



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**РЕДАКЦИОННЫЙ
С О В Е Т**

**Председатель
Л.А. ПУЧКОВ**

**Зам. председателя
Л.Х. ГИТИС**

**Члены редсовета
И.В. ДЕМЕНТЬЕВ**

А.П. ДМИТРИЕВ

Б.А. КАРТОЗИЯ

В.В. КУРЕХИН

М.В. КУРЛЕНЯ

В.И. ОСИПОВ

Э.М. СОКОЛОВ

К.Н. ТРУБЕЦКОЙ

В.В. ХРОНИН

В.А. ЧАНТУРИЯ

Е.И. ШЕМЯКИН

**ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**директор МГГУ,
чл.-корр. РАН**

**директор
Издательства МГГУ**

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАН

академик РАН

академик МАН ВШ

академик РАН

профессор

академик РАН

академик РАН

ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

**С.А. ГОНЧАРОВ
А.И. ДРЕМИН
Н.П. ЕРШОВ
Г.Г. КАРКАШАДЗЕ**

**РЕСУРСО-
СБЕРЕГАЮЩИЕ
ПРОЦЕССЫ
РАЗРУШЕНИЯ
ГОРНЫХ ПОРОД
НА КАРЬЕРАХ**

Издание второе, стереотипное

*Рекомендовано Министерством образования
Российской Федерации в качестве учебного
пособия для студентов высших учебных заве-
дений, обучающихся по направлению «Горное
дело», специальности «Физические процессы
горного производства»*

МОСКВА

**ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

2 0 0 2



УДК 622.271.3:622.5.52:622.325.5:622.243.94:622.026

ББК 33.1

Г 65

Рецензенты:

Докт. техн. наук, проф. *Ю.И. Анистратов* (Московская государственная геологоразведочная академия)

Докт. техн. наук *Н.Н. Казаков* (Институт проблем комплексного освоения недр РАН)

Гончаров С.А., Дремин А.И., Ершов Н.П., Каркашадзе Г.Г.

Г 65 Ресурсосберегающие процессы разрушения горных пород на карьерах: Учебное пособие. — 2-е изд., стер. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. — 236 с.: ил.

ISBN 5-7418-0022-X

Описаны теории прочности твердых тел и методы оценки степени их разупрочнения при воздействии динамических нагрузок. Рассмотрены способы водопонижения на рабочих уступах карьеров и разупрочнения межзерновых связей в руде при ее взрывной отбойке от массива, а также технология их реализации.

Для студентов горных специальностей, горных инженеров и аспирантов.

УДК 622.271.3:622.5.52:622.325.5:622.243.94:622.026

ББК 33.1

ISBN 5-7418-0022-X

© С.А. Гончаров, А.И. Дремин,
Н.П. Ершов, Г.Г. Каркашадзе,
1994, 2002

© Издательство МГГУ, 1994, 2002

MINING EDUCATION

**C.A.Goncharov
A.I.Dremin
N.P.Ershov
G.G.Karkashagze**

SAVE RESOURCE PROCESSES OF DESTRUCTION ROCKES



PUBLISHING HOUSE OF MOSCOW STATE MINING UNIVERSITY

MOSCOW • 2002

**Goncharov S.A., Dremin A.I., Ershov N.P.,
Karkashadze G.G. Save resource processes of destruction
rockes. M.: Publishing House of Moscow State Mining
University, 2002, — 236 pg.**

*Theory strength of rockes and the methodes estimate those
weakening under influence dynamics load.*

*Consider the methods of drainage bench in opencast
colliery, loss of strength interystalline bond when blasting
operations and the technology their realization.*

*For students of mining professions and mining engineeres
and post-graduates.*

ISBN 5-7418-0022-X

**© S.A.Goncharov, A.I.Dremin, N.P.Ershov,
G.G.Karkashadze**

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
Глава 1. Методы оценки прочности и разупрочнения горных пород	
1.1. Критерии прочности горных пород при различных видах напряженного состояния	11
1.2. Методика определения термокинетических параметров на основе базовых прочностных свойств	19
1.3. Эквивалентные напряжения в уравнении долговечности	23
1.4. Вероятностно-статистический метод оценки прочности горных пород.....	26
1.5. Метод оценки степени разупрочнения горных пород динамической нагрузкой	33
 Глава 2. Напряженное состояние полупространства под действием рассредоточенных источников динамической нагрузки	
2.1. Состояние полупространства от единичного сферического источника динамической нагрузки.....	39

2.2. Тензор напряжений от удлинённых источников динамической нагрузки в полуограниченном пространстве	45
2.3. Развитие давления в скважине при инициировании ВВ.....	51
2.4. Расчет степени разупрочнения породного массива динамической нагрузкой.....	57
Глава 3. Способы предварительного разупрочнения массива динамической нагрузкой	
3.1. Зависимость стойкости шарошечных долот от степени разупрочнения породного массива...	61
3.2. Производительность шарошечного бурения и термического расширения скважин в разупрочненных породных массивах	68
3.3. Показатели разупрочнения породного массива.....	73
3.4. Технологические варианты предварительного разупрочнения породных массивов на карьерах	94
3.5. Производственные показатели предварительного разупрочнения породного массива.....	100
3.6. Методология оценки эффективности предварительного разупрочнения массива	106

Глава 4. Способы предварительного осушения рабочих уступов на карьерах	
4.1. Методы осушения породных массивов.....	113
4.2. Дифференциальное уравнение фильтрации в задачах осушения породных массивов	119
4.3. Осесимметричная задача фильтрации жидкости.....	122
4.4. Плоская задача фильтрации в двухслойном породном массиве	125
4.5. Осесимметричная задача фильтрации в двухслойной среде	129
4.6. Методика расчета параметров процесса осушения рабочих уступов	135
4.7. Технологические варианты горных работ с предварительным осушением рабочих уступов на карьерах	143
4.8. Прогноз осушения рабочих уступов на карьерах	149
4.9. Рализация способов осушения рабочих уступов на карьерах	155

Глава 5. Технология буровзрывных работ с термическим расширением скважин оптимальной конфигурации	
5.1. Аналитическая модель процесса распространения волн напряжений от рассредоточенных зарядов	161

5.2. Интенсивность энергонасыщения массива при взрыве рассредоточенных зарядов	166
5.3. Моделирование взрывного нагружения массива в зависимости от конфигурации скважинного заряда	181
5.4. Оптимальные геометрические параметры двухкотлового скважинного заряда	185
5.5. Закономерности термического расширения скважин оптимальной конфигурации	194
5.6. Технология буровзрывных работ с применением двухкотловых скважинных зарядов ВВ.	201
5.7. Экономическая оптимизация комбинированной технологии шарошечного бурения и термического расширения скважин на карьерах	212

Глава 6. Технология рудоподготовки массивов слоистой структуры

6.1. Обоснование оптимального направления распространения фронта волны динамических напряжений в рудных массивах слоистой текстуры	223
6.2. Схема обустройства рабочих уступов в рудных массивах слоистой текстуры	232

ВВЕДЕНИЕ

Реализация основных направлений и задач экономического и социального развития страны неразрывно связано с увеличением производительности труда в первую очередь на основе создания новых ресурсосберегающих технологий.

В горнорудной промышленности при разработке месторождений в скальных крепких породах на карьерах одним из наиболее трудоемких, малопроизводительных и дорогостоящих процессов является бурение скважин и взрывная отбойка руды. Наиболее неблагоприятная обстановка в этом отношении сложилась на карьерах горно-обогатительных комбинатов, где крепость разрабатываемых пород и руд, как правило, выше $16 \div 18$ по шкале М.М.Протодяконова. Скорость бурения скважин диаметром 250 мм в таких породах отечественными серийно выпускаемыми шарошечными станками не превышает $7 \div 8$ м/час, стойкость шарошечных долот достигает максимум $70 \div 80$ м. Низкая стойкость шарошечных долот и высокая стоимость буровых работ объясняются отсутствием надежного твердосплавного вооружения шарошечных долот. Такая ситуация останется и впредь, из-за того, что у нас в стране существует большой дефицит металлов, используемых для производства твердых сплавов, идущих на вооружение шарошечных долот, ежегодный расход которых только на карьерах по добыче железных руд составляет около 50 тыс. штук.

При разработке крепких трудно взрывааемых руд и пород на карьерах, удельный расход взрывчатых веществ (ВВ) достигает $1,4 \div 1,5 \text{ кг/м}^3$. При этом следует отметить, что энергия взрыва расходуется нерационально при очень высокой ее стоимости. Только $10 \div 12\%$ энергии взрыва расходуется на собственно разрушение породы. Это при том, что стоимость единицы взрывной энергии примерно в десять раз выше стоимости электрической энергии, а применительно к водоустойчивым ВВ это соотношение еще в два раза выше.

Основной проблемой буровзрывных работ на карьерах по добыче крепких руд в настоящее время является создание таких технологических вариантов взрывной отбойки руды, при которых решались бы вопросы повышения производительности и качества всех последующих процессов, включая и обогащение.

Эта проблема будет решена, если на стадии проектирования буровзрывных работ будут учитываться и решаться задачи всех последующих технологических процессов горного и обогатительного циклов.

Другими словами это можно сформулировать следующим образом: необходимо разработать и внедрить в производство ресурсосберегающие технологии разрушения горных пород на карьерах.

Описанию таких технологических решений и посвящено данное учебное пособие.

Методы оценки прочности и разупрочнения горных пород

1.1. КРИТЕРИИ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Прочность горных пород зависит от вида напряженного состояния, скорости деформирования (статическое или динамическое нагружение), структуры, трещиноватости, слоистости и других факторов.

В общем случае вид напряженного состояния принято оценивать параметром Надаи-Лоде

$$\mu_{\sigma} = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (1.1.1.)$$

где $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ — главные нормальные напряжения, Па.

Параметр μ_{σ} меняется от +1 до -1. При $\mu_{\sigma} = -1$ промежуточное главное напряжение равно наименьшему ($\sigma_2 = \sigma_3$). При $\mu_{\sigma} = +1$ — промежуточное напряжение равно наибольшему главному ($\sigma_2 = \sigma_1$). Если сжимающие напряжения считать положительными, то при одноосном сжатии ($\sigma_1 \neq 0$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) $\mu_{\sigma} = -1$. Напротив, при одноосном растяжении

($\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 \neq 0$) $\mu_G = 1$. Понятие о виде напряженного состояния возникло в связи с несовершенством существующих теорий прочности. Рассмотрим некоторые из них.

Согласно теории прочности по максимальным касательным напряжениям главную роль в разрушении играют касательные напряжения, под действием которых происходит разрыв связей при сдвиге породы вдоль плоскости разрушения.

Условие разрушения:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_p, \quad (1.1.2)$$

где σ_p — предел прочности при растяжении, Па.

Данное условие разрушения справедливо для идеально связанных сред, т.е. когда пределы прочности при сжатии и растяжении равны, что у горных пород практически не встречается.

Теория прочности Мора является более общим случаем теории максимальных касательных напряжений. По этой теории разрушение происходит на площадке действия максимальных касательных напряжений, однако действующие на этой же площадке нормальные растягивающие напряжения способствуют процессу разрыва связей, а нормальные сжимающие напряжения оказывают «упрочняющее» действие за счет закрытия дефектов, проявления сил трения и др. Условие предельного равновесия при использовании прямолинейной сгибающей кругов Мора

$$\sigma_1 - \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} \sigma_3 = \sigma_{сж}. \quad (1.1.3)$$

Существенным недостатком условия (1.1.3) является то, что не учитывается действие промжуточного главного напряжения σ_2 .

По теории приведенных напряжений в основу критерия разрушения положена величина максимально возможных растягивающих или сжимающих деформаций

$$\sigma_{сж} \leq \sigma_1 - \nu(\sigma_2 - \sigma_3) \leq \sigma_p, \quad (1.1.4)$$

где ν — коэффициент Пуассона.

Сложнонапряженное состояние учитывается в энергетических теориях прочности. Условие разрушения выглядит так:

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2 \cdot \sigma_3 + \sigma_3 \cdot \sigma_1)} = \sigma_{сж}. \quad (1.1.5)$$

Основной недостаток критерия (1.1.5) — не учитывается значение предела прочности при растяжении σ_p . Очевидно критерий (1.1.5) может применяться только в условиях всестороннего сжатия.

Используют также критерий:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_{сж}. \quad (1.1.6)$$

В этом случае условие разрушения выводится из сопоставления величин интенсивности касательных напряжений на октаэдрической площадке и предела прочности при сжатии. Этот критерий используют при анализе разрушения пластических материалов в условиях всестороннего сжатия.

По критерию

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) + (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \cdot (\sigma_{сж} - \sigma_p) = \sigma_p \cdot \sigma_{сж} \quad (1.1.7)$$

учитывается способность материалов по разному сопротивляться растяжению и сжатию.

По обобщенному критерию, предложенному Г.С.Писаренко и А.А.Лебедевым, условие предельного равновесия имеет вид

$$\frac{\sigma_p^2}{\sigma_{сж}^2} \cdot \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] + \left(1 - \frac{\sigma_p^2}{\sigma_{сж}^2}\right) \sigma_1^2 = \sigma_p^2 \quad (1.1.8)$$

Приведенные выше критерии прочности предполагают знание пределов прочности породы при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$, растяжении σ_p и коэффициента Пуассона.

Как показывает практика, все рассмотренные условия прочности не соответствуют экспериментальным результатам испытаний горных пород в условиях трехосного неравномерного сжатия. Большинство из них удовлетворительно описывают прочность в условиях плоского напряженного состояния.

Рассмотрим путь описания влияния промежуточного главного напряжения через октаэдрические нормальные и касательные напряжения. Запишем условие прочности в виде, сходном с условием прочности Мора:

$$\tau_{окт} = f(\sigma_{окт}), \quad (1.1.9)$$

$$\text{где } \tau_{\text{окт}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}; \quad (1.1.10)$$

$$\sigma_{\text{окт}} = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3). \quad (1.1.11)$$

Подставив в эти выражения значения σ_2 , выраженные через параметр Надеи-Лоде (1.1.1), получим

$$\sigma_{\text{окт}} = \sigma_{13} + \frac{\mu\sigma}{3} \tau_{13}, \quad (1.1.12)$$

$$\tau_{\text{окт}} = \frac{\sqrt{2(3 + \mu^2)}}{3} \cdot \tau_{13}, \quad (1.1.13)$$

где σ_{13} и τ_{13} — нормальное и максимальное касательные напряжения.

$$\sigma_{13} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}; \quad \tau_{13} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}. \quad (1.1.14)$$

Форма предельной поверхности разрушения определяется тремя параметрами: нормальными и касательными напряжениями на октаэдрической площадке и параметром Надаи-Лоде, учитывающим вид напряженного состояния. Условие разрушения при этом запишется в виде:

$$f(\sigma_{\text{окт}}, \tau_{\text{окт}}, \mu\sigma, \sigma_{\text{сж}}, \sigma_p) = 0.$$

Известно, что обобщенное уравнение прочности, учитывающее напряженное состояние, имеет вид:

$$K_n + 0,73 \lg \varphi + \frac{0,73l}{\cos \varphi} \times \\ \times \left\{ 1 + \frac{2\mu\sigma}{3} \left[1 + \frac{1}{2} (1 + \mu\sigma) \left(1 - \frac{K_n}{4} \right) \right] \right\} = \frac{\sigma_1}{a}, \quad (1.1.15)$$

$$\text{где } K_n = K - (K_1 + q_1); \quad a = \frac{\sigma_p}{2q_1} = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{2q_2}.$$

Огибающая кругов Мора с безразмерными параметрами представлена на рис. 1.1, а численные значения параметров, входящих в уравнение, в табличном виде представлены в работе [1]*.

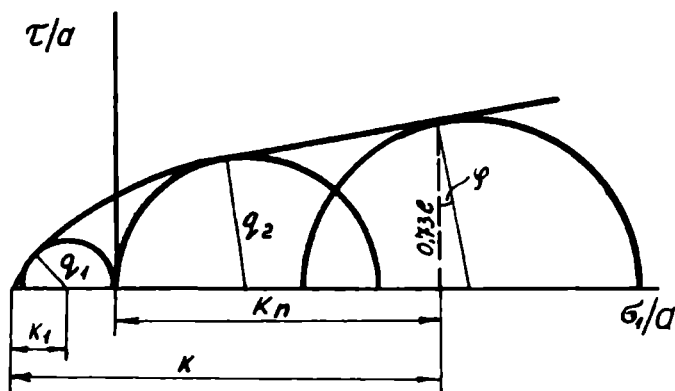


Рис. 1.1 Огибающая предельных кругов мора, учитывающая сложнапряженное состояние

При анализе процесса разрушения хрупких материалов хорошие результаты дает теория прочности Гриффитса. Предполагается, что хрупкий материал содержит случайно ориентированные трещины. У кончиков трещин или вблизи них создается концентрация напряжений, вызывающая распространение трещин и

* Свойства горных пород при разных видах и режимах нагружения
А.И.Берон, Е.С.Ватолин, М.И.Койфман и др. Под редакцией
А.И.Верона, М.: Недра, 1984. — 276 с.

в конечном итоге макроскопическое разрушение. В основу теории разрушения положено предположение, что трещина может развиваться при условии поступления энергии от некоторого источника. Для эллиптического отверстия, наибольшая ось которого перпендикулярна направлению приложенного растягивающего напряжения, максимальное напряжение σ_m у вершины эллипса зависит от радиуса кривизны ρ и длины трещины $2l$.

$$\sigma_m = 2\sigma_0 (l/\rho)^{0,5}, \quad (1.1.16)$$

где σ_0 — приложенное среднее напряжение, Па.

Разность величин энергии тела единичной толщины с отверстием и без него составляет

$$W_l = \pi l^2 \sigma_0^2 / E, \text{ Дж.} \quad (1.1.17)$$

Поверхностная энергия при образовании трещины составляет

$$W_s = 4l\Gamma, \text{ Дж,} \quad (1.1.18)$$

где Γ — поверхностное натяжение, Дж/м².

Следовательно, момент начала распространения трещины определяется условием $\partial(W_l - W_s)/\partial l = 0$, из которого следует

$$\sigma_p = \sqrt{2E\Gamma/\pi l}, \quad (1.1.19)$$

где σ_p — прочность материала при растяжении, Па.

Полученное соотношение относится к плоскому напряженному состоянию, для случая же плоской деформации оно записывается так:

$$\sigma_p = \sqrt{2E\Gamma / [\pi (1 - \nu^2) l]},$$

где ν — коэффициент Пуассона.

При сложнонапряженном состоянии предложенная Гриффитсом модель разрушения хрупкого мате-

риала, содержащего микротрещины определенной длины, приводит к критерию разрушения, представленному параболической огибающей кругов Мора. Условие прочности имеет вид:

$$\sigma_1 \left[(1 + \mu_{\text{тр}}^2)^{0,5} - \mu_{\text{тр}} \right] - \sigma_3 \left[(1 + \mu_{\text{тр}}^2)^{0,5} + \mu_{\text{тр}} \right] = 4\sigma_p, \quad (1.1.20)$$

где $\mu_{\text{тр}}$ — коэффициент трения на поверхности трещины.

Изложенная теория Гриффитса основана на двумерной модели. Распределение напряжений вокруг трещины и поверхностная энергия в случае трехмерной модели отличаются от двумерной всего на несколько процентов.

Коэффициент трения в уравнении (1.1.20) для большинства горных пород находится в интервале $1 < \mu_{\text{тр}} < 2$. Если это условие использовать в уравнении (1.1.20), то отношение пределов прочности при сжатии и растяжении составит 10...17.

Недостатком критерия разрушения (1.1.20) является то, что в нем не учитывается временная зависимость в механизме разрушения. Эта теория не объясняет причину изменения предельного разрушающего напряжения с изменением скорости нагружения.

1.2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ БАЗОВЫХ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ

Экспериментально установлено, что прочность горных пород в условиях динамического сжатия или растяжения превышает прочность статических испытаний. Так, например, в условиях ударного нагружения (скорость в момент удара 35 м/с) динамическая прочность диабазы возрастает в 1,5 раза по сравнению со статической ($\sigma_{ст}^{сж} = 3311 \cdot 10^5$ Па). Повышение прочности песчаника в аналогичных условиях происходит примерно в 3 раза ($\sigma_{ст}^{сж} = 1012 \cdot 10^5$ Па). Темп нарастания нагрузки в ударных испытаниях находится в пределах $10^{10} \dots 10^{11}$ Па/с. Известны также экспериментальные результаты, свидетельствующие о существенном понижении прочности горных пород, подверженных предварительным механическим нагрузкам. Так, например, при испытаниях мрамора отмечается понижение прочности в 2...7 раз за счет предварительного механического воздействия. Для крепких горных пород эффект разупрочнения проявляется в меньшей степени.

Перечисленные в предыдущем параграфе теории прочности не позволяют теоретически предсказать величину эффекта разупрочнения. Эту задачу можно решить на базе кинетической теории прочности, в которой процесс разрушения рассматривается как термофлуктуационный разрыв межмолекулярных связей

под действием механических напряжений и зависящий от температуры тела. Механизм разрушения описывается уравнением долговечности:

$$\tau = \tau_0 \exp \left(\frac{u_0 - \gamma \sigma}{RT} \right), \quad (1.2.1)$$

- где τ — долговечность тела под нагрузкой, с;
 τ_0 — период колебаний атомов,
 $\tau_0 = 10^{-12} \dots 10^{-13}$ с;
 u_0 — энергия активации разрушения, Дж/моль;
 γ — структурный коэффициент, Дж/(Па · моль);
 σ — абсолютная величина действующего напряжения, Па;
 R — универсальная газовая постоянная,
 $R = 8,31$ Дж/(моль · К)
 T — абсолютная температура тела, К.

Согласно принципу суммирования поверждений условие разрушения на основе уравнения долговечности принимает вид:

$$\frac{1}{\tau_0} \int_{t_p}^0 \exp \left(-\frac{u_0 - \gamma \sigma}{RT} \right) dt = 1, \quad (1.2.2)$$

где t_p — длительность тела под нагрузкой до момента разрушения, с.

Преимущество критерия разрушения (1.2.2) по сравнению с описанными выше заключается в том, что в нем учитывается закон изменения напряжений во времени. Кроме того, учитывается влияние температуры нагрева и изменение температуры во времени. Для определения параметров u_0 и γ разработаны специальные методики экспериментов. Эти эксперименты весьма трудоемки и долговременны. В то же время

практически для всех типов пород известны базовые прочностные свойства σ_p и $\sigma_{сж}$. Очевидно, что термокинетические параметры уравнения (1.2.2) должны находиться в соответствии с указанными прочностными свойствами.

Примем в качестве допущения, что в условиях квазистатических и динамических испытаний механические напряжения возрастают по линейному закону. Например, при растяжении

$$\sigma_p^{\sigma\tau} = \dot{\sigma}_1 \cdot t_p^{\sigma\tau}, \quad (1.2.3)$$

$$\sigma_p^{\partial} = \dot{\sigma}_2 \cdot t_p^{\partial}, \quad (1.2.4)$$

где $\sigma_p^{\sigma\tau}$ и σ_p^{∂} — пределы прочности при квазистатическом и динамическом растяжении соответственно, Па;

$\dot{\sigma}_1$ и $\dot{\sigma}_2$ — темп нарастания нагрузки в испытаниях, Па/с;

$t_p^{\sigma\tau}$ и t_p^{∂} — долговечность тела под нагрузкой, с.

После подстановки (1.2.3) и (1.2.4) в уравнение долговечности (1.2.2) и интегрирования получим два уравнения с двумя неизвестными u_0 и γ .

$$u_0 = RT \left[\ln \left(\frac{RT}{\tau_0 \cdot \gamma \cdot \dot{\sigma}_1} \right) + \gamma \sigma_p^{\sigma\tau} \right]; \quad (1.2.5)$$

$$u_0 = RT \left[\ln \left(\frac{RT}{\tau_0 \cdot \gamma \cdot \dot{\sigma}_2} \right) + \gamma \sigma_p^{\partial} \right]; \quad (1.2.6)$$

Введя обозначение $K^* = \sigma_p^{\partial} / \sigma_p^{\sigma\tau}$ из решения этой системы получим

$$\gamma = \frac{RT}{(K^* - 1) \sigma_p^{\sigma\tau}} \cdot \ln \left(\frac{\dot{\sigma}_2}{\dot{\sigma}_1} \right). \quad (1.2.7)$$