

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра разработки месторождений полезных ископаемых
подземным способом

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД НА РАСТЯЖЕНИЕ

Методические указания по выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Геомеханика» для студентов специальности
130400.65 «Горное дело» специализаций 130401.65 «Подземная
разработка пластовых месторождений», 130404.65 «Маркшейдерское
дело» и 130412.65 «Технологическая безопасность и
горноспасательное дело» всех форм обучения

Составители А. А. Ренев
Л. А. Белина



Утверждены на заседании кафедры
Протокол № 05 от 17.12.2013

Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
специальности 130400.65
Протокол № 16 от 10.06.2014

Электронная копия находится
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2014

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Цель работы – приобретение навыков определения предела прочности на растяжение в образцах горных пород.

1. Теоретические положения

Прочность горной породы определяется величиной критических напряжений, при которых происходит ее разрушение. Эти напряжения различны для разных пород и для разных видов приложенных нагрузок. Они носят названия пределов прочности. Различают пределы прочности пород при сжатии $\sigma_{сж}$, растяжении σ_p , сдвиге $\tau_{сд}$, изгибе $\sigma_{из}$.

Разрушение – это разрыв связей между атомами и ионами в кристаллической решетке. Величины сил, необходимых для разрыва, зависят от типа межатомных связей и строения кристаллической решетки вещества.

К оценке прочности горной породы следует подходить в зависимости от масштаба ее разрушения.

Существует несколько масштабов (уровней) разрушения пород. Мегаскопический уровень разрушения характерен для взрывания массивов пород, сдвижений и обвалов их. В этом случае наиболее сильно на разрушаемости сказываются крупные трещины. Более мелкие трещины, поры, контакты между агрегатами зерен предопределяют разрушение макроскопическое – выемочными агрегатами (экскаваторами, комбайнами), буровым инструментом.

Микроскопический уровень разрушения характерен для измельчения полезных ископаемых в мельницах и, частично, при бурении скважин. На этой стадии происходит разрыв связей в кристаллах и зернах. При этом существенную роль играют дислокации и вакансии.

Разрушение горных пород имеет либо хрупкий, либо пластичный характер. При хрупком разрушении происходит одновременный отрыв атомов друг от друга по всей плоскости разрыва, на что требуются большие внешние усилия, чем при пластическом.

Эксперименты, проведенные на породах, подтверждают

снижение прочности с увеличением длительности действия нагрузки.

Прочность пород, соответствующая той или иной длительности воздействия нагрузки, называется их длительной (текущей) прочностью $\sigma_{дл}$. С увеличением времени действия нагрузки величина $\sigma_{дл}$ падает по кривой, асимптотически приближаясь к некоторому предельному значению, называемому пределом длительной прочности σ_{∞} .

Отношение мгновенного предела прочности при сжатии к некоторому значению длительной прочности называется коэффициентом расслабления. Применительно к горным породам наибольшее распространение получила теория прочности Мора, основанная на зависимости между касательными и нормальными напряжениями в каждой точке тела, находящегося в сложноподпряженном состоянии.

Согласно теории Мора (рис. 1) разрушение наступает тогда, когда-либо касательные напряжения τ превысят определенное предельное значение $\tau_{сд}$, величина которого тем больше, чем больше нормальные напряжения, действующие на образец, либо при $\tau = 0$ и нормальные растягивающие напряжения превысят определенный предел, равный σ_p .

Графически эта зависимость между предельными нормальными и касательными напряжениями изображается в виде параболы (рис. 2). Она может быть построена для каждого типа породы по результатам определения ряда прочностных параметров.

Известно, что в любой плоскости тела при нагружении породы возникают касательные и нормальные напряжения, которые взаимосвязаны и могут быть рассчитаны.

Так, если образец находится в плоском напряженном состоянии (большее σ_1 и меньшее σ_3 напряжения), то в плоскости под углом α будут действовать напряжения (рис. 3):

$$\sigma_n = \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_3 \cdot \sin^2 \alpha, \quad (1)$$

$$\tau = 0,5(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \sin 2\alpha, \quad (2)$$

где σ_n – предел прочности плоского напряженного состояния (нормальное напряжение), кг/м²; σ_1 – максимальное значение нормального напряжения, кг/м²; σ_3 – минимальное значение нормального напряжения, кг/м²; α – угол плоскости, в которой действуют напряжения, град; где τ – касательное напряжение, кг/м²;

Связь между σ_n и τ может быть представлена графически с помощью, так называемых, кругов напряжений, которые строятся следующим образом. По оси абсцисс откладывают максимальное и минимальное значения нормальных напряжений, действующих на образец; на разности отрезков, как на диаметре, строят круг.

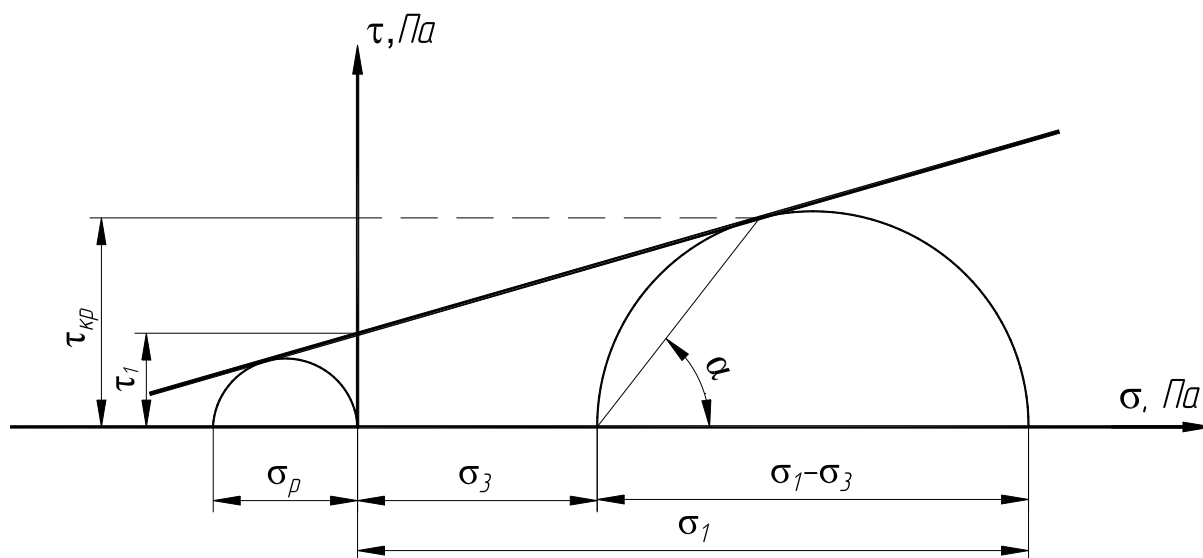


Рис. 1. Взаимосвязь между касательными и нормальными напряжениями (по Мору)

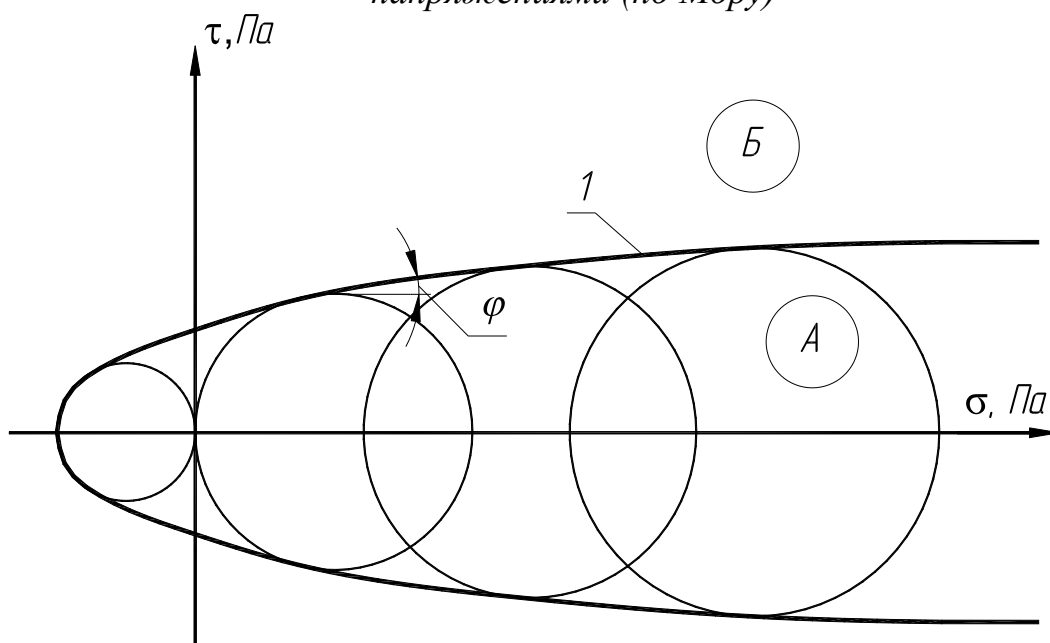


Рис. 2. Семейство кругов предельных напряжений:

1 – огибающая предельных кругов напряжений; А – область не разрушающих напряжений; Б – область разрушающих напряжений

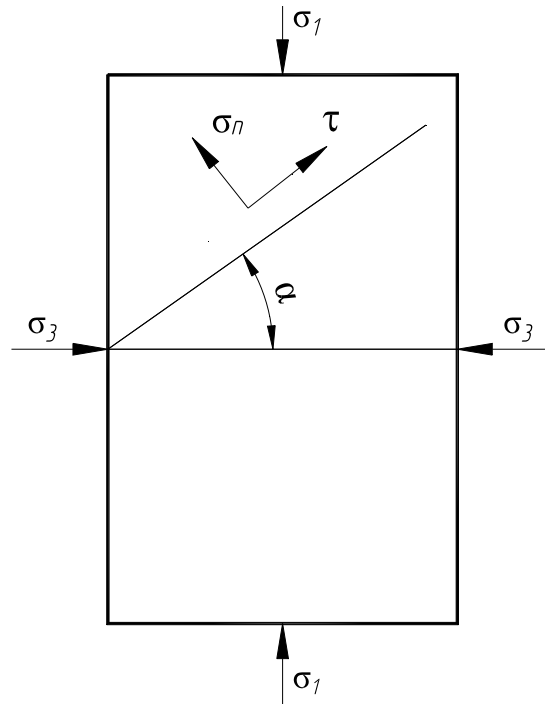


Рис. 3. Взаимосвязь между нормальными и касательными напряжениями

Значения касательного и нормального напряжений в любой точке образца могут быть найдены, если задан угол плоскости φ , в которой определяются напряжения. Под этим углом из точки пересечения окружности с абсциссой проводят прямую до ее пересечения с окружностью. Ордината точки пересечения окружности с прямой численно равна значению отыскиваемых касательных напряжений, абсцисса – значению нормальных напряжений.

Каждому частному значению напряженного состояния соответствует свой круг напряжений. Если горная порода подвергается одноосному ($\sigma_3 = 0$) сжатию вплоть до момента разрушения, то для данного случая также можно построить круг напряжений, отложив на оси абсцисс значения $\sigma_1 = \sigma_p$.

Поскольку этот круг для данного напряженного состояния является максимальным, его называют предельным. На этом графике можно таким же образом построить предельные круги напряжений для предела прочности на растяжение σ_p , для максимального σ_1 и минимального σ_3 напряжений, определенных в сложноподвижном состоянии (при $\sigma_3 > 0$). В результате получают семейство кругов напряжений.

Очевидно, что любое напряженное состояние породы, характеризуемое точкой на графике, лежащей вне этого семейства (область Б), является разрушающим для данной породы и наобо-

рот (область А). Поэтому, проведя огибающую этих кругов напряжений, получают кривую, характеризующую предельное напряженное состояние тела в момент его разрушения.

Огибающую предельных кругов напряжений называют паспортом прочности горных пород. Теория Мора наиболее полно согласуется с экспериментальными данными о прочности образцов горных пород.

Паспорт прочности может быть представлен аналитически в виде параболы

$$\tau = \sqrt{(\sigma_p + \sigma_{сж}) \left[2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p (\sigma_p + \sigma_{сж})} + \sigma_{сж} \right]}, \quad (3)$$

где τ – касательное напряжение, Па; σ_p – предел прочности на растяжение, Па; $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие, Па; или (на некотором участке вблизи оси ординат) в виде прямой линии

$$\tau = \tau_1 + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (4)$$

где τ_1 – предел прочности породы при срезе в условиях отсутствия нормальных напряжений, называемый сцеплением породы, Па; σ_n – нормальное напряжение, Па; φ – угол внутреннего трения, град.; $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент внутреннего трения (коэффициент пропорциональности между приращениями нормальных и касательных разрушающих напряжений).

По прочностным свойствам горные породы осадочного комплекса анизотропные, т. е. они имеют разные свойства в различных направлениях. Коэффициент анизотропии на сжатие равен:

$$K_{ан1} = \frac{\sigma_{сж, \perp}}{\sigma_{сж, \parallel}} = 1,2 - 3, \quad (5)$$

где $\sigma_{сж, \perp}$ – предел прочности на сжатие перпендикулярно напластованию, Па; $\sigma_{сж, \parallel}$ – предел прочности на сжатие параллельно напластованию, Па.

Коэффициент анизотропии на растяжение равен:

$$K_{ан2} = \frac{\sigma_{p, \parallel}}{\sigma_{p, \perp}} = 1,3 - 4, \quad (6)$$

где $\sigma_{p, \parallel}$ – предел прочности на растяжение параллельно напластованию, Па; $\sigma_{p, \perp}$ – предел прочности на растяжение перпендикулярно напластованию, Па.

2. Порядок выполнения работы

Настройка пробника (рис. 4) производится в следующем порядке:

1. Установить пробник основанием 1 на столе или на любой подходящей подставке.

2. Убедиться, что индикаторы 11 измерения деформаций сняты.

3. Убедиться, что инденторы 12 надежно закреплены резьбовыми колпачками в своих гнездах (для уменьшения износа инденторов следует периодически поворачивать их в гнездах вкладышей 9).

4. Установить динамометр 21 (перед установкой динамометра следует убедиться, что ноль большой шкалы индикатора совмещен с положением большой стрелки ненагруженного динамометра, при необходимости – повернуть шкалу), настроить и **ВКЛЮЧИТЬ** механизм фиксации показаний динамометра:

- вращением рукоятки 4 по часовой стрелке вернуть до упора винт стопорения втулки 6 относительно крышки 16;

- вращением рабочей рукоятки 17 против часовой стрелки («разгрузка») до упора (не пережимать!) установить следящую резьбовую втулку 5 в крайнее верхнее положение, после чего повернуть рукоятку 17 на 1-2 оборота в обратном направлении;

- вернуть маховичок 3 вверх до упора в резьбовую втулку 5 **(не пережимать !)**;

- вручную, подтягивая за коромысло 13 или нажимая снизу вверх на подпятник 2, приподнять связанную подвижную систему стакан 14 – винт 16 – толкатель 7 – подпятник 19 – подшипник 20 – подпятник 2 и, удерживая ее, установить сначала динамометр на центрирующей палец, а затем вставить верхнюю съемную пяту динамометра в гнездо подпятника 2; одновременно, подтягивая стакан 14 вручную за коромысло 15 и поджимая динамометр к подпятнику 2 маховичком 21, полностью выбрать

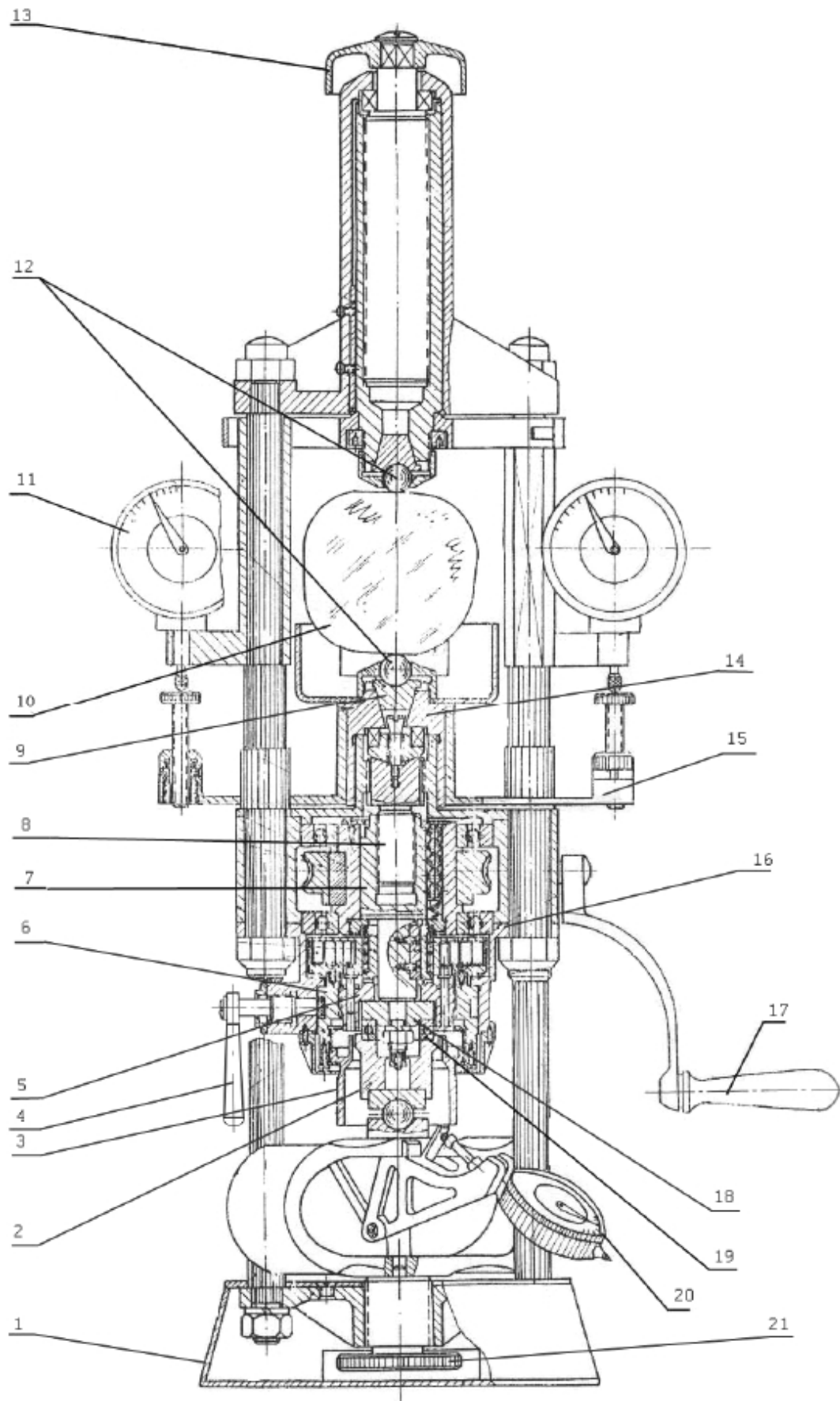


Рис. 4. Пробник для механических испытаний горных пород

осевые зазоры в системе поднятии. Не допуская страгивания стрелки динамометра более чем на одно-два деления; вывернуть маховичок 4 сначала вниз до упора (если маховичок 4 трудно стронуть с места, следует предварительно повернуть против часовой стрелки на 1-2 оборота рабочую рукоятку 17) (не пережимать!), а затем повернуть в обратном направлении на 1/4-1/2 оборота; - вращать рабочую рукоятку 17 по часовой стрелке («нагрузка») до момента страгивания большой стрелки динамометра и далее до стабилизации ее положения; установившееся показание динамометра соответствует усилию прижатия следящей втулки 5 к подпятнику 18. Это показание следует принять за "ноль" нагрузки и соответственно довернуть шкалу динамометра, совместив ноль со стрелкой.

5. Установить стакан 14 с коромыслом 15 в крайнее нижнее положение. Для этого отпустить до упора рукоятку 4 и вращать рабочую рукоятку 17 против часовой стрелки. Затем рукоятку 4 завернуть до упора.

Примечание. Испытания на прочность заведомо слабых породных образцов, когда разрушающие нагрузки $P_p \leq 100$ кгс ($1 \text{ кгс} = 1 \text{ даН}$), следует проводить при ПОЛНОСТЬЮ ВЫКЛЮЧЕННОМ механизме фиксации. В этом случае малые нагрузки не вызывают значительных динамических усилий при разрушении образцов, а соответствующие им отсчеты по динамометру легко снять и без автоматической фиксации. Техника же испытаний упрощается. В этих случаях при подготовке пробника вместо изложенных операций по включению механизма фиксации необходимо выполнить операции по ПОЛНОМУ ОТКЛЮЧЕНИЮ механизма фиксации, которые изложены в подразделе Г инструкции по эксплуатации пробника БУ-39.

Испытание образцов производится в следующем порядке:

1. Испытываемый образец 10 разместить между нагрузочными инденторами и вращением маховичка 13 поджать его до устойчивого положения, опустить защитные козырьки.

2. Плавным вращением рабочей рукоятки 17 нагрузить образец до разрушения.

3. Вращением рабочей рукоятки в обратном направлении разгрузить динамометр.

Пробник готов к испытанию следующего образца.

Если по какой-либо причине образец не был разрушен (например, из-за ограниченности силовых возможностей пробника),

прежде чем разгружать пробник необходимо ЧАСТИЧНО ОТКЛЮЧИТЬ механизм фиксации показаний динамометра, для чего рукоятку 4 отвернуть до упора. Только после этого разгрузить пробник рукояткой 17 и снова включить механизм фиксации, т. е. вернуть рукоятку 4 до упора.

В результате испытания каждого образца стакан 14 с коромыслом 15 постепенно смещается вверх. Это вызвано тем, что перемещение стакана вверх при нагружении образца больше его перемещения вниз при разгрузке динамометра на величину полного внедрения инденторов в образец. Поэтому при испытаниях необходимо следить, чтобы стакан с коромыслом не вышел за пределы рабочего диапазона, отмеченного рисками на штангах (указанного рабочего диапазона обычно достаточно для испытания 10-12 образцов). При достижении нижней границы верхней риски вращением рабочей рукоятки против часовой стрелки ПРИ ЧАСТИЧНО ВЫКЛЮЧЕННОМ МЕХАНИЗМЕ ФИКСАЦИИ стакан с коромыслом необходимо вернуть в крайнее нижнее положение (нижняя граница нижней риски).

После возвращения стакана в начальное положение включить механизм фиксации. Пробник подготовлен к испытанию на прочность следующей серии образцов.

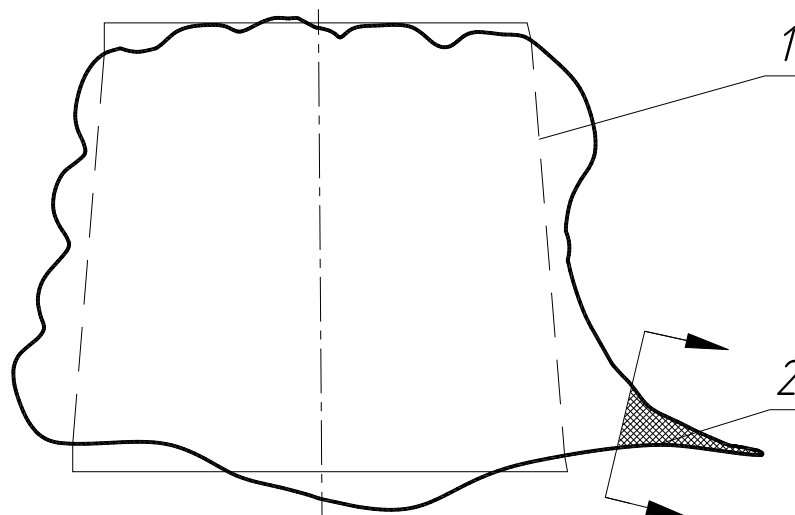
При испытании фиксируют:

- текущая нагрузка P (см. таблицу);
- максимальную разрушающую нагрузку P_p ;
- линейные размеры образца правильной формы, определяющие величину фактической площади поверхности разрыва, в сантиметрах с точностью до второго знака после запятой a и b ;
- очертание фактической поверхности разрыва образца неправильной формы, прикладывая образец поверхностью разрыва к листу миллиметровой бумаги и обводя контуры этой поверхности острозаточенным карандашом;
- абсолютная деформация образца Δl , м.

Обработка результатов испытаний. Зафиксированное в показаниях шкалы динамометрического индикатора значение P_p (Н) переводят в кгс по графику рабочей характеристики пробника.

При разрыве образца на две части (наиболее вероятный случай) вычисляют величину фактической площади поверхности

сквозного разрыва (раскола) образца F , м^2 : по результатам измерения линейных размеров образцов правильной формы или по очертаниям контура фактической поверхности разрыва образцов неправильной формы.



*Рис. 5. Пример аппроксимации площади поверхности разрыва образца:
1 – контур геометрической фигуру; 2 – периферийная часть контура*

В последнем случае применяют либо метод непосредственного подсчета по миллиметровой сетке, либо сводят сложную конфигурацию контура к одной или нескольким простейшим геометрическим фигурам (трапеция 1 – на рис. 5), либо применяют планиметр, палетки и т. п. При этом резко выступающие периферийные части контура 2 (рис. 5) в виде остроконечных пиков в расчет не принимаются (заштрихованная площадь). При разрыве образца на количество частей больше двух (в общем случае на n частей) вычисляют расчетную величину фактической площади поверхности сквозного разрыва (раскола) образца F (м^2) по формуле

$$F = 2 \frac{F_{01} + F_{02} + \dots + F_{0n}}{n}, \quad (7)$$

где $F_{01}, F_{02}, \dots, F_{0n}$ – площади поверхностей по каждому из направлений полуразрыва, м^2 (рис. 6). Частное от деления суммы ($F_{01}, F_{02}, \dots, F_{0n}$) на число частей разрыва n представляет собой среднее значение площади поверхности полуразрыва. Умножением на численный коэффициент 2 это значение приводят к среднему значению площади полного (сквозного) разрыва.

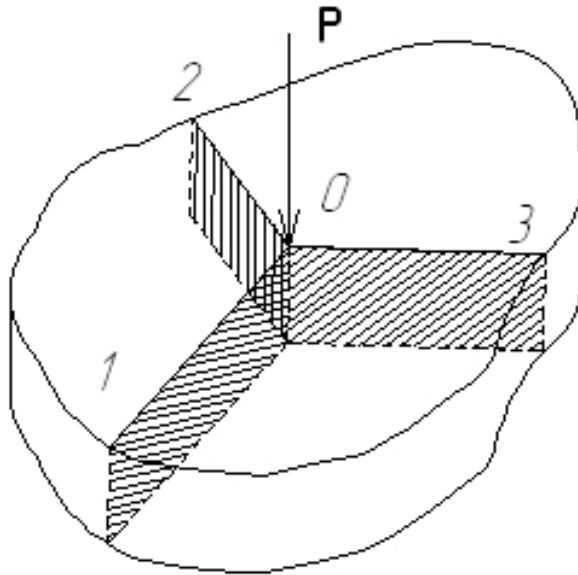


Рис. 6. Раскалывание образца на 3 части

Предел прочности горной породы на растяжение при раскалывании сферическими инденторами σ_p (Па) вычисляют по формуле

$$\sigma_p = 0,75 \frac{P_p}{F}, \quad (8)$$

P_p – максимальная разрушающая нагрузка, Н; F – величину фактической площади поверхности сквозного разрыва (раскола) образца F , м².

Результаты испытаний на растяжение, как правило, существенно зависят от размеров образцов. Поэтому настоящая методика предусматривает либо испытание образцов с фактической площадью поверхности разрушения $(15 \pm 3) \cdot 10^{-4}$ м², либо приведение результатов к этой площади. В последнем случае используют номограмму (рис. 7).

Окончательную обработку результатов по испытанию n образцов (вычисление среднего арифметического значения прочности $\bar{\sigma}$, среднего квадратического отклонения Δ и коэффициента вариации v производят по известным формулам математической статистики

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum \sigma_i}{n}, \quad (9)$$

где $\bar{\sigma}$ – среднее арифметическое значение прочности, Па; σ_i – измеренные значения прочности, Па; n – количество измерений.

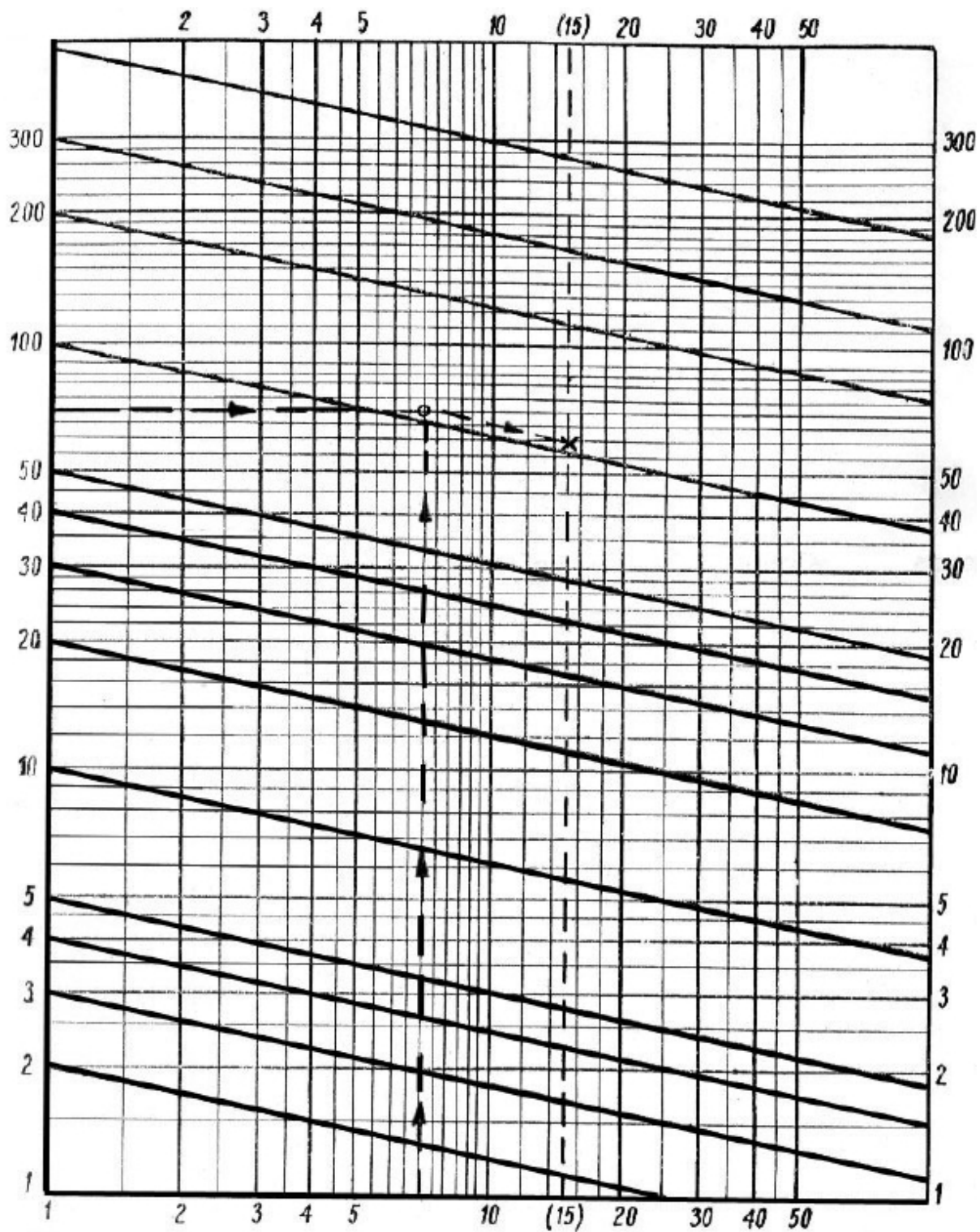


Рис. 7. Номограмма для приведения результатов раскалывания к площади поверхности раскола $F = 15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$

Среднее квадратическое отклонение определяем по формуле:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum(\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n-1}}; \quad (10)$$

где Δ – среднее квадратическое отклонение, Па; $\bar{\sigma}$ – среднее арифметическое значение прочности, Па; σ_i – измеренные значения прочности, Па; n – количество измерений.

$$\nu = \frac{\Delta}{\bar{\sigma}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где ν – коэффициент вариации, %; Δ – среднее квадратическое отклонение, Па; $\bar{\sigma}$ – среднее арифметическое значение прочности, Па.

Площадь F образцов неправильной формы вычисляют с точностью до первого знака после запятой, а образцов правильной формы – с точностью до второго знака и округляют до первого знака.

Частные значения прочности вычисляют с точностью до первого знака после запятой, а приведение результатов по номограмме – с точностью до целого деления масштабной сетки номограммы.

Средние значения прочности вычисляют с точностью до первого знака после запятой; при этом значения до 1 Па оставляют без изменения, а значения от 1 до 10 Па округляют до целого, свыше 10 Па – до 0,5 Па.

Значения Δ и ν вычисляют с точностью до первого знака после запятой, при этом значение Δ оставляют без изменения, а значение ν округляют до целого значения.

Результаты измерений и обработки данных заносим в таблицу.

| P , дел. | P_p , Н | Абсолютная деформация образца, Δl , м | Линейный размер образца, l , м | Относительная деформация $\xi = \frac{\Delta l}{l}$ | a , м | b , м | F , м ² | σ_p , Па | Δ , Па | ν , % |
|---------------|--------------|--|-------------------------------------|--|------------|------------|-------------------------|--------------------|------------------|--------------|
| | | | | | | | | | | |

3. Контрольные вопросы

1. Что такое прочность, предел прочности?
2. Какие пределы Вы знаете?
3. От чего зависит предел прочности горных пород?
4. Что позволяет определить теория Кулона-Мора?
5. Объясните, как производится обработка экспериментальных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геомеханика: учеб. пособие / П. В. Егоров, Г. Г. Штумпф, А. А. Ренев, Ю. А. Шевелев [и др.]; КузГТУ. – Кемерово, 2014. – 325 с.
2. Баклашов, И. В. Геомеханика: учеб. для вузов / И. В. Баклашов. – М.: МГГУ, 2004.
3. Певзнер, М. Е. Геомеханика: учеб. для вузов / М. Е. Певзнер, М. А. Иофис, В. Н. Попов. – М.: МГГУ, 2005. – 438 с.
4. Ржевский, В. В. Основы физики горных пород : учебник для вузов / В. В. Ржевский, Г. Я. Новиков. – М.: Недра, 1984. – 359 с.

Составители
Ренев Алексей Агафангелович
Белина Любовь Александровна

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД
НА РАСТЯЖЕНИЕ**

Методические указания по выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Геомеханика» для студентов специальности
130400.65 «Горное дело» специализаций 130401.65 «Подземная разработка
пластовых месторождений», 130404.65 «Маркшейдерское дело» и
130412.65 «Технологическая безопасность и горноспасательное дело»
всех форм обучения

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 30.06.2014. Формат 60?84/16.
Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Уч.-изд. л. 0,8. Тираж 79 экз. Заказ
КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.
Издательский центр КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4А.