

**Курс лекций по дисциплине  
«Разрушение горных пород при бурении скважин».**

**Лекция №2 Свойства горных пород при бурении.**

Основные темы лекции:

1. Введение.
2. Физико-механические свойства горных пород;

# Горные породы- объект разрушения при бурении

**Горная порода, это твердое тело (минеральный агрегат) определенного состава и строения, сформировавшееся в результате геологических процессов.**

Процесс разрушения горных пород при бурении нефтяных и газовых скважин это технологический процесс формирования и углубления забоя скважины, представляющий собой совокупность нескольких различных физических процессов и явлений.

Научные основы этого процесса опираются на результаты теоретических и экспериментальных исследований в области физики твердого тела, механики разрушения, гидромеханики и теоретической механики.

Механика разрушения горных пород является прикладным разделом механики разрушения.

Горные породы являются сложным по своей структуре и составу неповторимым объектом поскольку неоднородны по составу и строению, часто обладают анизотропными свойствами.

Поэтому при математическом моделировании используются частные решения, в основе которых лежат гипотезы о применимости упрощенных моделей горной породы.

# Классификация горных пород по происхождению

- Магматические горные породы;
- Метаморфические горные породы;
- Осадочные горные породы

# Классификация горных пород по происхождению

- Магматические горные породы;
- Метаморфические горные породы;
- Осадочные горные породы

## Магматические горные породы

Образовались из изверженной из глубин земли магмы. Подразделяются на:

- **Излившиеся (эффузивные)** породы (базальты, диабазы, андезиты, порфириты, липариты, фельзиты) характеризуются мелкокристаллической зернистой структурой и имеют повышенную прочность.
- **Глубинные (интрузивные)** породы (граниты, диориты, перидотиты и др.) имеют крупнокристаллическую структуру, обладают меньшей прочностью.

## Метаморфические горные породы

Образовались из изверженных и осадочных пород под действием высоких давлений и температур путем их метаморфизации.

К ним относятся сланцы, кварциты, мраморы и др.

Эти породы могут иметь как высокую так и низкую твердость.

# Осадочные горные породы

Горные породы, образовавшиеся на поверхности земли в процессе осаждения минеральных частиц, остатков живых организмов, и мелких частиц разрушенной горной породы.

Различают следующие основные типы осадочных горных пород по методу их формирования:

**Терригенные** – обломочные породы, образовавшиеся в результате отложения обломков ранее существовавших осадочных горных пород (песчаники, глины, аргиллиты, алевролиты);

**Карбонатные** - в результате отложения одного или нескольких карбонатных минералов (известняки, доломиты);

**Хемогенные** - в результате выпадения солей из водных растворов или химических реакций, происходящих в земной коре (каменная соль, гипс).

**Органогенные** - в результате отложений остатков организмов .

## Плотность осадочных пород (кг/м<sup>3</sup>)

Аргиллиты: 2630-2860; Алевролиты: 2340-3040; Глины: 1850-2200;

Доломиты: 2460-3190; Известняки: 2360-2980; Каменная соль: 2100-2200;

Мергели 2370-2920; Песчаники 2320-3200;

# Обломочные горные породы

По размерам обломков горные породы подразделяются на:

Песчаники – обломочные сцементированные породы, состоящие из минеральных зерен кварца (размер обломков от 0,01 до 2 мм). Цементы песчаников по составу подразделяются на карбонатные, глинистые и др.

По размерам зерен песчаники подразделяются на:

- крупнозернистые (1-0,5мм.)
- среднезернистые (0,5-0,25мм.)
- мелкозернистые (0,25-0,01мм.) (алевролиты) занимают промежуточное положение между песчаниками и глинистыми породами; .

Глинистые породы - размер частиц менее 0,01мм (глины, аргиллиты и глинистые сланцы).

# Горные породы слагающие разрезы нефтегазовых месторождений

- Месторождение нефти и газа обычно приурочены к осадочным горным породам, которые делятся на 2 большие группы:
- кристаллические составляющие 25% от общего количества горных пород в разрезах месторождений и обломочные (75%).
- **Глинистые породы относятся к обломочным горным породам.**
- Важнейшими геологическими характеристиками пород являются минералогический состав, строение и неоднородность.
- Минералов известно на сегодняшний день около 2000, из них лишь несколько десятков являются породообразующими.
- В случае хемогенных пород минералы входят в состав горной породы в виде кристаллитов (зерен неправильной формы), в случае обломочных горных пород - в виде моно- и полиминеральных обломков.

# СОСТАВ И СТРОЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

**Минеральный состав горной породы:** Характеристика количественного содержания минералов, входящих в состав данной горной породы:

Мономинеральной называется горная порода, состоящая из одного минерала (доломит, известняк, ангидрит).

Полиминеральной называется горная порода, состоящая из нескольких минералов (гранит, глина).

**Строение горной породы:** Характеристика формы, размеров, взаимного пространственного расположения, а также связи в горной породе минеральных зерен и связующих их минеральных агрегатов.

Строение горных пород характеризуют структурой и текстурой горной породы.

**Структура горной породы:** Характеристика строения, определяющая размеры, форму и взаимную связь минеральных зерен, составляющих минерального агрегата. Структура породы определяет особенности строения, обусловленные размером, формой и характером поверхностей, слагающих породу кристаллитов или обломков.

# СОСТАВ И СТРОЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД (продолжение)

**Текстура горной породы:** Характеристика строения горной породы, определяющая особенности строения, обусловленные взаимным пространственным расположением минеральных зерен, кристаллитов или обломков.

Текстурными признаками осадочных пород являются: сплошность, пористость и трещиноватость.

**Сплошность** является обобщенной текстурной характеристикой горной породы. Она определяет способность горных пород пропускать через себя промывочную жидкость.

**Различают следующие 4 категории сплошности:**

1 категория - внутрь горных пород может проникать промывочная жидкость вместе с обломками (шламом) выбуренной горной породы;

2 категория - внутрь горных пород могут проникать как дисперсная среда (коллоидные глинистые частицы), так и дисперсионная фаза;

3 категория - внутрь горных пород может проникать только маловязкая дисперсионная среда (вода);

4 категория - внутрь горных пород жидкости не проникают.

# Пористость осадочных горных пород

**Пористость горной породы** это величина характеризующая наличие в породе пространства, не заполненного твердым веществом.

**Общая пористость горной породы:** Параметр строения, равный объему всех пор и пустот, содержащихся в единице объема горной породы ;

**Открытая пористость горной породы** Параметр строения, равный объему пор в единице объема горной породы, соединяющихся между собой в непрерывные каналы, выходящие на свободную поверхность;

**Эффективная пористость горной породы:** Параметр строения, равный объему открытых пор в единице объема горной породы, через которые способны проникать жидкости и газы;

**Коэффициент пористости горной породы:**  $K_p$  –это параметр строения определяющий отношение объема всех пор  $V_p$  к объему твердой фазы минерального скелета в данном объеме породы  $V_t$  выраженная в процентах .

$$K_p = V_p / V_t (\%)$$

Порода	Пределы изменения (%)	Наиболее вероятная (%)
Песок	4–55	20–35
Песчаник	0–30	5–25
Глина	0–75	20–50
Известняки	0–35	2–15

# Проницаемость горных пород

Проницаемость – способность горной породы пропускать через себя флюиды.

**Различают проницаемость фазовую, абсолютную и относительную**

Проницаемость зависит от реологических свойств флюида и размера и конфигурации пор и трещин и обусловлено:

- размером зерен терригенных пород,
- плотностью их укладки,
- взаимным расположением частиц,
- составом и типом цемента и др
- наличием трещин.

## Проницаемость горной породы (согласно закону Дарси)

$$k = \eta \frac{q_{\phi} \cdot L}{\Delta P \cdot F}$$

где:  $k$  — коэффициент проницаемости образца горной породы,  $m^2$ ;

$q_{\phi}$  — объемный расход флюида через образец,  $m^3/c$ ;

$\eta$  — динамическая вязкость флюида,  $Pa \cdot c$ ;

$\Delta P$  — перепад давления по длине образца ( $\Delta P = P_1 - P_2$ )  $Pa$ ;

$L$  — длина образца пористой среды,  $m$ ;

$F$  — площадь фильтрации (площадь сечения образца),  $m^2$ .

Проницаемость часто оценивают во внесистемных единицах дарси (Д).

В системе СИ этой единице (1Д) примерно соответствует единица  $1 \cdot 10^{-12} m^2$ .

Такой проницаемостью обладает образец горной породы длиной  $L = 1$  м, площадью сечения в  $1 m^2$ , пропускающий сквозь себя  $1 m^3/c$  жидкости  $Q$  динамической вязкостью  $\eta = 0,001 Pa \cdot c$  при перепаде давления на концах образца  $\Delta P = 0,1013$  МПа.

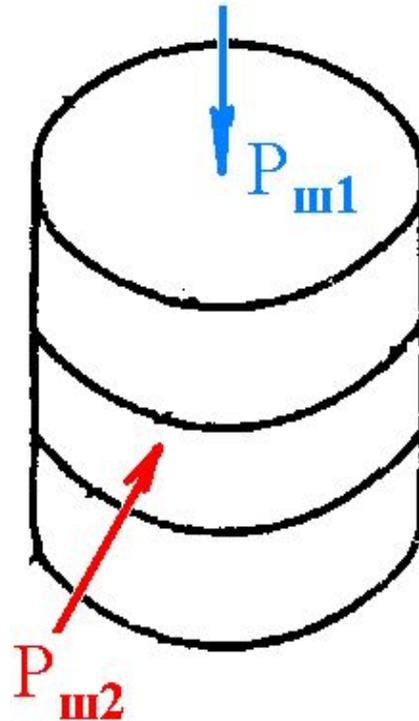
По величине проницаемости горные породы разделяются на три порядка в пределах  $1 \cdot 10^{-15} - 1 \cdot 10^{-12} m^2$ ; последнее соответствует 1 Д.

При бурении скважин на нефть и газ обычно встречаются горные породы проницаемостью от 1 до 100мД.

# Анизотропность твердого тела (горной породы)

**Анизотропность горной породы:** Изменчивость физических параметров горной породы по направлениям их определения и связана с текстурой (направлением слоистости или трещиноватости) горной породы;

**Коэффициент анизотропии горной породы:** Количественная характеристика анизотропии горной породы и равный отношению соответствующих физических параметров, определенных в двух взаимно перпендикулярных направлениях



# **Основные понятия механики горных пород**

# Механические свойства твердого тела

Механическими свойствами деформируемого твердого тела являются упругость, пластичность, прочность и твердость.

В твердых телах основными механическими процессами являются деформирование и разрушение.

**Деформирование** – процесс изменения размеров или формы твердых тел под влиянием внешних сил. В механике сплошных сред предполагается, что тело до и после его деформирования остается непрерывным (не имеет разрывов и пустот).

**Деформация** – это относительное изменение размера и/или формы тела. Деформации бывают обратимыми и необратимыми.

Упругой (обратимой) называется деформация, при которой форма и размеры тела полностью восстанавливаются после прекращения действия внешних сил.

Пластической (необратимой) называется такая деформация, после которой необратимо изменяются форма и/или размеры тела.

**Горные породы имеют ионные и атомные кристаллические структуры.**

Элементы структуры связаны между собой кулоновскими силами.

**Прочность** – это способность твердого тела оказывать сопротивление разрушению от внешнего воздействия при одноосном и многоосном деформировании.

**Твердость** – это способность твердого тела сопротивляться внедрению в него другого твердого тела.

# Модели твердых тел

Существует два основных метода изучения процесса деформирования и разрушения твердого тела: физическое моделирование (натурные эксперименты, испытания моделей) и математическое моделирование, основанное на фундаментальных положениях механики сплошных сред.

## Основные модели твердых тел:

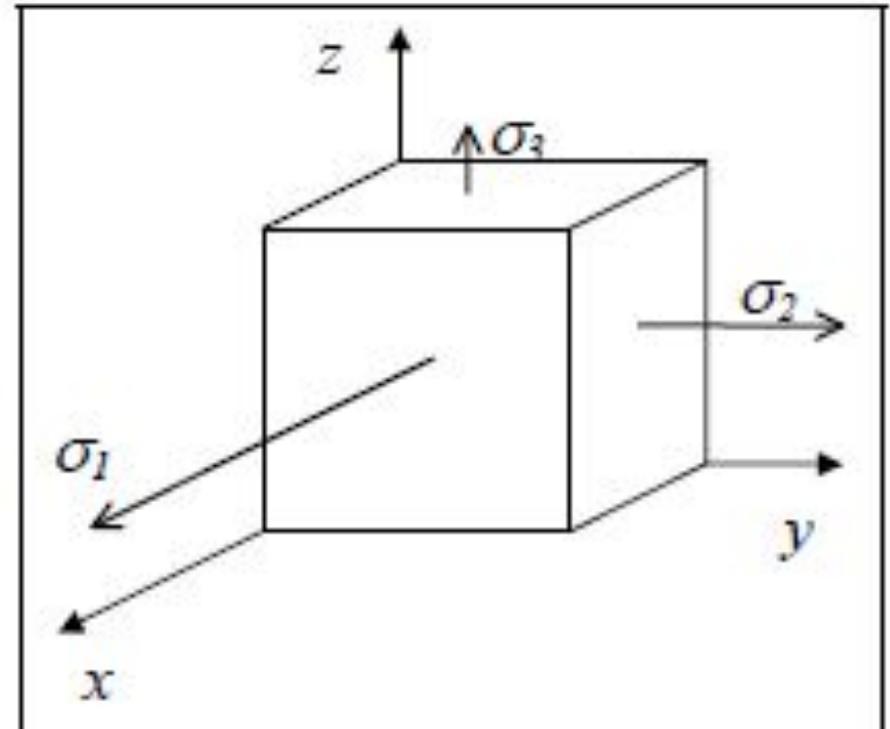
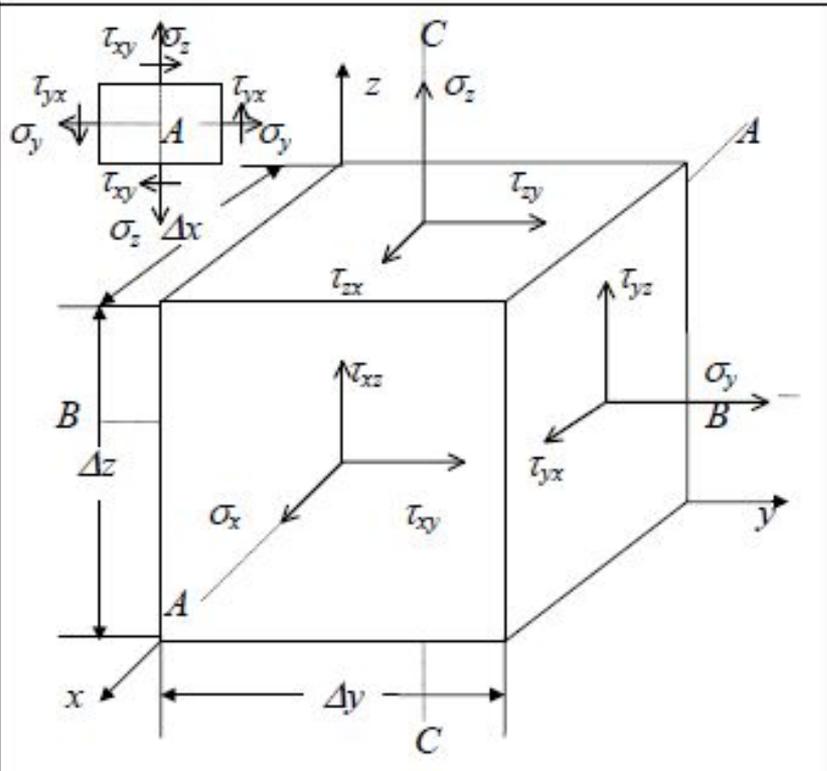
- **упругое тело или тело Гука** (деформируется упруго до разрушения);
- **идеальное упругопластическое тело** (деформируется упруго до предельных напряжений, далее пластически деформируется при постоянных напряжениях);
- **идеальное жестко-пластическое тело или тело Сен-Венана** (не деформируется до предельных напряжений, а при равных предельным – происходит пластическая деформация);
- **вязкое тело, или тело Ньютона** (деформируется подобно вязкой жидкости).

**Наибольшее распространение получила модель упругого твердого тела с линейной зависимостью между напряжениями и деформациями.**

# Схематизация (основные допущения), принятые в механике сплошных сред при описании упругого деформирования горной породы

Горная порода рассматривается как среда:

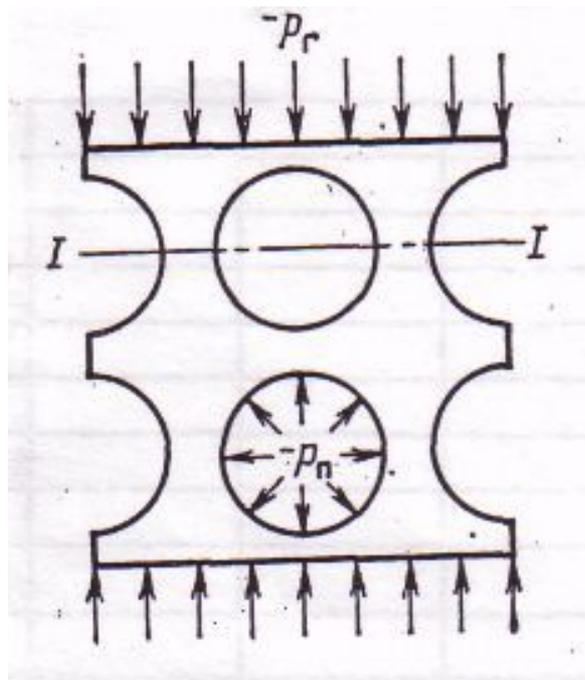
- **сплошная** (без пор и трещин);
- **однородная** (неизменные свойства);
- **изотропная** (свойства одинаковы во всех направлениях);



$$\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_0$$

$\sigma_0$  - среднее нормальное напряжение или гидростатическое давление

# Модель пористой горной породы



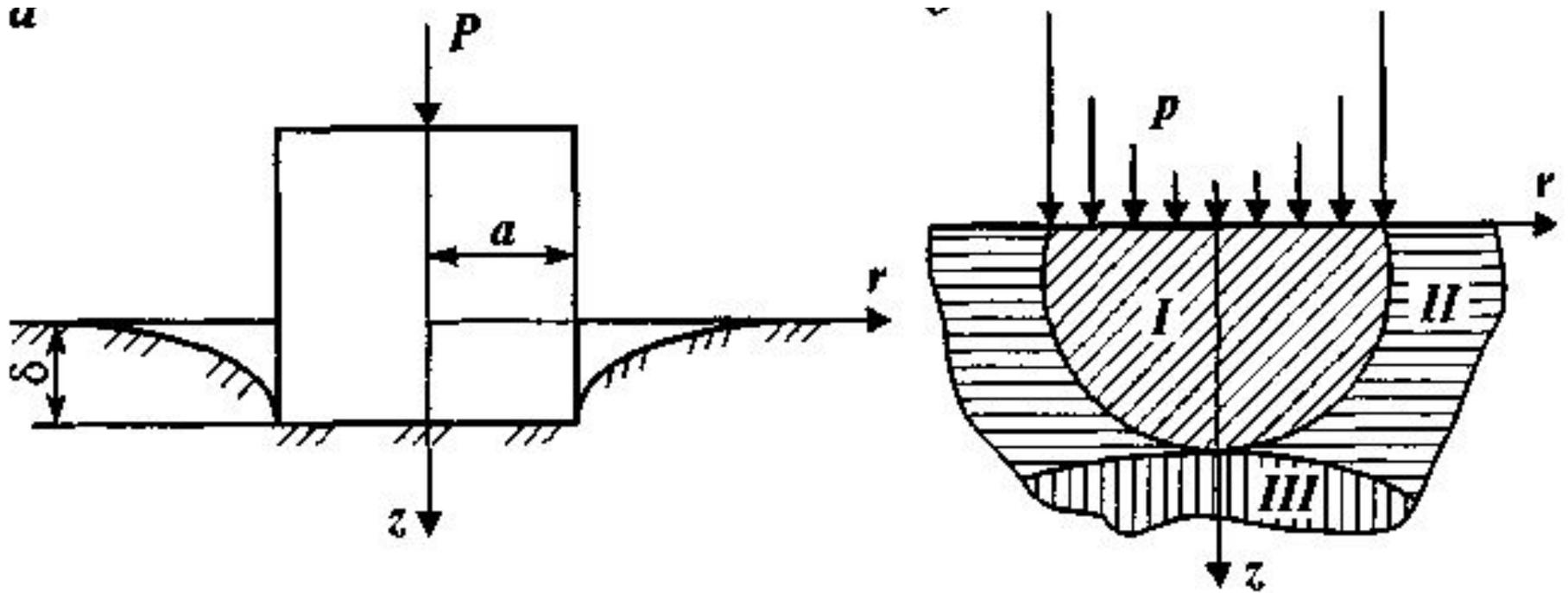
$P_r$  — горное давление;  $P_n$  —пластовое давление

## Обобщенное условие прочности Мора

$$\sigma_{in} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$$

где  $\sigma_{in}$  – предельная интенсивность касательных напряжений, определяемая по формуле:

# Напряженное состояние горной породы под штампом при вдавливании цилиндрического штампа в атмосферных условиях (по Р.М. Эйгелесу)

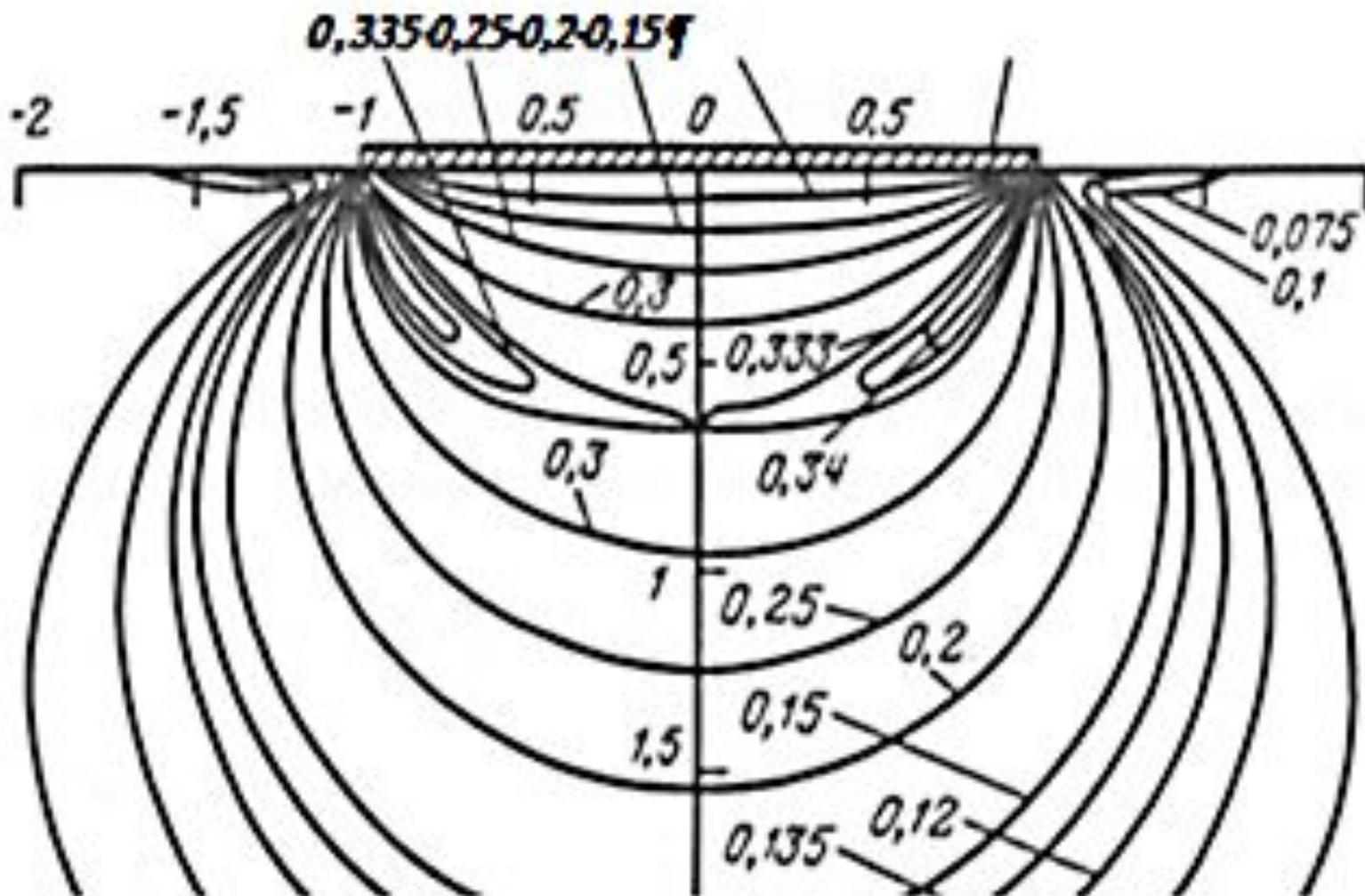


I-область всестороннего сжатия  $\sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0, \sigma_3 < 0$  ;

II-  $\sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0, \sigma_3 > 0$  одно из главных напряжений растягивающее;

III-  $\sigma_1 < 0, \sigma_2 > 0, \sigma_3 > 0$  два главных напряжения больше нуля (растягивающие);

# Распределение касательных напряжений в горной породе под штампом (по Р.М.Эйгелесу)

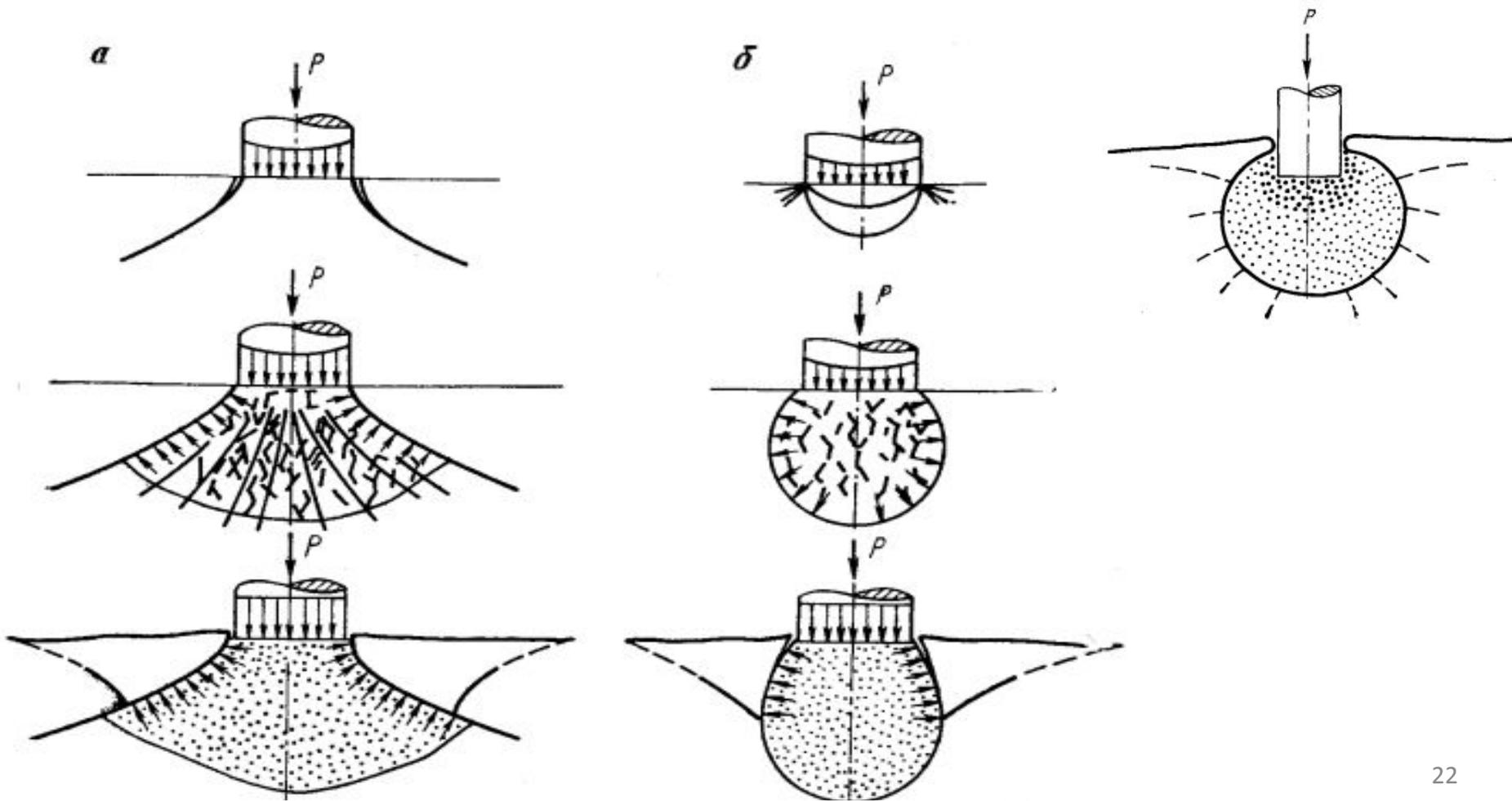


# Схемы механизмов разрушения горных пород при вдавливании для различных типов пород (по Р.М. Эйгелесу)

Хрупкие породы  
(первый механизм)

Хрупко-пластичные  
породы (второй механизм)

Пластичные породы  
(третий механизм)



# Распределение контактных напряжений по поверхности контакта элемента вооружения долота при вдавливании в горную породу.

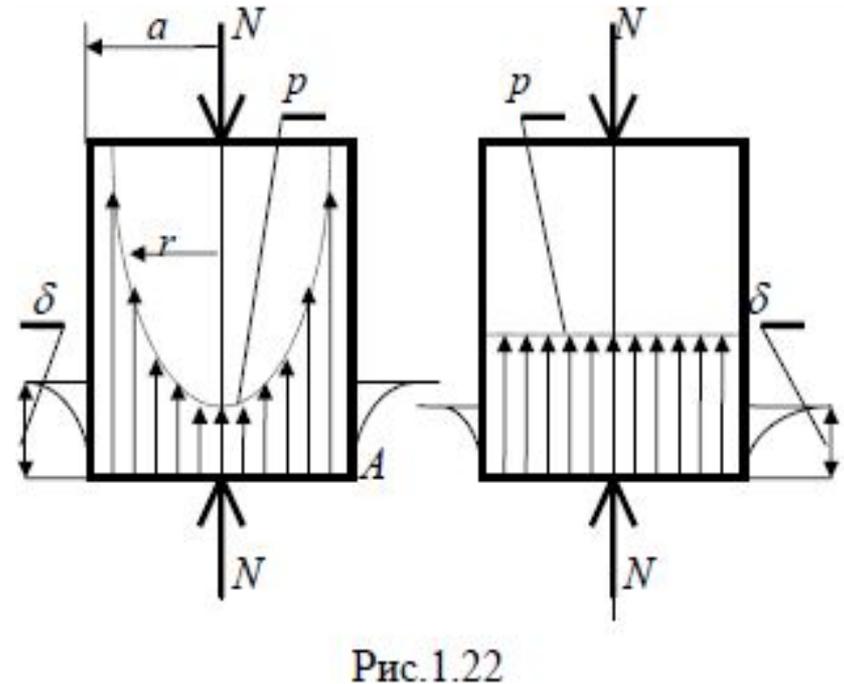
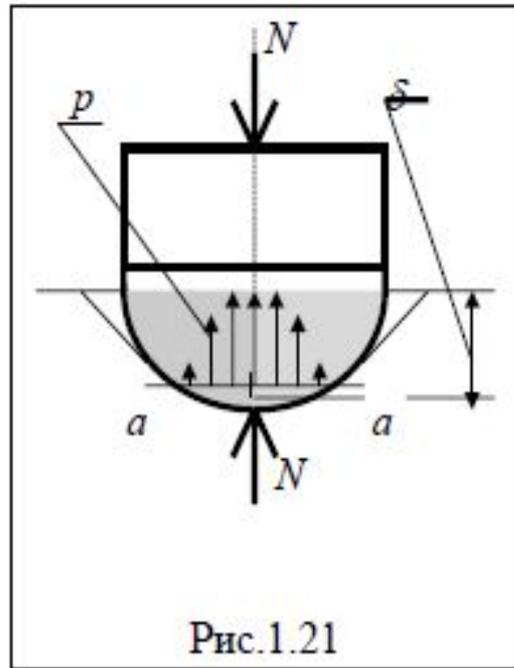


Рис. 1.21. полусферическая форма контактирующей поверхности;

Рис. 1.22. плоская форма контактирующей поверхности. Упругая (слева) и пластичная (справа) горные породы.

$N$ - вертикальное усилие на элемент вооружения бурового долота

$\delta$ - глубина внедрения элемента вооружения в горную породу;

$p$ - контактные напряжения на поверхности элемента вооружения

# Распределение контактных напряжений в породе при вдавливании индентора со сферической формой контактной площадки.

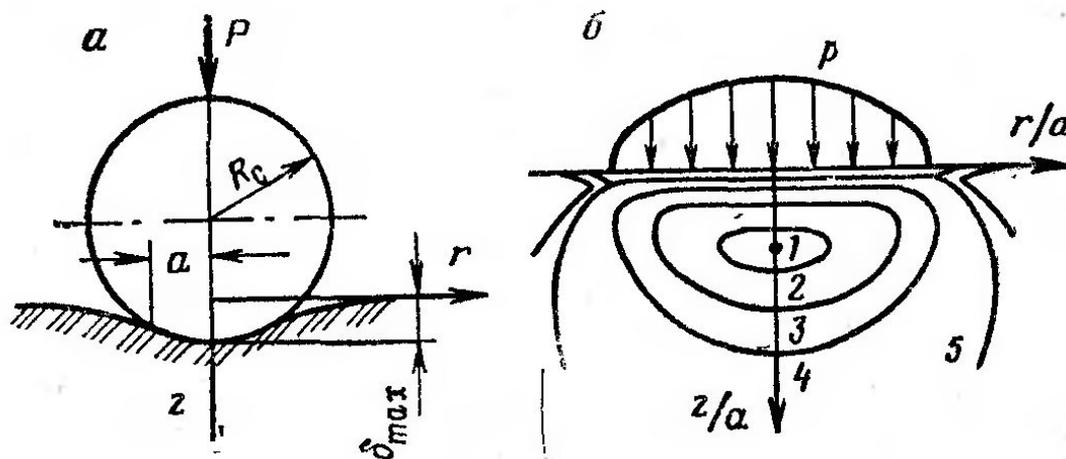
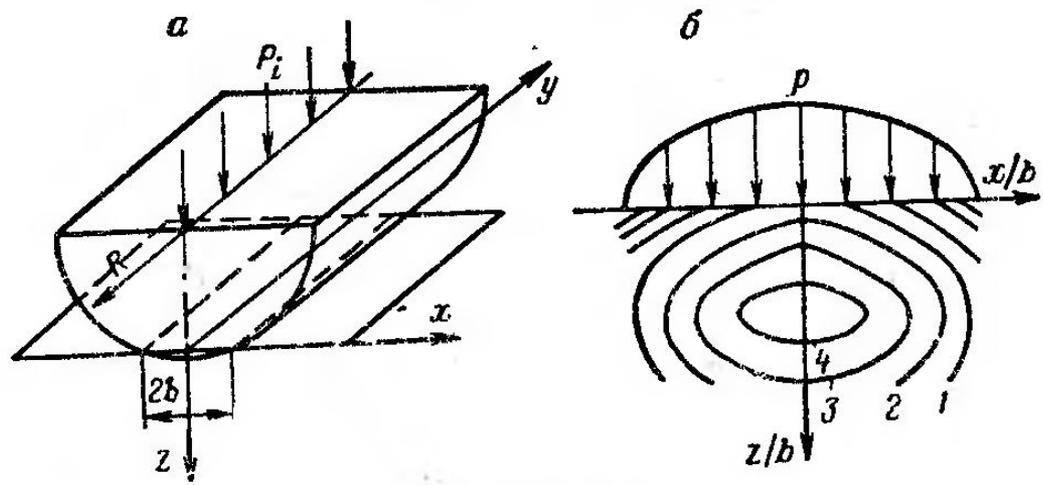


Рис. V.6. Расчетная схема (а), распределение давления и линии равных значений  $\tau_{max}/p_{max}$  (б) при вдавливании сферы ( $\mu = 0,3$ ).  
 $\tau_{max}/p_{max}$ : 1 — 0,31; 2 — 0,3; 3 — 0,25; 4 — 0,2; 5 — 0,1

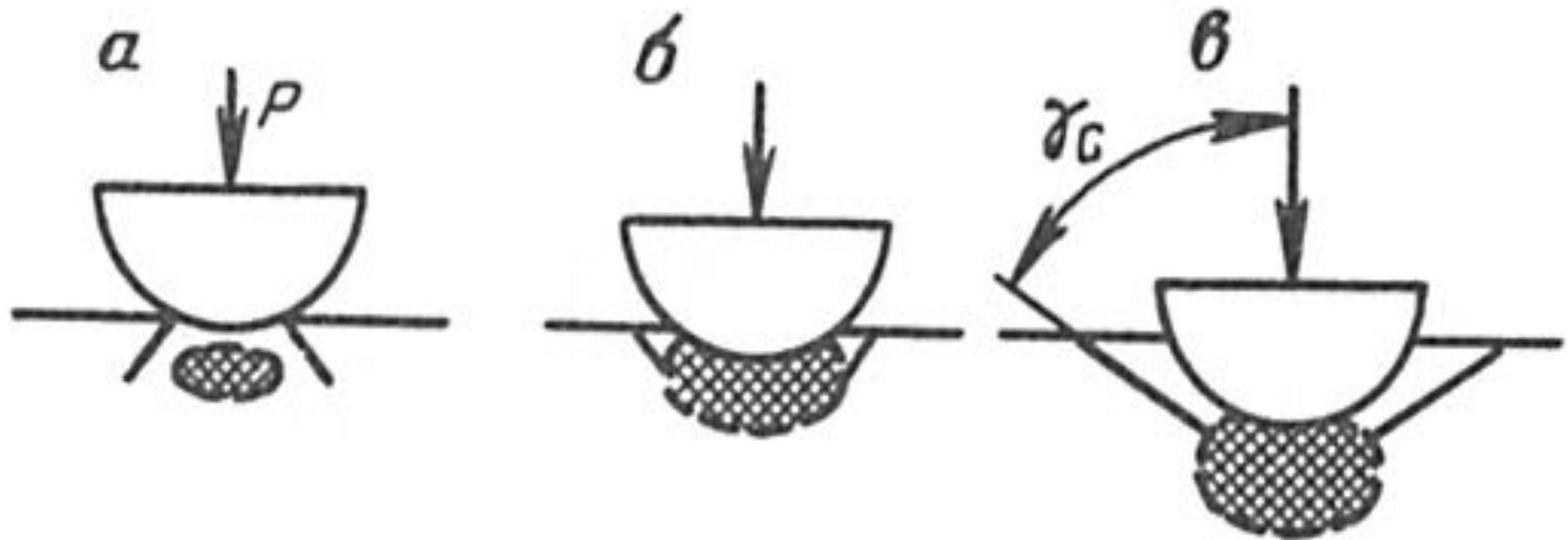
# Распределение контактных напряжений в породе при вдавливании индентора с цилиндрической формой контактной площадки.



**Рис. V.8.** Расчетная схема (а), распределение давления и линии равных значений  $\sigma_i/p_{\max}$  (б) при вдавливании цилиндра по образующей ( $\mu = 0,25$ )

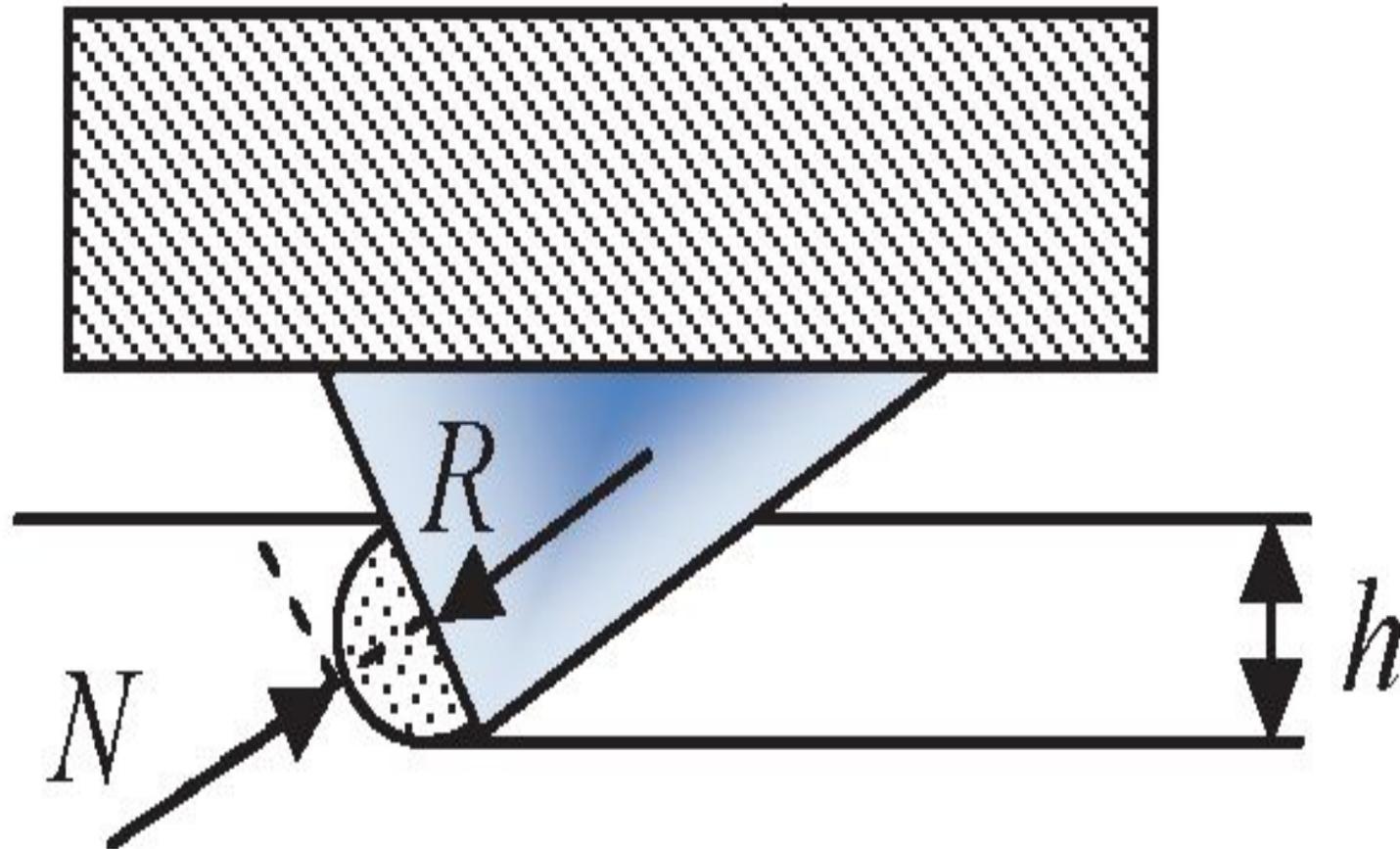
$\sigma_i/p_{\max}$ : 1 — 0,48; 2 — 0,51; 3 — 0,57

# Схема разрушения горной породы при вдавливании сферы



а — образование кольцевой трещины и зоны предельного состояния; б — образование кольцевого выкола; в — образование лунки (хрупкого разрушения)

# Схема взаимодействия резца PDC с горной породой



# Физико-механические свойства горных пород.

**Физические свойства горной породы:** Свойства горной породы, характеризующие протекание физических процессов в горной породе под действием различных физических полей.

**Механические свойства горных пород:** Физические свойства, характеризующие протекание процессов деформирования и разрушения горной породы под действием поля механических напряжений, обусловленных как условиями залегания горных пород так и техник-технологическими параметрами разрушения горных пород при бурении.

## Механические свойства горных пород, используемые в бурении:

- **Прочность горных пород-** Параметр, характеризующий сопротивляемость горной породы разрушению при одноосном и многоосном деформировании.
- **Твердость горной породы по штампу** – Параметр, характеризующий способность горной породы сопротивляться внедрению более твердого тела.
- **Абразивность-**способность породы изнашивать буровой породоразрушающий инструмент.
- **Пластичность** – способность горной породы деформироваться под действием механических напряжений без разрыва сплошности и сохранять эти изменения после этого действия;

# **Факторы, влияющие на твердость и прочность горной породы**

**Твердость горных пород** зависит от скорости приложения нагрузок. В зависимости от скорости приложения нагрузки различают статическую и динамическую твердость.

**Прочность горной породы** зависит от вида ее деформирования:

- Многоосное всестороннее или одноосное деформирование;
- Тип прилагаемых напряжений: растяжение, сжатие, изгиб, срез.

# Факторы, влияющие на абразивность горных пород

- **Абразивность** горной породы зависит от твердости породообразующих минералов, характера сцепления зерен друг с другом, крупности и формы зерен, плотности породы и степени ее трещиноватости.
- **Наиболее абразивными** оказываются породы, в которых твердые минералы (например кварц, корунд, гранит) **сцементированы** менее твердым материалом.

**Абразивность горной породы оценивается по интенсивности износа эталонного стального образца при взаимодействии с породой.**

**Показатель абразивности зависит от того, какой материал принят за эталонный (сталь, твердый сплав и т.д.). Обычно это низколегированная сталь.**

# Абразивность горных пород

Абразивность горной породы оценивается средней потерей в весе (в миллиграммах) цилиндрического стержня из углеродистой стали (серебрянки) путем истирания его о породу при вращении со скоростью 400 об/мин под осевой нагрузкой 15 кгс в течение 10 мин.

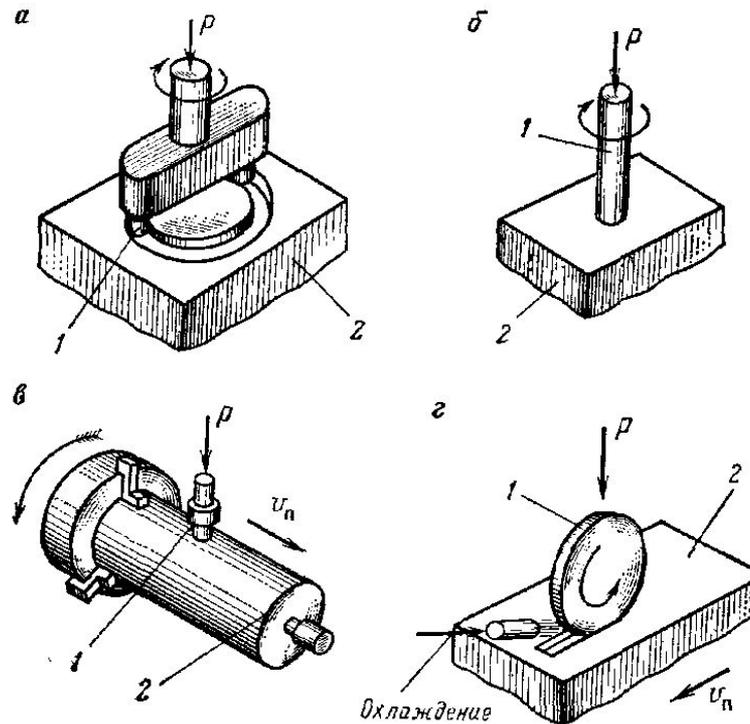


Рис. 48. Основные схемы изнашивания металлов при изучении абразивности горных пород:

*а* — схема бурения-резания; *б* — схема сверления; *в* — схема изнашивания на цилиндрической поверхности керна; *г* — схема изнашивания диска:  
*1* — образец металла; *2* — образец горной породы; *P* — нагрузка на образец;  $v_n$  — скорость подачи

# Классификация горных пород по абразивности.

## Классы абразивности горных пород

Класс	Название класса	$a_3$ , мг/10 мин
I	Весьма малоабразивные	$< 5$
II	Малоабразивные	5—10
III	Ниже средней абразивности	10—18
IV	Среднеабразивные	18—30
V	Выше средней абразивности	30—45
VI	Повышенной абразивности	45—65
VII	Высокоабразивные	65—90
VIII	В высшей степени абразивные	$> 90$

# Зависимость характера износа стали при взаимодействии с горной породой от величины подводимой энергии

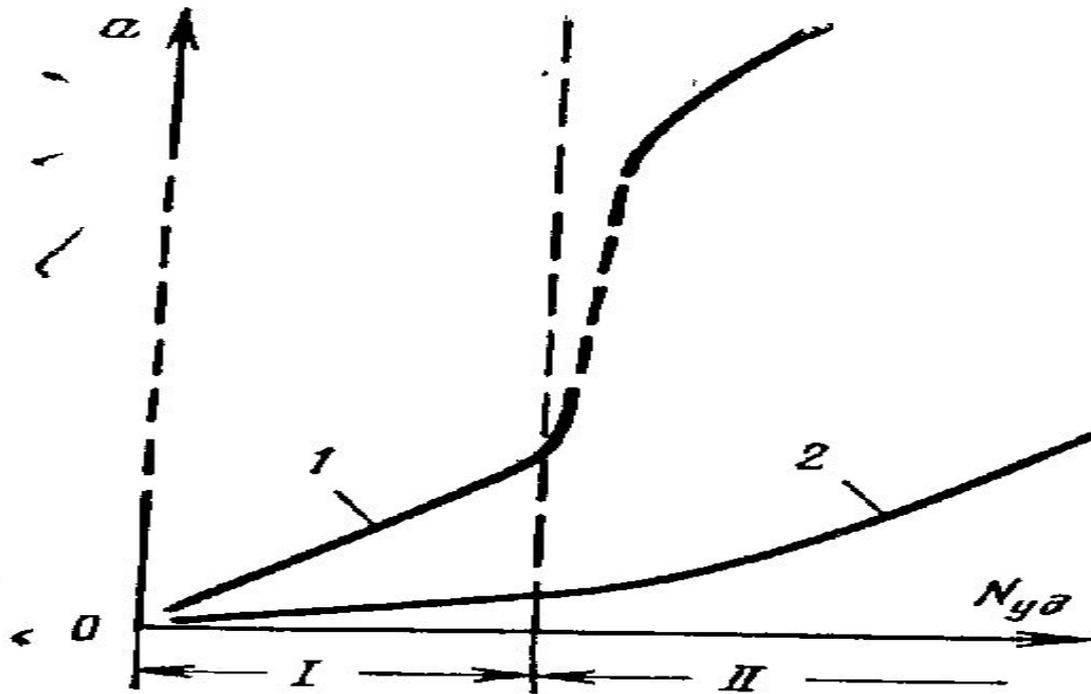
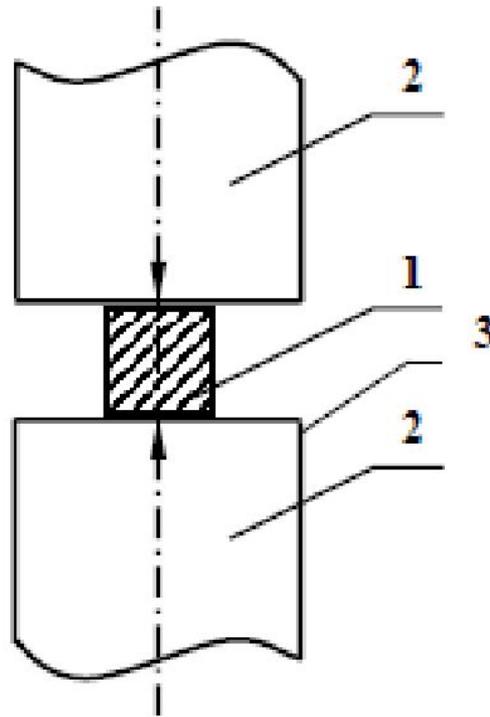


Рис. 49. Характерный вид зависимостей скорости изнашивания стали от удельной мощности при трении об обломочные (1) и о кристаллические (2) осадочные породы:

I, II — области изнашивания

# Схема установки для определения прочности горной породы на одноосное сжатие в атмосферных условиях



$$\sigma_{сж} = \frac{P_{max}}{F}$$

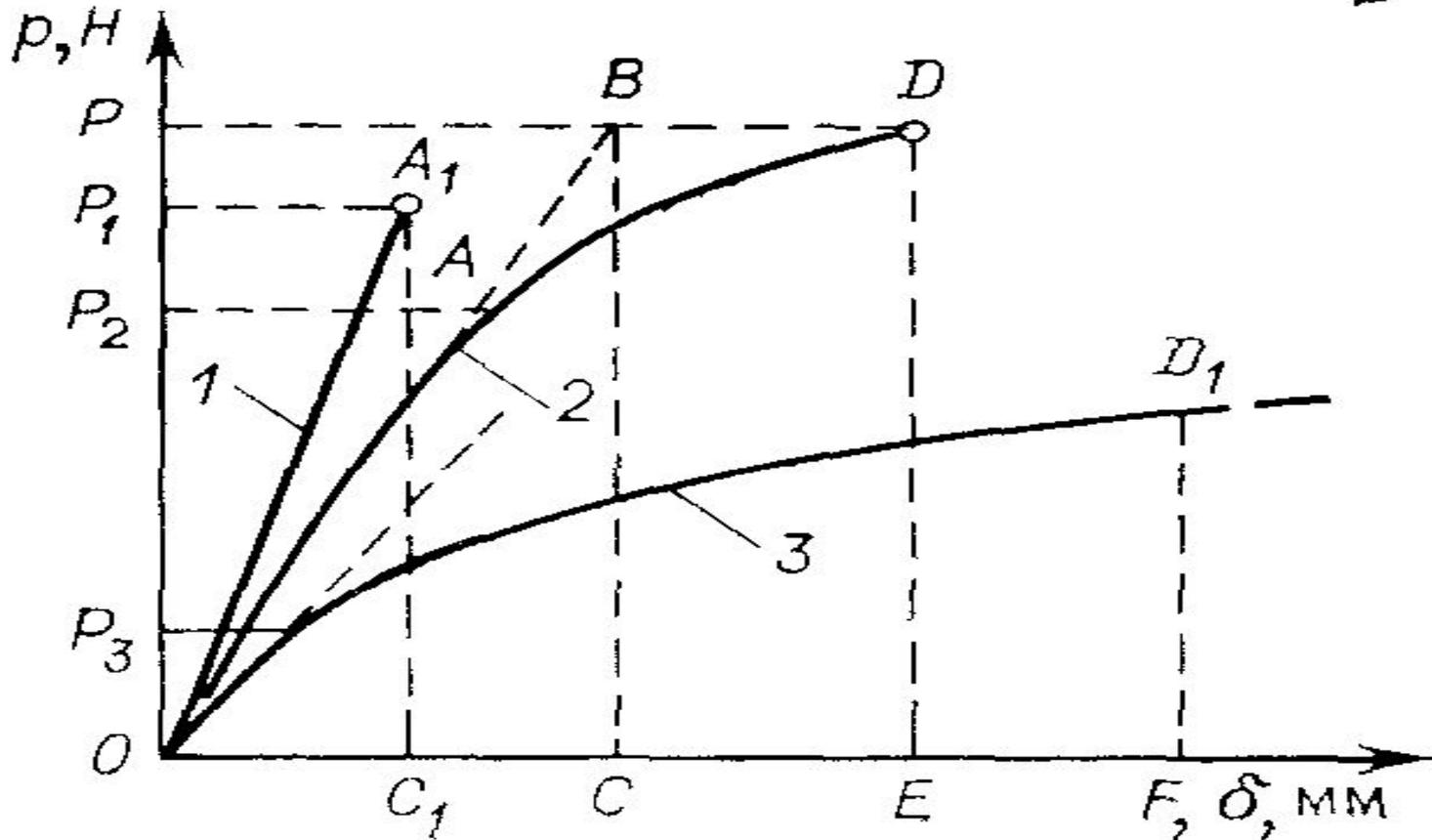
1 – образец породы; 2 – плиты пресса; 3 – стол гидропресса

# Сравнительные значения прочности горных пород на сжатие, сдвиг и растяжение

Породы	$\sigma_{сж}$	Относительная доля от сопротивления сжатию, %		
		$\sigma_s$	$\sigma_{изг}$	$\sigma_p$
Песчаники	100	10-20	2-14	2-5
Глинистые сланцы	100	-	15-60	10-18
Известняки	100	15-20	8-10	10-13
Мрамор	100	16-40	-	8-10

# График деформирования горных пород при одноосном сжатии

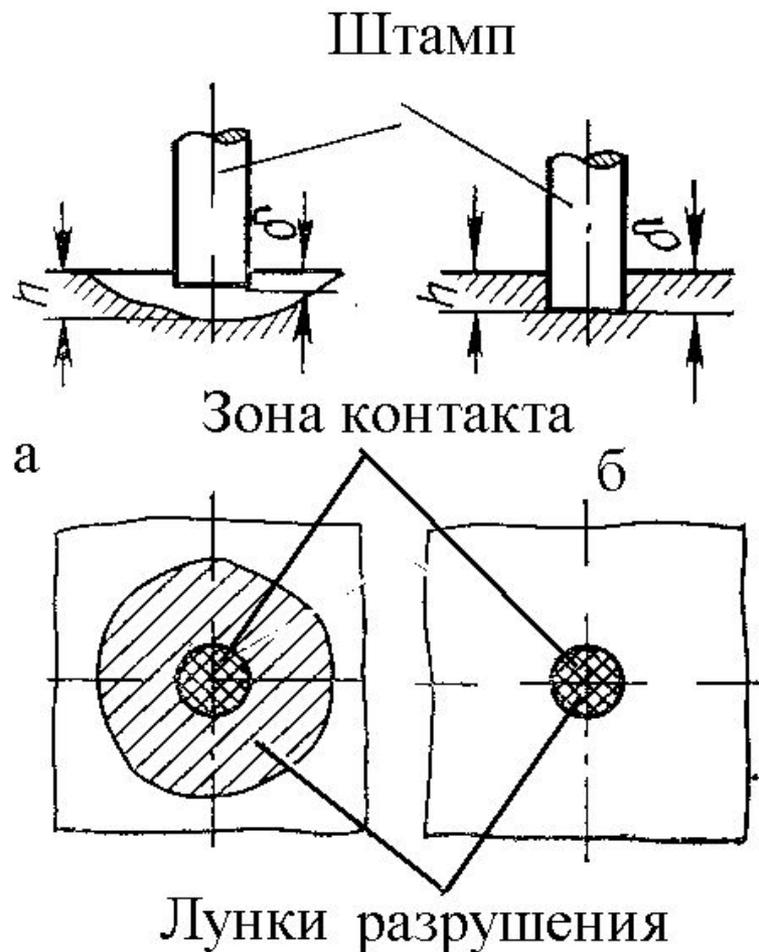
- 1—хрупкая порода (кварцит);
- 2— хрупко-пластичная порода (мрамор)
- 3— пластичная порода (глина, каменная соль)



$p$ - нагрузка,  $H$ ;  $\delta$ - деформация образца,  $MM$

# Определение твердости горной породы методом вдавливания штампа (по методу Шрейнера Л.А.)

- **a** — для хрупких и хрупко-пластичных горных пород;
- **б** — для высокопластичных и сильнопористых горных пород;
- $\delta$  — наибольшая деформация породы ( $h=d\delta$ ),
- $h$  — глубина лунки разрушения



# Твердость горной породы по штампу

Твердость хрупкой и хрупко-пластичной горной породы по штампу **T** это величина, численно равная контактному давлению штампа на горную породу, при котором происходит разрушение её поверхности при вдавливании индентора. Твердость по штампу измеряется в **МПа или кг/мм<sup>2</sup>**

$$T=P/F$$

где:

**P**- максимальное осевое усилие на штамп, при котором происходит разрушение поверхности образца этой хрупкой или хрупко-пластичной горной породы (Н) ;

**F**- площадь контакта штампа с горной породой (М<sup>2</sup>)

Твердость пластичных горных пород, это величина контактного давления штампа на горную породу, при котором штамп внедряется в горную породу на глубину равную диаметру штампа (Н);

Твердость породы по штампу определяют согласно ГОСТ 12288-66 на стандартизованном приборе УМПГ-4 путем вдавливания в образец породы штампа, имеющего плоскую опорную поверхность (S=1-10 мм<sup>2</sup>).

# Дополнительные физико-механические характеристики горной породы

## Пластичность горной породы

**Коэффициент пластичности горной породы:** Параметр, оценивающий пластичность горной породы и определяющий вклад пластических деформаций в разрушение горной породы;

**Удельная объемная работа разрушения** при вдавливании штампа – величина энергии на разрушение единицы объема горной породы под штампом ( $A_{уд}$ , Дж/см<sup>3</sup>). Определяется как отношение работы силы вдавливания индентора к объему разрушенной породы в зоне разрушения.

# Схема установки УМПГ-4 для измерения твердости горной породы по штампу

Твердость породы по штампу определяют согласно ГОСТ 12288-66 на стандартизованном приборе УМПГ-4 путем вдавливания в образец породы штампа, имеющего плоскую опорную поверхность ( $S=1-10 \text{ мм}^2$ ).

Для определения твердости по штампу применяют штампы двух видов: стальной и с твердосплавной вставкой.

Площадь штампа выбирается в зависимости от размера минеральных зерен, структуры и текстуры породы.

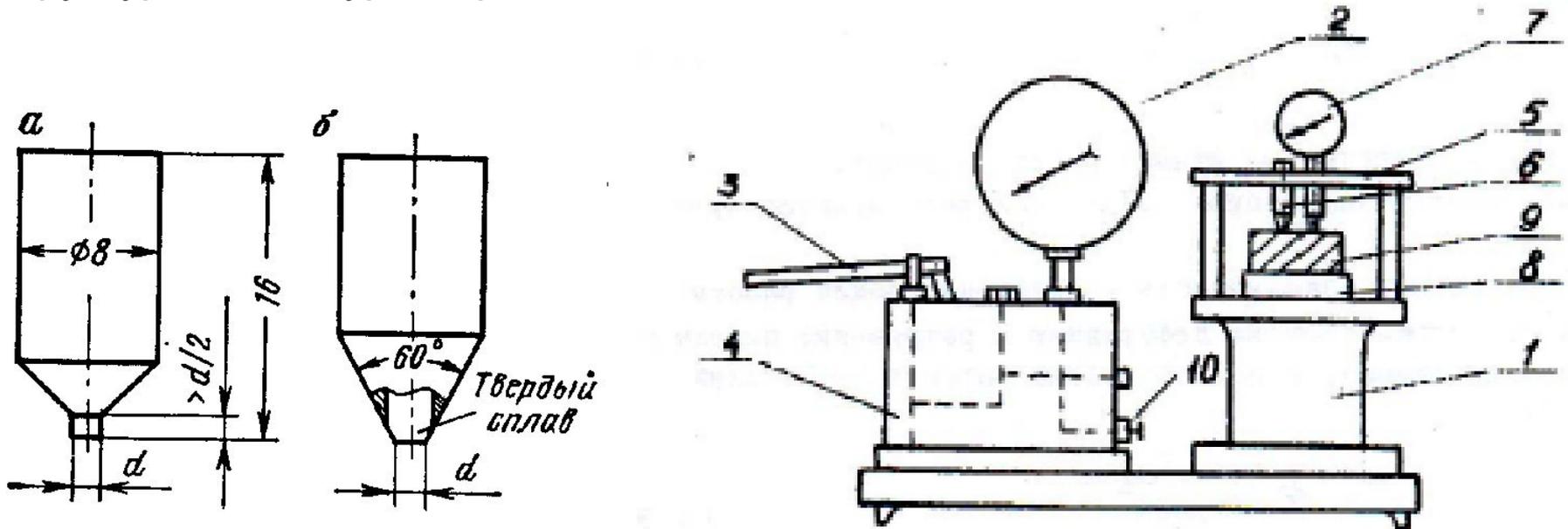


Рис. 38. Цилиндрические штампы

# Определение твердости по штампу и коэффициента пластичности горной породы.

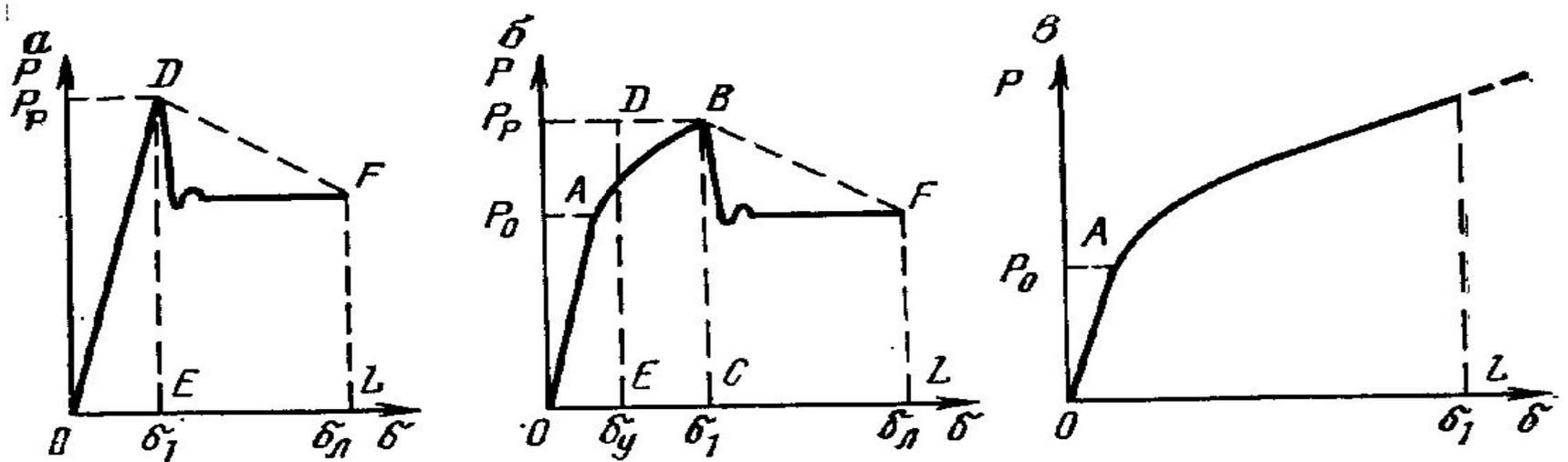


Рис. 39. Характерные графики нагрузка — глубина вдавливания штампа для: а — хрупких пород (кварцит); б — пластично-хрупких пород (ангидрит); в — высокопластичных и сильно пористых пород

**OA** - упругая деформация, **AB** - пластическая деформация.

**P<sub>0</sub>** - нагрузка, соответствующая пределу текучести породы  $p_0 = P_0/S$

Коэффициент пластичности  $K = A_{пд}/A_{упр.д}$ ,

где:  $A_{упр.д}$  - работа упругого деформирования (ODE);

$A_{пд}$  - работа полного деформирования до момента разрушения (OABC).

# Классификация горных пород по твердости и пластичности

## Классификация горных пород по твердости по штампу

I группа				
Категория	1	2	3	4
$\rho_{ш}$ , МПа	<100	100—250	250—500	500—1000

I группа –высоко пластичные горные породы (глины, аргиллиты, алевролиты, песчаники);

II группа				
Категория	5	6	7	8
$\rho_{ш}$ , МПа	1000—1500	1500—2000	2000—3000	3000—4000

II группа хрупко –пластичные горные породы (песчаники, известняки, доломиты, ангидриты);

III группа				
Категория	9	10	11	12
$\rho_{ш}$ , МПа	4000—5000	5000—6000	6000—7000	>7000

III группа хрупкие (кварциты, граниты, кремнеземные известняки и доломиты)

По величине коэффициента пластичности все горные породы разделены на шесть категорий

Категория . . . . .	1	2	3	4	5	6
$k$ . . . . .	1	1—2	2—3	3—4	4—6	6— $\infty$

# Типы вооружения шарошечных долот по (ГОСТ 20692-03)

Общая характеристика горной породы (категория твердости)	Характеристика механических свойств	Шифр долота	Исполнение вооружения
Мягкие породы (1 и 2 кат.)	Неабразивные рыхлые, пластичные (слабые супеси, пластичные глины, мягкие известняки и т.д.)	<b>М</b>	С фрезерованными зубьями
	Абразивные слабосцементированные (слабые песчаники, суглинки, мергели и т.п.)	<b>МЗ</b>	Со вставными зубками
Мягкие породы с пропластками пород средней твердости (3 кат)	Неабразивные породы (каменная соль с пропластками ангидритов, тонко переслаивающиеся глины с пропластками слабых песчаников)	<b>МС</b>	С фрезерованными зубьями
	Абразивные слабосцементированные породы (с пропластками песчаников, сланцы мягкие с пропластками сланцев средней твердости и т.п.).	<b>МСЗ</b>	Со вставными зубками
Породы средней твердости (4 кат)	Неабразивные пластичные и хрупкопластичные породы (известняки средней твердости, слабые доломиты, плотные глины)	<b>С</b>	С фрезерованными зубьями
	Абразивные породы средней твердости (песчаники, алевролиты)	<b>СЗ</b>	Со вставными зубками
Породы средней твердости с пропластками твердых (5 кат)	Неабразивные хрупкопластичные породы средней твердости с пропластками твердых (переслаивающиеся известняки, гипсы, доломиты, аргиллиты)	<b>СТ</b>	С фрезерованными зубьями
Твердые (6 кат)	Неабразивные твердые породы (аргиллиты, доломиты, твердые известняки и т.п.)	<b>Т</b>	С фрезерованными зубьями
	Абразивные твердые породы (крепкие песчаники, окварцованные известняки, доломиты)	<b>ТЗ</b>	Со вставными зубками
Твердые с пропластками крепких (7 кат)	Неабразивные твердые породы с пропластками крепких (переслаивающиеся твердые известняки, доломиты, ангидриты и т.п.)	<b>ТК</b>	С комбинированным вооружением (фрезерованные и вставные зубья)

# Таблица соответствия типа долота категориям твердости и абразивности горной породы

Абразивность, кат.

12												
11											ИМП	
10								ОК ИМП	ОК ИМП	ИМП		
9							К ИМП	К ИМП	ОК ИМП	ОК ИМП		
8						ТКЗ	ТКЗ ИМП	К ИМП	ОК ИМП	ОК ИМП		
7					ТЗ	ТЗ	ТКЗ ИМП	К ИМП	ОК ИМП			
6			МСЗ	СЗ	ТЗ	ТЗ	ТКЗ ИМП	К ИМП	ОК ИМП			
5		МЗ	МСЗ	МСЗ	СЗ	СЗ АЛМ	ТЗ АЛМ	К ИМП	К ИМП			
4		PDC	МС PDC	С PDC	СТ PDC	Т АЛМ	Т АЛМ	ТК АЛМ	К АЛМ	К ИМП		
3		М PDC	МС PDC	С PDC	СТ PDC	СТ АЛМ	Т АЛМ	ТК АЛМ	К АЛМ			
2		М PDC	МС PDC	МС PDC	С PDC	СТ PDC						
1												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Твердость, кат.

Обозначения:

**М, МС, С, СТ, Т** — трехшарошечные долота со стальным вооружением;

**МЗ, МСЗ, СЗ, ТЗ, ТК, ТКЗ, К, ОК** — трехшарошечные долота с твердосплавным вооружением;

**АЛМ** — алмазные долота;

**ИМП** — импрегнированные алмазные долота;

**PDC** — долота PDC.

# Таблица выбора типажа шарошечных долот в зависимости от твердости и абразивности пород

Класс пород	Описание пород	Средневзвешенные показатели свойств пород		Обозначение типа вооружения долота	Тип вооружения долота
		твердость, кат.	абразивность, кат.		
Мягкие	Пластичные глины, пески, мягкие известняки	2,4	3,9	М	Фрезерованное
Мягкие абразивные	Слабые песчаники, суглинки, мергели	3,2	4,9	МЗ	Твердосплавное
Мягкие с пропластками средних	Глины, соли, песок	4,5	3,2	МС	Фрезерованное
Мягкие абразивные с пропластками средних	Слабые песчаники, сланцы	4,5	3,2	МСЗ	Твердосплавное
Средние	Известняки, доломиты, плотные глины, мел	3,7	4,4	С	Фрезерованное
Средние абразивные	Песчаники, алевролиты	4,2	5,8	СЗ	Твердосплавное
Средние с пропластками твердых	Известняки, гипсы, доломиты, аргиллиты	4,5	4,0	СТ	Фрезерованное
Твердые	Крепкие песчаники, известняки, доломиты	5,6	4,5	Т	Фрезерованное
Твердые абразивные	Крепкие песчаники, окварцованные известняки, доломиты	6,2	5,9	ТЗ	Твердосплавное
Твердые с пропластками крепких	Твердые известняки, доломиты, ангидриды	5,9	4,9	ТК	Фрезерованное с твердосплавным
Твердые абразивные с пропластками крепких	Мелкозернистые песчаники, окремненные аргиллиты	6,2	6,0	ТКЗ	Твердосплавное
Крепкие	Окремненные известняки, доломиты, кварциты	7,3	7,8	К	Твердосплавное
Очень крепкие	Мелкозернистые песчаники, граниты, гнейсы	8,0	8,0	ОК	Твердосплавное

# Механические свойства наиболее распространенных горных пород

Горная порода	Твердость по штампу, МПа	Коэффициент пластичности К	Модуль упругости E, $10^{10}$ Па	Удельная объемная работа разрушения, Дж/см <sup>3</sup>
<b>Глинистый сланец</b>	<b>200-250</b>	<b>1,3-3,3</b>	<b>0,4-0,9</b>	<b>1,5-7,7</b>
Ангидрит	950-1500	2,9-4,3	1,8-5,4	21-54
Песчаник и алевролит	200-350	1,4-4,3	0,5-3,5	5-59
<b>Известняк</b>	<b>1000-2500</b>	<b>1,5-7,0</b>	<b>1,5-4,0</b>	<b>21-80</b>
Доломит	1000-6000	1,5-6,0	5-9	39-151
<b>Кремень</b>	<b>5000-7000</b>	<b>1,0-2,0</b>	<b>&gt;10</b>	<b>≈20</b>

# Физическое моделирование как метод исследования процесса или явления

Физическое моделирование это метод экспериментального исследования объекта (физического процесса или явления), основанный на замене исследований натурального объекта исследованиями на физической модели этого объекта, имеющей ту же физическую природу, что и исследуемый натуральный объект.

При этом должны соблюдаться требования подобия исследуемого натурального объекта и его физической модели.

В технических науках это необходимо для того, чтобы использовать результаты исследований объекта на его модели для последующего проектирования техники и технологии, которые могут быть эффективно использоваться в реальных условиях.

# Основные задачи физического моделирования взаимодействия вооружения шарошечного долота с горной породой

- Исследование основных закономерностей влияния геологических, технических и технологических факторов на эффективность процесса разрушения горной породы в забойных условиях при бурении глубоких скважин;
- Получение силовых характеристик взаимодействия элементов вооружения бурового долота с горной породой в забойных условиях  $P(Z)$ . При этом под силовой характеристикой  $P(Z)$  понимается зависимость вертикальной составляющей силы сопротивления внедрению элемента вооружения в горную породу  $P$  от глубины внедрения элемента вооружения в породу  $Z$ .
- Получение зависимости  $V(Z_{\max})$  объема зоны разрушения поверхности горной породы  $V$  от максимальной глубины внедрения  $Z_{\max}$  в забойных условиях.

# Условия, параметры и показатели процесса разрушения горных пород при бурении

**Условия процесса** : совокупность факторов, которые влияют на процесс, но не могут быть изменены (геологические условия залегания горных пород);

**Параметры процесса** : совокупность факторов, которые влияют на процесс, а значения этих параметров могут быть изменены в процессе бурения скважины (все технические и технологические факторы);

**Показатели процесса**: механическая скорость бурения, удельная энергоёмкость процесса.

# **Геологические, технические и технологические факторы определяющие эффективность процесса разрушения горных пород при бурении.**

## **1. Геологические факторы:**

- условия залегания горных пород на забое скважины: (температура на забое скважины, горное и пластовое давление в зоне забоя скважины);
- Физико-механические свойства горных пород в забойных условиях;

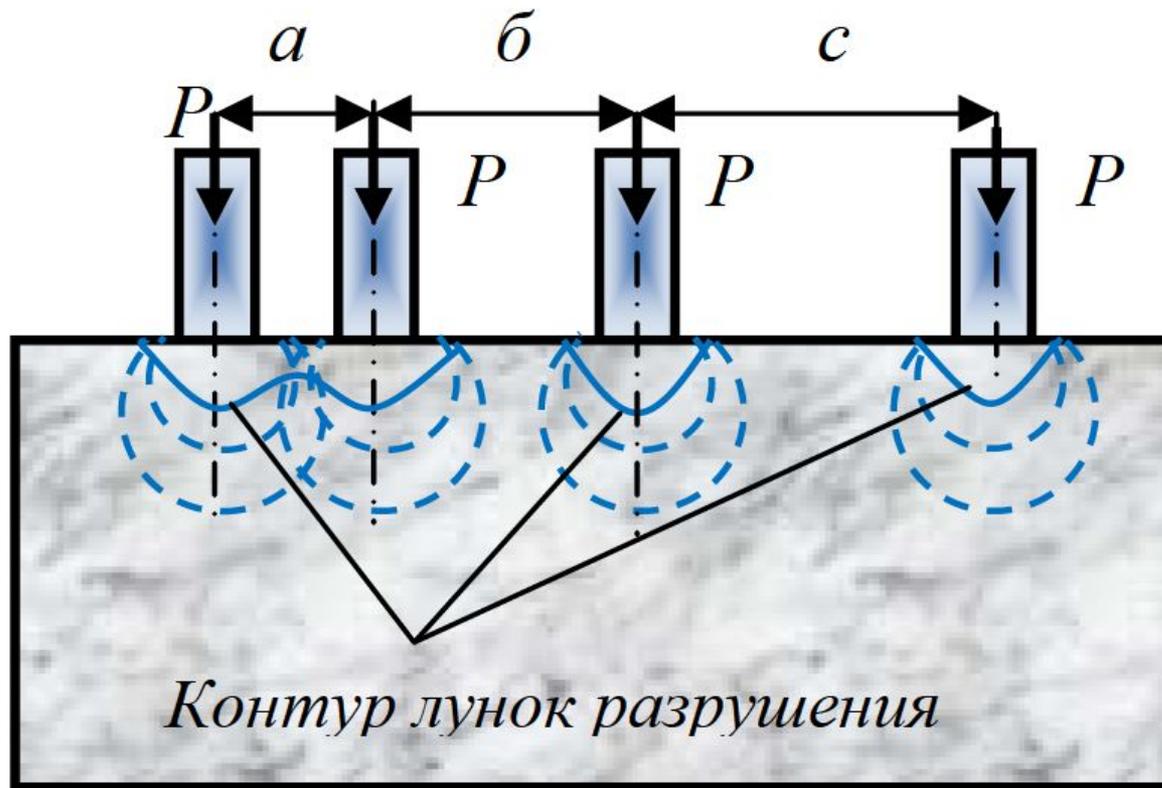
## **2. Технические факторы:**

- Конструктивные параметры буровой колонны;
- Конструктивные параметры вооружения бурового долота;
- Способ бурения;

## **3. Технологические факторы:**

- параметры режима бурения (осевая нагрузка на долото, частота вращения долота, расход промывочной жидкости, параметры промывочной жидкости)

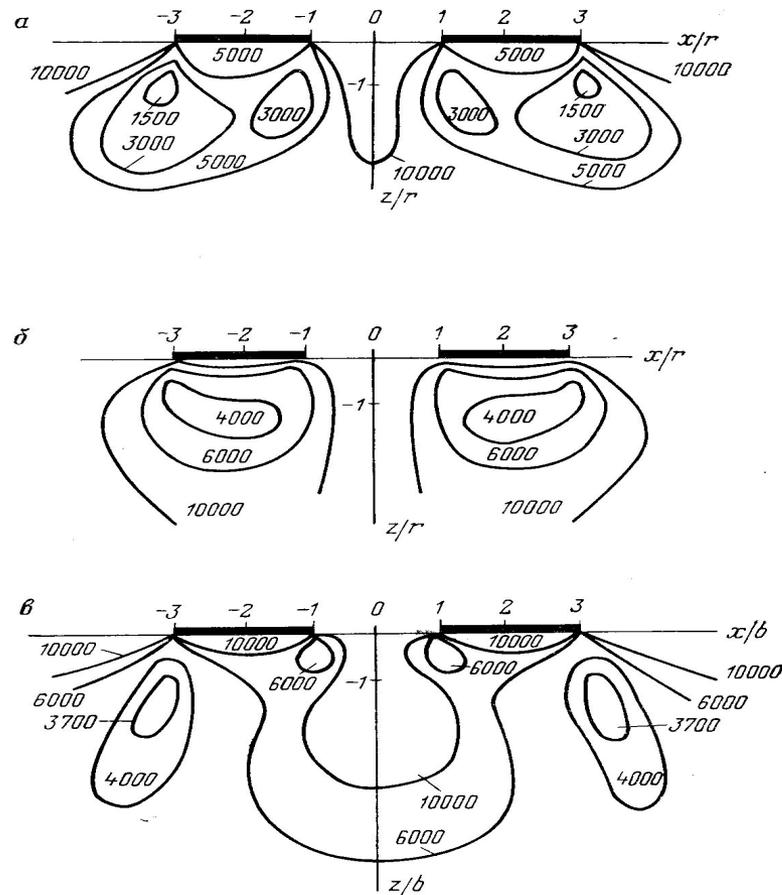
# Схема одновременного внедрения в породу нескольких инденторов



$b, c$  – расстояние между инденторами при отсутствии взаимодействия зон разрушения;  $a$  – расстояние между инденторами при наличии взаимодействия зон разрушения;

# Расчетные значения полей напряжений для двух площадок давления

(а-площадки круглые, эпюра давления равномерная; б – площадки круглые, эпюра давления полусферическая; в- площадки прямоугольные, эпюра давления равномерная.)



# Взаимодействие зон разрушения при вдавливании двух инденторов.



$V_2$  – суммарный объем двух зон разрушения

$2V_{ед}$  - объем двух зон разрушения;  $C$  - расстояние между инденторами;  $r$  – радиус инденторов.

# Профилограммы зон разрушения при вдавливании двух инденторов на различных расстояниях.

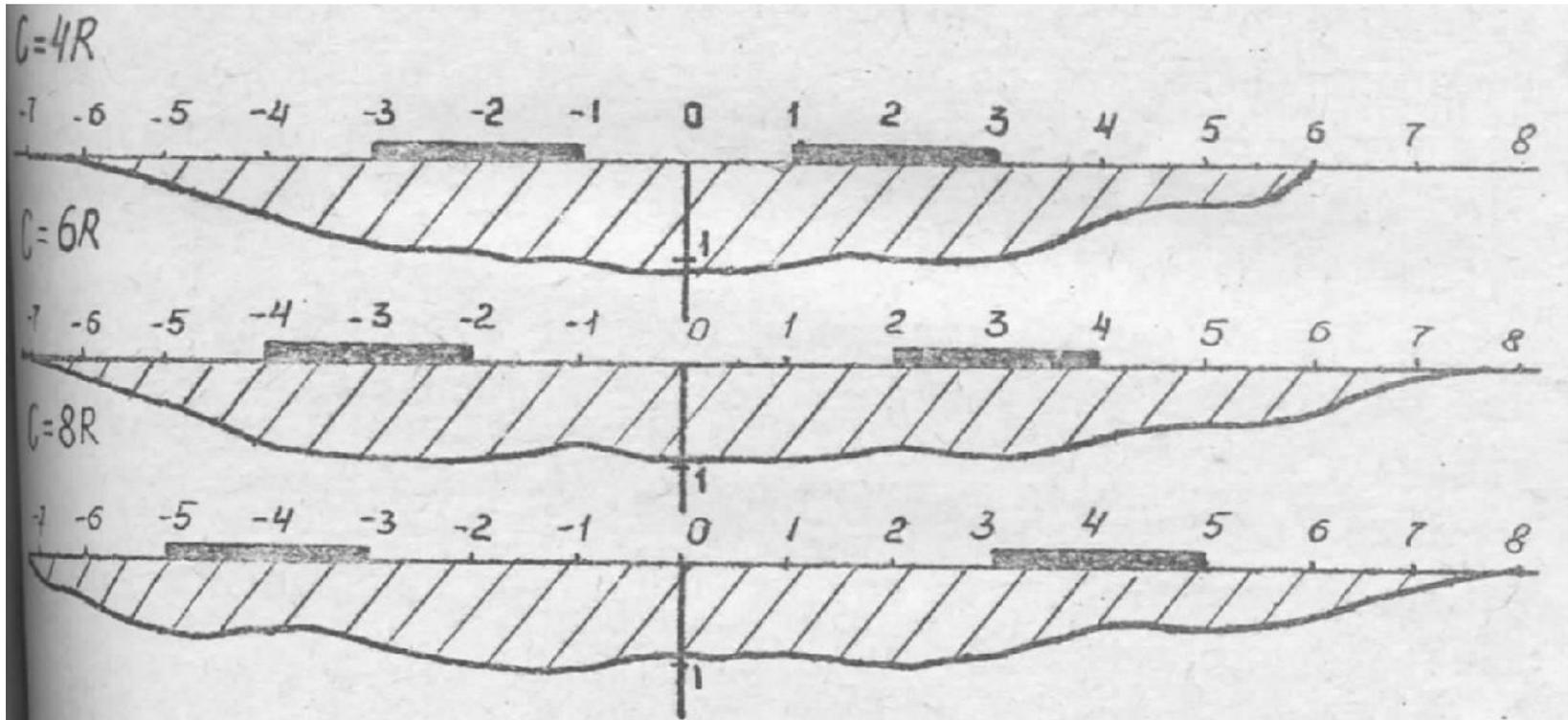


Рис. 9.

Усредненные профилограммы лунок разрушения. Давление равномерное по двум круглым площадкам  $\frac{S}{2} = 4; 6; 8$ .

$C$  - расстояние между инденторами;  $r$  - радиус инденторов.

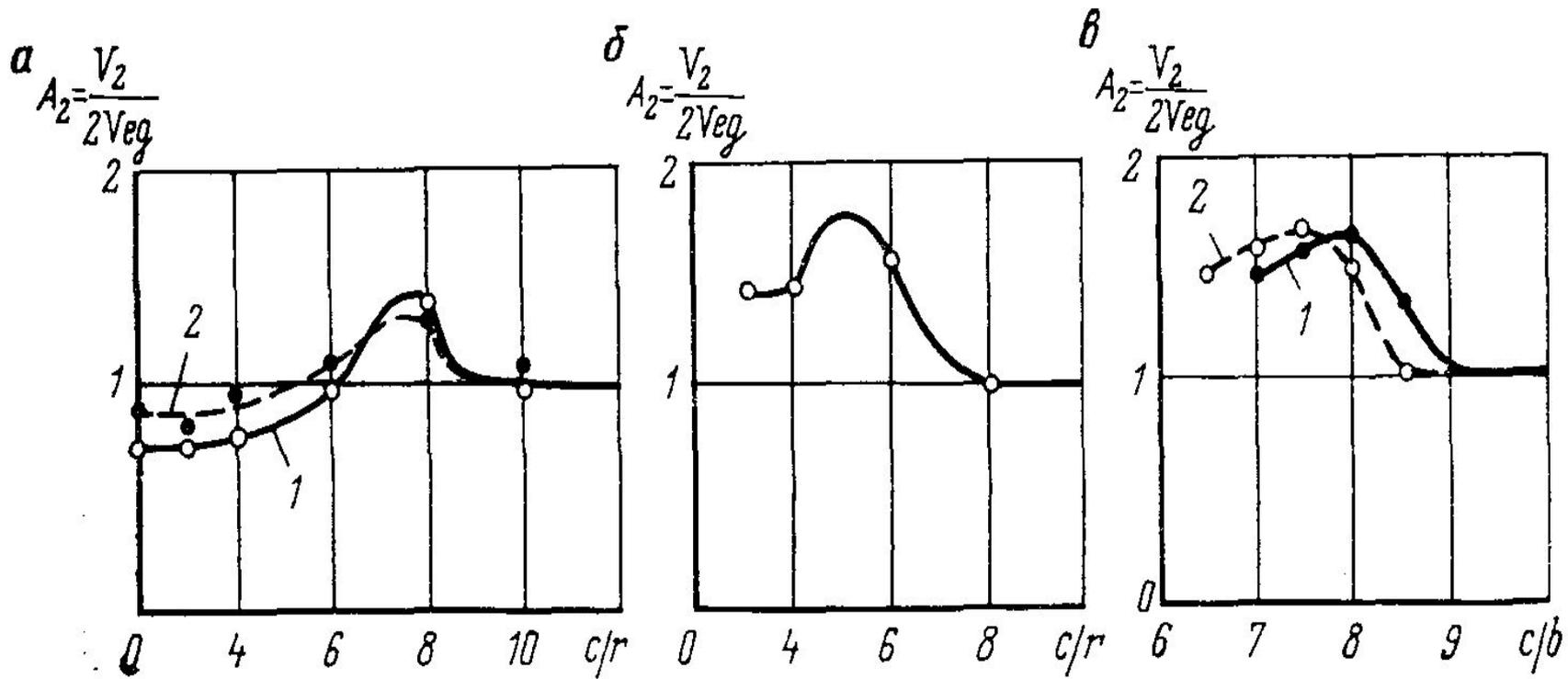


Рис. 60. Экспериментальные зависимости приведенного объема разрушения от относительного расстояния между инденторами:

*a* — круглые плоскодонные инденторы: 1 —  $r=5$ , 2 —  $r=2,5$  мм; *б* — инденторы с полусферической вершиной ( $r=2,6$  мм); *в* — призматические инденторы: 1 —  $a=5$ ,  $b=1$  мм; 2 —  $a=10$ ,  $b=2$  мм

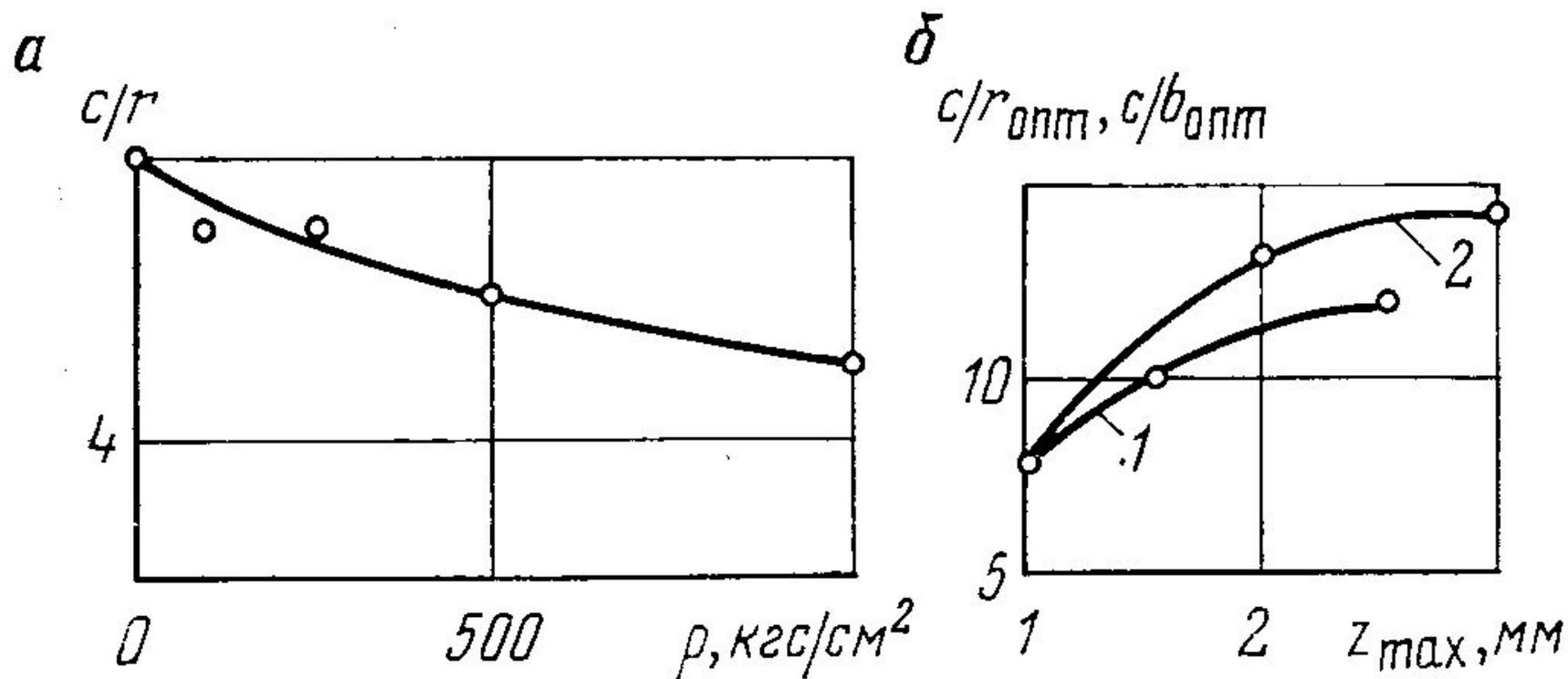
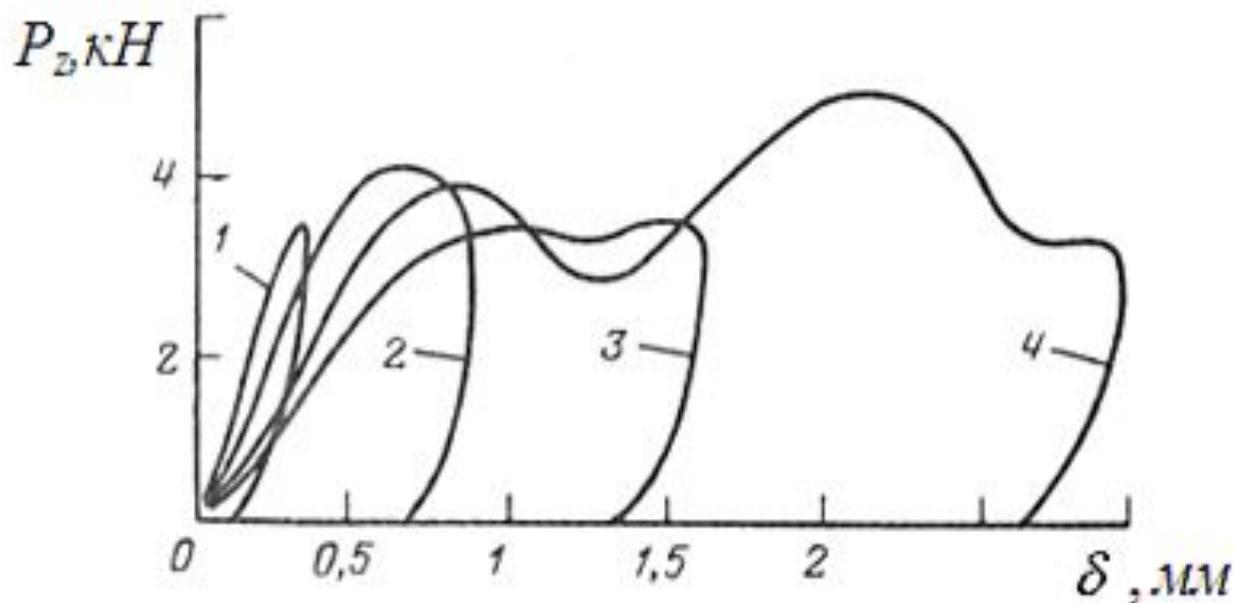


Рис. 63. Экспериментальные зависимости оптимального расстояния между инденторами от всестороннего давления (а) и глубины внедрения (б):

1 — три цилиндрических плоскодонных индентора ( $r=2,5$  мм, расположены треугольником); 2 — два призматических индентора ( $a=5, b=1$  мм)

# Зависимость осевого усилия на штамп от глубины внедрения в мрамор при различной энергии удара



1 — 0,8 Дж; 2 — 2,3 Дж; 3 — 4,6 Дж; 4 — 10,5 Дж

# Физическое моделирование взаимодействия элементов вооружения с горной породой в забойных условиях

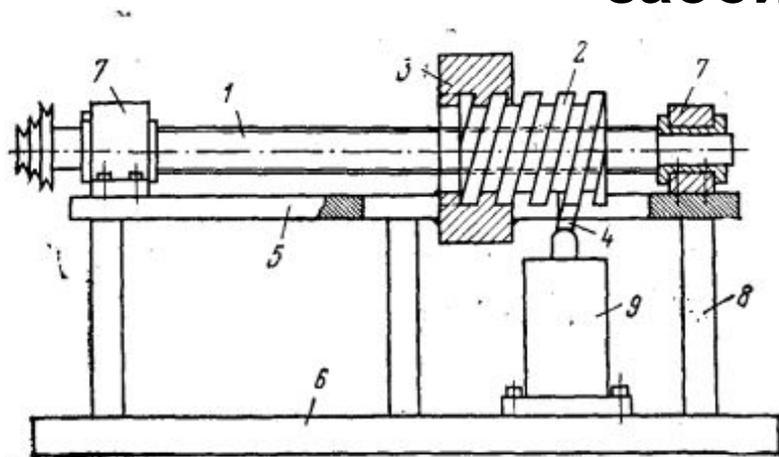


Рис.

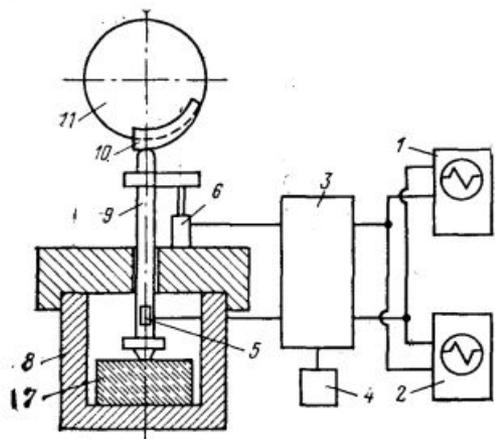


Рис. 36. Блок-схема измерительной схемы установки КУМ-15:

1, 2 — осциллографы; 3 — пульт управления с усилителями; 4 — стабилизированный источник питания; 5 — тензодинамометр; 6 — датчик перемещения; 7 — образец горной породы; 8 — камера забойных условий КЗУ; 9 — нагрузочный шток; 10 — кулачок; 11 — червяк винт

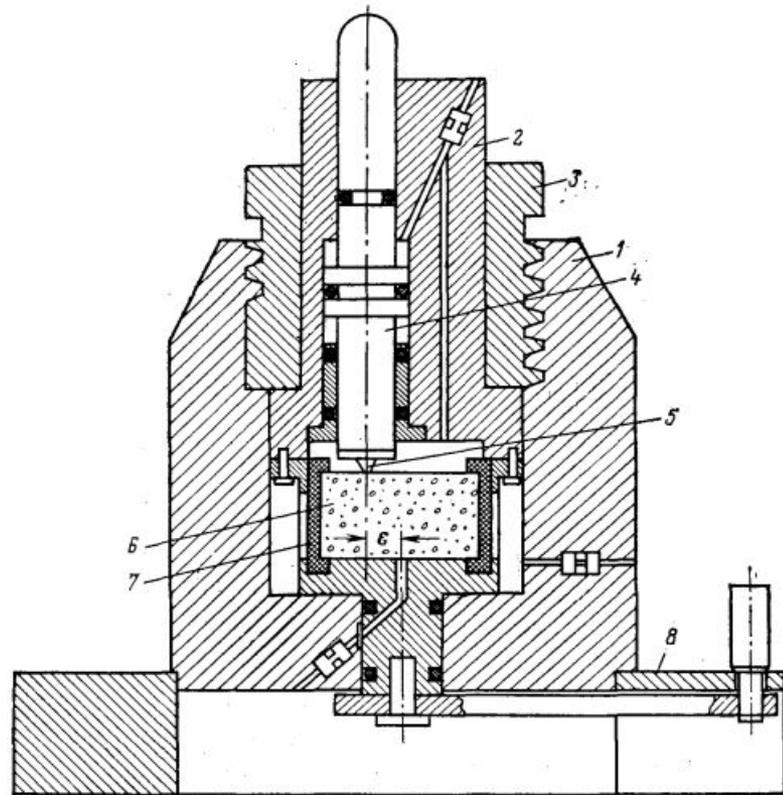


Рис. 34. Схема камеры высокого давления КЗУ

# Экспериментальные зависимости силы сопротивления от глубины внедрения $P(Z)$ для различных типов пород и формы зубков.

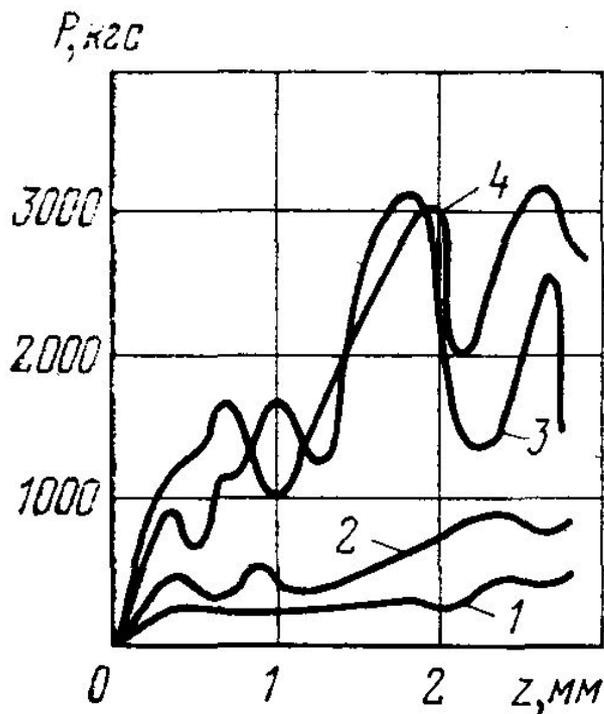


Рис. 7. Экспериментальная зависимость силы сопротивления породы от глубины внедрения зубца (зубец  $5 \times 1$  мм, условия атмосферные: 1 — глина; 2 — песчаник; 3 — известняк слабый; 4 — мрамор)

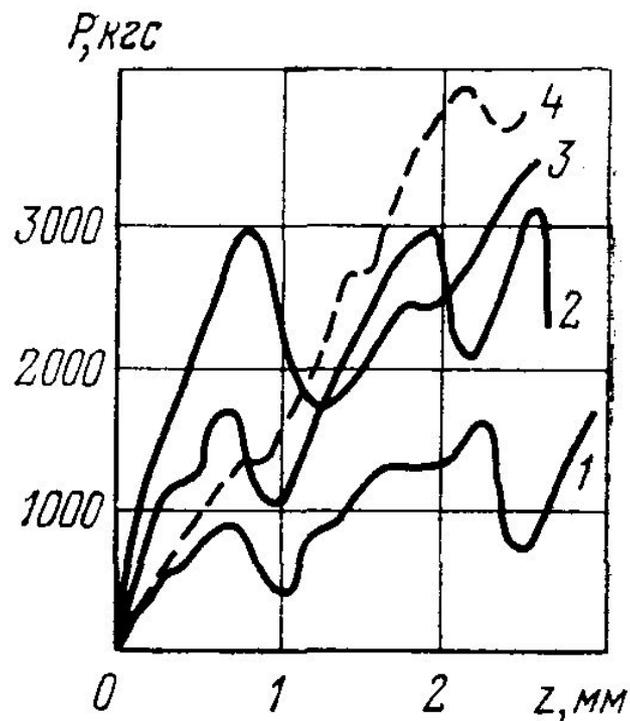


Рис. 8. Экспериментальная зависимость силы сопротивления породы от глубины внедрения зубца (условия атмосферные, порода — мрамор) Зубцы: 1 —  $5 \times 0,5$  мм; 2 —  $5 \times 1,0$  мм; 3 —  $10 \times 1$  мм; 4 — полусферический  $r=0$  мм

# Зависимость объема зоны разрушения $V$ от максимальной глубины внедрения зубца $Z_{\max}$

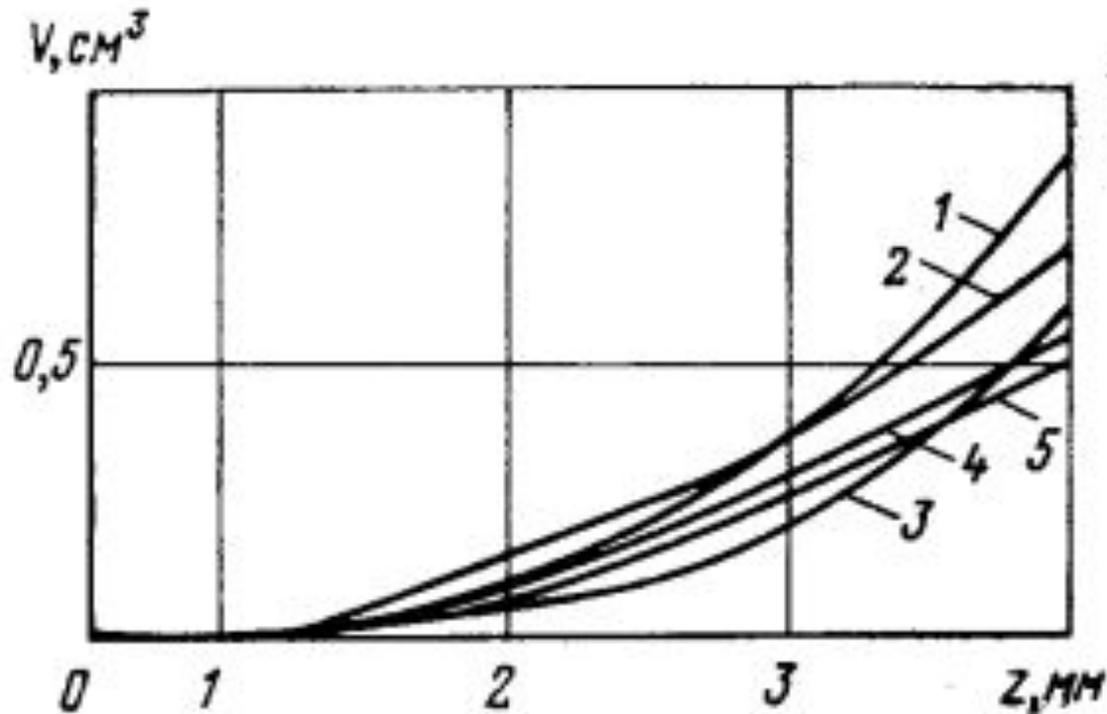


Рис. 12. Экспериментальная зависимость объема разрушенной породы от глубины внедрения зубца (зубец  $5 \times 1,0$  мм, условия атмосферные):

1 — известняк кремнистый; 2 — известняк слюдяной; 3 — песчаник; 4 — глина; 5 — мрамор

# Влияние динамики взаимодействия элемента вооружения с горной породой

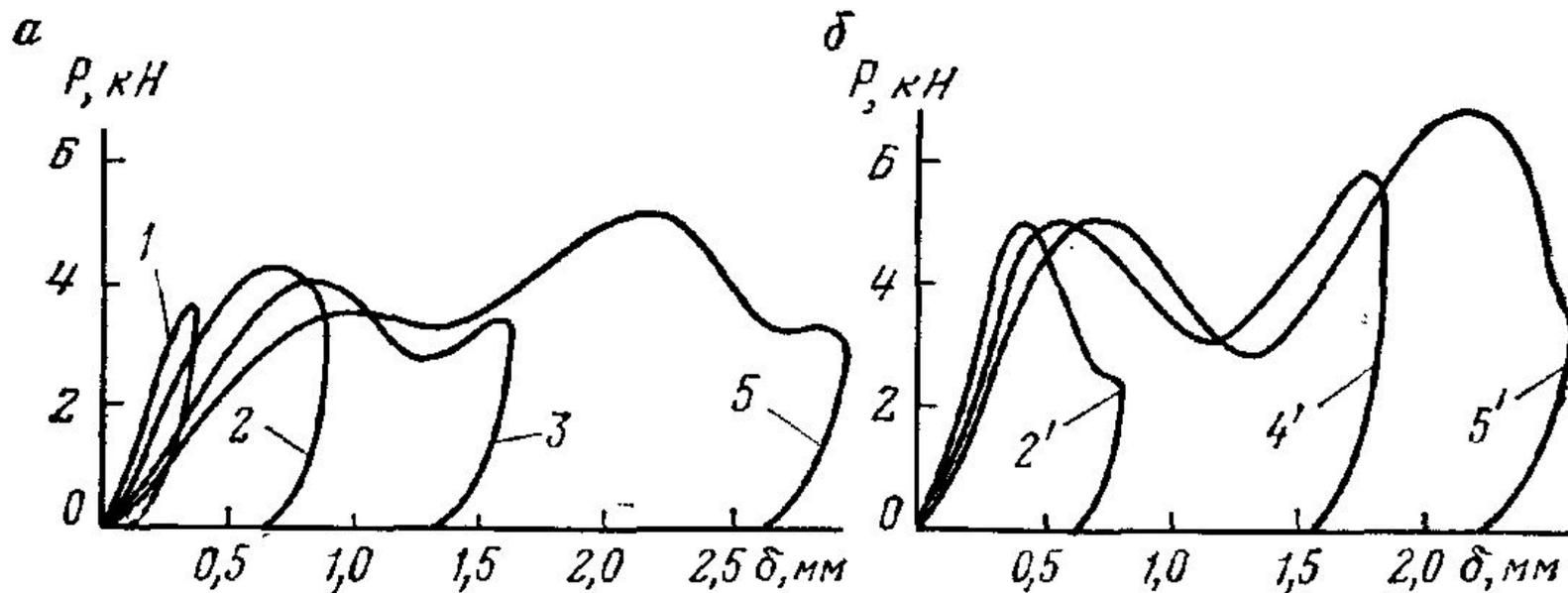


Рис. 35. Графики зависимости динамической нагрузки от глубины погружения штампа ( $d=1,95$  мм) в мрамор при ударе «легким» (а) и «тяжелым» (б) ударниками (по данным К. И. Вдовина).

Энергия удара (в кгс·м) соответственно равна: 1 — 0,079; 2 — 0,237; 2' — 0,230; 3 — 0,473; 4' — 0,636; 5 — 1,073; 5' — 1,081

# Влияние скорости соударения зубца с горной породой на $P(z)$

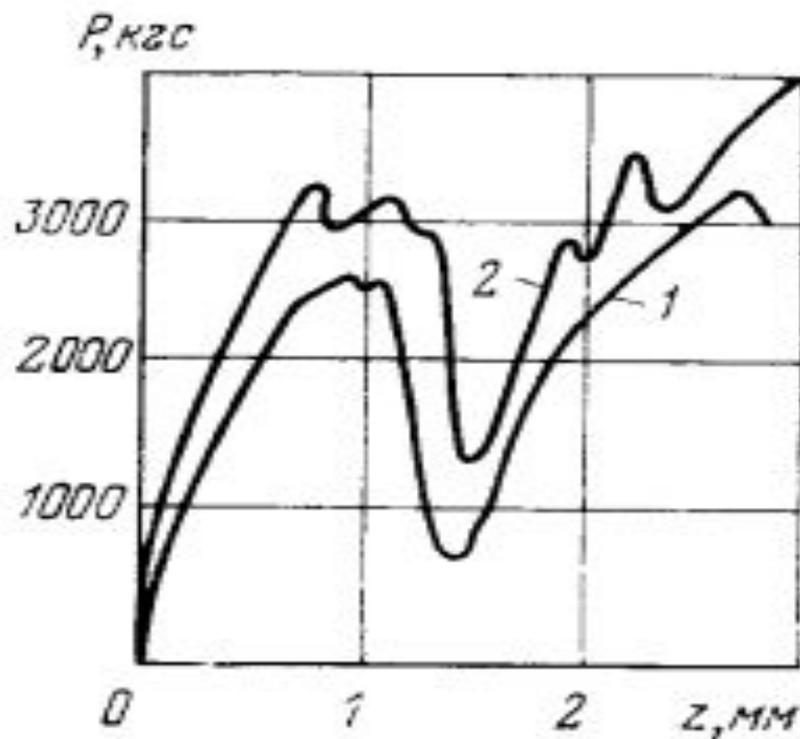
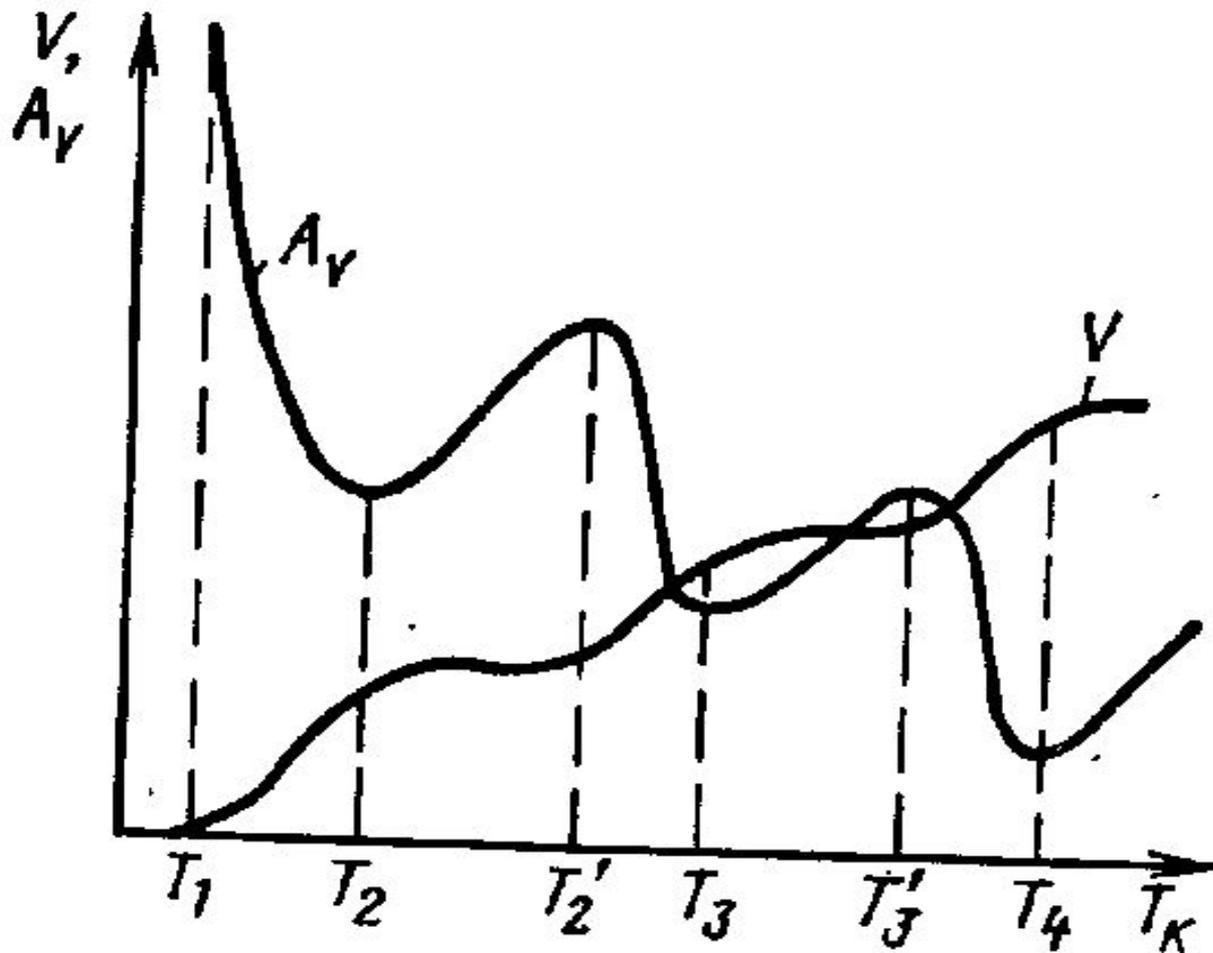


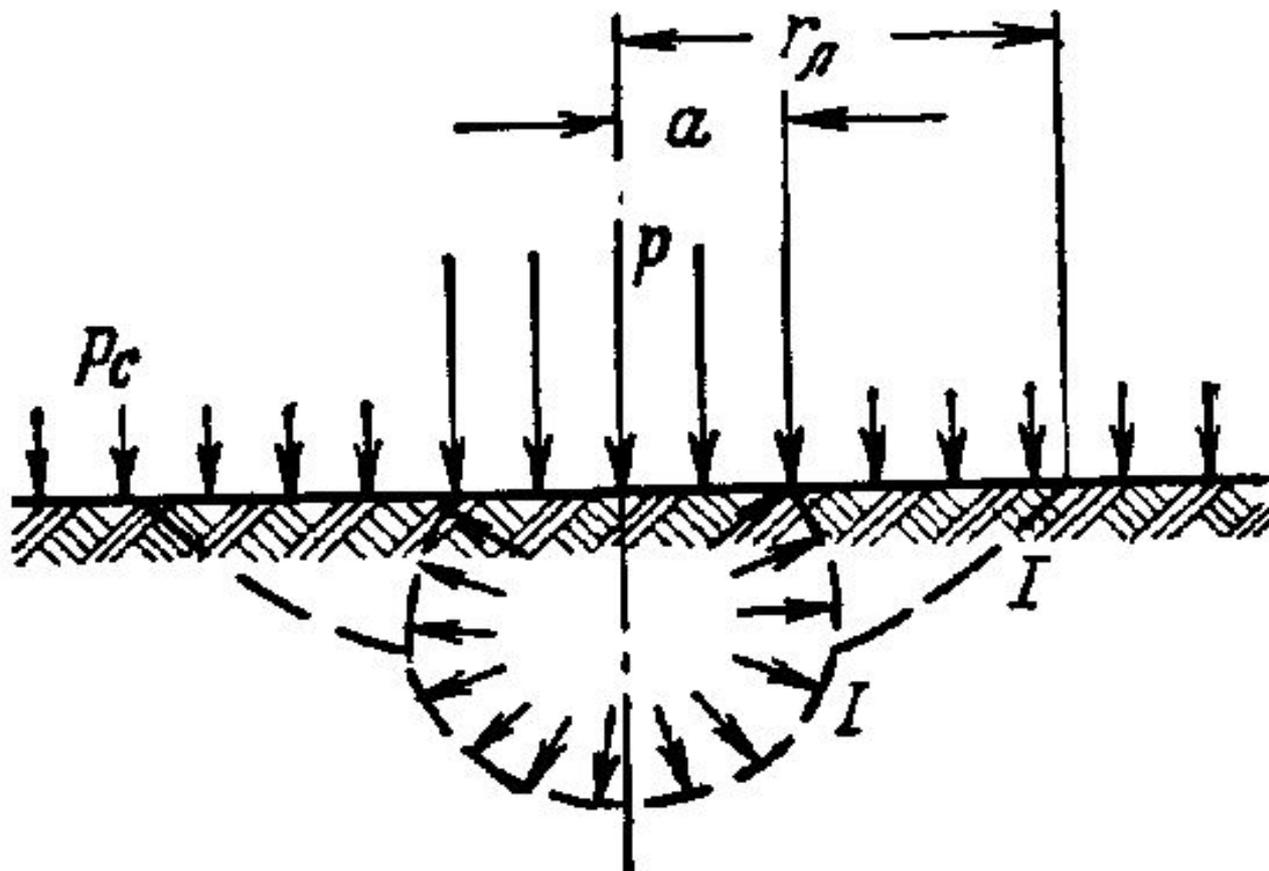
Рис. 11. Экспериментальная зависимость силы сопротивления породы от глубины внедрения зубца (зубец  $5 \times 1,0$  мм, условия атмосферные, порода — известняк крепкий)

Скорость соударения: 1 — 0,4 м/с; 2 — 2,0 м/с

Зависимость удельной объемной работы разрушения породы  $A_v$  и объема лунки разрушения  $V$  от энергии взаимодействия индентора с породой  $T$

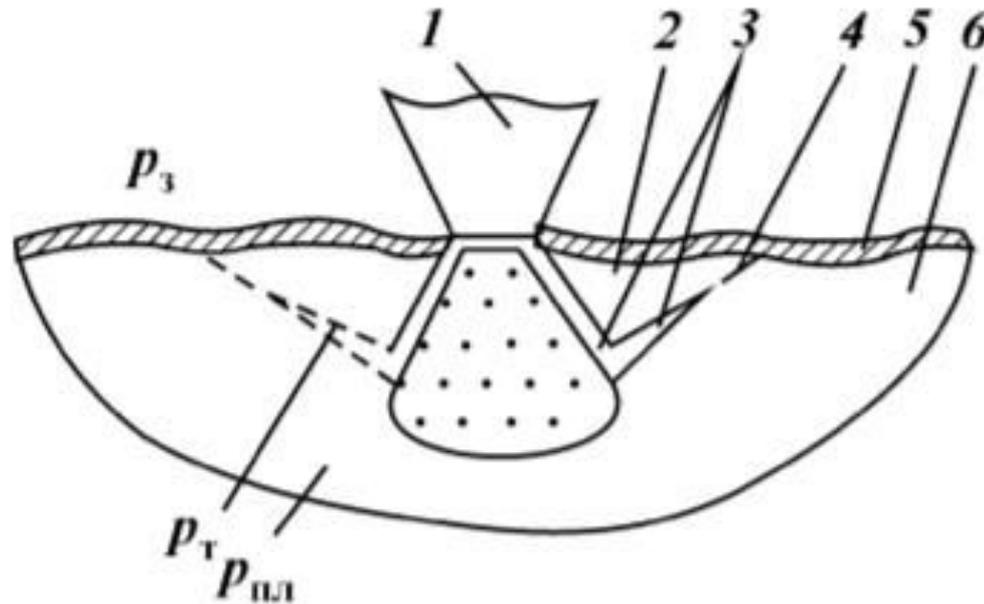


# Механизм действия дифференциального давления на процесс разрушения при вдавливании.



# Схематичное представление момента отрыва частицы горной породы от забоя

(давления жидкости:  $P_t$ -в трещине;  $P_p$ -пластовое;  $P_z$  - забойное )



- 1 – элемент вооружения долота; 2 – отделяющаяся частица горной породы; 3 – магистральная трещина;  
4 - участок, не пересеченный трещиной; 5 - глинистая корка; 6 - массив горной породы на забое.

# Влияние параметров глинистого раствора на силовые характеристики взаимодействия зубца с горной породой в забойных условиях.

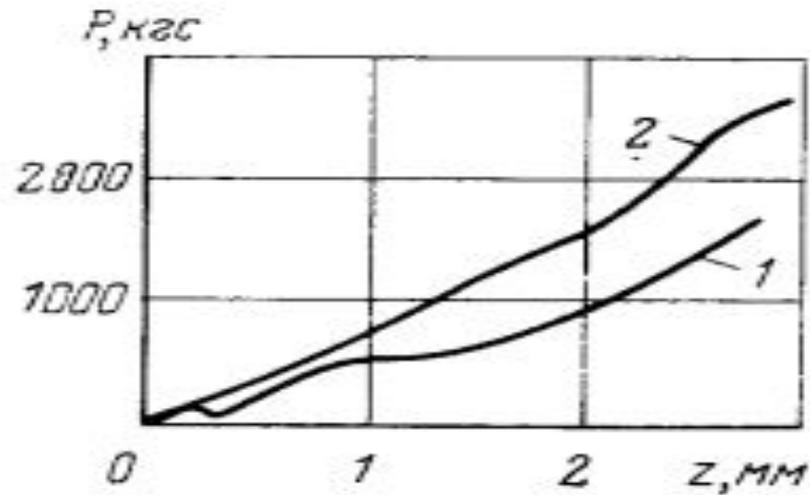


Рис. 10. Экспериментальная зависимость силы сопротивления породы от глубины внедрения зубца (зубец  $5 \times 1,0$  мм, порода — песчаник,  $\rho = 250$  кгс/см<sup>2</sup>)

Раствор: 1 — водоотдача 25 см<sup>3</sup>/30 мин, содержание твердой фазы 5%; 2 — водоотдача 5 см<sup>3</sup>/30 мин, содержание твердой фазы 25%

# Влияние дифференциального давления на процесс разрушения при вдавливании для различных пород.

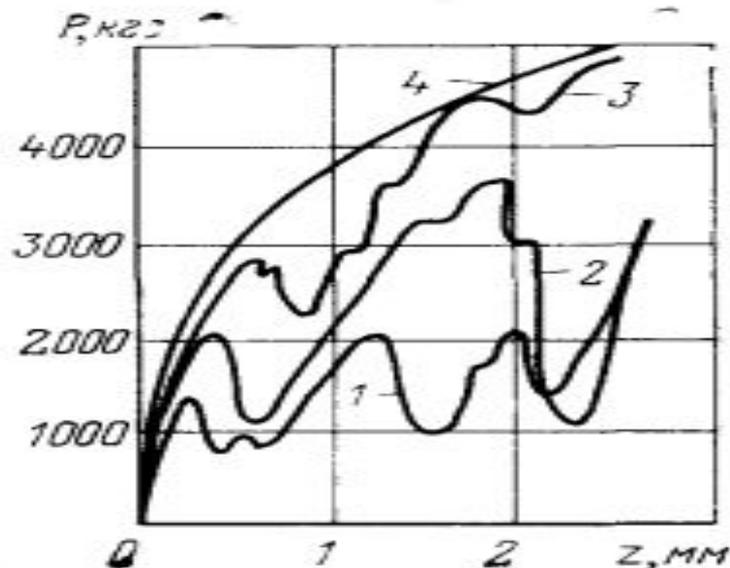


Рис. 9. Экспериментальная зависимость силы сопротивления породы от глубины внедрения зубца (порода — известняк средний, зубец  $5 \times 1,0$  мм):

1 — атмосферные условия;  
 2 —  $p = 50$  кгс/см<sup>2</sup>; 3 —  $p = 250$  кгс/см<sup>2</sup>; 4 —  $p = 500$  кгс/см<sup>2</sup>

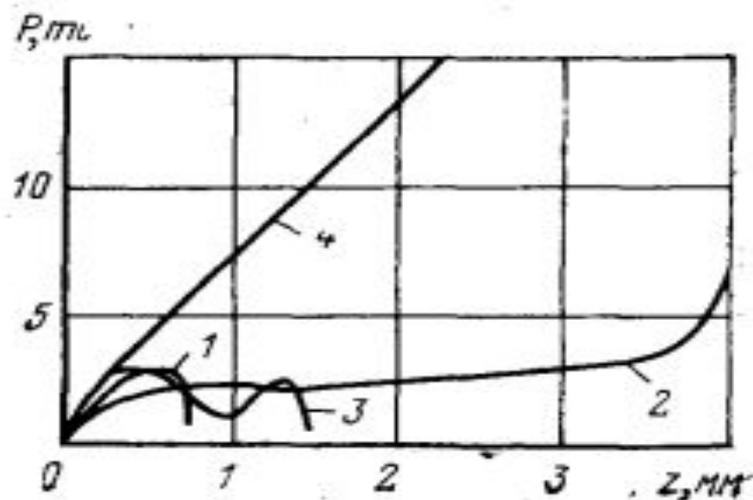
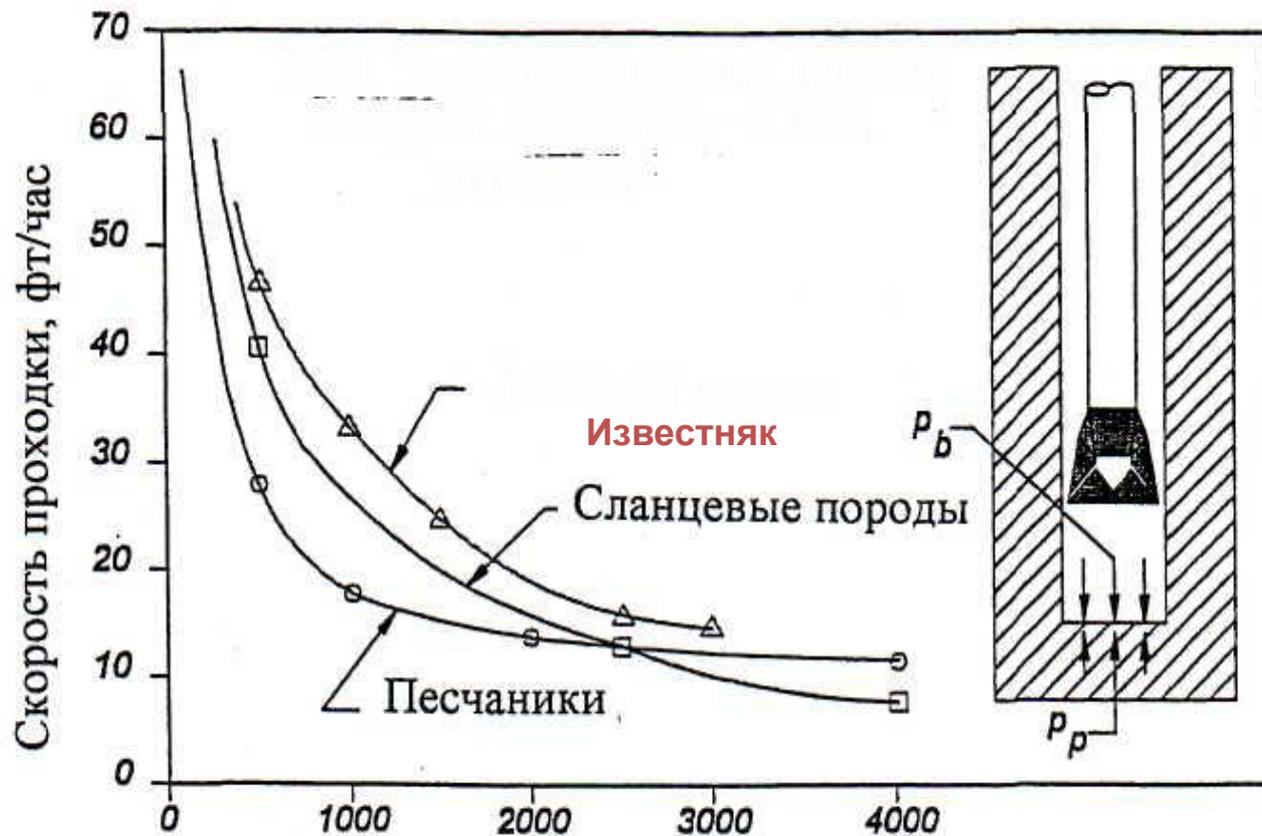


Рис. 32. Экспериментальная зависимость силы сопротивления породы от глубины внедрения зубца (индентор — плоскодонный, круглый, порода — мелкозернистый песчаник):

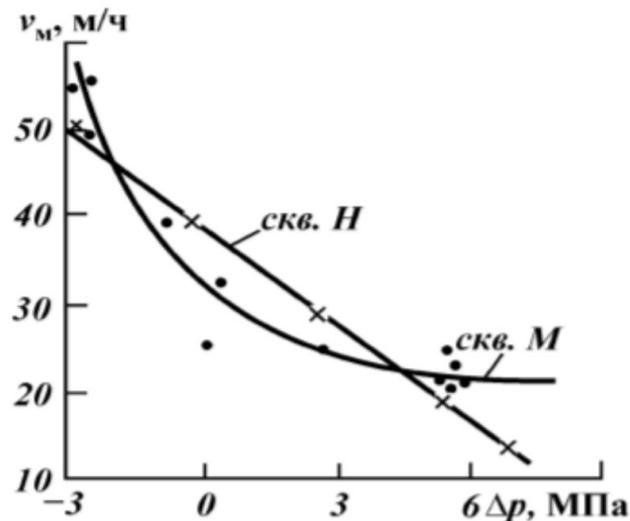
1 — атмосферные условия; 2 —  $p = 1000$  кгс/см<sup>2</sup>, глинистый раствор с водоотдачей  $33 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$ ; 3 —  $p = 1000$  кгс/см<sup>2</sup>, вода; 4 —  $p = 1000$  кгс/см<sup>2</sup>, глинистый раствор с водоотдачей  $1,8 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$

# Зависимость механической скорости бурения от величины дифференциального давления (Moffitt, 1991)



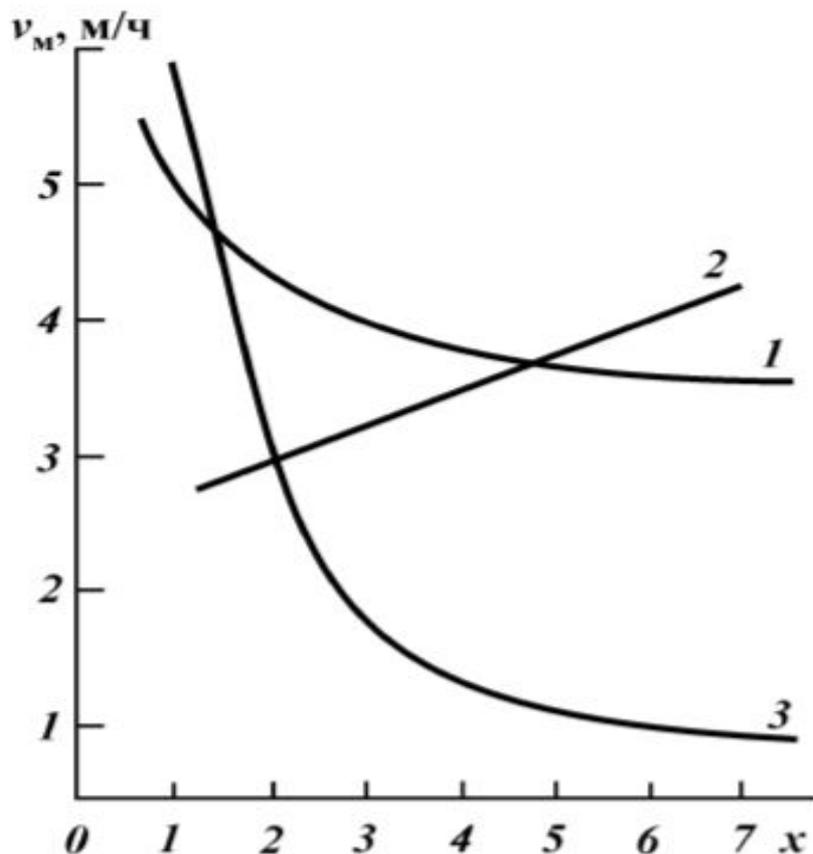
Дифференциальное давление (psi)

# Зависимость механической скорости бурения от дифференциального давления в Южной Луизиане.



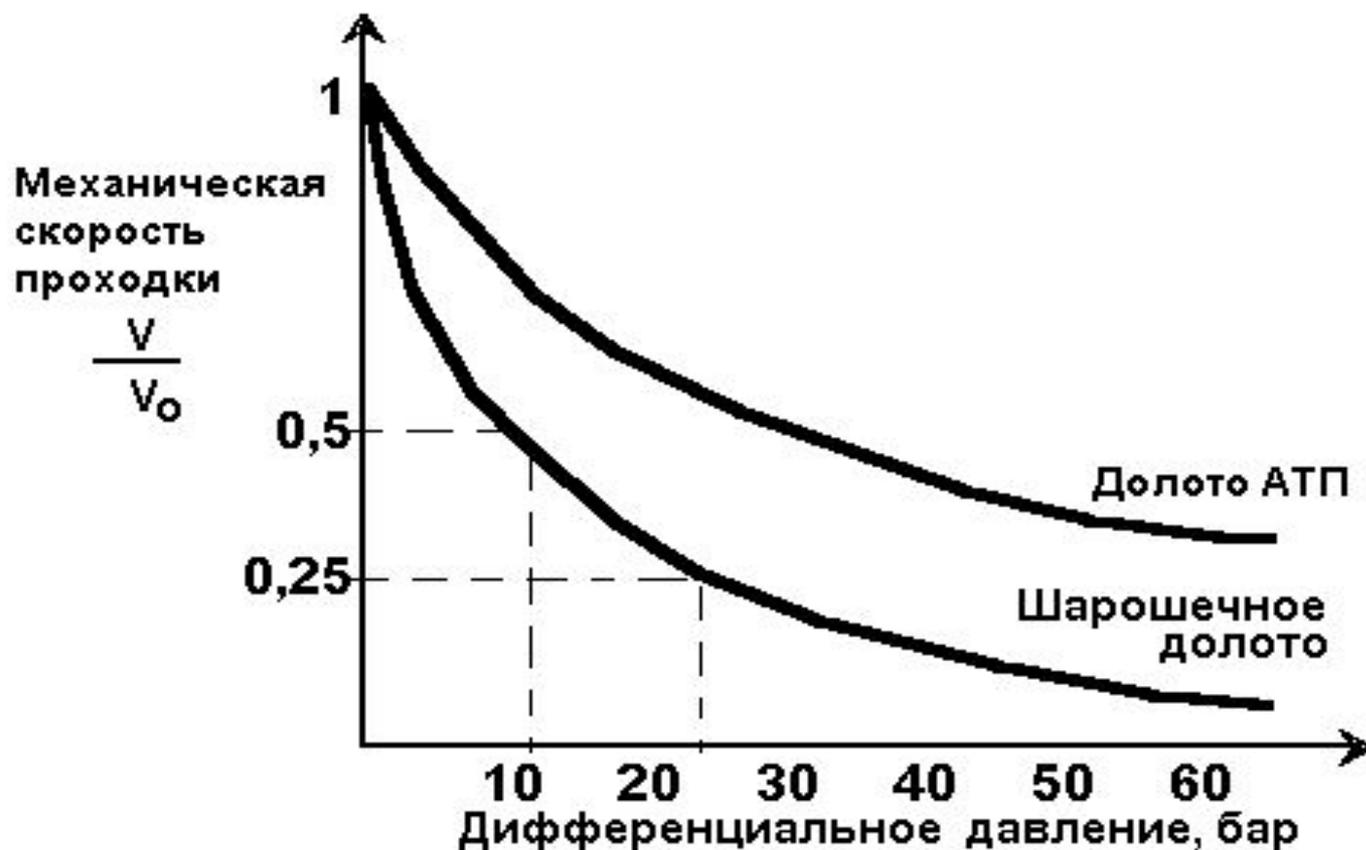
Скважина	Скорость вращения долота, об/мин	Осевая нагрузка, %	Увеличение $v_m$ (в %) при уменьшении дифференциального давления от 4,0 МПа до 0
А	100	100	28
В	180	100	34
С	150	115	34
Н	160	125	53
Г	140	150	160
Д	140	150	192

# Качественная зависимость механической скорости бурения от параметров буровой промывочной жидкости



1 – влияние вязкости БПЖ; 2 – водоотдачи БПЖ; 3 – плотности БПЖ

# Влияние дифференциального давления $\Delta P$ на механическую скорость бурения для различных типов долот.



$V_0$  - механическая скорость бурения при  $\Delta P=0$ .

# Влияние кинематики взаимодействия элементов вооружения трехшарошечные долота на процесс разрушения забоя

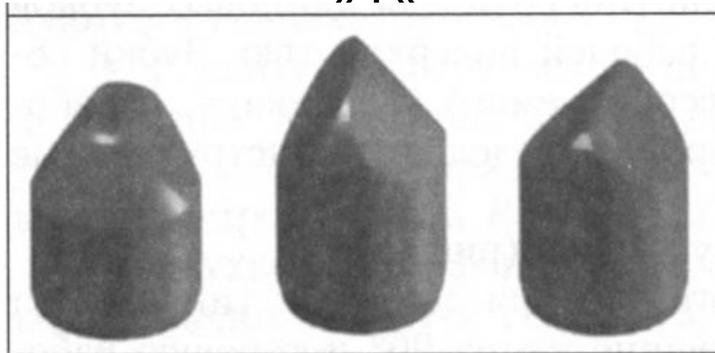


Формы зубков типа

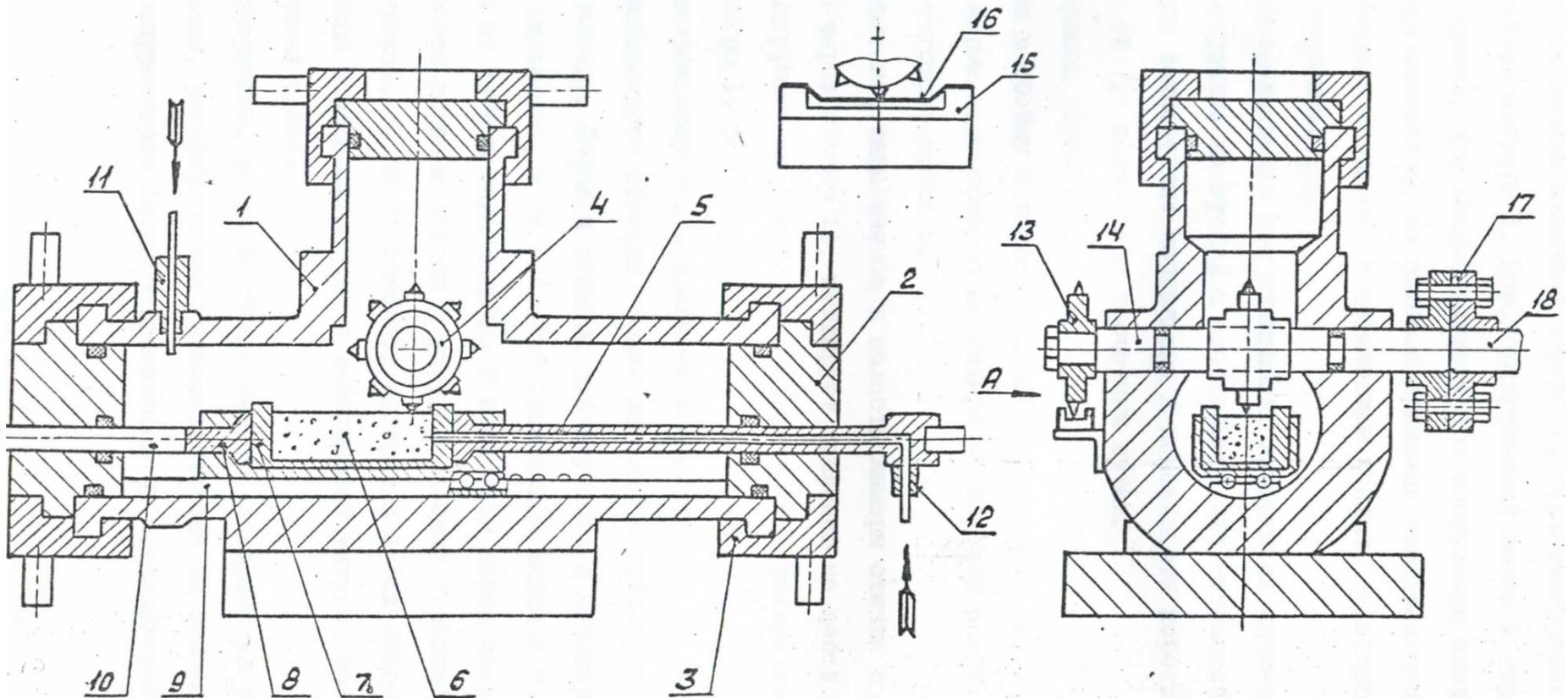
«С»

«Г25»

«Т»



# Схема камеры высокого давления стенда КИПР-2С для исследования процесса разрушения породы вооружением шарошечных долот



# Схема взаимодействия зубка с породой и формы траектории движения зубка в породе на стенде КИПР-2С

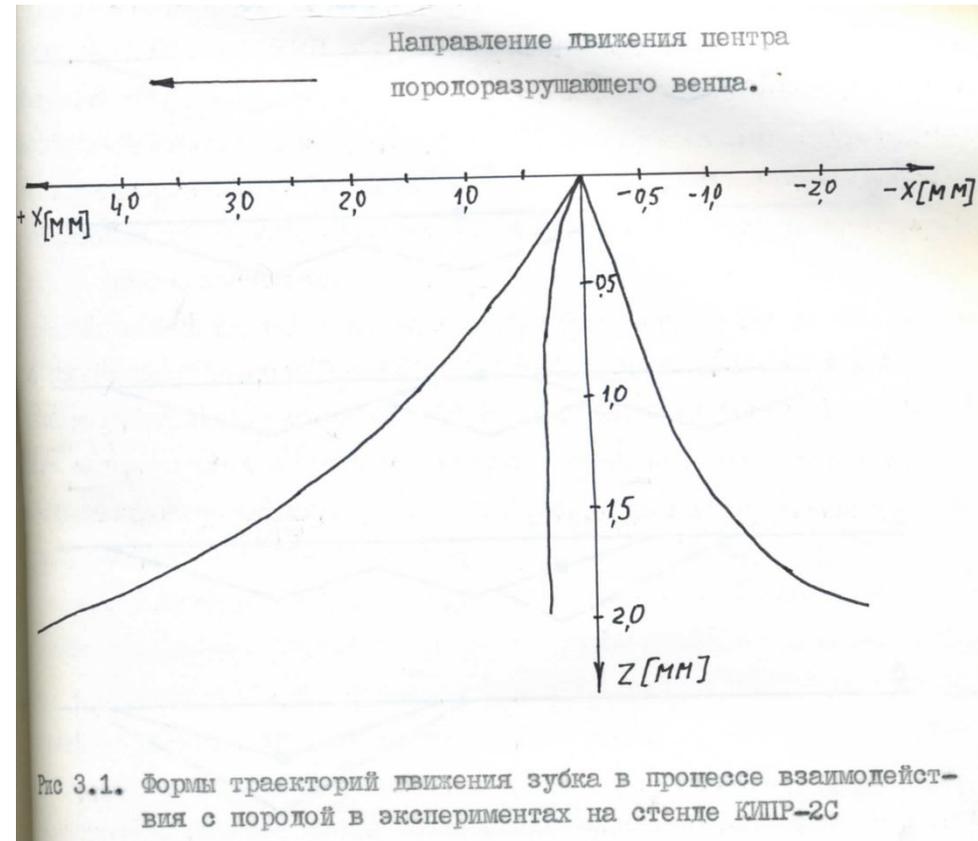
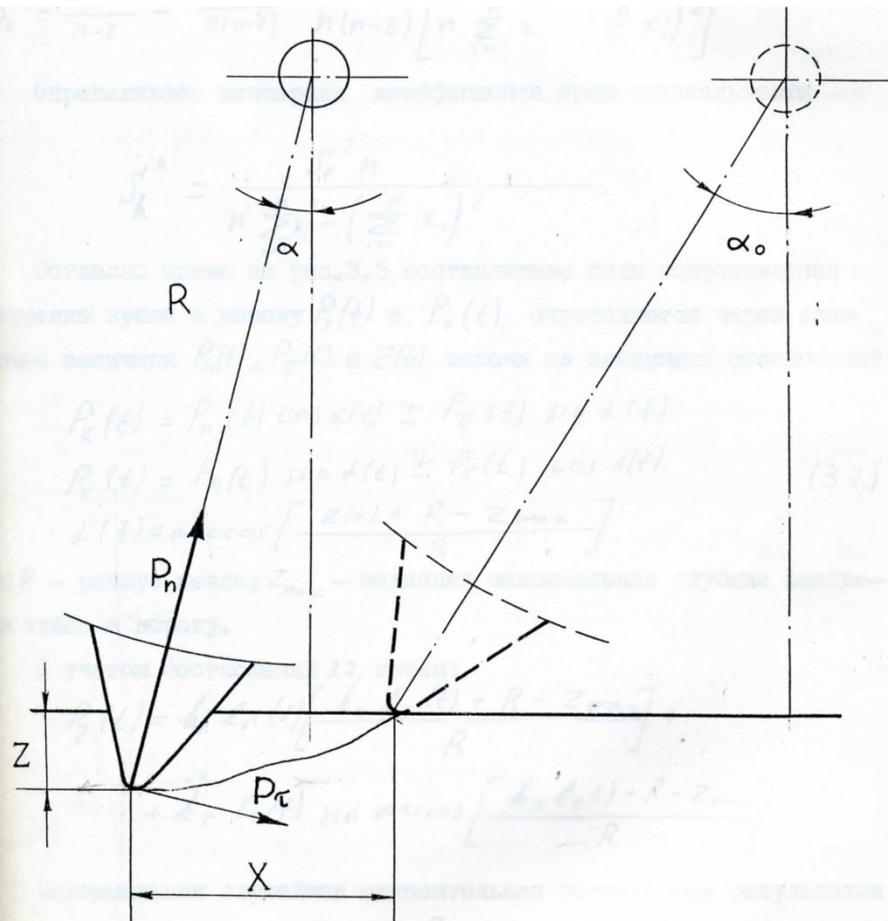


Рис 3.1. Формы траекторий движения зубка в процессе взаимодействия с породой в экспериментах на стенде КИПР-2С

Положительное  
скольжение

Нулевое  
скольжение

Отрицательное  
скольжение

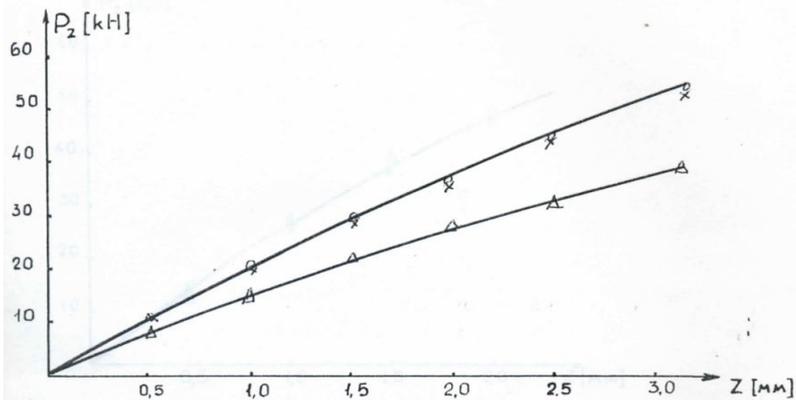
Рис.3.5. Схема взаимодействия зубка с горной породой на стенде КИПР-2С.

# Зависимости вертикальной - $P_z$ и горизонтальной – $P_x$ составляющих силы сопротивления внедрению зубка в породу от глубины его внедрения - $Z$ при различных видах скольжения зубка.

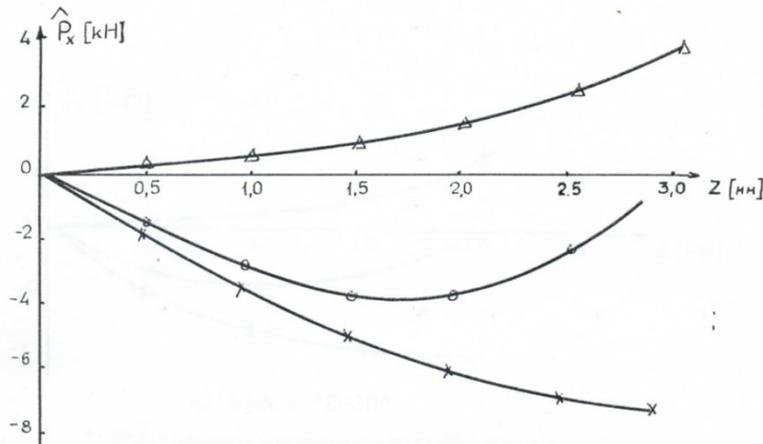
(зубки «Г-25» и «С»; горная порода – мергель (тип-МС); дифференц. давление-19,6МПа)

$P_z(z)$

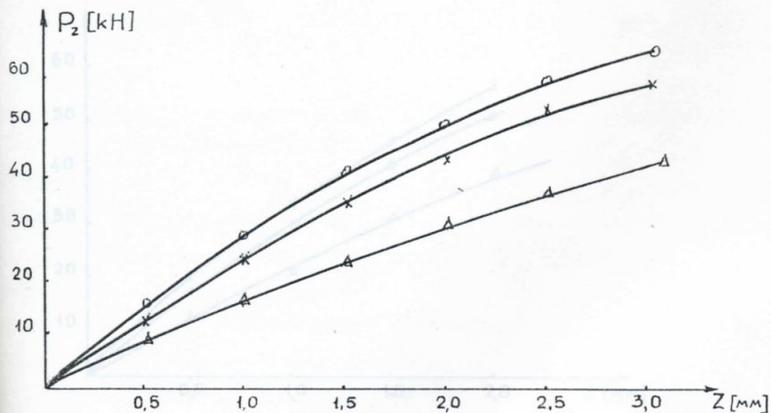
$P_x(z)$



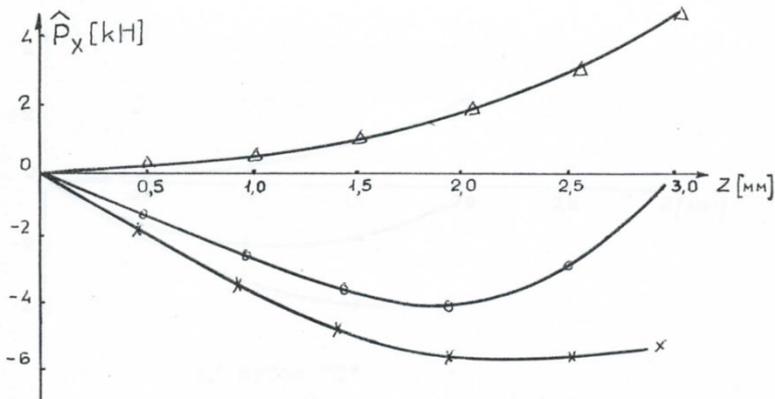
а/ зубок "Г-25"



а/ зубок "Г-25"



б/ зубок "С"



б/ зубок "С"

Рис.4.3. Зависимость силы  $P_z$  от глубины внедрения зубка  $Z$   
Порода – мергель ( $\times - \chi < 0$ ;  $o - \chi = 0$ ;  $\Delta - \chi > 0$ )

Рис.4.6. Зависимость силы  $\hat{P}_x$  от глубины внедрения зубка  $Z$   
Порода – мергель ( $\times - \chi < 0$ ;  $o - \chi = 0$ ;  $\Delta - \chi > 0$ )

Направление движения центра венца

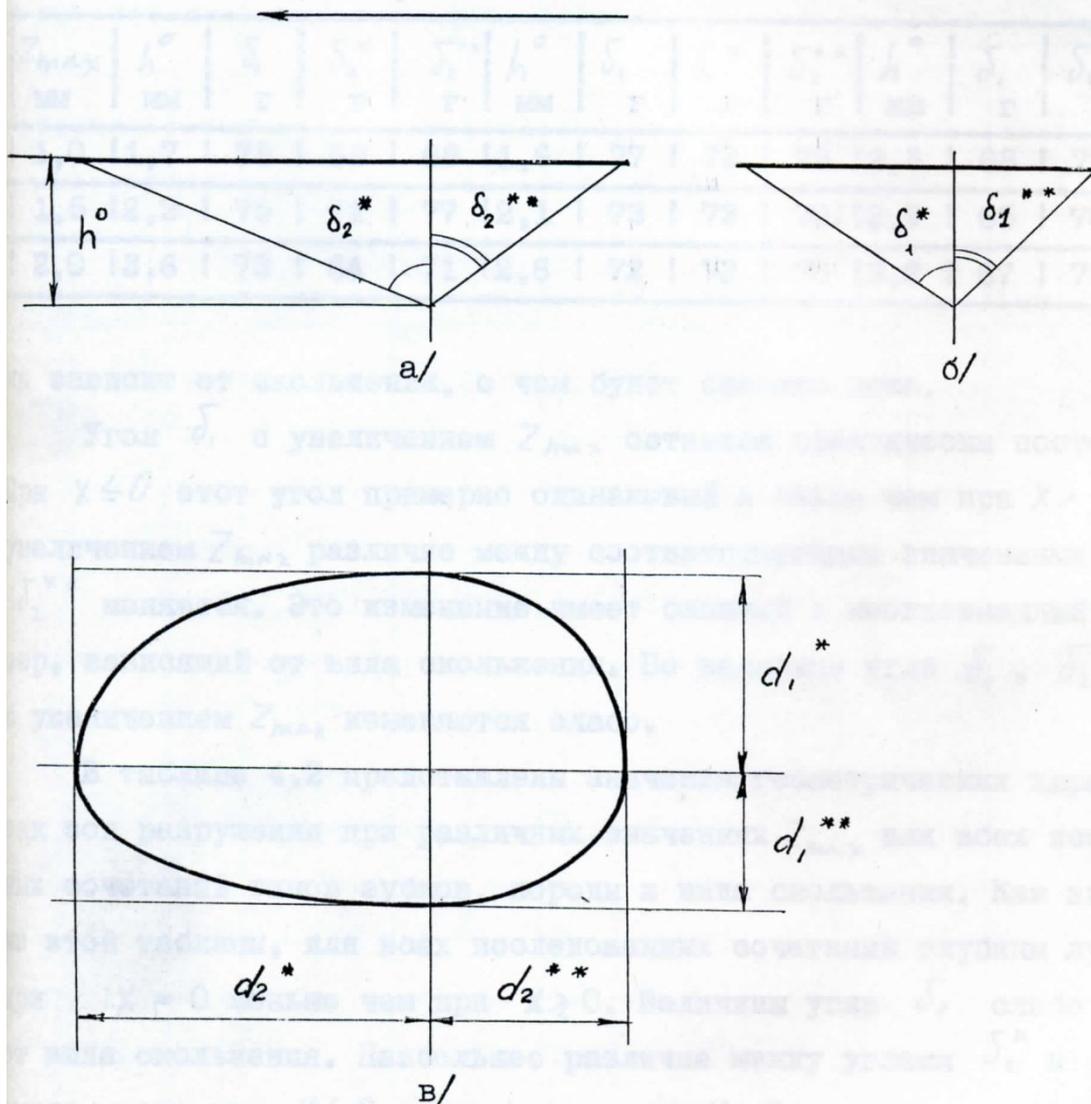


Рис.4.9. Схематизация формы лунки разрушения на поверхности забоя /  $\delta_2^*$  - передний угол лунки;  $\delta_2^{**}$  - задний угол лунки;  $\delta_1$  - боковой угол лунки; (в условиях стенда КИПР-2С  $\delta_1^* = \delta_1^{**} = \delta_1$ )  $d_1^*, d_1^{**}, d_2^*, d_2^{**}$  полуоси эллиптического конуса.

Геометрические характеристики зон разрушения.

Тип зубка		Зубок "Г-25"				Зубок "С"				Зубок "Т"			
Порода	x	$h^0$	$\delta_1$	$\delta_2^*$	$\delta_2^{*x}$	$h^0$	$\delta_1$	$\delta_2^*$	$\delta_2^{*x}$	$h^0$	$\delta_1$	$\delta_2^*$	$\delta_2^{*x}$
		мм	грд	мм	грд	мм	грд	грд	грд	мм	грд	грд	грд
Мергель	x < 0	5,6	66	60	50	5,5	69	69	58	-	-	-	-
	$Z = 3 \text{ мм}$ max	5,2	67	70	57	4,9	69	72	67	-	-	-	-
	x > 0	5,8	67	44	63	5,2	66	51	64	-	-	-	-
Мрамор	x < 0	2,7	71	73	62	3,6	67	65	71	-	-	-	-
	$Z = 2 \text{ мм}$ max	2,5	72	75	58	2,6	72	73	70	-	-	-	-
	x > 0	3,0	68	59	74	3,2	67	75	68	-	-	-	-
Известняк	x < 0	-	-	-	-	3,1	66	61	68	3,0	63	56	68
	$Z = 1,5 \text{ мм}$ max	-	-	-	-	2,6	68	71	69	2,5	65	69	54
	x > 0	-	-	-	-	3,2	67	73	67	2,9	64	72	60

# Основные задачи физического моделирования взаимодействия вооружения долота PDC с горной породой

- Исследование основных закономерностей влияния геологических, технических и технологических факторов на энергоемкость процесса разрушения горной породы единичным резцом долота PDC в забойных условиях при бурении глубоких скважин;
- Получение силовых характеристик взаимодействия единичного резца долота PDC с горной породой в забойных условиях  $P(Z_{\max})$   $T(Z_{\max})$ .
- Под силовыми характеристиками  $P(Z_{\max})$  и  $T(Z_{\max})$  понимаются зависимости вертикальной составляющей усилия резания элемента вооружения в горную породу  $P$  и горизонтальной составляющей усилия резания  $T$  от глубины внедрения резца в породу  $Z_{\max}$ .
- Получение зависимости  $V(Z_{\max})$  объема зоны разрушения поверхности горной породы -  $V$  единицы длины пути резания от максимальной глубины внедрения -  $Z_{\max}$  в забойных условиях.

# Схематизация взаимодействия резца PDC с горной породой

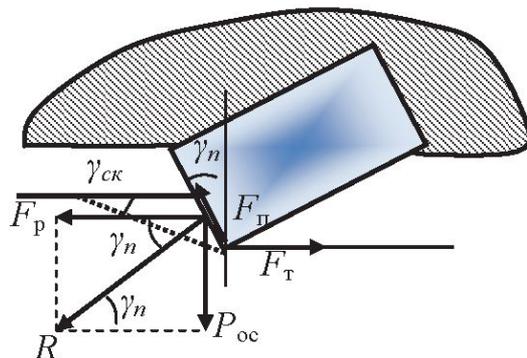
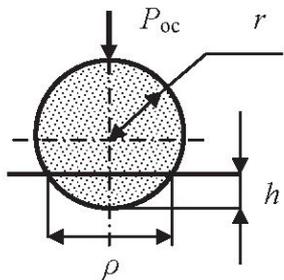


Рис. 1. Схема к анализу процесса-резания скалывания породы резцом PDC

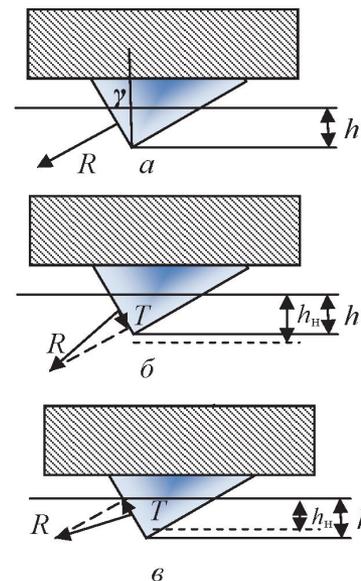


Рис. 2. Схемы для анализа механики резания-скалывания резцом

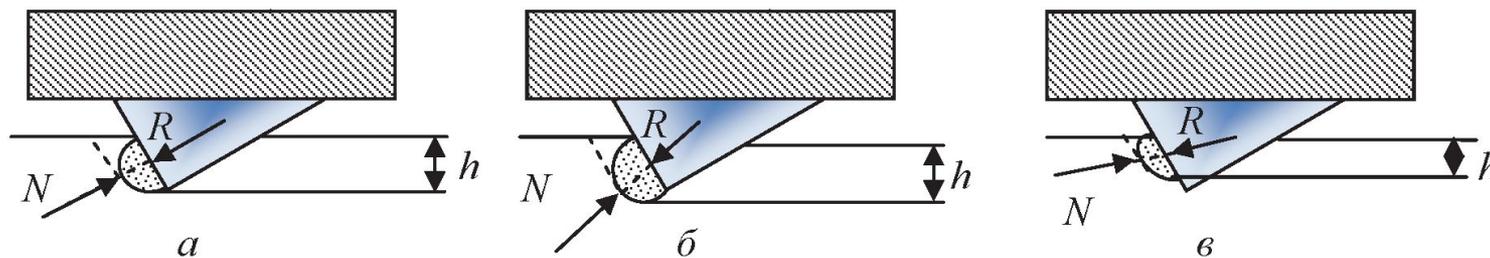
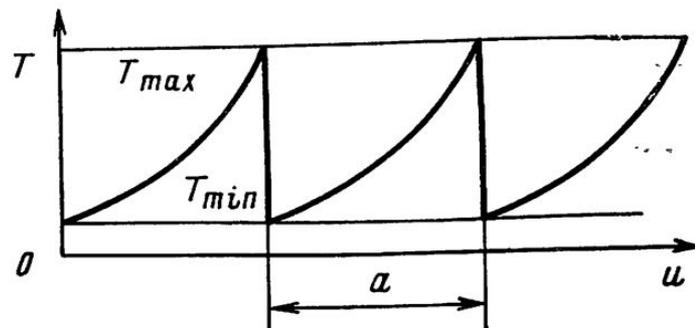
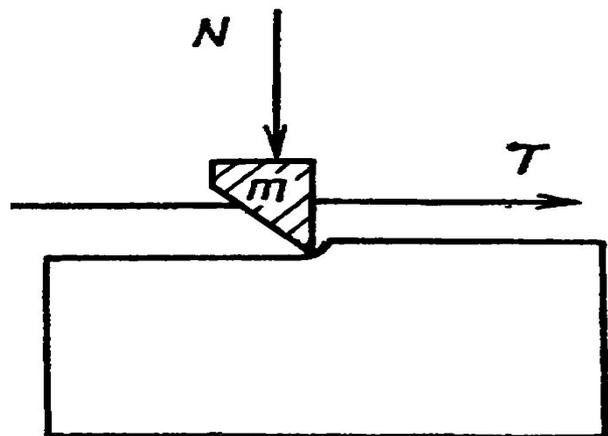


Рис. 3. Схемы трансформации ядра сжатия породы при установившемся режиме резания-скалывания (а), заглублинии резца (б) и повышении сопротивления резанию-скалыванию (в)

# Физическое моделирование процесса резания горной породы



## Принципиальная схема физической модели резания горной породы

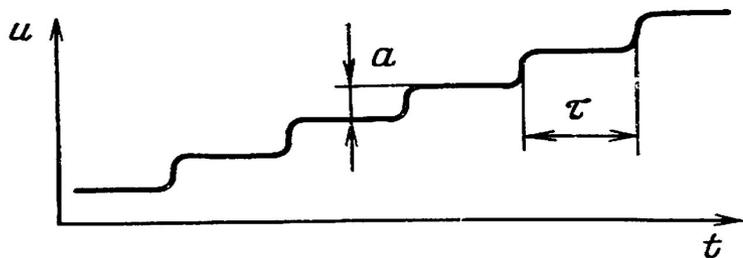


Рис. 4.3. Кривая перемещения реза во времени:  
 $a$  — величина скачка перемещения;  $\tau$  — период колебания

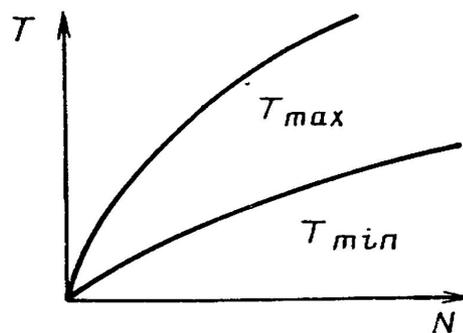
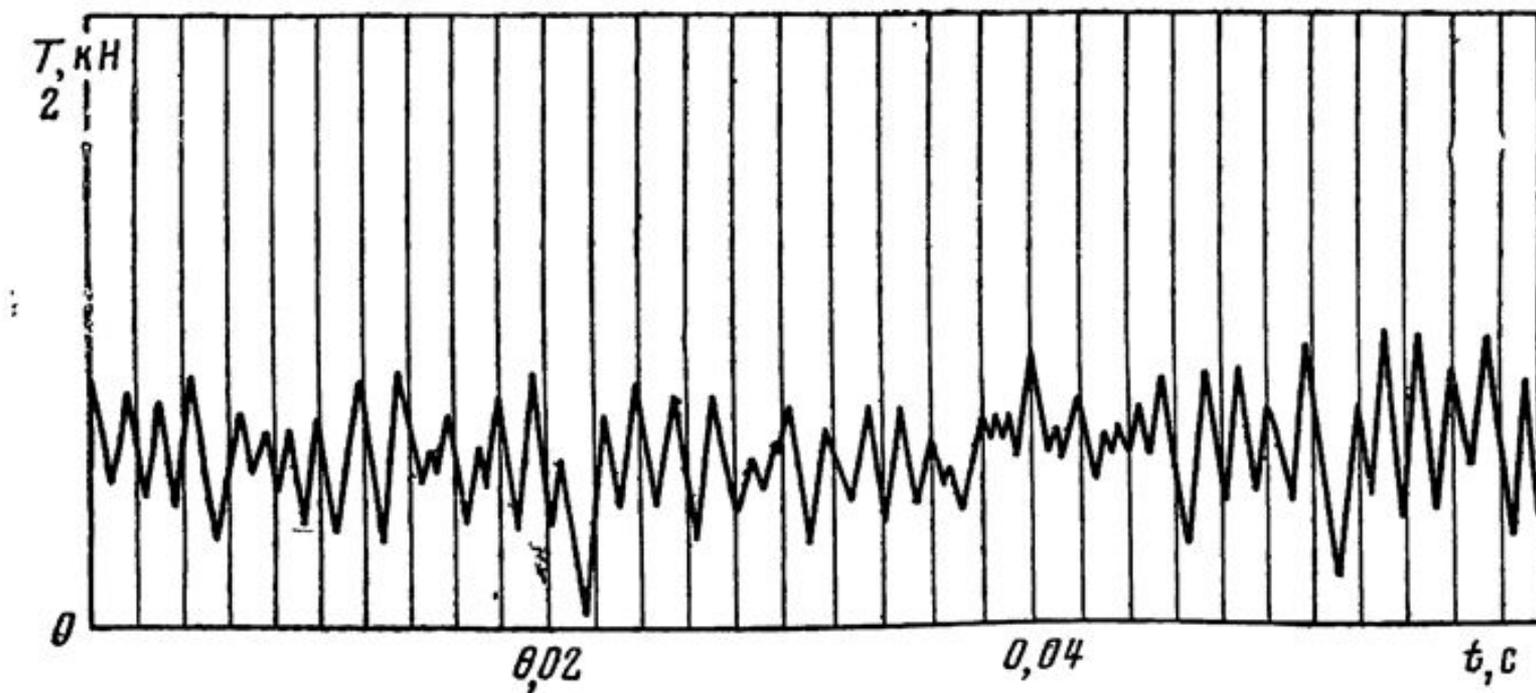


Рис. 4.4. Зависимость  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$  от нормальной прижимающей силы  $N$

# Осциллограмма изменения силы сопротивления резанию хрупко-пластичной горной породы единичным резцом



## Зависимость механической скорости от мощности, подводимой к долоту.

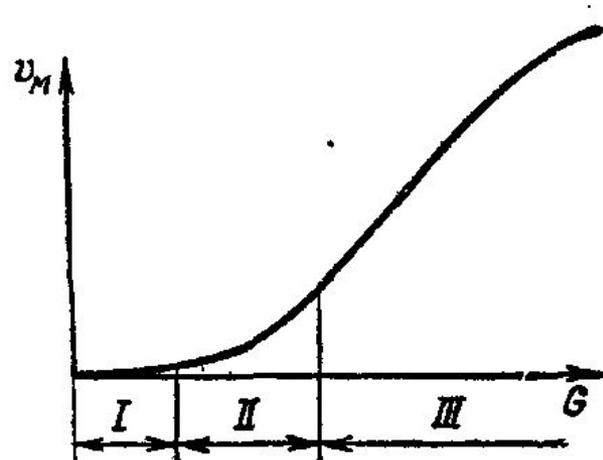
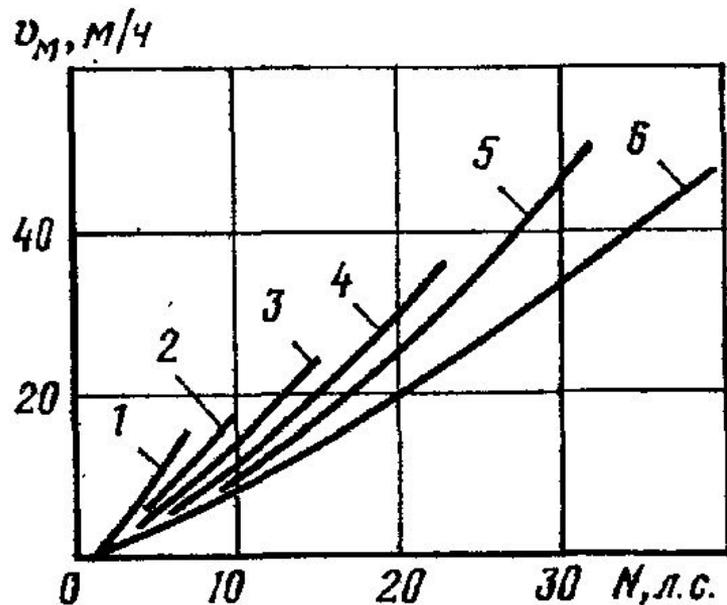


Рис. 100. Зависимость механической скорости бурения от мощности, подводимой к долоту 1В-4аТ при частоте вращения

№ кривой на рисунке . . . . .	1	2	3	4	5	6
Частота вращения, об/мин . . . . .	69	132	245	358	640	940

Рис. 101. График зависимости механической скорости бурения от нагрузки на долото (по Л. А. Шрейнеру)

# Энергоемкость разрушения горной породы вооружением шарошечного долота $A_{уд}$ (Дж/см<sup>3</sup>)

При единичном взаимодействии элемента вооружения шарошечного долота с горной породой:

$$A_{уд} = \int P(Z) dz / V_{зр}$$

где:  $V_{зр}$  – объем зоны разрушения при единичном взаимодействии элемента вооружения с горной породой (см<sup>3</sup>)

При бурении долотом:

$$A_{уд} = M_{уд} P_{ос} n / v_m S$$

где :  $M_{уд}$ -удельный крутящий момент на долоте (Нм/кН);

$P_{ос}$  – осевая нагрузка (кН);  $n$  – частота вращения долота (мин<sup>-1</sup>);

$v_m$  - механическая скорость бурения;  $S$  – площадь забоя скважины (см<sup>2</sup>)

# Энергоемкость различных технологий разрушения горных пород

№ п/п	Технология разрушения горных пород	Удельная энергоемкость разрушения, Дж/см <sup>3</sup>
1	Разрушение ультразвуком	10104
2	Разрушение водяными струями	1684
3	Ударное разрушение маломощными механизмами	253
4	Разрушение шарошечным инструментом	126-253
5	Разрушение мощным ударом (со скоростью удара до 10 м/с)	17-25
6	Разрушение взрывом (удар со скоростью 700-900 м/с)	6

**190,5 С3-ГАУ**



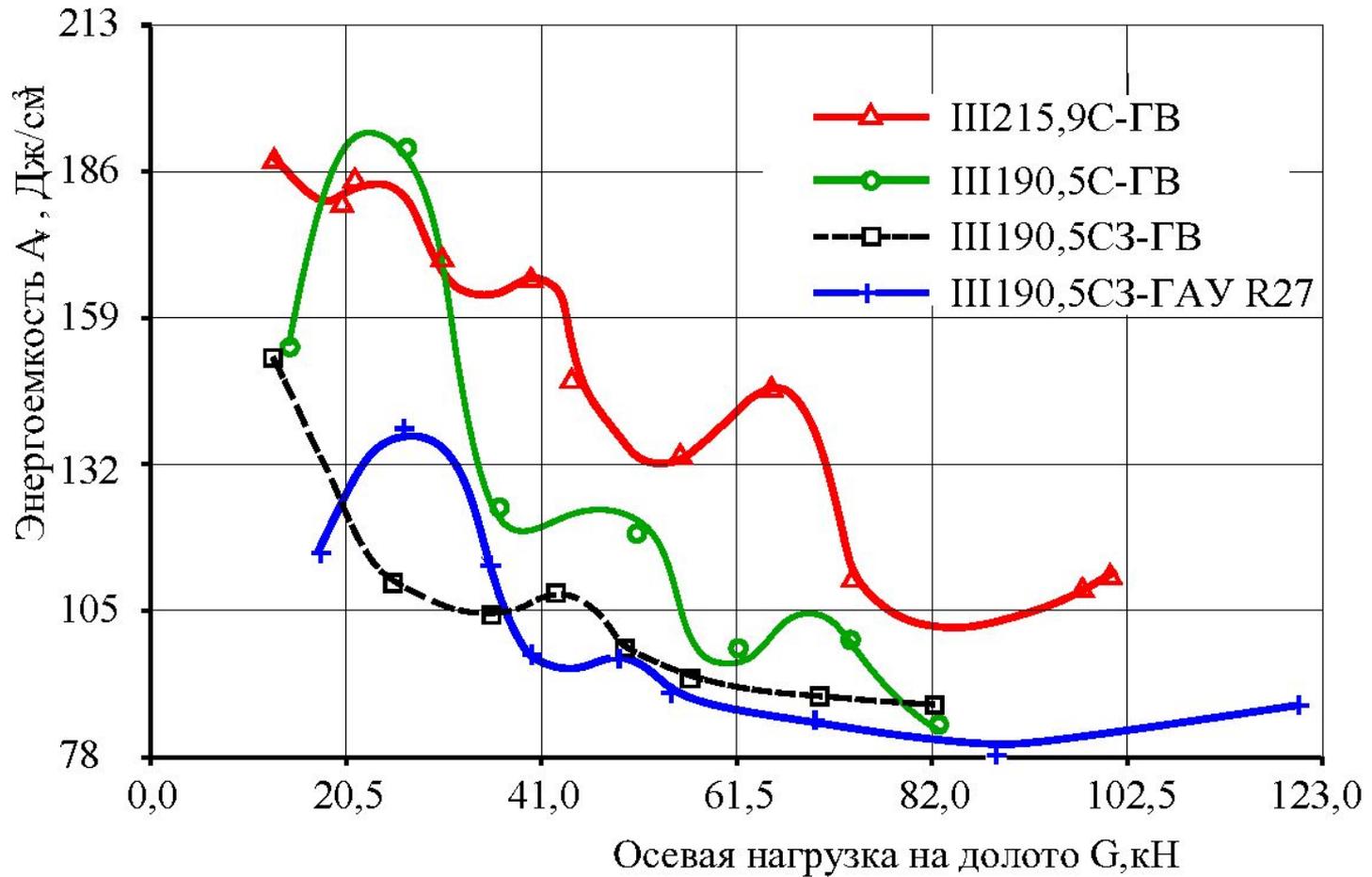
**190,5 С3-ГВ**



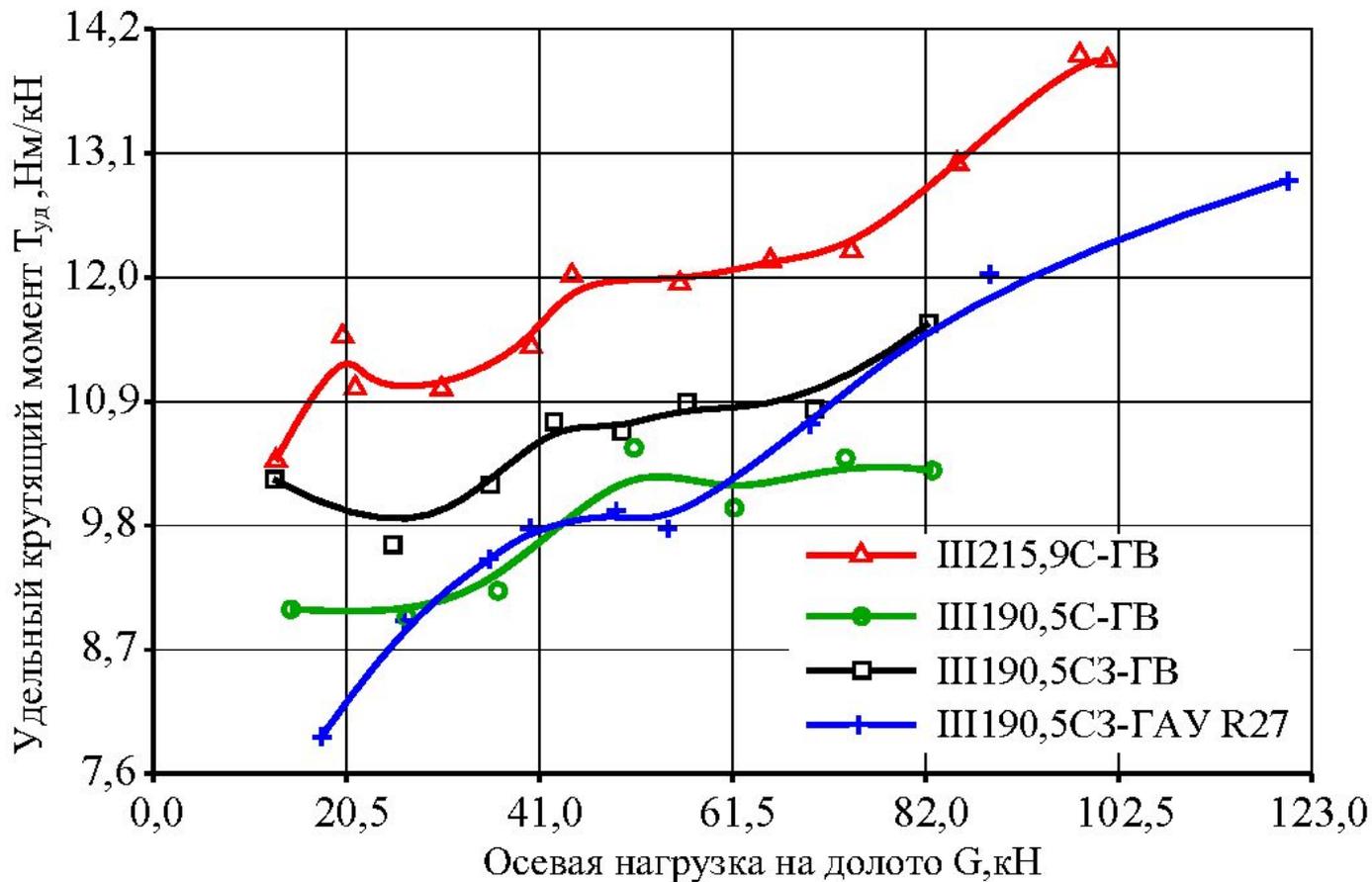
**190,5 С-ГВ**



# Зависимость энергоемкости разрушения горной породы от осевой нагрузки на долото при бурении шарошечным долотом (мрамор, атмосферные условия)



# Зависимость удельного крутящего момента от осевой нагрузки на шарошечное долото (порода мрамор)



**Зависимость интенсивности (1), энергоемкости разрушения горной породы (2), динамичности (3) при бурении шарошечным долотом 215,9С-ГВ (мрамор, атмосферные условия) от безразмерной нагрузки**

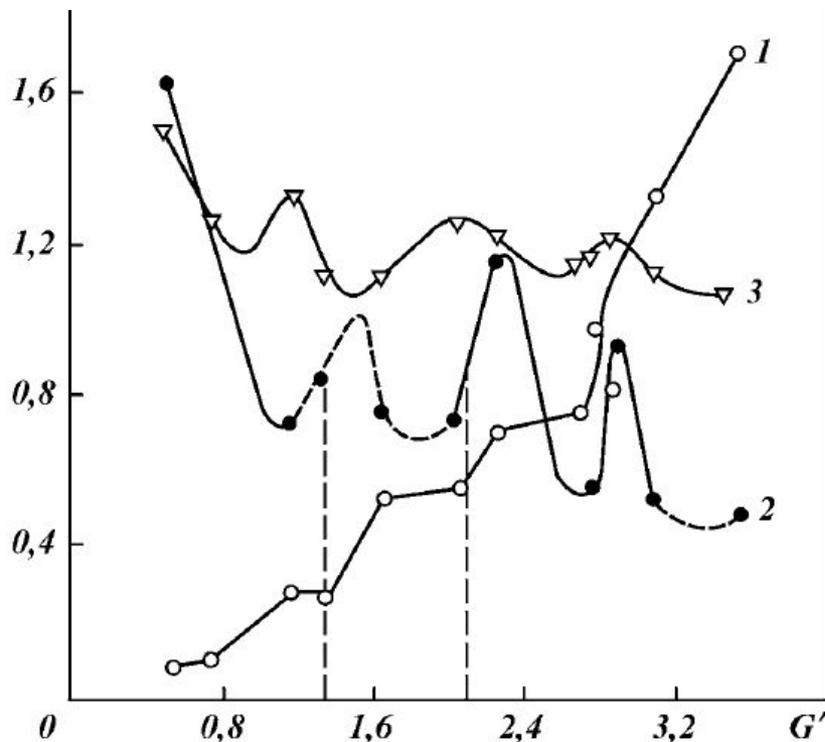


Рис. 5.5. Зависимости интенсивности (1), энергоемкости (2) и коэффициента динамичности (3) разрушения мрамора от безразмерной нагрузки при бурении на стенде долотом 215,9С-ГВ

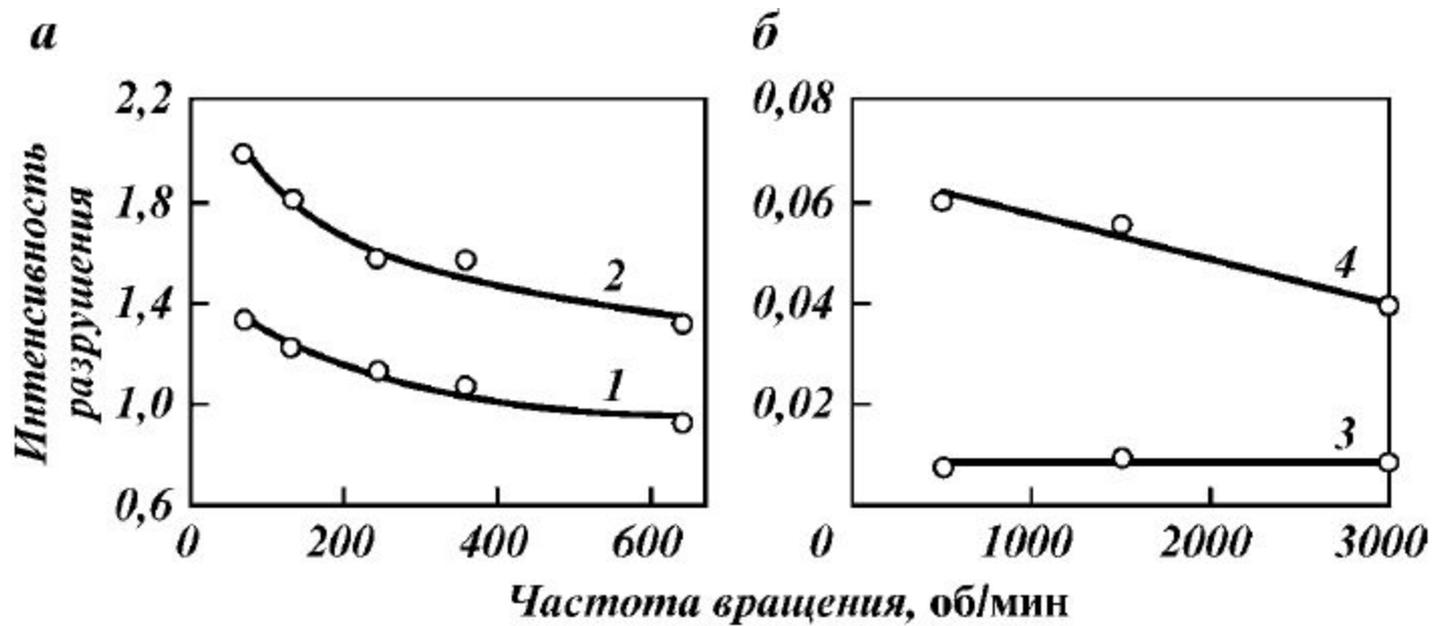
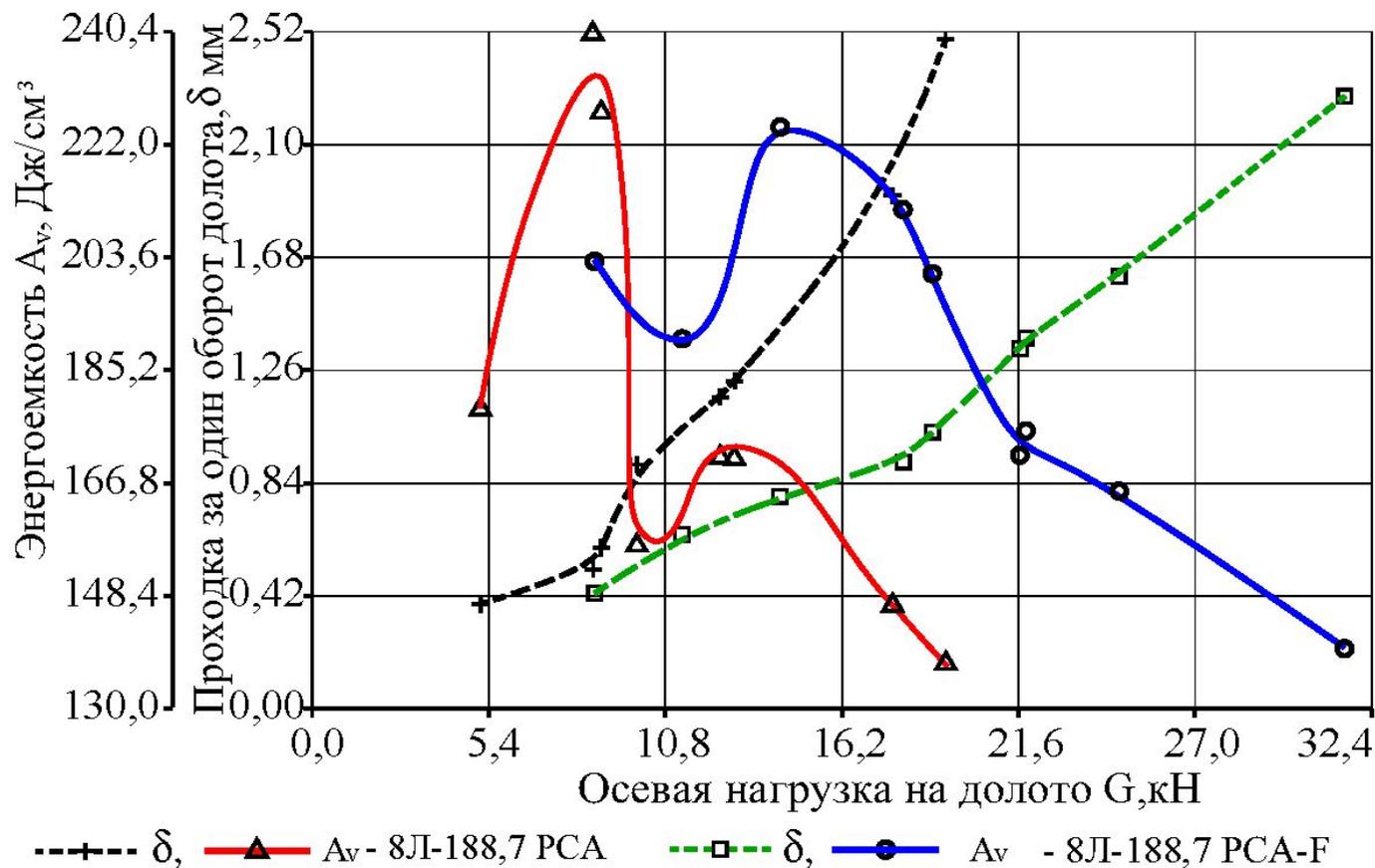


Рис. 5.6. Влияние частоты вращения долота на интенсивность разрушения горных пород

# Зависимость проходки за оборот ( $\delta$ ) и энергоемкости разрушения горной породы ( $A_v$ ) при бурении долотом PDC(мрамор, атмосферные условия)



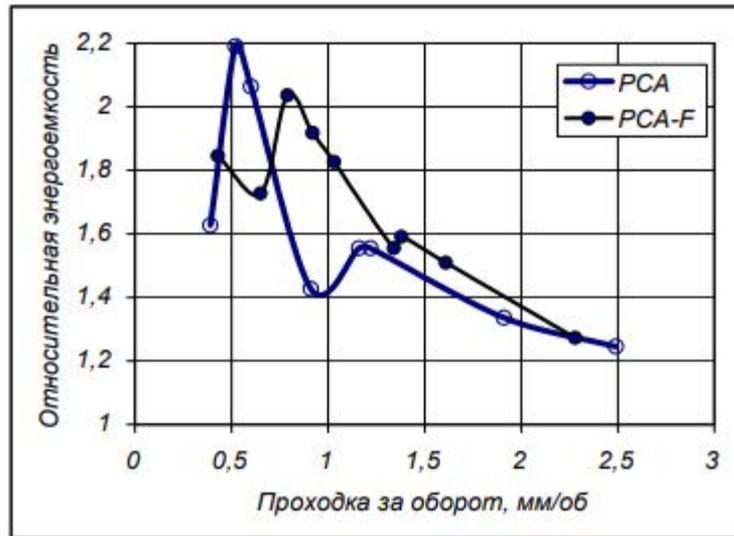


Рис. 5.21. Зависимость относительной энергоёмкости разрушения горной породы от интенсивности ее разрушения

$$A_o = \frac{A_{y\partial}}{A_V},$$

, где  $A_{y\partial}$  – удельная работа разрушения горной породы долотом;  $A_V$  – энергоёмкость разрушения горной породы при вдавливании штампа. Из рисунка 5.21 видно, что зависимость  $A_o$  от  $h_o$  отражает скачкообразное разрушение горной породы.

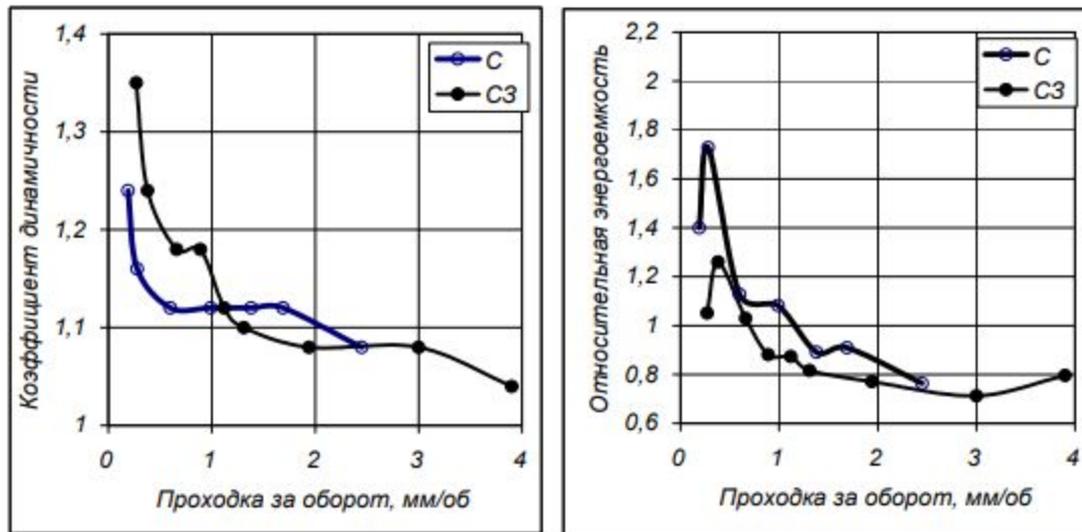
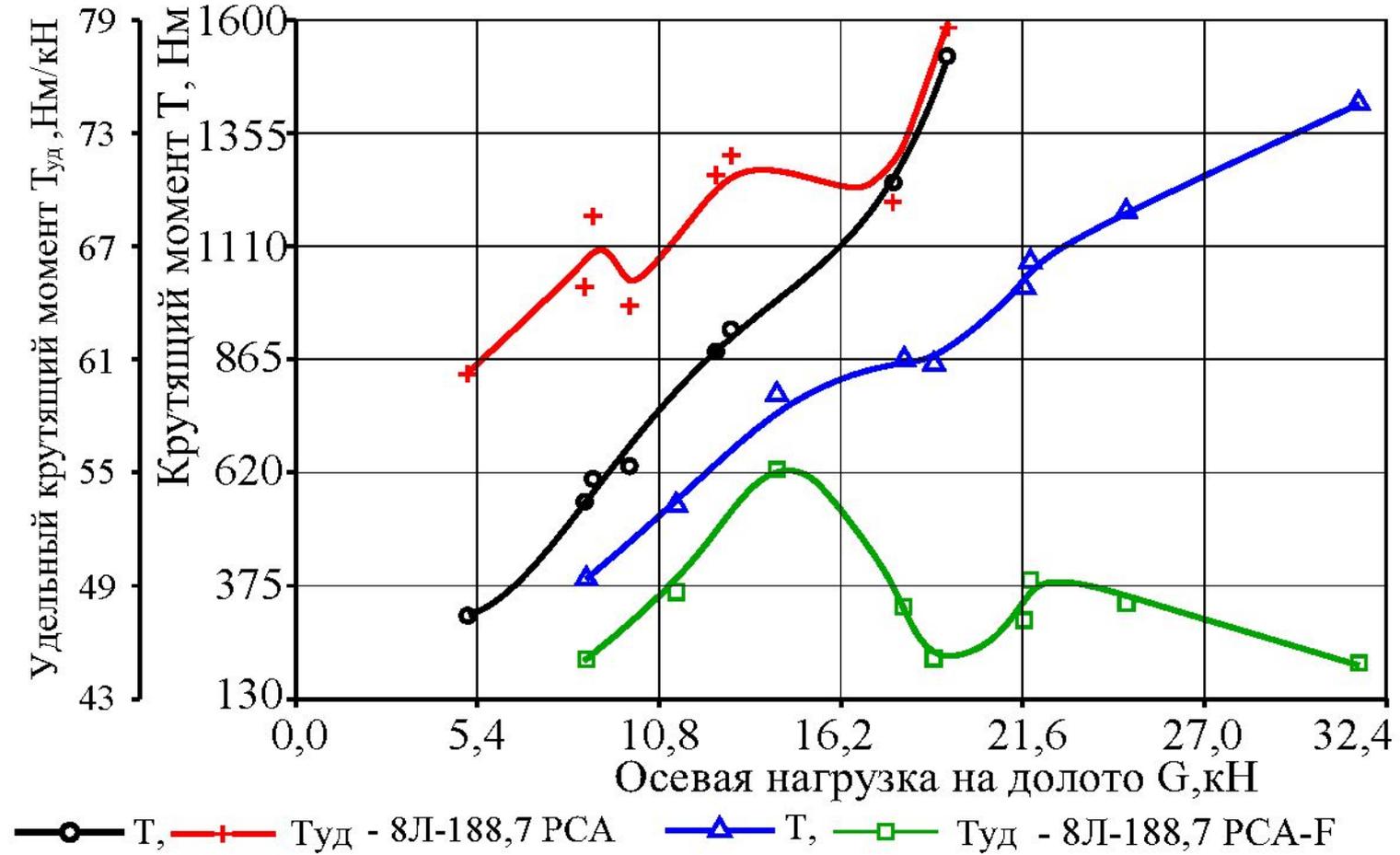


Рис. 5.58. Зависимости коэффициента динамичности (а) и энергоёмкости (б) разрушения горной породы от проходки за один оборот долота

# Зависимость крутящего момента и удельного крутящего момента на долоте PDC от осевой нагрузки на долото



# Основные типы существующих математических моделей процесса разрушения горной породы при бурения

- математические модели процесса бурения, основанные на эмпирических зависимостях показателей бурения (механической скорости бурения, проходки на долото, стойкости долота и.т.д.) от параметров бурения;
- математические модели процесса бурения, описывающие процесс бурения как процесс взаимодействия в системе бурильная колонна-долото-забой;
- комбинированные математические модели, представляющие собой комбинацию первых двух типов математических моделей

# Математические модели зависимости показателей бурения от режима бурения по промышленным данным

$$v^0 = AP^\alpha n^\beta$$

где  $P$  и  $n$  соответственно осевое усилие, приложенное к долоту, и скорость его вращения;  $A$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  - экспериментальные коэффициенты, причем  $\alpha \geq 1$ , а  $\beta \leq 1$ .

предложены эмпирические зависимости и других видов, например:

$$v_0 = \frac{AP^\alpha n^\beta}{1 + (bP)^k},$$

где  $b$  и  $k$  - тоже экспериментальные коэффициенты.

Функциональные представления механической скорости бурения  $v = f(v_0, t)$

часто принимаются в виде

$$v = v_0 - kt,$$

$$v = v_0 e^{-at},$$

где  $k$  и  $a$  - опытные коэффициенты.

# **Основные этапы математического моделирования взаимодействия в системе бурильная колонна долото забой.**

- Моделирование кинематики шарошечного долота;
- Моделирования на физических моделях процесса взаимодействия вооружения шарошечного долота с породой с учетом особенностей конструкции долота, свойств породы, забойных условий (температуры, горного, порового и гидростатического давлений), свойств промывочной жидкости и режимов бурения).
- Моделирование продольных и крутильных колебаний бурильной колонны;
- Расчет механической скорости и проходки на долото в зависимости от различных конструктивных параметров долота и геолого-технических условий бурения.

# Моделирование геометрии и кинематики шарошечного долота.

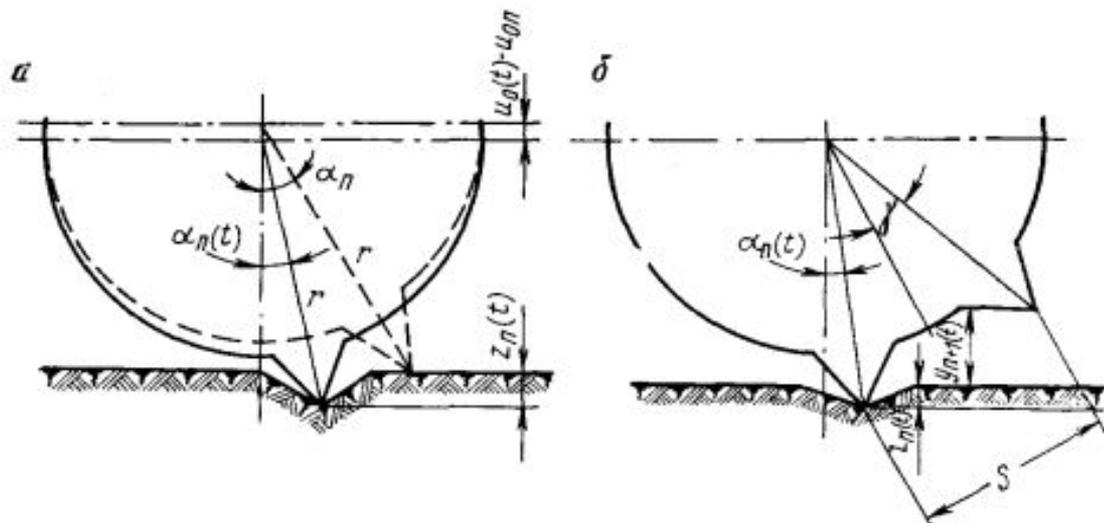


Рис. 4. Схема к расчету:

*a* — глубины внедрения зубца; *b* — расстояния очередного зубца от поверхности забоя

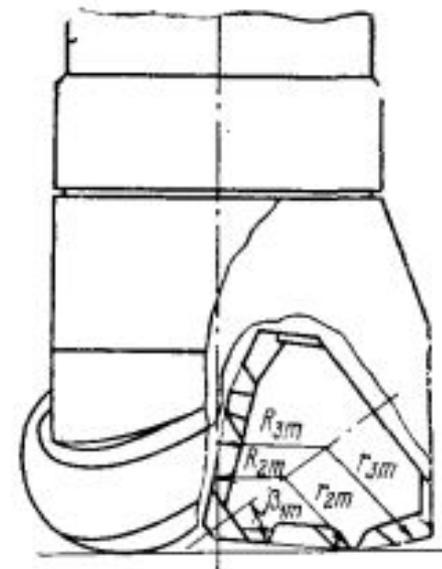
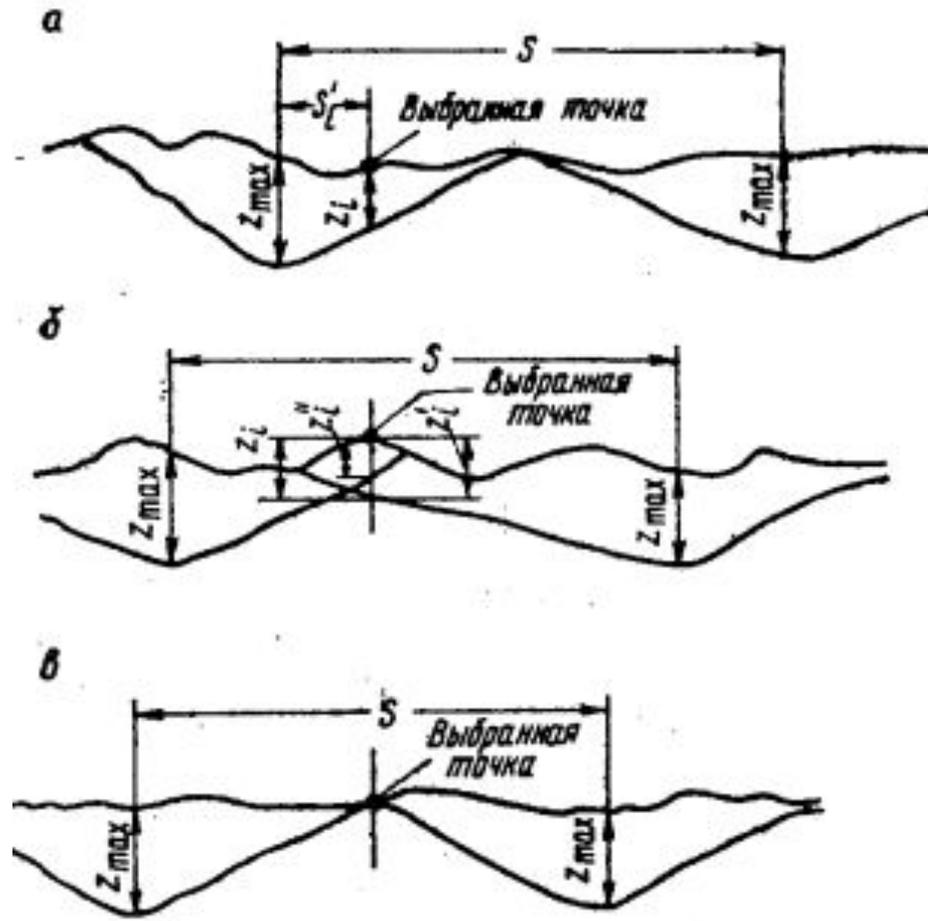


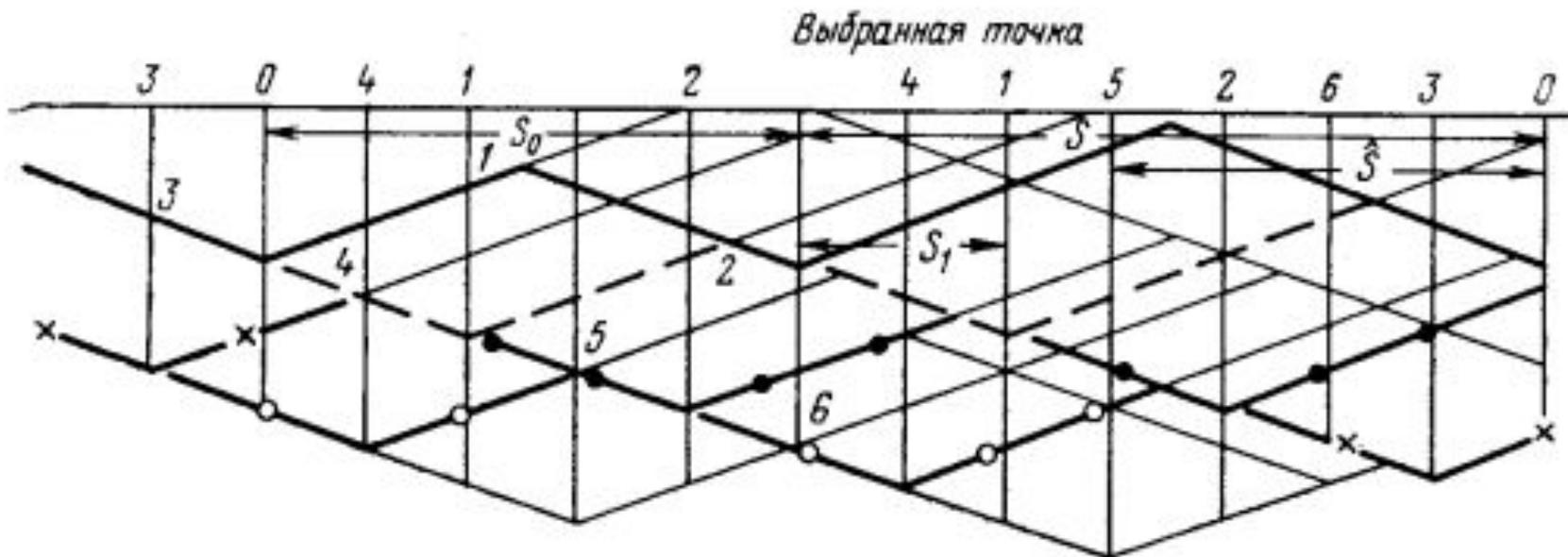
Рис. 5. Схема к моделированию шарошечного долота

# Схема формирования и продвижения забоя скважины при бурении шарошечными долотами.



ис. 1. Схемы продвижения выбранной точки забоя

# Схема моделирования процесса формирования забоя при бурении шарошечным долотом.



# Схема расчета механической скорости бурения

отдельных ее точек. Будем считать, что скорость проходки может быть определена, как средняя скорость за время  $t$  любой произвольно выбранной точки забоя. В общем виде можно записать

$$v = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{i=1}^{N(t)} z_i, \quad (1.1)$$

где  $v$  — скорость проходки, обычно называемая механической скоростью проходки или бурения, чаще всего обозначается  $v_{\text{мех}}$  (имеется в виду прежде всего скорость бурения неизношенным долотом);  $t$  — текущее время;  $i$  — индекс каждого акта взаимодействия венца долота с породой в окрестности выбранной точки забоя;  $z_i$  — углубление выбранной точки забоя при очередном взаимодействии зубцов данного венца с породой в окрестности этой точки;  $N(t)$  — общее число ударов зубцов в окрестности выбранной точки, учитываемых при расчете скорости проходки.

Учитывая формулу (1.1), для ограниченного числа проходов  $N$  можно записать

$$v = 0,06 \frac{n}{N} \sum_{i=1}^N z_i, \quad (1.2)$$

где  $v$  — скорость проходки в м/ч;  $n$  — скорость вращения долота в об/мин.

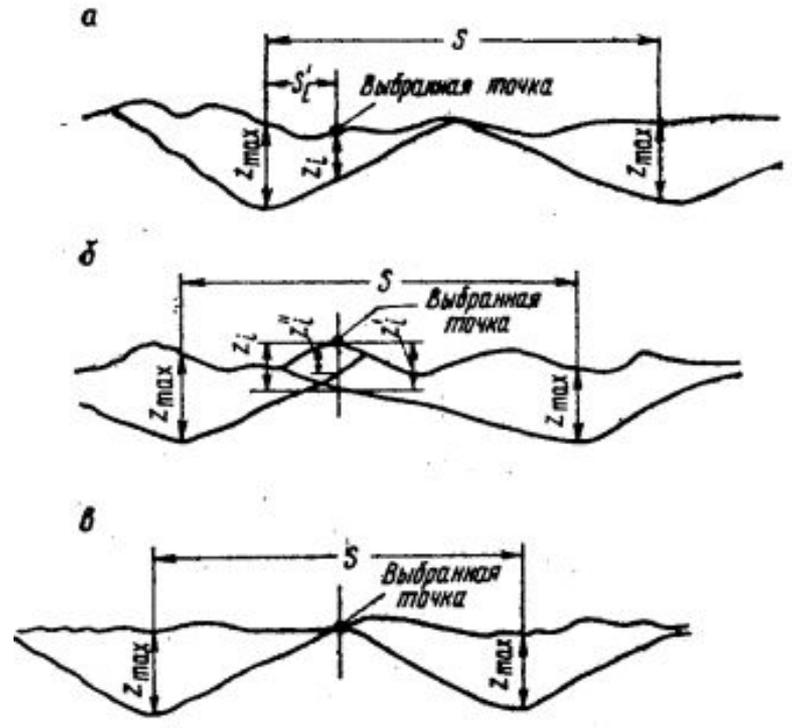
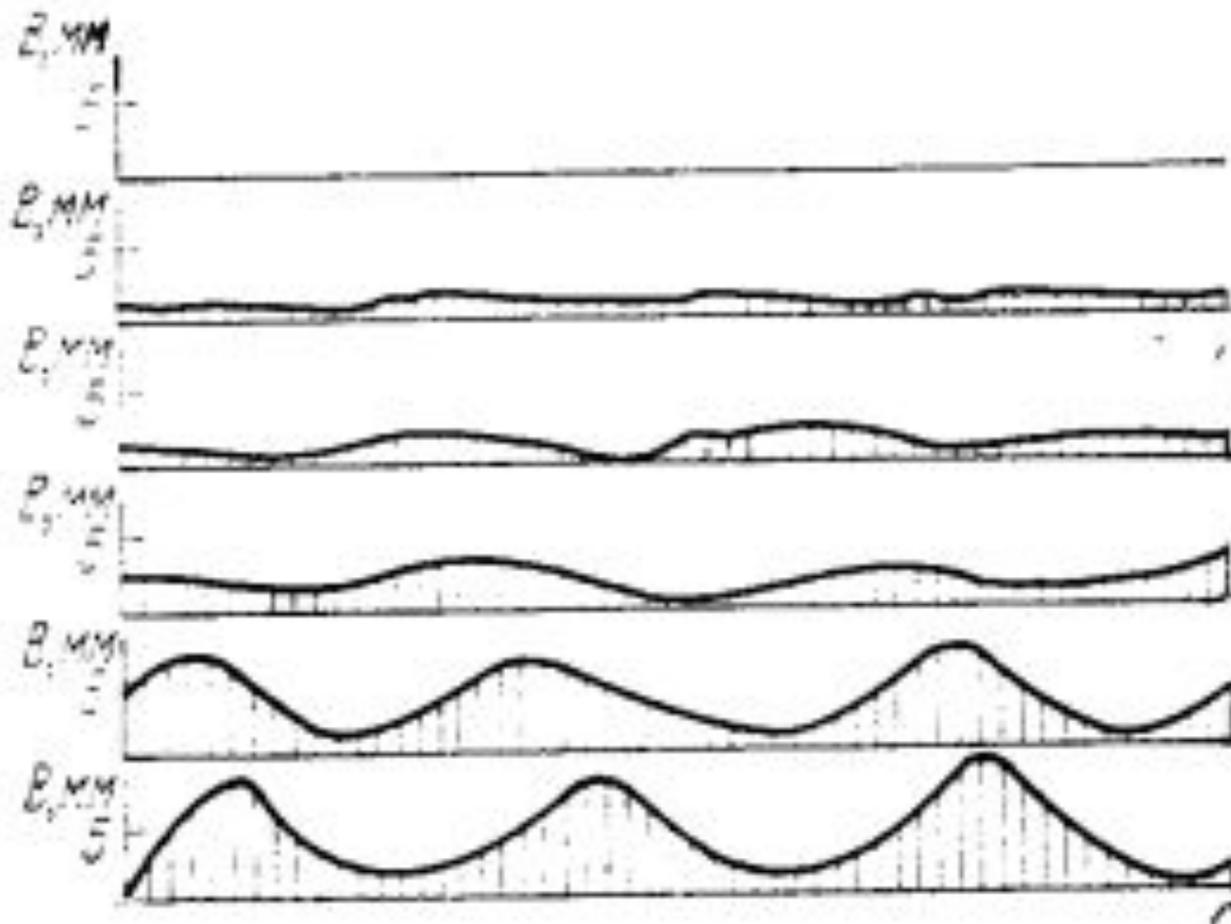


Рис. 1. Схемы продвижения выбранной точки забоя

# Моделирование процесса формирования забойной рейки и ухабов на поверхности забоя скважины.



# Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей механической скорости от режимных параметров.

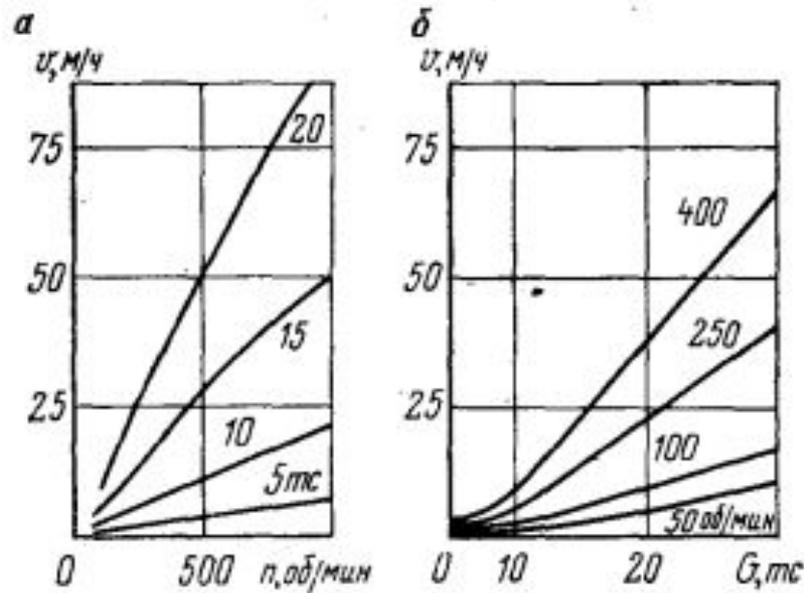


Рис. 23. Расчетные зависимости скорости проходки от числа оборотов (а) и осевой нагрузки (б)

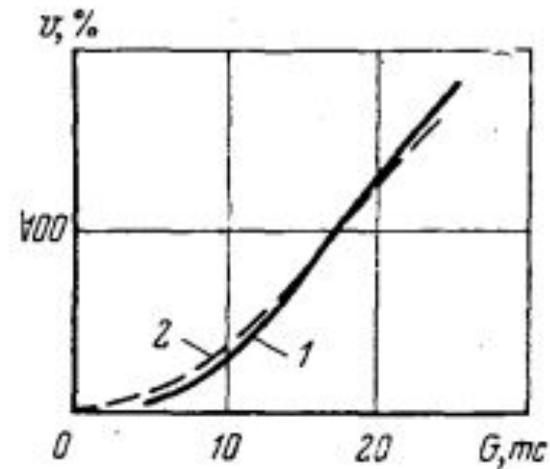


Рис. 24. Сравнение расчетной зависимости скорости проходки от осевой нагрузки с экспериментальной зависимостью по Бингхэму:  
1 — расчетная зависимость;  
2 — экспериментальная зависимость

# Сравнение расчетных и промышленных данных зависимости механической скорости от осевой нагрузки.

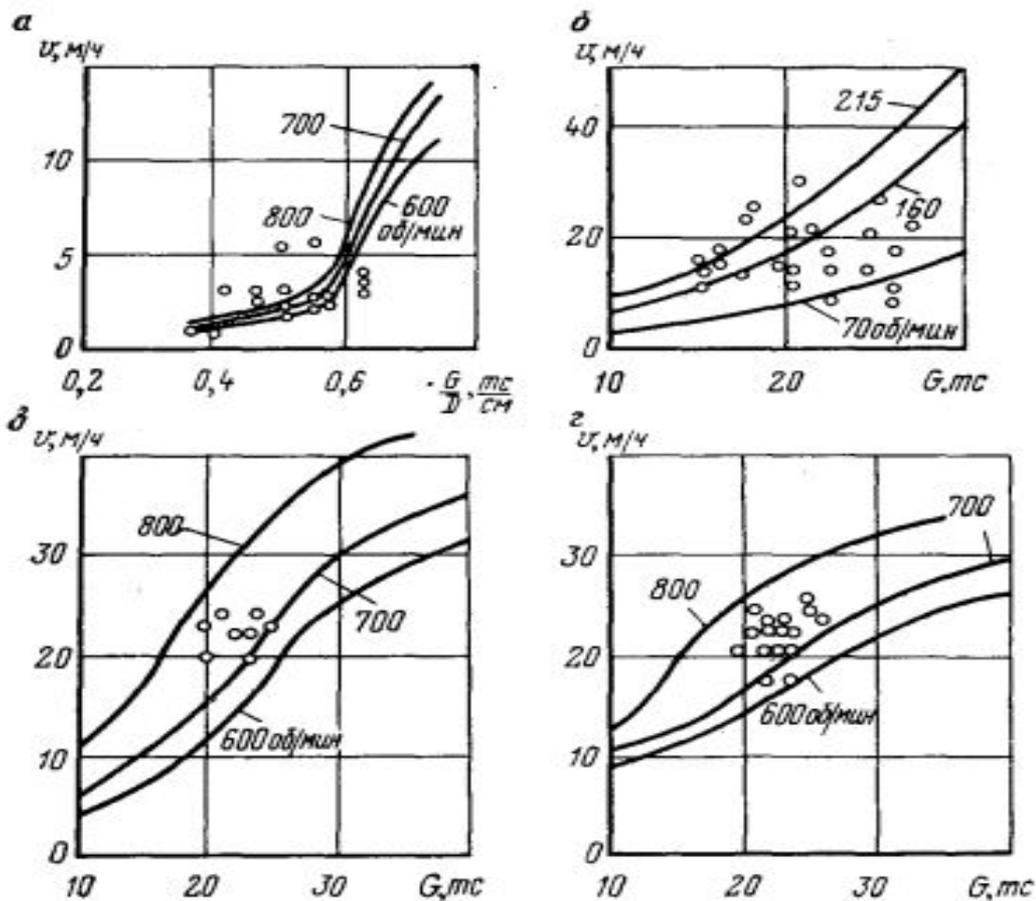


Рис. 27. Сравнение расчетных данных по скорости проходки с промышленными экспериментальными данными:

сплошная линия — расчетные зависимости, кружки — экспериментальные точки

# Параметры режима бурения

- осевая нагрузка на долото  $G_o$ ,
- скорость  $\omega$  и частота  $n$  вращения долота;
- количество  $Q$  и **качество** бурового раствора:
  - ✓ фильтрация  $\Phi$ , (фи)
  - ✓ статическое напряжение сдвига  $\theta$  (греч. Тета),
  - ✓ вязкость  $\eta$  (эта),
  - ✓ плотность  $\rho$  (ро).

# Что определяют параметры режима бурения?



# Оптимальный, Форсированный и Специальный режимные параметры бурения

**Оптимальный режим бурения:** сочетание значений параметров бурения обеспечивающий наилучшие значения технико-экономических показателей процесса бурения (мех. скорость, проходка на долото, стоимость метра проходки);

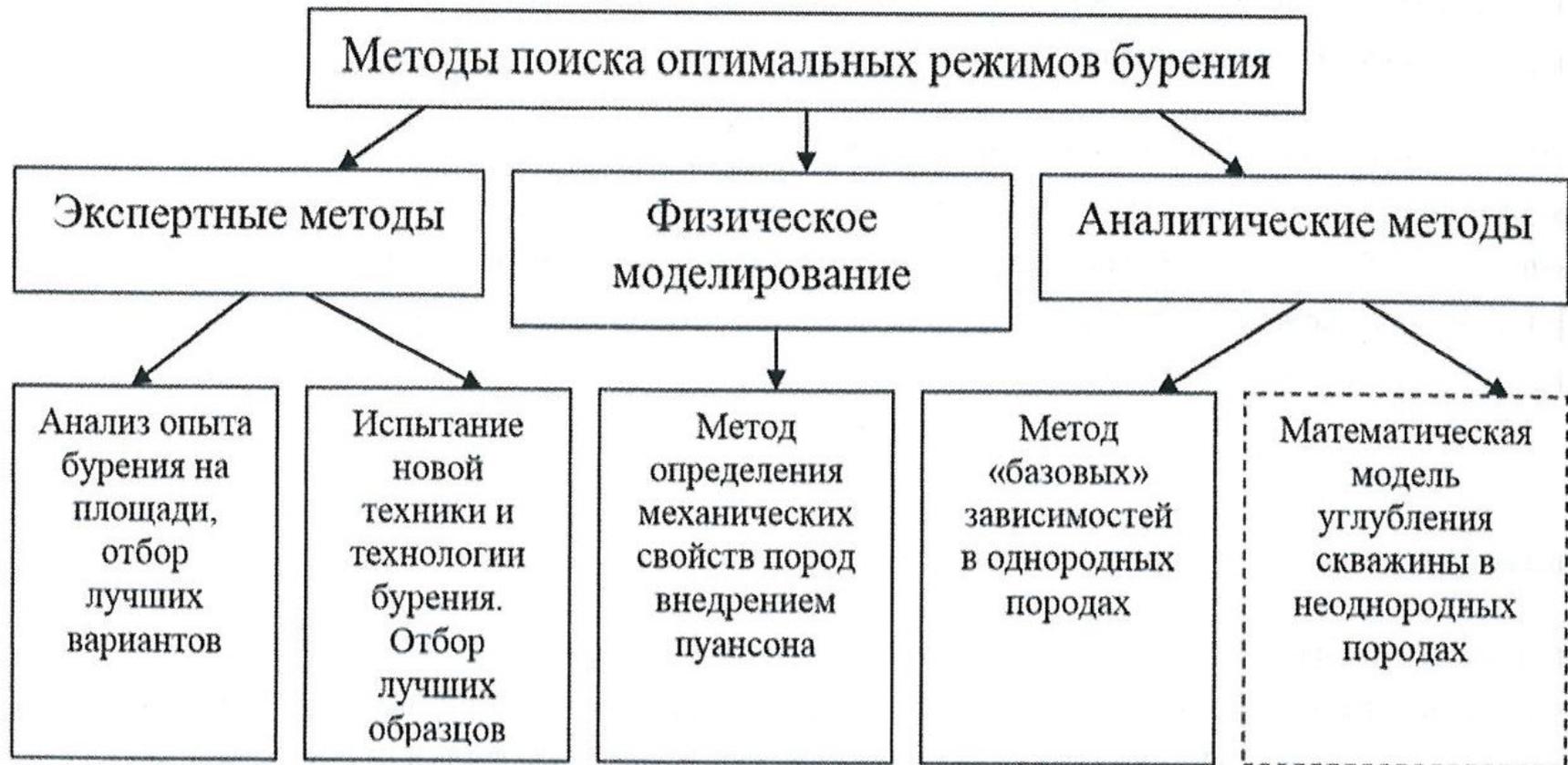
**Форсированный режим бурения:** сочетание значений параметров бурения обеспечивающий получение максимально высокой механической скорости бурения в данных конкретных условиях;

**Специальный режим бурения:** сочетание значений параметров бурения обеспечивающий решение специальных задач.

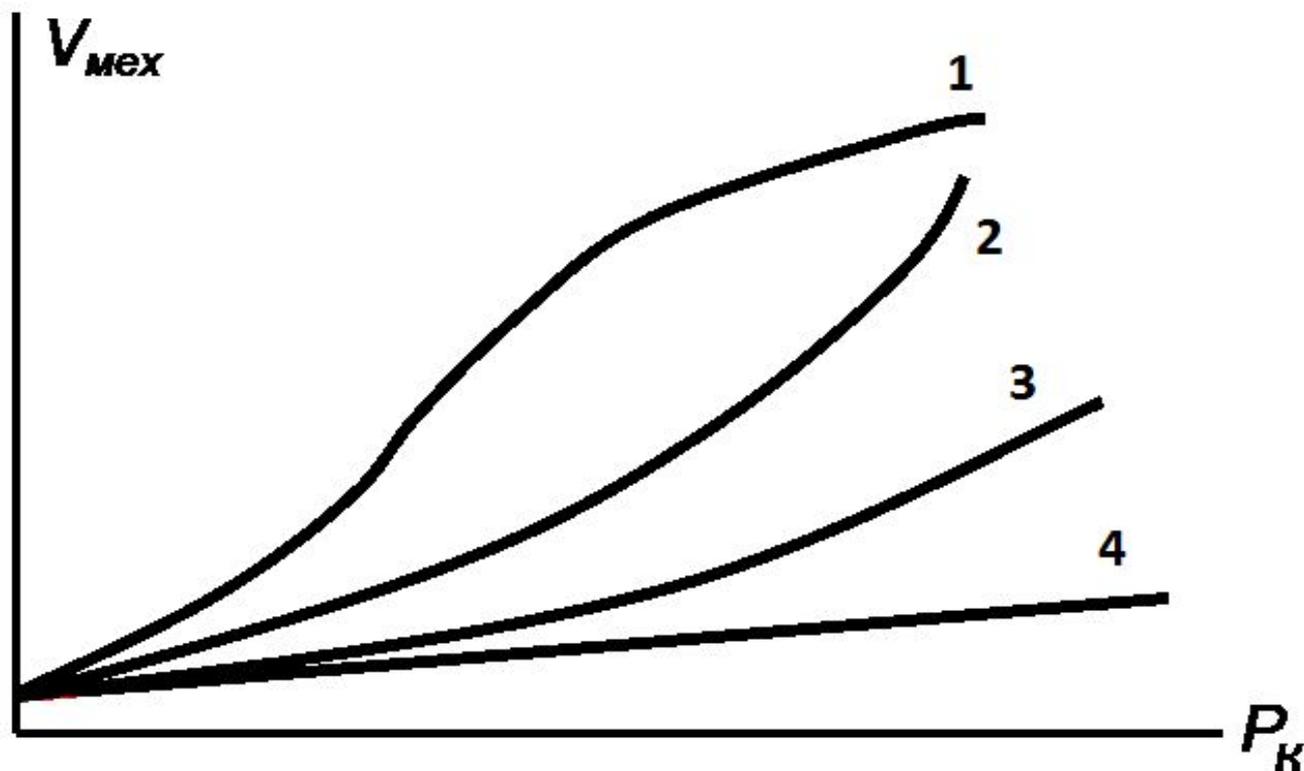
К специальным режимам прибегают , например, при бурении в неблагоприятных геологических условиях, когда:

- снижаются частота вращения, осевая нагрузка и интенсивность промывки,
- ограничивается величина проходки за рейс;
- при изменении параметров траектории ствола скважин;
- в других случаях.

# Методы поиска оптимальных режимов бурения

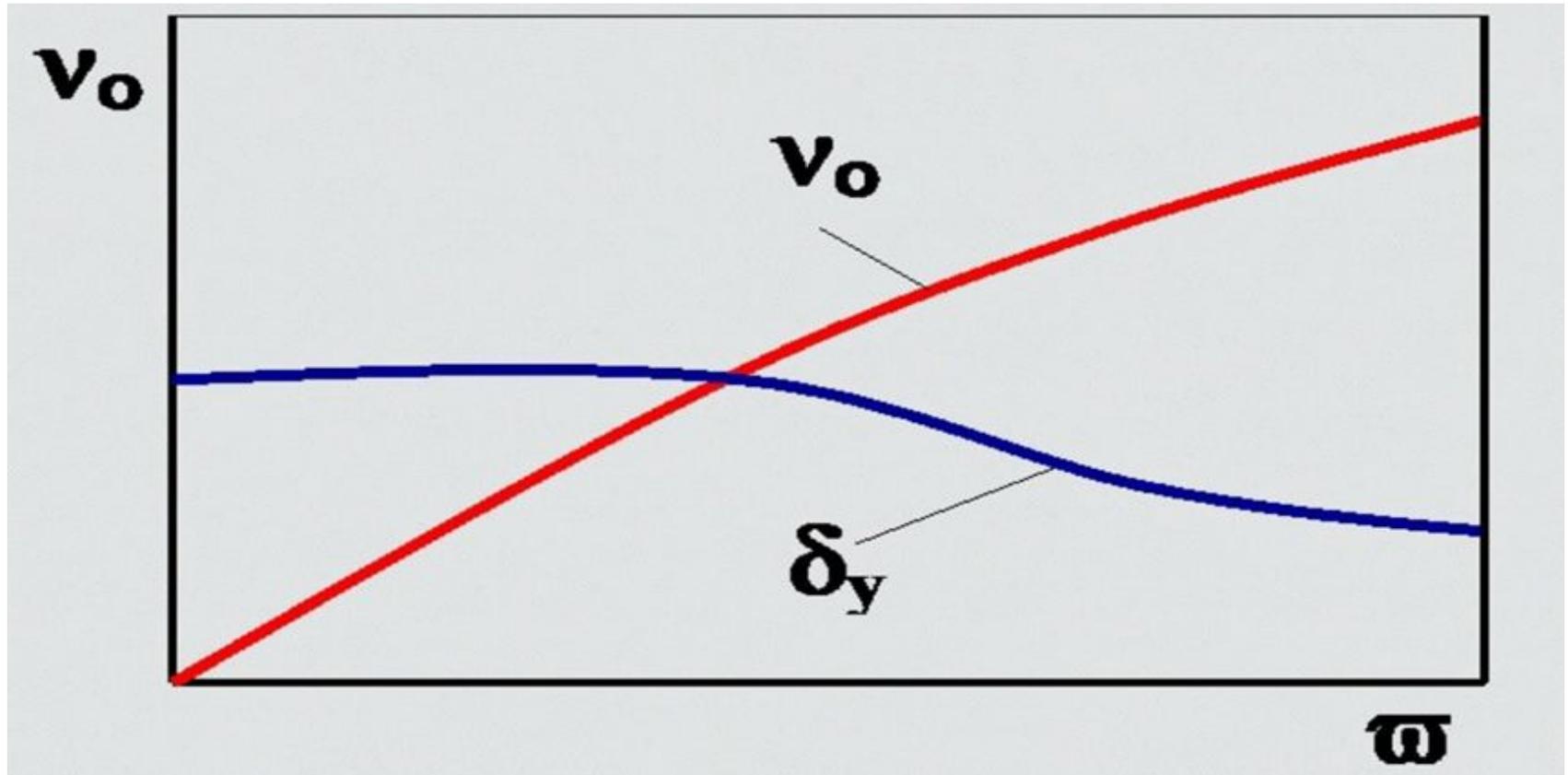


# Зависимость механической скорости бурения от осевой нагрузки на долото для различных типов горных пород



1- мягкие породы; 2 – средней твердости;  
3 – твердые породы; 4 – крепкие породы

**Зависимость начальной механической скорости бурения  $V_0$  и углубления за один оборот  $\delta_y$  от частоты вращения долота  $\omega$**



# Зависимость начальной механической скорости бурения и углубления за оборот от угловой скорости вращения шарошечного долота. (по Е.К. Юнину)

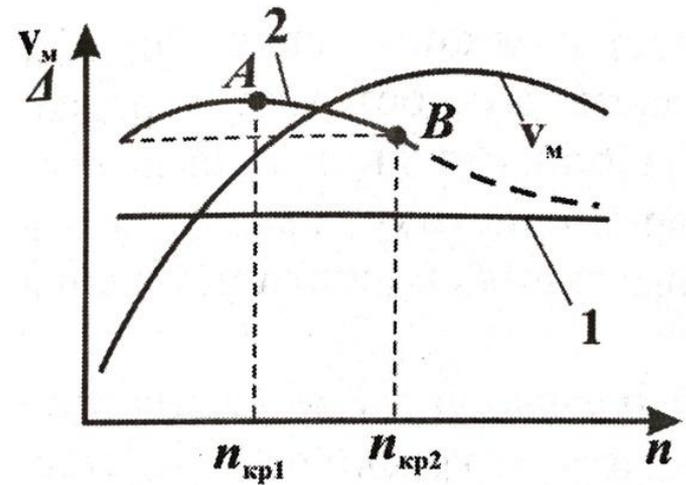
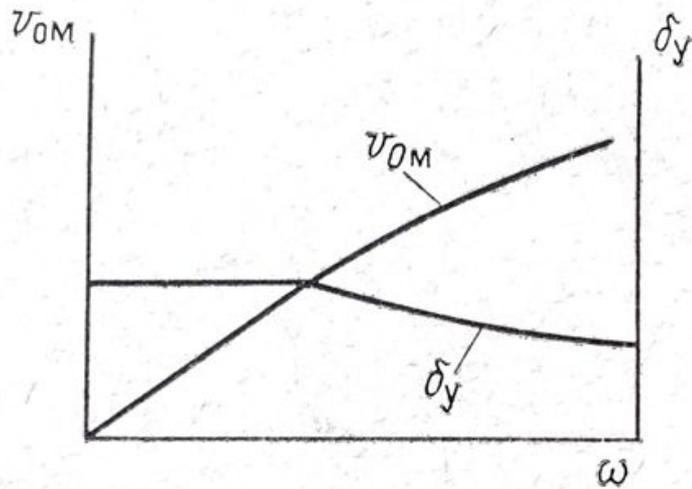
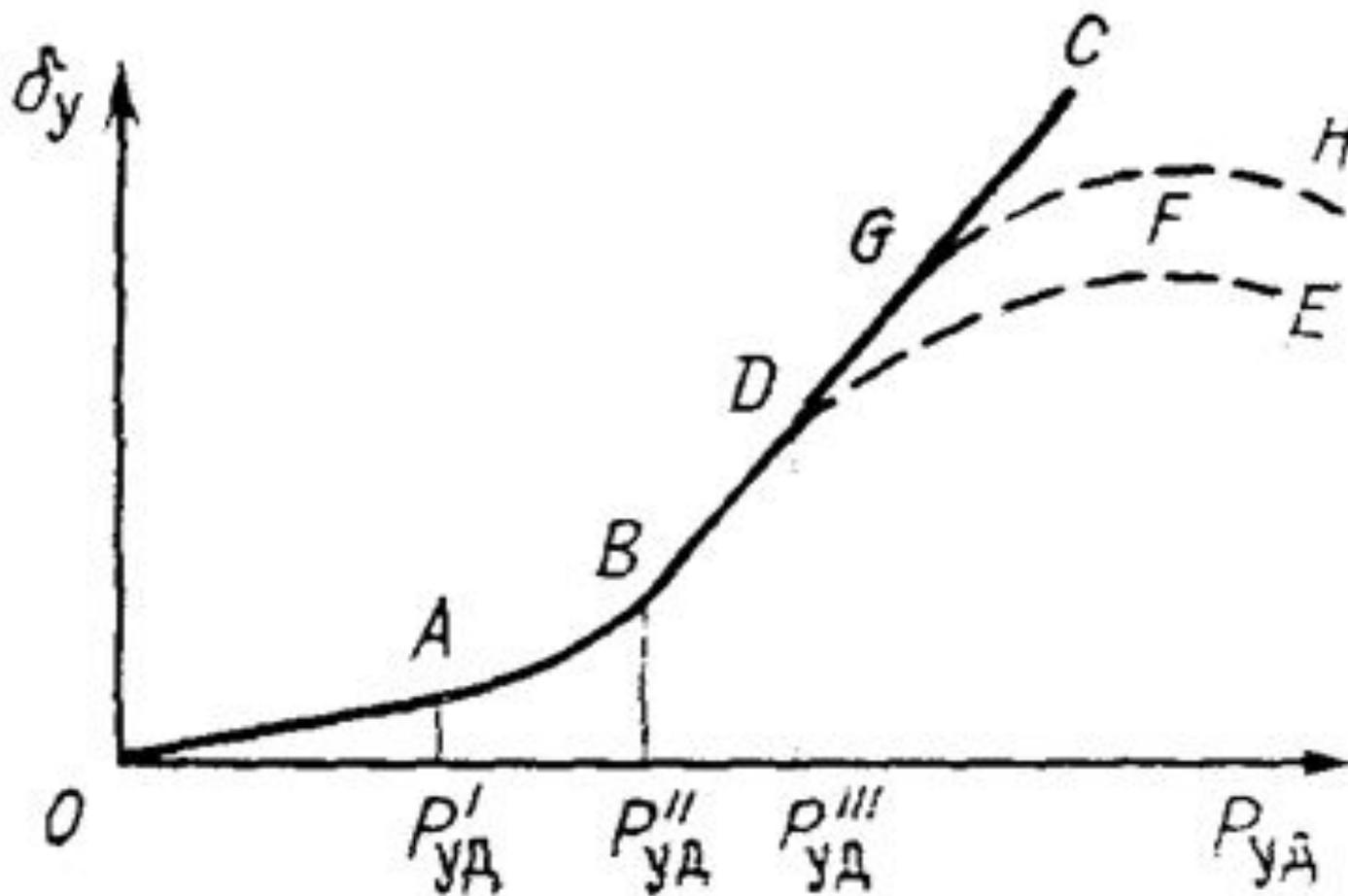


Рис. 5. Зависимость  $\delta = f(n)$ .

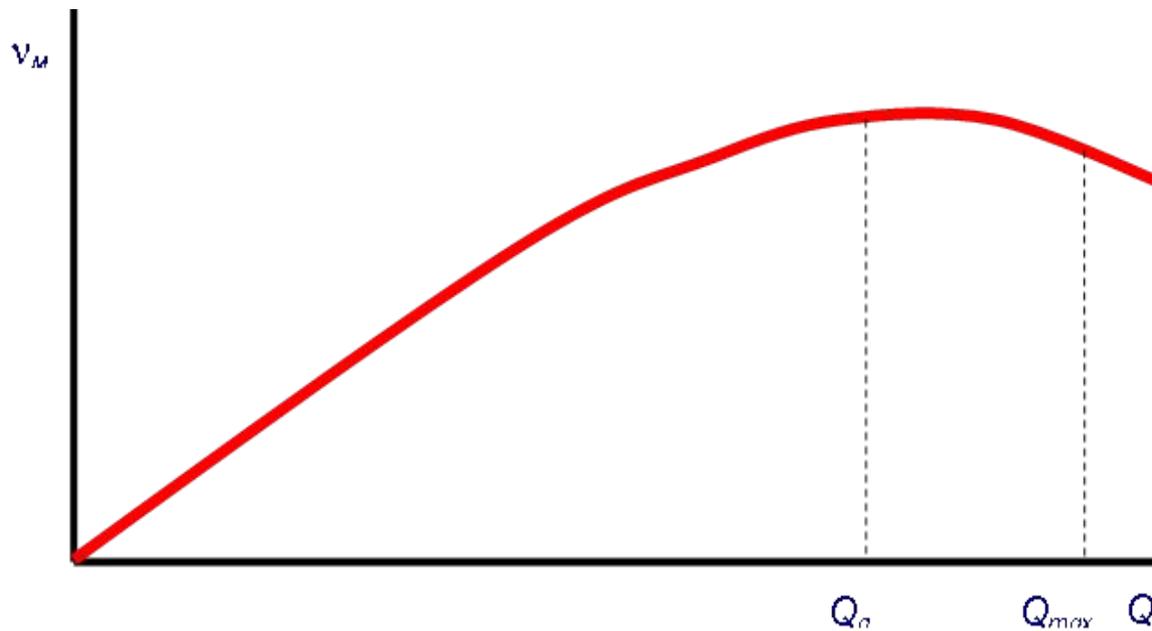
1 – при бурении твердых и хрупких пород алмазными долотами;

2 – при бурении упругопластичных пород шарошечными долотами.

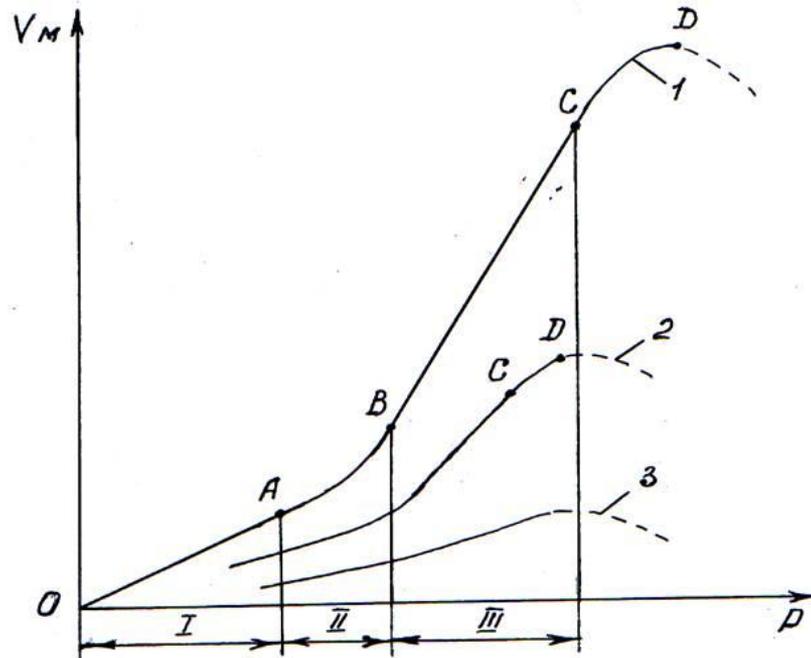
# Зависимость углубления долота за один оборот от удельной осевой нагрузки на долото



# Зависимость механической скорости бурения от расхода промывочной жидкости



# Зависимость механической скорости бурения от осевой нагрузки на долото при различном качестве очистки забоя



1- совершенная очистка; 2 – несовершенная очистка;  
3 – плохая очистка

Зависимости механической скорости бурения от свойств бурового раствора:  
1- плотности; 2 – содержания твердой фазы; 3 – водоотдачи; 4 – условной  
вязкости. Алексеев, Вдовин)

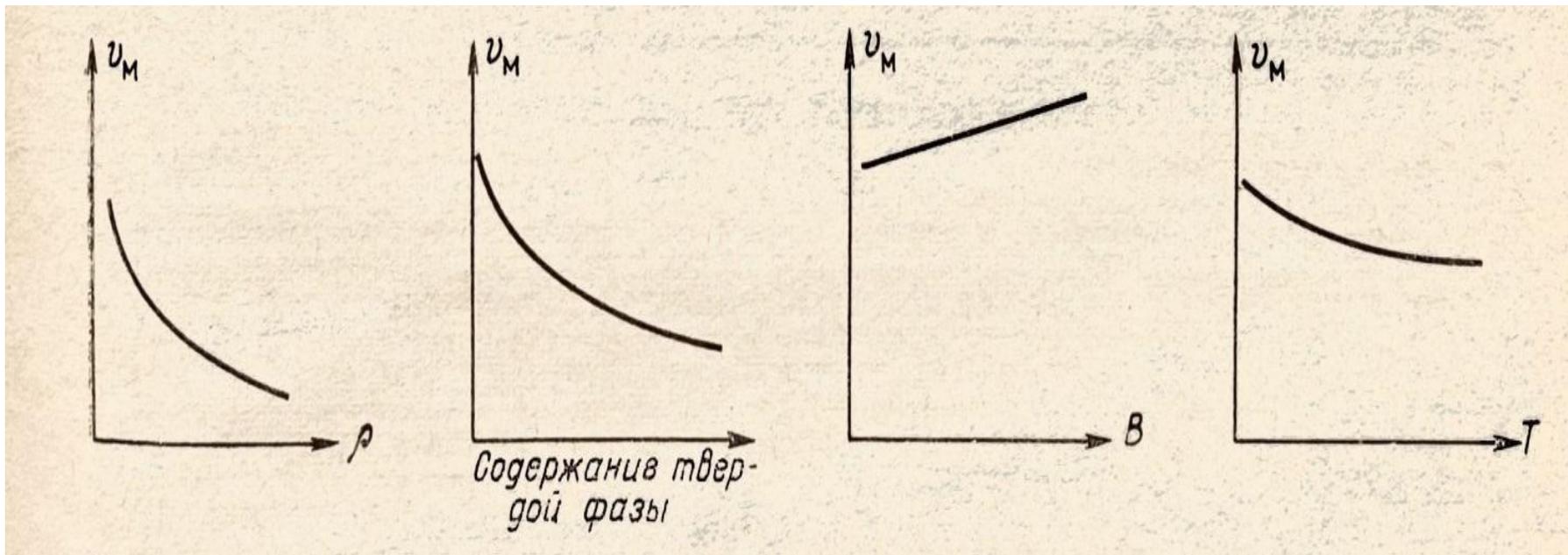


Рис. 7. Зависимости механической скорости бурения от свойств бурового раствора:

1- плотности; 2 – содержания твердой фазы; 3 – водоотдачи; 4 – условной вязкости.

В УГНТУ было поведено стендовое изучение динамики и энергетики бурения горной породы средней твердости (мрамора) по типу глубоких скважин восьмиллопастными долотами диаметром 188,7 мм, оснащенными: одно – резцами с острой режущей кромкой, а второе – резцами с режущей кромкой, притупленной фаской. Опыты проведены при частоте вращения долота 80 об/мин.

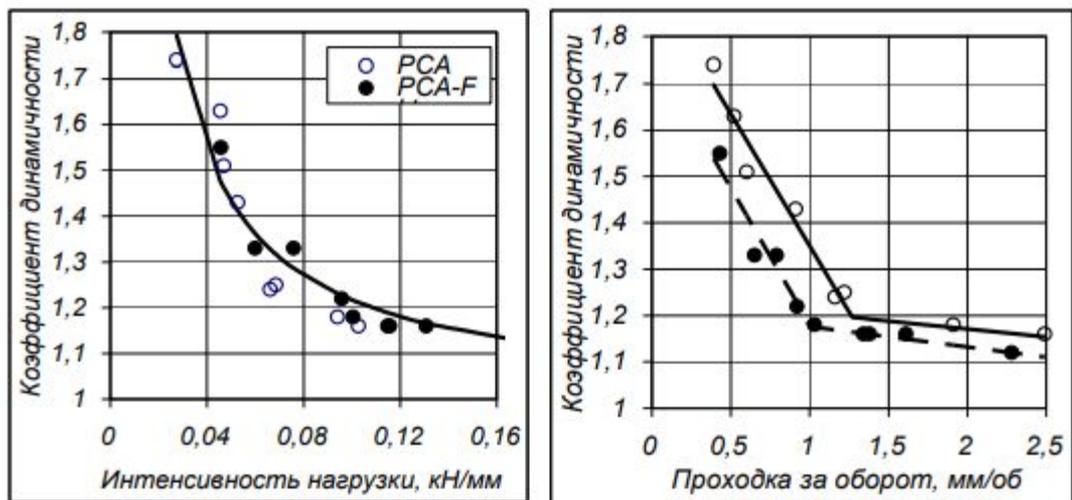


Рис. 5.20. Зависимости коэффицента динамичности от интенсивности нагрузки на долото (а) и интенсивности разрушения горной породы (б)

$$k_d = \frac{G_{max}}{G_{ст}}$$

Отношение измеренной максимальной нагрузки  $G_{max}$  к статической нагрузке  $G_{ст}$  принято называть коэффициентом динамичности работы долота:

# КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ БУРЕНИЯ

## МЕХАНИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ БУРЕНИЯ

$$V_m = \frac{\mu P_{oc} R \omega}{97,5 A_v F},$$

где:  $\mu$  – коэффициент сопротивления породы вращению бурового инструмента;

$P_{oc}$  – осевая нагрузка на инструмент, Н;

$R$  – радиус торца породоразрушающего инструмента, м;

$\omega$  – частота вращения,  $s^{-1}$ ;

$A_v$  – энергоемкость разрушения породы определенного объема,  $kBt/m^3$ ;

$F$  – площадь забоя скважины,  $m^2$ .

$$V_m = \frac{\mu v}{2\pi 97,5 A_v} q,$$

где  $q = P_{oc} / F$  – удельное контактное давление на забой скважины;

$v$  – линейная скорость перемещения резцов.

# КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ Стоимость 1 м бурения скважины

Зависимость общего вида для расчета стоимости бурения 1 м скважины  $C_m$  имеет следующий вид:

$$C_m = \frac{C_{cm}}{T_{cm}} \left( \frac{1}{V_m} + \frac{T_{cm} - T_b}{l_p} \right) + \frac{Ц}{L},$$

где  $C_{cm}$  – стоимость смены работы БУ, руб;

$T_{cm}$  – длительность станко-смены, ч;

$V_m$  – механическая скорость бурения, м/ч;

$T_b$  – время, затраченное на углубление ствола скважины, ч;

$l_p$  – длина рейсовой проходки, м;

$Ц$  – стоимость бурового долота, руб;

$L$  – проходка на долото, м.

Конец лекции