

6
А-59

АКАДЕМИЯ НАУК КИРГИЗСКОЙ ССР
СОВЕТ ПО ГЕОЛОГИИ И ГОРНОМУ ДЕЛУ
ОБЪЕДИНЕННОГО СОВЕТА ПО ТЕХНИЧЕСКИМ
И ЕСТЕСТВЕННЫМ НАУКАМ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ И МЕХАНИКИ ГОРНЫХ ПОРОД

На правах рукописи

МАНСУРОВ ВЛАДИМИР АГЛЕЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД
В КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ
НАГРУЖЕНИЯ

Специальность — 01.02.07. Механика грунтов,
горных пород и сыпучих материалов

Автореферат
диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Фрунзе 1975

113

АКАДЕМИЯ НАУК КИРГИЗСКОЙ ССР

СОВЕТ ПО ГЕОЛОГИИ И ГОРНОМУ ДЕЛУ ОБЪЕДИНЕННОГО
СОВЕТА ПО ТЕХНИЧЕСКИМ И ЕСТЕСТВЕННЫМ НАУКАМ

Институт физики и механики горных пород

На правах рукописи

МАНСУРОВ ВЛАДИМИР АГЛЕЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
И РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ
ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ НАГРУЖЕНИЯ

Специальность - 01.02.07. Механика грунтов,
горных пород и сыпучих материалов

А в т о р е ф е р а т

диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук



Фрунзе - 1975

22.02
9
Работа выполнена в Институте физики и механики горных пород
АН Киргизской ССР.

Научный руководитель:
кандидат технических наук

М.К.Терметчиков

Официальные оппоненты:
доктор технических наук
кандидат технических наук

А.Н.Ставрогин
Ш.А.Мамбетов

Ведущее предприятие:
Ордена Ленина Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта
Академии наук СССР.

Автореферат разослан "___" _____ 1975 г.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1975 г.

на заседании Ученого Совета по геологии и горному делу Объединенного Ученого Совета по техническим и естественным наукам Академии наук Киргизской ССР (г.Фрунзе, бульвар Дзержинского, 30)

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке АН Киргизской ССР (г.Фрунзе, бульвар Дзержинского, 30).

Отзыв, заверенный печатью, просим направлять в двух экземплярах по адресу: г.Фрунзе, бульвар Дзержинского, 30. Институт геологии, ученому секретарю.

Ученый секретарь Совета
по геологии и горному делу
кандидат геолого-минералогических наук

В.В.Мальгин В.В.МАЛЬГИН

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Создание материально-технической базы коммунизма в нашей стране неразрывно связано с резким увеличением объема добычи полезных ископаемых. Технологические особенности ведения горных пород предопределяются физико-механическими свойствами и горногеологическими условиями залегания пород, слагающих конкретное месторождение. Недостаточные знания в этой области тормозят развитие горнодобывающей промышленности и горной науки в целом.

Общезвестно, что числовые значения ряда характеристик свойств горных пород, в частности механических и деформационных, не являются константами и в определенной степени зависят от условий постановки эксперимента и приложения внешних усилий на испытываемый объект.

Диапазон изменения скорости приложения внешних усилий в реальных процессах деформирования и разрушения горных пород очень широк и поэтому выяснение влияния скорости нагружения на несущую способность материала и выяснение физических явлений, происходящих при этом представляет несомненный научный и практический интерес.

В настоящее время существует общепринятое мнение о наличии одной зависимости прочностных свойств горных пород от скорости нагружения. Однако материалы некоторых работ (В.Ч.Курбатов, В.Николау) и анализ экспериментальных данных, опубликованных в ИФМГП с участием автора, говорят о наличии аномальных явлений в диапазоне квазистатического нагружения. При этом одни исследователи считают, что здесь имеет место просто разброс данных и, интерпретируя опытные данные, дают единую зависимость, другие, отмечая сам факт, не дают его объяснения. Поэтому эти работы носят частный характер.

Если учесть, что большинство механических способов разрушения горных пород (бурение, комбайновая выемка, работа струга, механические испытания образцов пород) и деформирование пород, расположенных вблизи ведения очистных работ, сопровождаются относительно небольшими скоростями приложения внешних усилий и деформирования, то вопрос исследования физических особенностей деформирования и разрушения горных пород в квазистатическом диапазоне скоростей нагружения и деформирования представляет безусловный интерес. Решение его позволит установить закономерности, которые необходимо учитывать в инженерных расчетах устойчивости горных выработок и эффективности

разрушения горных пород при различных видах воздействия нагрузок.

Целью работы является выявление закономерностей влияния скорости нагружения на деформируемость и разрушение горных пород в квазистатическом диапазоне и их научное объяснение.

Методика выполнения исследований. При выполнении работы использован комплексный метод исследований, включающий обзор и анализ состояния изученности вопроса, лабораторные эксперименты с использованием метода тензометрии, аналитические и графо-аналитические исследования деформируемости горных пород и обработку результатов методами математической статистики.

Научная новизна. Установлен сложный характер изменения прочностных и деформационных характеристик горных пород в квазистатическом диапазоне скоростей нагружения. Показано, что изменение прочности можно объяснить исходя из положений кинетической концепции прочности. Полагается, что снижение прочности с увеличением скорости нагружения при переходе ее за некоторую величину связано с наличием в горных породах неоднородностей структуры. Найдена возможность изучения процесса деформации на основе гранулометрического анализа продуктов разрушения с привлечением петрографического описания.

Практическая ценность. Выявленные и исследованные эффекты и их закономерности, имеющие принципиальное значение, необходимо учитывать при решении конкретных инженерных задач горного производства, конструировании и создании породоразрушающих машин.

Апробация работы. Основное содержание докладывалось и получило одобрение на заседании научного методического семинара по механике горных пород Института физики и механики горных пород АН Киргизской ССР в 1973-1974 гг.; на Ученом Совете ИФМГП АН Киргизской ССР в 1974 г.; на Всесоюзной научно-технической конференции по разрушению горных пород при бурении скважин в г.Уфе в 1973 г.; на ХУШ-ХІХ научно-технических конференциях Фрунзенского политехнического института в 1972-1973 гг.; на Республиканской конференции Совета научно-технических обществ "Молодежь советского Киргизстана в борьбе за технический прогресс", посвященной 50-летию образования СССР в 1973 г.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликованы пять работ, четыре находятся в печати.

Объем работы. Реферируемая диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, содержащих 153 страницы машинописного текста, в том числе 19 таблиц, 33 иллюстраций, списка использованной литературы из 135 наименований.

Работа выполнялась в течение ряда лет в лаборатории исследований физико-механических свойств горных пород Института физики и механики горных пород Академии наук Киргизской ССР.

Одним из положений, обеспечивающих возможность использования результатов лабораторных исследований в практическом инженерном приложении, является соблюдение условий проведения экспериментов, максимально приближающихся к условиям природы.

Диапазон скоростей нагружения в реальных процессах деформирования и разрушения горных пород очень широк - от взрывных до длительных, реологических. По времени действия нагрузки или скорости приложения ее к среде они различаются на 15-20 порядков.

Анализ исследований А.И.Старогина, Л.А.Шрейнера и И.Н.Павловой, Б.Н.Кутузова, Л.И.Барона, М.Ф.Кунтыша, М.П.Мохначева, Е.Д.Певзнера, Р.Кобаяси и других показал, что, хотя не имеется достаточно количества данных об измерении прочностных и деформационных свойств горных пород в зависимости от времени приложения нагрузки, охватывающих весь спектр скоростей и длительности воздействия нагрузок, однако, по-видимому, существует единая зависимость свойств горных пород от скорости нагружения. На это указывают рост прочности с увеличением скорости нагружения и известный физический факт различия модулей упругости горных пород, определяемых статическими и динамическими методами. Однако обработка экспериментальных данных, опубликованных в работах К.Колева (Болгария), Ю.А.Онищенко и Б.А.Лисикова, показала наличие аномальных отклонений от общего представленного в них вида зависимостей предела прочности на одноосное сжатие от скорости нагружения. В работах В.М.Курбатова и В.Николау говорится о снижении прочности при повышении скорости приложения внешних усилий в диапазоне, характерном для механических испытаний горных пород. Однако, отмечая этот факт, они не дают ему физического объяснения.

Таким образом, если факт общей тенденции: увеличения прочностных свойств пород с повышением скорости нагружения в широком диапазоне изменения последних несомненен, то в диапазоне квазистатического нагружения вопрос остается спорным. Необходимо дать от-

вет - являются ли отмеченные аномальные явления поведения пород в указанном диапазоне результатами ошибок, разброса данных или это вполне объяснимое явление, характерное для материалов, подобных горным породам.

Следует отметить, что на сегодняшний день работы, ведущиеся в этом направлении на горных породах, немногочисленны и охватывают диапазон изменения скорости нагружения и деформирования, обусловленный различными целями, объектами и задачами, в связи с чем недостаточно уделяется внимания изучению механизма разрушения, т.е. физической стороны процессов, происходящих в горных породах при скоростных нагружениях. Почти все они носят эмпирический характер. При этом остается отметить недостаточную изученность динамики развития деформаций на всех этапах нагружения, приводящего к разрушению, и энергоемкости этого процесса.

В связи с этим были поставлены следующие задачи:

1. Разработка методики получения прочностных и деформационных характеристик горных пород при изменении скорости нагружения.
2. Выяснение влияния скорости нагружения на прочностные, деформационные и энергетические характеристики горных пород.
3. Изучение механизма разрушения горных пород при одноосном нагружении с различными скоростями.

Учитывая, что большинство процессов механических способов разрушения горных пород и углей, а также деформирование пород вблизи очистных выработок сопровождаются относительно небольшими скоростями приложения нагрузки и деформирования и имеющиеся отдельные данные говорят о сложной взаимосвязи предела прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ и скорости нагружения V_n , мы остановили свой выбор на квазистатическом диапазоне скоростей нагружения и деформирования.

Опыты проводились на двух группах пород. Первую группу представляли следующие разновидности:

1. Гранодиорит объекта Министерства мелиорации и водного хозяйства Киргизской ССР.
2. Известняк карьера Кантского цементно-шиферного комбината.
3. Известняк вблизи плотины Токтогульской ГЭС.
4. Мрамор карьера строительных материалов Чат-Базар.
5. Мрамор близ водохранилища Орто-Токой.

Сухообразцы с отношением высоты h к диаметру d , равным 1, при $d = 42$ мм, испытывались при комнатной температуре с изме-

нением только одного параметра - скорости нагружения - V_n от 2,9 кг/см²сек до 850 кг/см²сек. При этом изучалась закономерность изменения предела прочности на одноосное сжатие с увеличением скорости нагружения.

Вторая группа включала 4 разновидности горных пород:

1. Песчаник угольного месторождения Джергалан.
2. Мрамор близ водохранилища Орто-Токой.
3. Известняк карьера строительных материалов Озгоруш.
4. Песчаник с перевала Тюя-Ашу (район тоннеля).

Породы второй группы отличались от пород первой размерами образцов, т.е. отношение h/d равнялось двум, а также скоростями нагружения. Это обусловлено тем, что вторая группа пород исследовалась в связи с изучением закономерности изменения прочностных, деформационных и энергетических характеристик.

Кроме того, исследования первой группы пород позволили более обоснованно выбрать диапазон скоростей нагружения. Поэтому исследуемые породы испытывались при пяти значениях V_n в диапазоне от 5 кг/см² до 1200 кг/см²сек.

Выбор представленных пород, как объекта исследования, сделан исходя из того, что они являются представителями широкого круга горных пород, на что указывает их различие как по физико-механическим свойствам, так и по структурным особенностям (табл. I).

Однородность образцов устанавливалась при помощи дефектоскопа ДУК-20.

Эксперименты с породами второй группы проводились в две серии: в первой исследовалось влияние скорости нагружения на прочностные и деформационные характеристики, во второй - на прочностные и энергетические, но при изменении условий на контакте давящей плиты с образцом, достигнутым за счет применения полированных плит.

Для каждой точки ($\sigma_{сж}$, V_n и т.д.) испытывались в среднем 8-10 образцов, исходя из надежности, равной 0,95, и величины коэффициентов вариации. Строились графики изменения относительных продольных и поперечных, а также абсолютной продольной деформаций от роста напряжения для каждой скорости нагружения. Результаты испытаний усреднялись графически, так как усредняемые величины отличаются по обеим координатам: по деформациям ($\epsilon_{пр}$,

Таблица I

Физико-механические свойства исследуемых пород

Порода	Предел прочности при одноосном сжатии, кг/см ²	Предел прочности при растяжении (бра- зиль- ская проба), кг/см ²	Дробность, см ³	Модуль упру- гости $\times 10^5$, кг/см ²	Коэффи- циент Пуас- сонна	Услов- ный предел теку- чести, кг/мм ²	Коэффи- циент пластич- ности
Гранодиорит	1600	97	2,5	5,3	0,21	270	5,0
Известняк Кантский	2317	219	4,0	4,5	0,20	99	5,1
Известняк Токтогуль- ский	1280	92	3,9	6,2	0,21	100	1,6
Мрамор Чат-Базар- ский	1720	151	4,5	4,4	0,16	187	2,5
Мрамор Орто-Токой- ский	642	51	4,4	3,9	0,20	65	2,1
Песчаник Джергалан- ский	522	34	13,6	0,7	0,31	21	2,6
Известняк Озгорушский	1534	127	7,0	3,9	0,19	111	5,6
Песчаник Тяя-Ашу	1945	167	1,9	5,9	0,24	199	2,9

$\epsilon_{пл}$, $\epsilon_{адс}$) и по напряжениям σ . Скорость деформации опре- делялась по экспериментальным зависимостям " $\epsilon_{пр} - t$ "

$$\epsilon = \frac{\epsilon_{пр}^{max}}{t_{пр}}, \quad (1)$$

где $\epsilon_{пр}^{max}$ - максимальная относительная деформация вдоль оси нагружения;
- время нагружения образца до разрушения.

Задаваемая скорость нагружения вычислялась по формуле

$$V_H = \frac{\sigma_{сж}}{t_p}. \quad (2)$$

Упругие характеристики (E - модуль Юнга и μ - коэффициент Пуассона) находились по экспериментальным зависимостям " $\epsilon_{пр} - \sigma$ ", " $\epsilon_{пл} - \sigma$ " в линейной зоне этих величин.

Работа, идущая на разрушение A , определялась по графикам " $\epsilon_{адс} - \sigma$ " и усреднялась при каждой скорости нагружения.

Коэффициент хрупкости находился по формуле, предложенной Л.И. Бароном,

$$K_{хр} = \frac{A_{упр}}{A}$$

где $A_{упр}$ - работа, затрачиваемая на деформирование образца в зо- не линейной зависимости " $\epsilon_{адс} - \sigma$ ".

Вновь образованная поверхность S определялась на основе гранулометрического анализа продуктов разрушения.

Удельная поверхностная энергоёмкость отбрасывалась на оледую- щего выражения:

$$U = \frac{A}{S}. \quad (3)$$

В результате исследования оказалось, что изменение прочности приобретает с увеличением скорости нагружения сложный характер (рис. I).

Можно отметить три участка изменения прочности в квазистати- ческом диапазоне скоростей нагружения. Для объяснения этого явле- ния мы воспользовались положениями термофлуктуационной теории проч- ности С.Н. Журкова, которая учитывает время воздействия нагрузки. Оказалось, что при разных условиях испытания металлам, пластмассам, и ионным кристаллам присуще единообразная зависимость долговечно- сти от напряжения, имеющая вид

$$\tau = A \exp(-d\sigma). \quad (4 \text{ в})$$

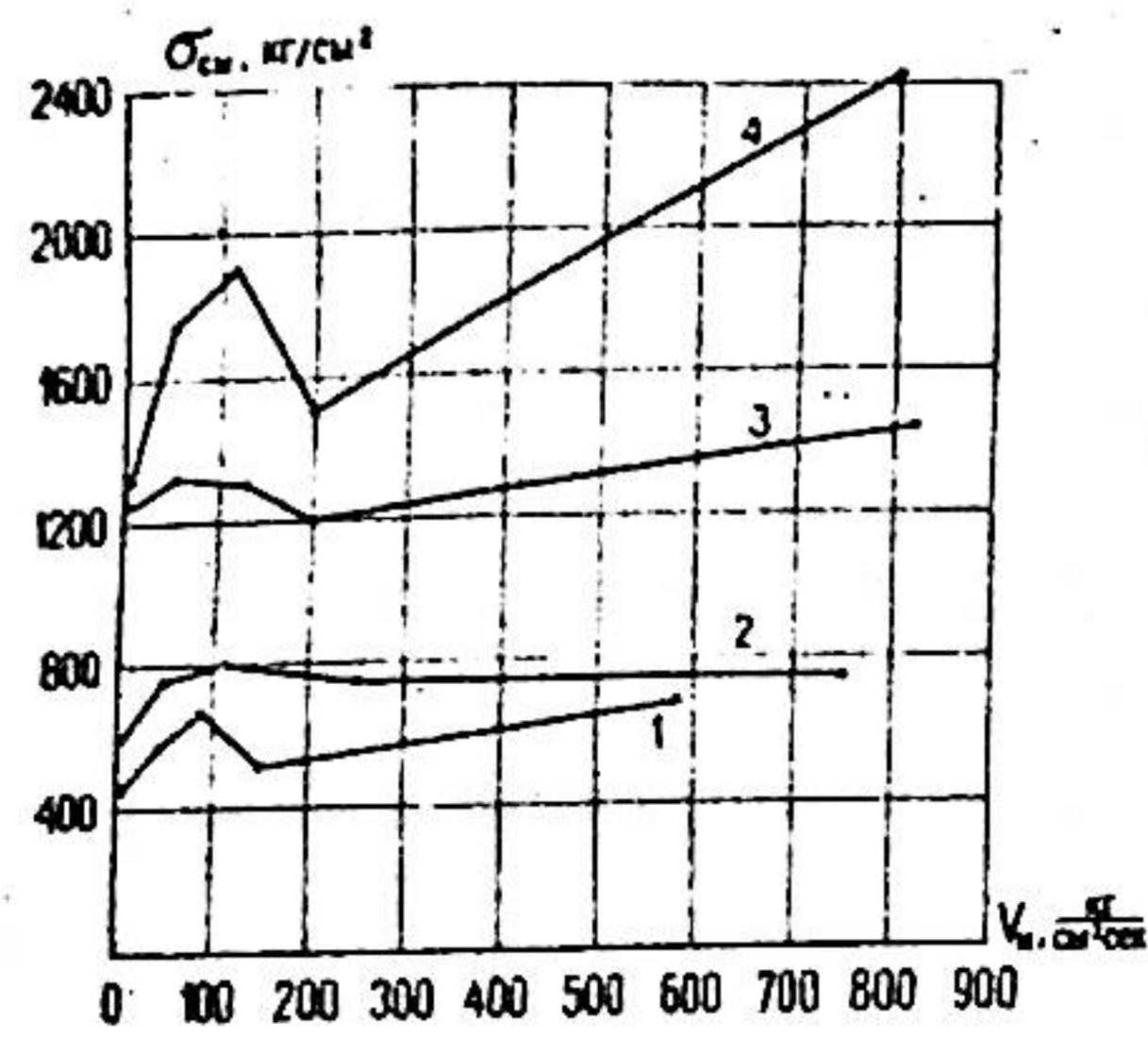


Рис. 1. Изменение предела прочности на одноосное сжатие с увеличением скорости нагружения (результаты первой серии экспериментов):

- 1 - песчаник Джерагаланский;
- 2 - мрамор Орто-Токойский;
- 3 - известняк Озгорушский;
- 4 - песчаник Тюя-Ашу.

где A , α - постоянные величины, зависящие от свойств материала;
 τ - долговечность - время нахождения образца под нагрузкой до разрушения.

В более общем виде, учитывающем температуру, эта зависимость приобретает вид

$$\tau = \tau_{0 \text{ exp}} \cdot \left(\frac{U_0 - \gamma \theta}{KT} \right), \quad (4 \text{ б})$$

где τ_0 , U_0 , γ - величины, характеризующие свойства испытуемого материала;
 K - постоянная Больцмана = $1,3805 \cdot 10^{-16}$ эрг/град;
 T - абсолютная температура образца.

При этом разрушение рассматривается как процесс постепенного накопления нарушений сплошности, начинающийся с момента приложения нагрузки и идущий практически при любом ее значении. Поэтому фундаментальной величиной становится долговечность τ - время от момента приложения нагрузки до разрушения образца.

Исследования С.Н.Журкова, А.Смекала и других ученых показали, что закономерность временной зависимости прочности следует связывать в основном с закономерностями роста трещин, а не с закономерностями их возникновения. Поскольку разрушение всегда является процессом образования и развития нарушений сплошности надатомного масштаба, поэтому у горных пород, имеющих достаточное количество микро- и макродефектов (пор, микротрещин, неоднородных включений), хаотично распределенных по объему, возникновение новых нарушений сплошности будет очень незначительным. Разрушение будет происходить

в результате развития и слияния уже имеющихся дефектов, расположенных в "опасных" местах, до их критического размера в результате разрыва напряженных связей в их вершинах под действием термических флуктуаций.

Обработка данных различных исследований влияния скорости нагружения или, что то же самое, времени воздействия растущей нагрузки на прочность горных пород показала, что имеет место следующая зависимость:

$$\tau_p = B \exp(-\alpha \sigma_{сж}), \quad (5)$$

где B и α - постоянные величины, зависящие от свойств горной породы;

τ_p - время нагружения образца до разрушения.

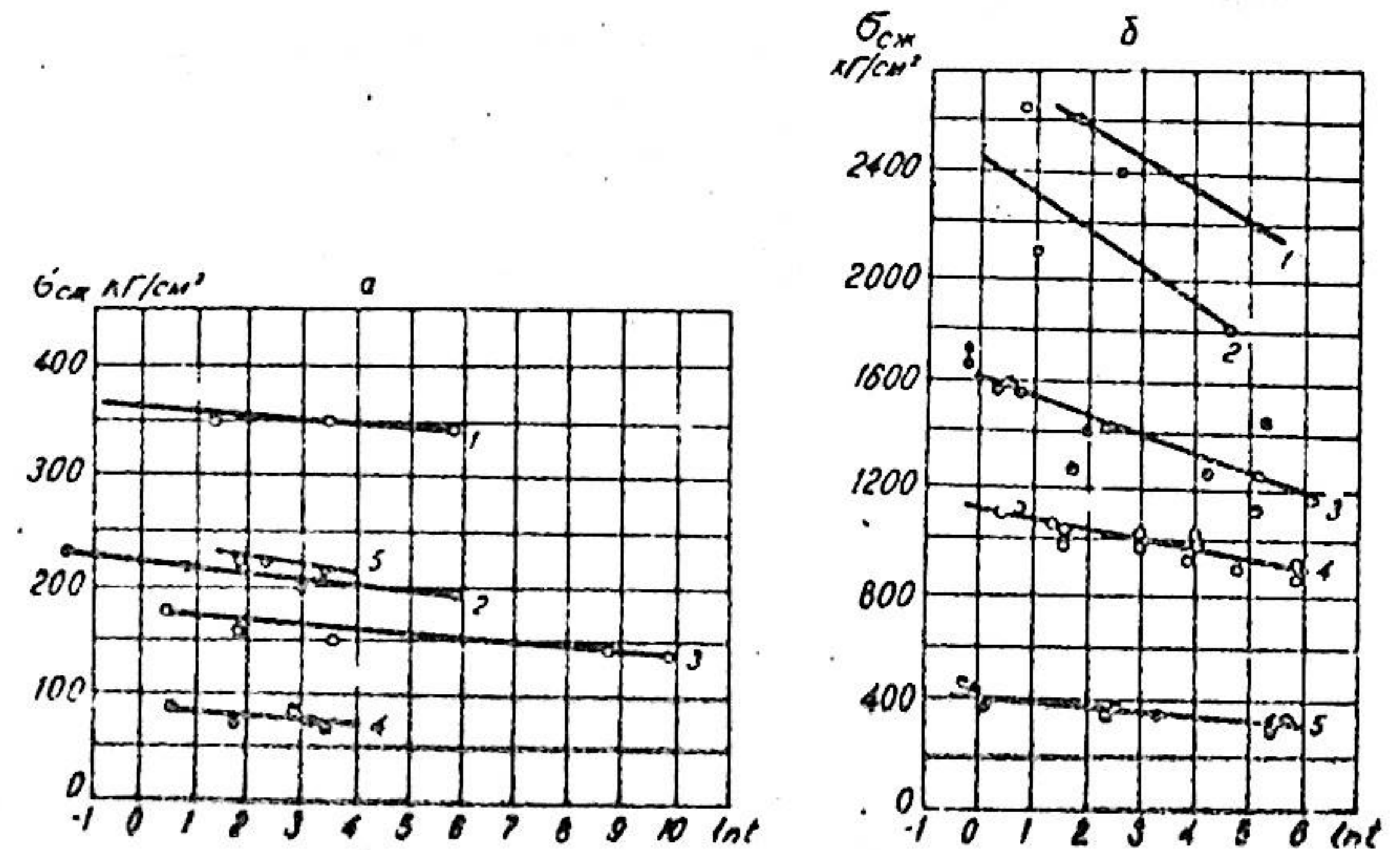


Рис. 2. Зависимость предела прочности на одноосное сжатие от времени воздействия нагрузки:
 а) 1, 2 - известняк; 3 - карналит; 4 - гипс;
 5 - бетон;
 б) 1, 2 - магнетит; 3 - габбро; 4 - гранит;
 5 - известняк.

Таблица 2

Сравнение экспериментальных и расчетных величин длительности нагружения

Порода	I серия			2 серия		
	Скорость нагружения, кг/см ² · сек	Продолжит. нагруж. эксперимента, сек	Продолж. нагруж. расчетн. сек	Скорость нагружения, кг/см ² · сек	Продолжит. нагруж. эксперимента, сек	Продолжит. нагружен. сек
Песчаник	5,04	89,00	86,53	5,10	128,10	131,88
	35,76	15,67	16,35	45,54	14,92	14,80
	88,87	7,50	7,92	102,77	7,42	7,33
	141,33	3,63	3,83	203,68	3,60	3,61
Джержаланский	585,30	1,16	1,18	59,70	1,03	1,08
	4,83	129,50	133,49	5,65	106,01	109,21
	37,61	20,00	20,39	47,37	15,34	15,08
	100,86	7,90	8,16	99,39	6,50	6,46
Орто-Токойский	241,25	3,10	3,12	217,11	3,10	3,12
	746,80	1,02	1,00	838,20	0,81	0,81
	5,08	291,95	255,95	5,75	216,30	226,49
	50,30	26,69	27,57	47,89	24,91	27,03
Известняк Озгорушский	111,66	11,70	11,92	88,83	14,11	13,92
	192,96	6,22	6,20	205,61	6,10	6,15
	815,10	1,78	1,85	1037,60	1,33	1,73
	5,11	262,20	237,84	5,81	309,80	268,62
Тя-Ашу	55,48	31,84	33,83	64,38	32,92	32,39
	110,40	17,42	18,40	94,11	19,72	22,56
	207,43	7,36	7,86	202,70	10,44	10,19
	895,60	2,75	2,90	1172,30	1,89	1,87

Применение условия накопления повреждаемостей Д.Бейли

$$\int_0^{t_p} \frac{dt}{\tau(\sigma(t))} = 1, \quad (6)$$

где $\tau(\sigma(t))$ - функциональная зависимость времени "жизни" материала при соответствующем изменении нагрузки во времени $\sigma(t)$ вида $\tau = A \exp(-\alpha \sigma)$ приводит к следующему выражению

$$\sigma_{сж} = \frac{\ln A d}{\alpha} + \frac{1}{\alpha} \ln V_H \quad (7)$$

Оказалось, оно хорошо согласуется с результатами М.П.Мохначева, полученными на ряде горных пород - $\sigma_{сж} = \alpha + \beta \ln V_H$ в большом диапазоне скоростей нагружения.

Но в наших экспериментах наблюдается отклонение от такого вида линейной зависимости (рис. 1). Для объяснения этого явления о позиций термофлуктуационной концепции сравнивалось экспериментальное время нагружения и найденное из выражения

$$t_p \approx \frac{KT}{\gamma V_H} \left(\frac{U_0}{KT} + \ln \frac{\gamma V_H}{KT} + \ln \tau_0 \right), \quad (8)$$

получен это И.С.Томашевской и Я.Н.Хамидуллиным исходя из условия Д.Бейли. Совпадение величин было достаточно хорошим, что наглядно представлено в таблице 2. Кроме того, показатель экспоненты в уравнении для долговечности $\frac{U_0 - \gamma \sigma}{KT}$ в опытах при разных скоростях нагружения для всех исследуемых пород изменялся от 6 до 10, в то время как при атермическом разрушении эта величина не превышает 1-5. Поэтому можно сделать предположение, что в квазистатическом диапазоне скоростей нагружения разрушение основано на термофлуктуационном механизме роста трещин.

Для нахождения коэффициента γ и U_0 для всех пород и скоростей нагружения преобразовываем уравнение (4 б)

$$U_0 - \gamma \sigma_{сж} = KT \ln \frac{\tau}{\tau_0}, \quad (9)$$

где $U = U_0 - \gamma \sigma_{сж}$ - энергия активации процесса разрушения, соответствующая прочности;

γ - структурно-чувствительный коэффициент, показывающий степень влияния напряжения на уменьшение энергии активации;

$\tau_0 = 10^{-13}$ сек - период упругих колебаний атомов в решетке;

$\varepsilon = \frac{t_p}{\Delta \sigma_{сж}}$ - долговечность "жизни" образца под статической нагрузкой, выраженная через время непрерывного нагружения исходя из выражения (7).

Согласно термофлуктуационной теории С.Н.Журкова, все точки в координатах " $\sigma - \sigma_{сж}$ " при испытании, различающихся только своей длительностью, должны ложиться на единую прямую. Экстраполируя эту прямую к $\sigma_{сж} = 0$, найдем величины начальной энергии активации U_0 для разных пород, а по наклону вычислим коэффициент γ . Эти величины можно найти без графических построений. Исходя из выражения (3) для коэффициента γ запишем следующее выражение, решая систему двух уравнений, которые соответствуют двум различным режимам нагружения:

$$\gamma = \frac{KT \ln \frac{V_2}{V_1}}{\sigma_{сж_2} - \sigma_{сж_1}}$$

Далее, подставляя полученную величину γ в выражение

$$U_0 = \gamma \sigma - KT \ln \frac{\gamma V_n}{KT} - KT \ln C_0 \quad (10)$$

полученное после ряда преобразований выражения (8), находим искомое значение величины U_0 . Совпадение этих величин, полученное разными путями, указывает на надежность определения по второй схеме. Но изменение прочности согласно термофлуктуационной теории связано с величиной γ , входящей в уравнение (4 б):

$$\gamma = \omega \beta \quad (11)$$

где ω - активационный объем;

β - коэффициент концентрации напряжений.

Это естественно, так как U_0 постоянная величина, следовательно, меняется не атомное строение тела или межтомное воздействие, а надатомное. Наличие такой надатомной структуры или дефектов определяют локальные перенапряжения в теле. Таким образом, от изменения структуры изменяются перенапряжения, т.е. изменяется коэффициент γ . Кроме того, прочность материала зависит от скорости роста дефектов (трещин) $V_{р.тр.}$; наличие которых в горных породах не вызывает сомнений. Изменение же коэффициента γ показывает как инициировался их рост. Но поскольку свойство материалов прояв-

ляются не сами по себе, а только в результате воздействия каких-либо физических полей, то изменение величин γ и $V_{р.тр.}$ связано с изменением как скорости нагружения, так и скорости релаксации напряжений. Так, при более напряженных связях необходимы небольшие по величине флуктуации, чтобы разорвать их, а частота посещения ими напряженных связей больше, и трещины прорастают с большей скоростью.

Опираясь на эти положения, полученный сложный характер изменения прочности с увеличением скорости нагружения имеет следующее объяснение.

В неоднородных материалах при приложении к ним нагрузки протекают одновременно процессы текучести и разрушения. Оба эти процесса протекают одновременно и степень разрушения и деформации определяется их конкуренцией, в конечном счете зависящей от условий нагружения и деформирования. Падение прочности с увеличением скорости нагружения, по-видимому, и является результатом этой конкуренции, т.е. превалирование скорости нарастания напряжения над скоростью ее релаксации (что определяется текучестью) обуславливает разрыв, начинающийся с неоднородностей (дефектов структуры), с другой стороны, если скорость релаксации напряжения больше скорости их нарастания, то разрушение будет затруднено или пройдет только по наиболее сильным неоднородностям.

Поэтому при малых скоростях нагружения испытываемых образцов горных пород (5-100 кг/см²сек), очевидно, существует возможность частичного выравнивания пиковых значений напряжений (концентрации) на дефектах, вовлеченных в процесс деформации, до средних ее значений, поскольку имеет место релаксация усилий. Увеличение скорости в этом диапазоне снижает скорость релаксации напряжений и величину коэффициента локальных перенапряжений γ , в то время как доля теплового движения в общем балансе сил почти не меняется. Рост трещин не успевает достичь предельной величины, что связано с уменьшением зон микронарушений на пути их развития. Поэтому он медленный до момента их слияния, приводящего к понижению сопротивления. Прочность пород увеличивается.

Дальнейшее увеличение скорости нагружения приводит к тому, что напряжение в вершинах трещин не успевает в полной мере релаксировать и это ведет к усилению локализации разрушения, т.е. создаются условия для возникновения крупного разрыва прежде, чем успевают образоваться зоны микронарушений, предшествующие ему. В силу концен-

траши напряжений, на что указывает увеличение величины γ , рост трещин ускоренный и наблюдается снижение прочности, характеризующееся хрупким разрушением.

И, наконец, при переходе скорости нагружения за величину 100-200 кг/см²сек повышается прочность испытуемых пород. При этом величина коэффициента γ уменьшается. Это обусловлено повышением температуры в виде локального нагрева за счет пластической деформации в вершинах растущих трещин. Так как рост трещин термически активирован, что было показано ранее, и к тому же термическое расширение за счет локального нагрева в их вершинах понижает концентрацию напряжений, то в связи с этим увеличивается вязкость разрушения. Эти трещины начинают прорастать быстро благодаря повышению температуры, но нагрев обуславливает термическое расширение, снижающее концентрацию напряжений, и разрушение заканчивается в условиях релаксации напряжений.

Изучение динамики деформирования горных пород под нагрузкой и энергетических показателей процесса нагружения может в определенной степени осветить механизмы этого явления. Поэтому исследовались такие деформационные характеристики, как модуль Юнга и коэффициент Пуассона, а также коэффициент поперечной деформации, выражаемый той же формулой, что и последняя величина, но в отличие от нее замеряемый от момента приложения нагрузки и до разрушения.

Изучение динамики развития деформаций показало, что горные породы: уже при малых напряжениях имеют нелинейную зависимость и модуль Юнга вследствие криволинейности графиков " $\epsilon_{пр} - \sigma$ " непрерывно изменяется. Это относится и к коэффициенту Пуассона. Различие пород по структурным особенностям обуславливает количество стадий в их деформировании, что связано с наличием трещин и цементирующего материала. Если продольные деформации указывают на особенности деформирования, то поперечные — на общие, характерные для всех пород, моменты. Опережающий ее рост по отношению к продольным деформациям и говорит нам о превалировании процессов разрушения и росте дефектов, влияние которых приводит в конце концов к разделению тела на части. Следовало ожидать, что различные по своим структурным особенностям породы изменяют свои упругие характеристики по-разному. Величины модуля Юнга и коэффициента Пуассона, найденные при напряжениях $\sigma_{пр} = 0,4 \sigma_{сж}$, представлены на рисунке 3. Сравнивая их изменение с изменением прочности, отметим, что при уменьшении

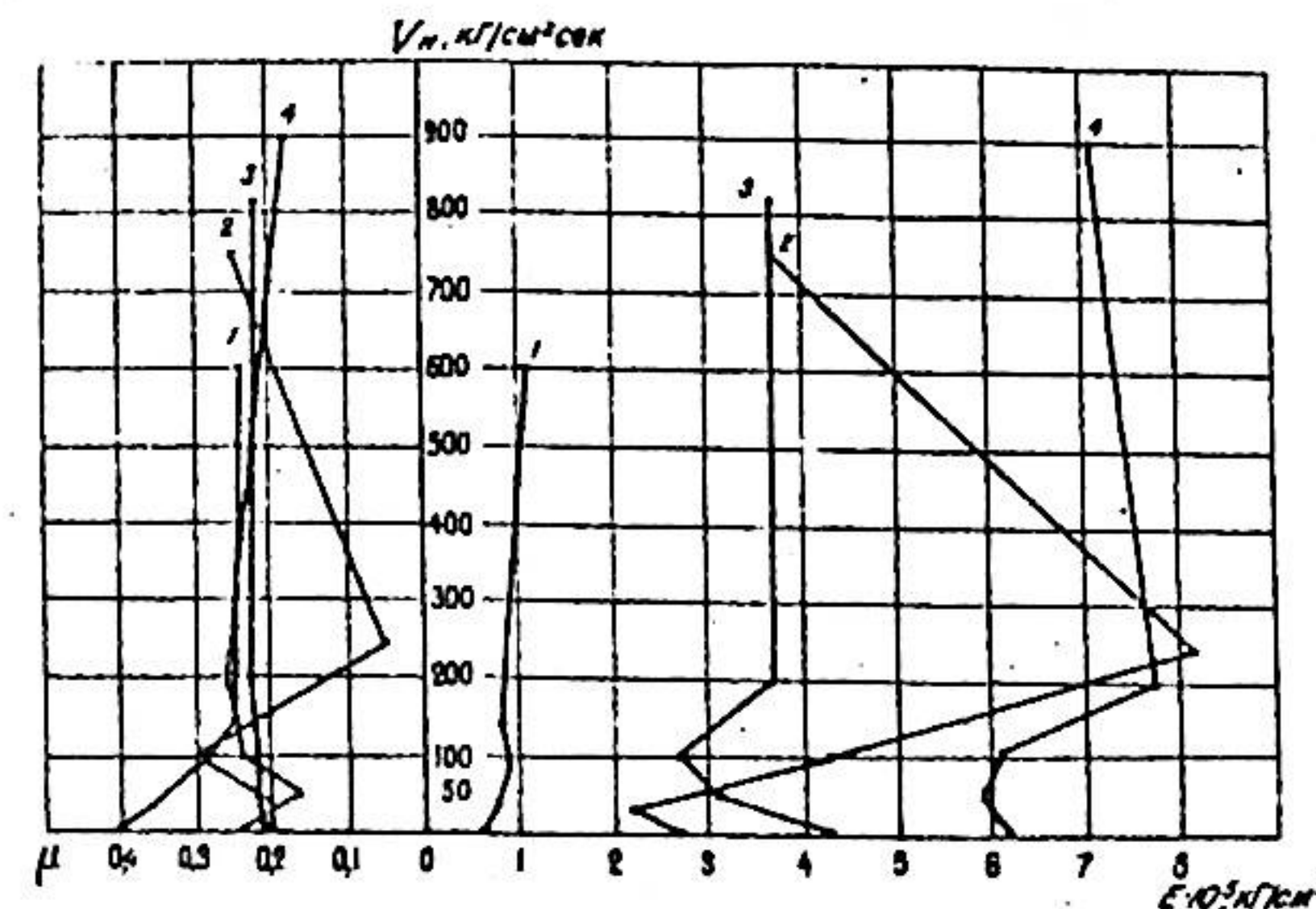


Рис. 3. Изменение упругих характеристик горных пород

1 — песчаник Джергаланский; 2 — мрамор Орто-Токойский; 3 — известняк Озгорушский; 4 — песчаник Тья-Ашу.

прочности с увеличением скорости нагружения мы имеем более упругое деформирование для всех пород. Это говорит о локализации разрушения за счет увеличения концентрации напряжений на дефектах и о хрупком разрушении с участием относительно небольшого количества дефектов, что приводит к увеличению упругого деформирования.

Дополнением к этому служат данные об изменении коэффициента поперечной деформации, замерянного в момент разрушения. Оказалось, что перед разрушением происходит увеличение объема образцов горных пород, т.е. коэффициент поперечной деформации $\mu > 0,5$. Сопоставление картины его изменения при увеличении скорости нагружения с прочностными кривыми показывает, что они имеют тот же характер, т.е. согласуются с изменением прочности.

Таким образом, к падению прочности приводит более упругое деформирование и менее выраженное увеличение объема образца в момент разрушения, о чем говорят величины E , μ и μ_p . Яв-

ление увеличения объема (переход величины μ за границу 0,5) характеризуется неоднородностью процесса деформации горных пород, сопровождающегося образованием и ростом микроразрывов и микротрещин. Оно отмечено в работах А.Н.Ставрогина, М.П.Воларовича, Д. Ваттстейна и других и хорошо согласуется с положениями кинетической термофлуктуационной концепции прочности.

Следовательно, как разрушение, так и деформирование, по-видимому, можно объяснить с позиций этой концепции. Но при деформировании разрывы напряженных связей тепловыми флуктуациями имеют обратимый характер, а при разрушении - необратимый. Границу между этими двумя процессами достаточно надежно можно определить при изучении динамики развития деформаций.

Вторая серия экспериментов проводилась для изучения эффективности процесса разрушения в исследуемом диапазоне скоростей нагружения с тем, чтобы объяснить изменение прочности с позиций затраты на разрушение определенной работы в том или ином случае.

Испытание на сжатие вдоль оси рассматривается, как один из способов дробления хрупких тел. Академик П.А.Ребиндер с сотрудниками дает следующий обобщенный закон для механической работы, израсходованной на разрушение тела,

$$A = \alpha S + qV, \quad (12)$$

где α - поверхностная энергия единицы поверхности тела;
 S - вновь образованная поверхность тела;
 q - работа упругих и пластических деформаций, которая пропорциональна деформируемому объему образца.
 При одноосном сжатии удельная работа равна

$$A_v = \frac{\sigma_{сж}^2}{2E} K_{пл}. \quad (13)$$

Совместное решение (12) и (13) дает следующую зависимость:

$$\sigma_{сж} = \sqrt{\frac{2E}{K_{пл}} (\alpha S + q)}. \quad (14)$$

Поскольку α и q постоянные величины, то предел прочности будет зависеть от вновь образованной поверхности S и от множителя $\frac{2E}{K_{пл}}$.

Изучать применение предела прочности от этих двух величин не представляется возможным из-за трудности нахождения величины α . Поэтому изучали изменение S от V_H . Наблюдая изменения S с увеличением V_H , видим (рис. 4), что она почти повторяет ход кривой прочности, т.е. по вновь образованной поверхности можно судить о прочностных свойствах пород.

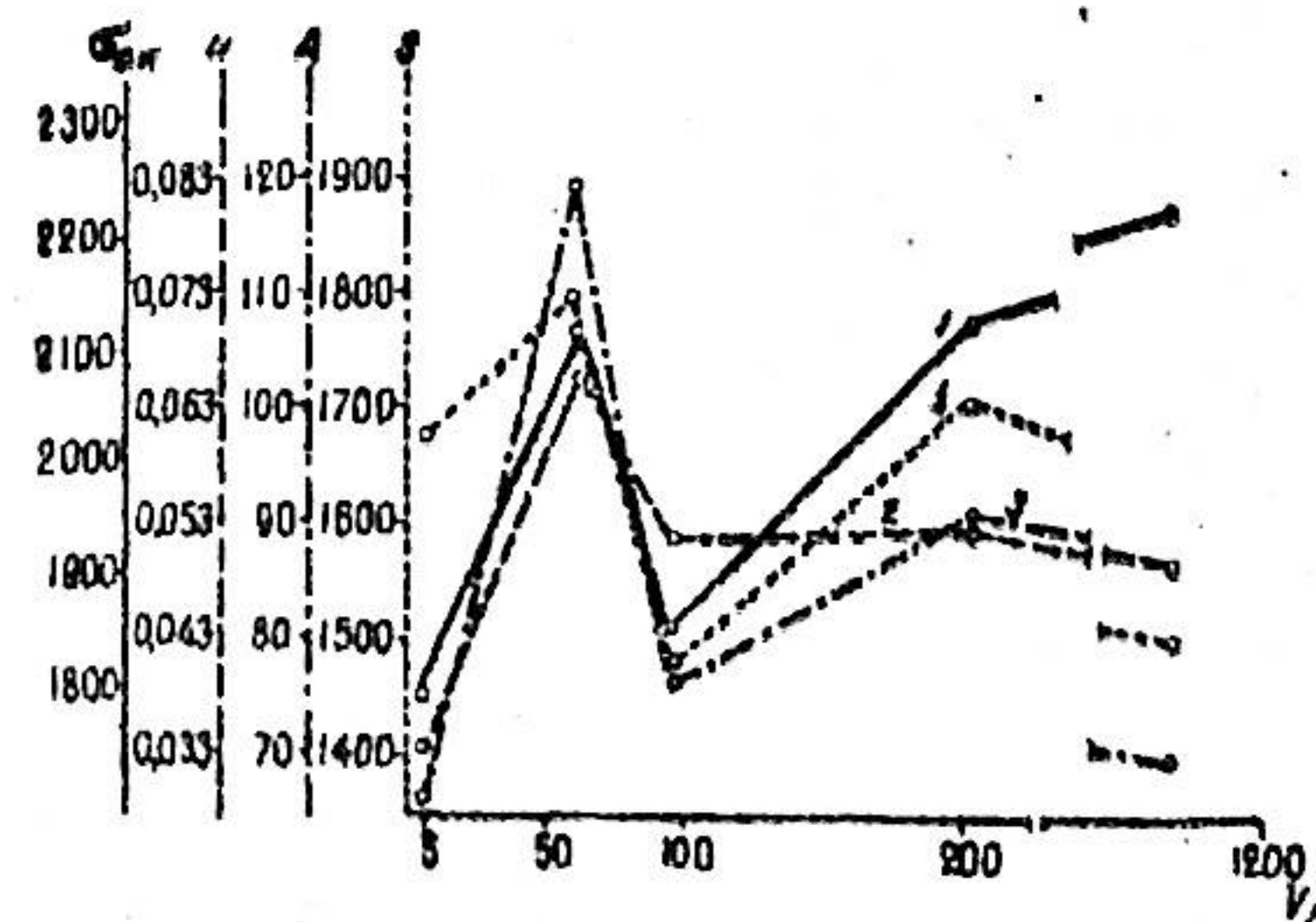


Рис. 4. Изменение параметров, характеризующих эффективность разрушения испытуемых пород

$\sigma_{сж}$ - предел прочности при одноосном сжатии, кг/см²; U - удельная поверхностная энергоемкость, кг/см²; A - общая работа, идущая на разрушение, кгм; S - вновь образованная поверхность, см².

(для краткости приведены результаты исследований песчаника Тюя-Ашу)

И подтверждаются наши предположения о механизме разрушения при V_H , дающей снижение прочности.

Изучение изменения работы, идущей на разрушение какой-либо закономерности в этом диапазоне, не выявило, несмотря на то, что для песчаника Тюя-Ашу (рис. 4) зависимость прослеживается. Это вытекает из того, что в общем случае соотношение между A и S

может быть более сложным, чем по формуле (12). Увеличение работы разрушения говорит о том, что разрушение, т.е. образование новых поверхностей, идет по местам с более прочными связями. При этом изменение S зависит от структурных особенностей породы. В одном случае возрастание работы связано с высокой дисперсностью продуктов разрушения, в другом — с уменьшением, что характеризуется структурно-чувствительным коэффициентом γ . Но, используя отношение работ в упругой области деформирования к общей работе, затраченной на деформирование вплоть до разрушения (коэффициент хрупкости по Л.И. Барону) получим дополнительные данные, объясняющие изменение механизма разрушения при увеличении скорости нагружения. То есть при скоростях нагружения, приводящих к снижению прочности наблюдается повышение K_{xp} , что говорит о более упругом деформировании и хрупком разрушении. Дальнейшее увеличение V_H приводит к понижению K_{xp} что хорошо согласуется с закономерностью изменения прочности.

Анализ процентного выхода фракций различных классов по крупности достаточно хорошо подтвердил оказанное. Последнее в совокупности с петрографическим анализом помогает вскрыть и изучить элементы механизма деформации и разрушения, что в свою очередь позволяет более полно рассмотреть полученное явление.

Выводы по диссертации

Проведено комплексное исследование закономерностей развития деформаций и разрушения горных пород при одноосном сжатии в квазистатическом диапазоне изменения скоростей нагружения. Основой исследования послужило изучение изменения их прочности.

1. Анализ результатов исследования позволил установить, что в этом диапазоне существует сложная зависимость изменения прочности, выражающаяся в ее вномальном снижении при переходе за первую критическую скорость нагружения и дальнейшем росте при переходе за вторую.

2. Исследованиями, объясняющими природу этого явления, выявлены особенности деформирования и разрушения горных пород при одноосном сжатии:

— установлено, что механизм деформирования при малых напряжениях различных горных пород связан с их конструктивными особенностями;

— найдено, что поперечная деформация наиболее полно отражает характерные для всех пород моменты деформирования, в то время как продольная указывает на их особенности;

— показано, что модуль Юнга и коэффициент Пуассона являются нелинейными функциями скорости нагружения и имеют сложный характер изменения в исследуемом диапазоне скоростей нагружения, соответствующий закономерностям изменения прочности;

— получены экспериментальные значения коэффициента поперечной деформации в зоне нагрузок, предшествующих разрушению и в его момент, которые говорят о явлении увеличения объема (разрыхления). Его изменение согласуется с изменением прочности.

3. Исследование дало возможность для объяснения процессов деформирования и разрушения применять кинетическую, термофлуктуационную концепцию прочности твердых тел, имеющую четкое физическое толкование. Согласно этой концепции все изменение прочности внутри исследуемого диапазона скоростей нагружения оказывается связанным с коэффициентом локальных перенапряжений на дефектах и скоростью роста трещин, являющихся сложными функциями скорости нагружения и релаксации напряжений. Различное их соотношение предопределило установленный сложный характер поведения пород при одноосном сжатии. По-видимому, это явление связано с наличием неоднородностей, на что указывает различие относительных величин колебания прочности с увеличением скорости нагружения у исследуемых пород.

4. Полученные экспериментальные результаты указывают на то, что горные породы в крайних точках исследуемого диапазона скоростей нагружения подчиняются общей зависимости

$$\sigma_{сж} = \frac{\rho_n A d}{d} + \frac{1}{d} \rho_n V_H,$$

полученной на основе этой концепции и подтверждающейся известными экспериментальными исследованиями других авторов.

5. Изменение коэффициента хрупкости с ростом V_H имеет сложный характер, объясняющий изменение прочности.

6. Исследование вновь образованной поверхности продуктов разрушения позволило установить закономерность ее изменения при повышении скорости нагружения с изменением прочности горных пород.

7. Обоснована необходимость учета этого явления в процессах, сопровождающих разрушение пород при ведении горных работ.

Материалы диссертации доложены:

1. На заседании Научного методического семинара по механике горных пород Института физики и механики горных пород АН Киргизской ССР в 1973-1974 гг.
2. На Ученом Совете Института физики и механики горных пород АН Киргизской ССР в 1974 г.
3. На Всесоюзной научно-технической конференции по разрушению горных пород при бурении скважин (г.Уфа, 1973 г.).
4. На XУШ-XIX научно-технических конференциях Фрунзенского политехнического института в 1972-1973 гг.
5. На Республиканской конференции Советов научно-технических обществ, посвященной 50-летию образования СССР, в 1973 г.

Основное содержание диссертации опубликовано
в следующих работах:

1. Сравнительные исследования прочностных и деформационных свойств горных пород при различных скоростях нагружения. Труды Всесоюзной научно-технической конференции "Разрушение горных пород при бурении скважин", Башнипнефть, ОНТИ, Уфа, 1973 г. (соавтор М.К.Терметчиков).
2. К вопросу деформируемости и разрушения горных пород при различных скоростях нагружения. Труды Республиканской конференции научно-технических обществ "Молодежь Советского Киргизстана в борьбе за технический прогресс", КиргизИИТИ, г.Фрунзе, 1974 (соавторы М.К.Терметчиков, Н.И.Ковшов).
3. Экспериментальное изучение закономерностей развития деформаций поперечного расширения при одноосном сжатии. Труды Республиканской конференции научно-технических обществ "Молодежь Советского Киргизстана в борьбе за технический прогресс", КиргизИИТИ, г.Фрунзе, 1974 (соавторы М.К.Терметчиков, А.Б.Жакыпбеков).
4. Результаты экспериментальных исследований временных зависимостей прочности горных пород при одноосном сжатии. В сб.: "Исследования по механике скальных пород", Фрунзе, "Илим", 1974 (соавтор М.К.Терметчиков).
5. Оценка неоднородности горных пород по результатам разрушения. В сб.: "Исследования по механике скальных пород", Фрунзе, "Илим", 1974.

ПОДПИСАНО В ПЕЧАТЬ 31/1 1975 Г. ФОРМАТ БУМАГИ
60x90 1/16. ОБЪЕМ 1,5 П. Л. Д-01650. ЗАКАЗ 555.
ТИРАЖ 200 ЭКЗ.

Г. ФРУНЗЕ, ТИПОГРАФИЯ АН
УЛ. ПУШКИНА, 144