60	103,65	0,494	8,47
2.5.12		108,10	0,516	
2.5.13		93,00	0,434	
2.5.14		88,15	0,425	
2.5.15		103,15	0,489	

Продолжение таблицы А7 – Результаты испытаний серого мрамора крупнозернистого

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}^*, %
2.5.16	80	83,65	0,400	11,37
2.5.25		98,05	0,432	
2.5.17[2]		-	-	
2.5.18		101,30	0,488	
2.5.19		96,15	0,463	
2.5.20		112,00	0,538	
2521	100	84,10	0,412	7,82
2522		70,00	0,344	
2523		79,95	0,370	
2524		82,15	0,396	

Таблица А8 – Результаты испытаний ненасыщенного известняка

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}^*, %
3.1.1	20	181,25	0,918	3,68
3.1.2[1]		138,60	0,676	
3.1.9		216,30	1,045	
3.1.13		218,50	1,045	
3.1.30		230,20	1,055	
3.1.31		238,65	1,115	
3.1.33		229,80	1,084	
3.1.34		237,15	1,119	
3.1.46		220,20	1,053	
3.1.52		261,50	1,238	
3.1.58		238,65	1,143	
3.1.59		220,95	1,054	
3.1.60		222,05	1,080	
3.1.77		232,05	1,091	
3.1.78		231,60	1,079	
3.1.82		222,75	1,059	
3.1.85		234,20	1,120	
3.1.86		221,65	1,071	
3.1.89		216,10	1,048	
3.1.93		233,45	1,120	
3.1.97		217,55	1,042	
3.1.109		243,00	1,140	
3.1.110		229,40	1,116	
3.1.112		229,40	1,086	
3.1.127		230,50	1,107	
3.1.130		219,05	1,025	
3.1.132		216,50	1,043	
3.1.135		202,10	0,997	
3.1.144		241,90	1,177	
3.1.224		230,55	1,080	

Продолжение таблицы А8 – Результаты испытаний ненасыщенного известняка

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}*, %
3.1.3	40	168,75	0,824	6,99
3.1.4		231,40	1,115	
3.1.10		205,60	1,004	
3.1.55		236,45	1,147	
3.1.128		209,15	1,011	
3.1.32		207,65	1,014	
3.1.57		243,45	1,126	
3.1.80		232,00	1,134	
3.1.193		210,95	1,030	
3.1.15		206,55	0,992	
3.1.68		210,60	1,000	
3.1.207		211,35	1,001	
3.1.23		219,45	1,090	
3.1.91		224,20	1,051	
3.1.172		204,65	0,996	
3.1.232		202,85	0,957	
3.1.95		200,25	0,997	
3.1.115		216,25	1,050	
3.1.26		202,95	0,984	
3.1.134		214,35	1,067	
3.1.151		207,00	0,997	
3.1.170		231,35	1,214	
3.1.45		210,30	1,038	
3.1.146		234,55	1,111	
3.1.154		217,25	1,046	
3.1.155		209,50	1,016	
3.1.156		203,60	1,011	
3.1.160		224,25	1,083	
3.1.231		216,85	1,088	

Продолжение таблицы А8 – Результаты испытаний ненасыщенного известняка

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}*, %
3.1.5	60	215,20	1,038	6,02
3.1.6		231,05	1,129	
3.1.11		237,65	1,195	
3.1.161		206,95	1,000	
3.1.168		225,45	1,112	
3.1.56		232,05	1,129	
3.1.174		197,80	0,941	
3.1.191		199,65	0,982	
3.1.75		208,50	1,018	
3.1.87		215,90	1,037	
3.1.99		195,60	0,991	
3.1.116		234,30	1,121	
3.1.125		211,10	1,017	
3.1.35		187,80	0,937	
3.1.153		215,05	1,071	
3.1.219		203,60	1,053	
3.1.28		215,80	1,016	
3.1.37		217,25	0,998	
3.1.18		228,35	1,108	
3.1.19		217,30	1,054	
3.1.36		215,80	1,076	
3.1.49		218,35	1,052	
3.1.50		207,65	1,021	
3.1.162		213,15	1,027	
3.1.167		200,60	0,963	
3.1.169		240,85	1,155	
3.1.187		219,80	1,059	
3.1.194		222,40	1,022	
3.1.233		222,05	1,048	
3.2.124		227,95	1,169	
3.2.137		215,00	0,938	
3.2.106		180,35	0,887	
3.2.107		216,15	1,063	
3.2.108		207,25	1,009	
3.2.111		237,15	1,187	
3.2.105		184,50	0,921	
3.2.126		197,75	0,984	

Продолжение таблицы А8 – Результаты испытаний ненасыщенного известняка

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}*, %
3.1.7	80	175,40	0,859	11,79
3.1.8		201,55	0,939	
3.1.12		141,15	0,687	
3.1.81		202,60	0,973	
3.1.100		184,20	0,874	
3.1.215		163,25	0,842	
3.1.137		190,80	0,903	
3.1.17		233,90	1,146	
3.1.186		166,45	0,802	
3.1.16		230,55	1,130	
3.1.51		220,25	1,061	
3.1.148		209,20	0,994	
3.1.217		214,35	1,023	
3.1.120		202,90	0,981	
3.1.131		218,40	1,045	
3.1.140		250,85	1,176	
3.1.198		226,10	1,115	
3.1.200		245,35	1,141	
3.1.220		194,05	0,997	
3.1.48		239,85	1,155	
3.1.138		186,70	0,913	
3.1.84		210,65	1,011	
3.1.202		192,20	0,919	
3.1.195		227,90	1,061	
3.1.199		181,45	0,865	
3.1.201		171,55	0,810	
3.1.203		198,05	0,947	
3.1.204		203,25	0,963	
3.1.234		243,45	1,221	

Продолжение таблицы А8 – Результаты испытаний ненасыщенного известняка

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}*, %
3.2.9	100	228,65	1,127	13,87
3.2.10[1]		268,85	1,244	
3.2.39		247,80	1,135	
3.2.45		243,05	1,239	
3.2.87		231,20	1,127	
3.2.26		224,25	1,104	
3.2.29		238,60	1,225	
3.2.33		181,80	0,775	
3.2.34		237,85	1,164	
3.2.38		242,65	1,112	
3.2.42		220,50	1,060	
3.2.44		206,30	1,054	
3.2.27		202,05	1,041	
3.2.62		210,90	1,102	
3.2.25[1]		236,35	1,223	
3.2.23		197,65	1,015	
3.2.21[1]		255,85	1,324	
3.2.36		196,50	0,994	
3.2.51		207,90	0,962	
3.2.73		195,45	0,948	
3.2.82		211,40	0,998	
3.2.171		139,65	0,689	
3.2.89		219,15	1,010	
3.2.53		163,60	0,828	
3.2.24		184,50	0,956	
3.2.115		188,05	0,948	
3.2.153		234,55	1,115	
3.2.116		166,30	0,818	
3.2.117		194,35	0,949	
3.2.121		143,15	0,724	
3.2.122		218,30	1,066	
3.2.119		190,75	0,932	
3.2.131		176,45	0,873	

Таблица А9 – Результаты испытаний насыщенного известняка

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}^*, %
3.1.102	20	196,25	0,968	8,45
3.1.139		229,45	1,086	
3.1.63		245,30	1,222	
3.1.74		246,00	1,193	
3.1.103		213,55	1,032	
3.1.14		243,85	1,191	
3.1.39		226,50	1,113	
3.1.62		215,05	1,057	
3.1.21		189,95	0,896	
3.1.171		201,05	1,016	
3.1.117		223,55	1,049	
3.1.118		233,90	1,126	
3.1.119		226,55	1,113	
3.1.124		223,20	1,057	
3.1.133		238,70	1,165	
3.1.163		231,30	1,095	
3.1.182		191,15	0,924	
3.1.196		244,20	1,156	
3.1.197		219,15	1,031	
3.1.205		225,05	1,084	
3.1.53		194,50	0,953	
3.1.65		219,90	1,041	
3.1.69		206,65	0,992	
3.1.71		237,55	1,203	
3.1.92		222,10	1,166	
3.1.111		253,05	1,286	
3.1.114		228,35	1,102	
3.1.25		218,40	1,067	
3.1.206		228,85	1,125	

Продолжение таблицы А9 – Результаты испытаний насыщенного известняка

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}^*, %
3.1.143	40	240,15	1,168	11,24
3.1.38		250,10	1,239	
3.1.66		207,65	1,021	
3.1.73		221,35	1,100	
3.1.64		233,55	1,164	
3.1.108		190,10	0,938	
3.1.136		209,95	1,046	
3.1.20		204,05	0,963	
3.1.40		205,55	1,000	
3.1.22		287,85	1,373	
3.1.121		215,85	1,019	
3.1.122		232,80	1,098	
3.1.123		176,80	0,845	
3.1.209		230,95	1,158	
3.1.211		184,90	0,915	
3.1.129		189,25	0,895	
3.1.157		208,45	1,051	
3.1.158		209,55	1,027	
3.1.159		202,15	0,974	
3.1.165		216,20	1,028	
3.1.176		222,10	1,099	
3.1.29		242,00	1,105	
3.1.41		223,55	1,065	
3.1.42		221,70	1,050	
3.1.43		235,35	1,127	
3.1.44		214,00	1,010	
3.1.47		180,75	0,842	
3.1.54		190,35	0,949	
3.1.208		181,60	0,911	

Продолжение таблицы А9 – Результаты испытаний насыщенного известняка

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}^*, %
3.1.90	60	190,80	0,951	13,64
3.1.76		185,65	0,909	
3.1.96		178,30	0,853	
3.1.98		236,10	1,205	
3.1.145		214,00	1,048	
3.1.149		185,65	0,885	
3.1.24		170,55	0,844	
3.1.27		254,90	1,292	
3.1.61		180,80	0,904	
3.1.67		138,50	0,685	
3.1.223		250,15	1,205	
3.1.164		232,10	1,286	
3.1.212		187,10	0,886	
3.1.213		202,95	1,004	
3.1.218		213,30	1,023	
3.1.185		220,65	1,047	
3.1.221		240,90	1,122	
3.1.72		216,60	1,100	
3.1.79		210,00	1,000	
3.1.83		204,80	1,004	
3.1.88		206,65	1,016	
3.1.94		217,35	1,044	
3.1.105		244,60	1,201	
3.1.106		209,20	0,997	
3.1.180		211,80	1,070	
3.1.184		224,35	1,107	
3.1.188		174,25	0,860	
3.1.189		205,55	1,010	
3.1.210		228,45	1,089	

Продолжение таблицы А9 – Результаты испытаний насыщенного известняка

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}^*, %
3.1.230	80	204,55	1,005	18,76
3.1.228		222,25	1,094	
3.1.178		177,65	0,872	
3.1.181		189,05	0,887	
3.1.222		274,20	1,290	
3.1.70		167,00	0,827	
3.1.107		190,25	0,946	
3.1.147		208,65	1,052	
3.1.101		161,90	0,777	
3.1.152		150,85	0,717	
3.1.126		218,80	1,034	
3.1.166		230,30	1,136	
3.1.216		249,80	1,203	
3.1.226		211,15	1,110	
3.1.236		212,25	1,014	
3.1.241		214,45	1,006	
3.1.225		215,55	1,039	
3.1.240		214,05	1,076	
3.1.142		224,75	1,112	
3.1.173		244,30	1,260	
3.1.175		242,80	1,181	
3.1.177		255,35	1,217	
3.1.183		215,55	1,041	
3.1.192		224,00	1,026	
3.1.227		229,20	1,131	
3.1.235		229,90	1,142	
3.1.190		210,40	1,025	
3.1.229		234,00	1,123	
3.1.214		219,65	1,072	
3.2.184		155,45	0,784	
3.2.67		191,90	0,965	
3.2.185		162,45	0,764	
3.2.188		179,75	0,883	
3.2.146		137,40	0,685	
3.2.162		149,90	0,732	
3.2.103		96,85	0,485	
3.2.194		136,30	0,695	

Продолжение таблицы А9 – Результаты испытаний насыщенного известняка

Образец	Температура, ºС	P_c, Н	K_{IC}, МПа*м^{0,5}	Коэффициент вариации K_{IC}^*, %
3.1.237	100	223,50	1,084	19,21
3.1.238		210,95	1,016	
3.1.239		196,15	0,933	
3.2.1		226,85	1,129	
3.2.3		247,45	1,270	
3.2.5		217,95	1,223	
3.2.4		192,85	1,043	
3.2.7		229,00	1,163	
3.2.11		222,00	1,152	
3.2.12		246,00	1,237	
3.2.13		222,75	1,181	
3.2.14		226,85	1,049	
3.2.15		182,20	0,978	
3.2.16		235,70	1,214	
3.2.17		240,15	1,184	
3.2.18		233,80	1,176	
3.2.2		220,90	1,107	
3.2.37		196,20	0,966	
3.2.6		216,50	1,095	
3.2.19		151,60	0,770	
3.2.172		141,50	0,715	
3.2.98		184,85	0,928	
3.2.145		135,90	0,676	
3.2.49		163,55	0,787	
3.2.132		109,80	0,523	
3.2.135		90,60	0,454	
3.2.197		180,80	0,877	
3.2.97		114,20	0,562	
3.2.43		178,25	0,908	

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Справка о внедрении результатов диссертационной работы

Общество с ограниченной ответственностью
«Газпром геотехнологии»
(ООО «Газпром геотехнологии»)

ул. Строителей, д. 8, корп.1, г. Москва,
Российская Федерация, 119311
тел.: +7 (495) 631-51-22, факс: +7 (495) 631-51-15
e-mail: mail@gazpromgeotech.ru, www.gazpromgeotech.ru
ОКПО 11523652, ОГРН 1037739149447, ИНН 7719002546, КПП 773601001

06.11.2024 № 23

на № _____ от _____

Справка

о внедрении результатов диссертационной работы аспиранта кафедры Физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ МИСИС Павлова Ильи Алексеевича

Результаты диссертационной работы Павлова Ильи Алексеевича на тему «Изучение закономерностей изменения коэффициента трещиностойкости горных пород при умеренном тепловом воздействии для повышения точности моделирования геомеханических процессов» в части температурных зависимостей величины коэффициента трещиностойкости осадочных пород приняты к использованию ООО «Газпром геотехнологии» и будут учтены при проектировании объектов подземного хранения.

И.о. первого заместителя генерального директора – главного инженера ООО «Газпром геотехнологии» **А.А. Скворцов**

Рисунок Б1 – Скан справки о внедрении результатов диссертационной работы