

Г. Д. Ушаков

**аппаратура
и методы
изучения
деформаций
горных пород**



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ТРУДЫ ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

Выпуск 350

Г. Д. УШАКОВ

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ГОРНЫХ ПОРОД

(при высоких давлениях и температурах)

Ответственный редактор
чл.-корр. АН СССР И. В. Лучицкий



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Новосибирск · 1977

Работа посвящена гидростатическим аппаратам высокого давления для исследования твердых веществ в условиях сложноподвиженного состояния. Описывается гидростатический аппарат новой конструкции системы плавающий цилиндр—поршень, позволяющий проводить испытания цилиндрических образцов на сжатие и растяжение при высоких термодинамических параметрах. Рассматриваются методы определения физических характеристик (давление, температура, скорость упругих волн) деформации образца под давлением при повышенных температурах.

Книга рассчитана на специалистов по механике горных пород, механике деформируемого твердого тела, геологов, минералогов, металлургов, а также преподавателей и студентов вузов.

Исследования физико-механических свойств горных пород и минералов при высоких термодинамических параметрах, моделирующих условия земной коры и мантии, в настоящее время ведутся по двум направлениям — изучение полиморфных и фазовых переходов, равновесия состояния фазовых диаграмм, получение новых модификаций минералов и изучение механических состояний, т. е. способности горных пород и минералов изменяться и оказывать сопротивление разрушению.

Установлено, что горные породы в недрах Земли находятся в сложном напряженном состоянии, вызывающем течение пород, разрывы и сдвиги. Эти и многие другие вопросы, в частности, каков физический механизм течения пород в процессе деформации, остаются еще до конца не выясненными. Как выразить особенности течения пород, пользуясь теми или иными величинами локальных смещений или деформаций? Каков характер распределения природных механических сил в недрах Земли и мантии? Для решения этих вопросов необходимо применение различных методов, в частности, метод кратковременного испытания реальных пород в соответствующих термодинамических условиях.

Из литературных данных известно, что испытания горных пород при изучении их механических свойств в настоящее время проводятся преимущественно на цилиндрических образцах при одноосном и трехосном нагружении. При одноосном испытании образцов производится на сжатие и растяжение. Возникают два вида напряженного состояния. В первом случае главные компоненты напряжений имеют вид $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0$, во втором $\sigma_3 < 0$; $\sigma_2 = \sigma_1 = 0$. Эти виды испытаний широко применяются в инженерных целях для изучения предела прочности горных пород при атмосферном давлении. В недрах же Земли ни одноосное растяжение, ни одноосное сжатие, очевидно, существовать не могут.

Трехосное сжатие образуется при наложении одноосного сжатия на всестороннее давление. При этом главные компоненты напряжений имеют вид $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$. Трехосное растяжение — это видоизмененное состояние трехосного сжатия; главные компоненты напряжений имеют вид $\sigma_3 > \sigma_2 = \sigma_1$. Эти напряженные

состояния достаточно хорошо иллюстрируются диаграммой Мора. Трехосное сжатие и напряжение — это те виды напряженного состояния, которые чаще всего осуществляются в экспериментах по деформации горных пород; существование такого вида нагружения, вероятно, можно ожидать в земной коре и мантии.

Стремительное развитие новых направлений в науке, таких как механика больших давлений и температур или геомеханика глубинных зон Земли, связанных с разработкой физических основ сверхглубоких выработок, шахт, скважин и других сооружений, а также с прогнозом землетрясений, требует расширения знаний о состоянии горных пород в соответствующих физических условиях.

В отечественной и зарубежной литературе опубликовано большое количество данных по деформации горных пород (Воларович и др., 1974; Ставрогин, Георгиевский, 1968; Griggs, Handin, 1960). Все эти результаты в основном получены в термодинамических условиях, соответствующих глубинам земной коры 15 км, и не дают полного представления о механизмах разрушения горных пород в различных напряженных состояниях при высоких термодинамических параметрах. Для моделирования физических условий более глубоких горизонтов Земли и изучения деформационных свойств горных пород в этих условиях требуются более совершенные аппаратура и методики.

Для решения вопросов, стоящих в плане исследования деформационных свойств горных пород при высоких термодинамических параметрах, перед нами были поставлены конкретные задачи:

1. Сконструировать более совершенный гидростатический аппарат для исследования деформационных свойств горных пород в широком диапазоне давлений и температур.

2. Разработать методики для испытания образцов горных пород при высоких термодинамических параметрах на сжатие и растяжение со снятием одновременно комплекса механических характеристик: сжимаемости, диаграмм напряжения — деформации, скоростей упругих волн и прочности пород.

Работа выполнялась в лаборатории экспериментальной тектоники Института геологии и геофизики СО АН СССР.

При выполнении работы пользовался практической поддержкой В. И. Громина, П. М. Бопдаренко, А. Г. Лобова, М. Я. Квadiaева. Им он выражает искреннюю признательность.

Особую благодарность за постоянное внимание к работе автор приносит член-корреспонденту АН СССР И. В. Луцицкому.

КРАТКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО АППАРАТУРЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Для исследования твердого вещества при высоких давлениях и температурах применяется сложная аппаратура. В этой области за последние два десятилетия достигнут значительный прогресс. Многие физические и механические свойства твердых тел изучены при давлениях свыше $50\,000\text{ кГ/см}^2$. Аппаратура высокого давления для осуществления такого рода исследований достаточно хорошо описана во многих работах (Бриджмен, 1948, 1955; Береснев и др., 1960; Циклис, 1965; Огибалов, Кийко, 1966; Свенсон, 1963; Брандес, 1973; и др.).

Для создания давления до $30\,000\text{ кГ/см}^2$ применяют преимущественно гидростатические аппараты, в которых в качестве среды, передающей давление, используются жидкости или газы. Более высокие давления получают в квазигидростатических аппаратах, в которых средой, передающей давление, являются твердые вещества. Это связано с тем, что все жидкие среды при высоких давлениях (более $30\,000\text{ кГ/см}^2$) обладают свойством переходить в твердое состояние или становиться вязкими, не способными передавать равномерное давление на испытываемый образец.

Аппараты высокого давления, работающие с применением жидкостей (гидростатические) или твердых тел (квазигидростатические), значительно отличаются друг от друга по своей конструкции.

КВАЗИГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Эти аппараты в настоящее время приобрели широкую известность благодаря простоте конструкции, позволяющей проводить исследования веществ под давлением до нескольких Мбар.

Впервые квазигидростатические аппараты были разработаны П. Бриджменом (Bridgman, 1946). В аппарате цилиндр — поршень достигаются давления до $50\,000\text{ кГ/см}^2$ в сравнительно большом объеме. Для получения более высоких давлений им был сконструирован аппарат с массивной поддержкой, состоящий из двух поршней, имеющих форму усеченного конуса.

В дальнейшем принцип Бриджмена массивной поддержки был положен в основу конструкции многпоршневых квазигидростатических аппаратов высокого давления. Первым создателем такого многпоршневого аппарата явился У. Т. Холл (Hall, 1958). Сконструированный им аппарат состоял из четырех трехгранных пирамидальных поршней с торцами в виде равносторонних треугольников, ограничивающих тетраэдрический объем. При этом каждый поршень имел индивидуальный пресс.

Аппарат Холла позже был несколько модернизирован и изготовлен в Бюро стандартов США (1959 г.), вместо четырех прессов применялся только один, а функции других выполняло несущее кольцо, охватывающее нижние части трех других поршней.

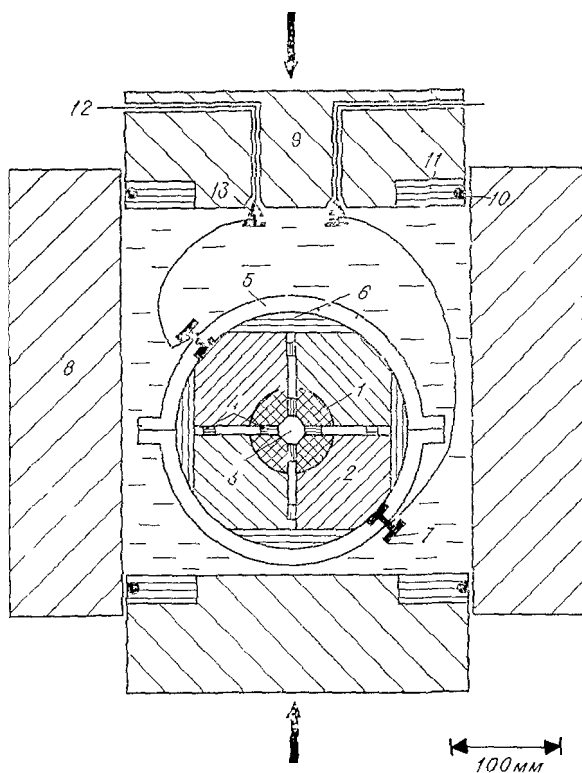


Рис. 1. Квазигидростатический многпоршневой аппарат в масляном резервуаре.

1 — сердечник из карбида вольфрама 2 — стальной поддерживающий блок, 3 — камера для образца 4 — изолирующая прокладка 5 — резиновая оболочка 6 — крышка, 7 — электрод, 8 — цилиндр 9 — поршень, 10 — уплотнительное резиновое кольцо, 11 — неопеновое кольцо, 12 — токвод 13 — конус

Позднее по образцу аппарата Холла как в СССР, так и за рубежом было изготовлено несколько кубических аппаратов, в которых торцовые плоскости поршней ограничивают кубический объем. Усеченная рабочая часть каждого поршня представляет собой прямоугольную пирамиду с углом при вершине 90° . Для обеспечения хода поршней в этих аппаратах площадки граничной держателя образца делаются больше опорных площадок торцов поршней, вследствие чего между боковыми гранями поршней образуется зазор. Такие аппараты имеют большой рабочий объем, с их помощью достигается более равномерное распределение давлений.

Большое число различных конструкций квазигидростатических аппаратов описано в ряде отечественных и зарубежных работ (Циклис, 1965; Вережанин и др., 1960; Bandi, 1964). Один из таких аппаратов, описанный японскими исследователями (Кавай, Эпдо, 1970), представлен на рис. 1. Этот аппарат способен создавать давления до $2,5 \cdot 10^6$ кГ/см².

С помощью квазигидростатических аппаратов достигаются высокие термодинамические параметры. Они надежны в работе, но не обеспечивают полной гидростатичности и поэтому при изучении физико-механических свойств твердых тел имеют ограниченное применение.

Гидростатические аппараты лишены этих недостатков. Они позволяют варьировать сложным нагружением испытуемых образцов, применять большое число различного рода датчиков, преобразователей для измерения физических и линейных величин, обеспечивающих надежный контроль за условиями опыта и состоянием испытуемого образца.

ГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Существующие гидростатические аппараты имеют различные конструкции. Для более эффективного использования мы предлагаем разделить их на три группы.

1. Однопоршневые аппараты системы цилиндр — поршень: всестороннее осевое давление в них создается одним и тем же поршнем.

2. Аппараты системы цилиндр — поршень — мультипликатор: всестороннее давление создается мультипликатором, осевое — поршнем, заключенным в цилиндре блока высокого давления; мультипликатор и поршень, как правило, работают независимо друг от друга.

Двухпоршневые аппараты типа цилиндр — поршень — поршень: всестороннее и осевое давления создаются одним из поршней, в то время как второй используется для поддержания постоянного давления во время опыта.

В качестве сред, передающих давление в гидростатических аппаратах, используются жидкости: изопентан, бензин Б-70, полиэтилсилоксановая жидкость и другие, которые хорошо передают давление до 30 000 кГ/см². Обычные минеральные масла при таких давлениях затвердевают либо становятся слишком вязкими.

Однопоршневые аппараты системы цилиндр — поршень. Простой однопоршневой гидростатический аппарат высокого давления был сконструирован в начале нашего столетия (Карман, 1911). Он состоял из пресса, цилиндра высокого давления, абтюлятора и нагрузочного поршня. С его помощью Карман впервые исследовал поведение твердых веществ под давлением, которое не превышало 2000 кГ/см². Несколько позже П. Бридльмен (1946) сконструировал аппарат с механической поддержкой, в котором достигалось давление 30 000 кГ/см².

В настоящее время известно много модификаций гидростатических аппаратов системы цилиндр — поршень. В качестве примера рассмотрим аппарат конструкции В. П. Бутузова, Г. П. Шаховского, М. Г. Гоникберга (1955). Этот аппарат (рис. 2) состоит из пресса с силовыми цилиндрами, расположенными в верхней и нижней траверсах нагрузочного блока, блока высокого давления, имеющего конусный сосуд, оправку и две обоймы. В канал конусного сосуда с одной стороны входит нагрузочный поршень, с другой — затвор.

Всестороннее давление создается нагрузочным поршнем при действии на него поршня, заключенного в верхнем силовом цилиндре. Одновременно поршень нижнего силового цилиндра запрессовывает конусный сосуд в оправку и создает поддерживающее давление со стороны оправки.

Долгое время аппараты такой конструкции не имели широкого применения для изучения под давлением деформируемости твердых тел. И лишь после того, как при исследовании процессов гидроэкструзии металлов были обнаружены эффекты, относящиеся к линейной зависимости между временем истечения материала заготовки и величиной всестороннего давления, стало возможным использовать эти аппараты для исследования механических свойств различных металлов и их сплавов при постоянном давлении.

В настоящее время известно несколько конструкций однопоршневых аппаратов, в которых для поддержания постоянства давления используется заготовка с матрицей. Один из таких аппаратов представлен на рис. 3 (Розанов и др., 1973). Этот аппарат состоит из стандартного однопоршневого пресса (пресс на рисунке не представлен), блока высокого давления со специальным устройством для испытания образцов на растяжение и сжатие при постоянном давлении. Блок представляет собой цилиндр с центральным сквозным каналом, в котором заключены поршень, динамометр для измерения осевой нагрузки, матрица с заготовкой и двусторонняя вилка с образцом.

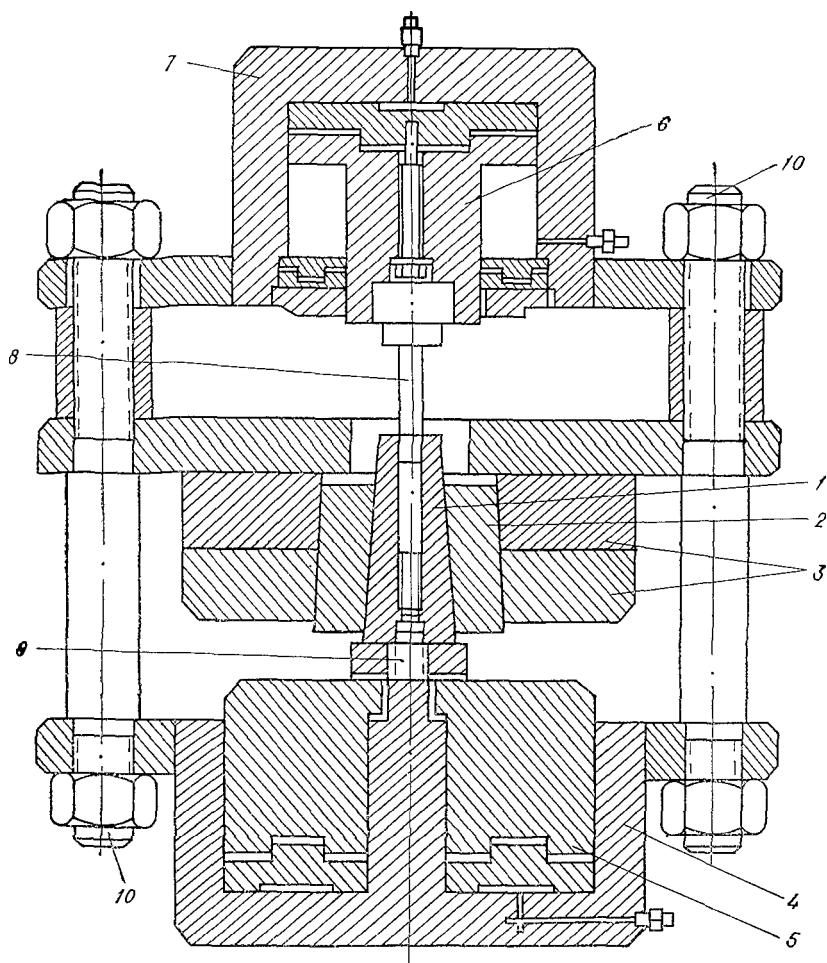


Рис. 2. Гидростатический аппарат системы цилиндр — поршень с двойной механической поддержкой.

1 — конусный сосуд; 2 — оправка; 3 — обойма; 4 и 7 — цилиндры; 5, 6 и 8 — поршни; 9 — затвор; 10 — колонны.

При испытании образцов всестороннее давление создается поршнем, и им же производится осевое нагружение образца. Для поддержания всестороннего давления во время опыта используется матрица с заготовкой. Величина давления в рабочей камере регулируется соответствующим подбором материала заготовки. Уровень жидкости, заливаемой в рабочую камеру, рассчитывается таким образом, чтобы выдавливание заготовки начиналось прежде, чем поршень коснется верхней вилки скобы. Нагрузочный поршень приводится в действие поршнем цилиндра прессы, а цилиндр контейнера с уплотненной матрицей размеща-

ется на неподвижной плите пресса. Осевая нагрузка, действующая на образец, измеряется с помощью тензодатчиков, наклеенных на стальную опорную втулку. Деформация образца регистрируется ходографом, работающим по принципу реостата. Электрическая связь датчиков с регистрирующими приборами осуществляется через электрические вводы, расположенные в матрице. Для повышения надежности эксперимента в этом аппарате применяется внешняя дублирующая аппаратура регистрации, расположенная вне рабочей камеры. Аппаратура такой конст-

рукции широко используется для испытания различных материалов как на сжатие, так и на растяжение при комнатной температуре и давлениях, не превышающих $20\,000\text{ кг/см}^2$. Применение этой аппаратуры для исследования горных пород под давлением при высоких температурах связано с большими трудностями подбора материала заготовки. Существенным недостатком этих аппаратов является несовершенная конструкция тензодатчиков, которые не выдерживают давлений более $10\,000$ — $12\,000\text{ кг/см}^2$.

В последние годы для исследования механических свойств твердых тел при влиянии давления были разработаны аппараты типа цилиндр — мультипликатор (или компрессор), которые сейчас на-

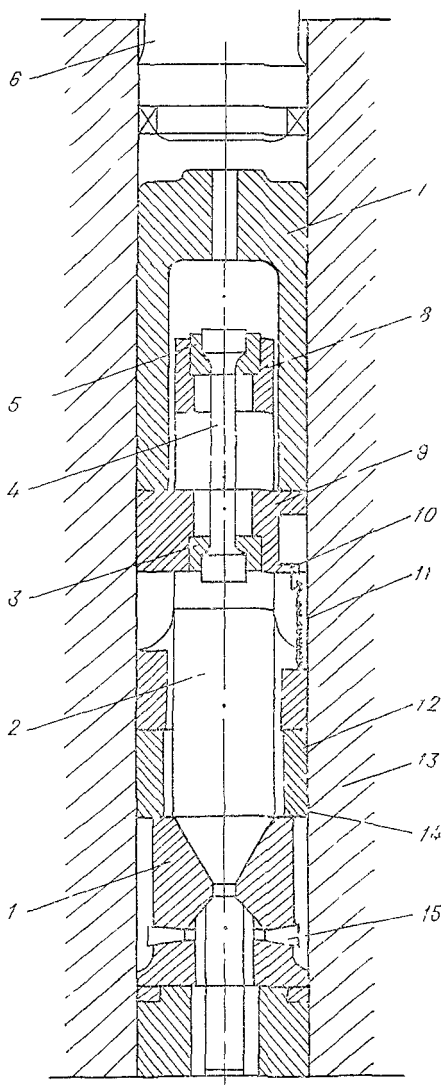


Рис. 3. Гидростатический аппарат системы цилиндр — поршень с устройством для испытания материалов на растяжение.

1 — матрица; 2 — заготовка; 3 и 5 — вкладыши; 4 — образец; 6 — поршень; 7 — вилка; 8 и 9 — захваты; 10 — скользящий контакт; 11 — катушка; 12 — кольцо; 13 — цилиндр; 14 — месдоза; 15 — конус.

зывают гидростатами (Береснев и др., 1970; Целиков, Розанов, Максимов, 1973). Учитывая, что гидростаты имеют один источник давления, мы относим их также к типу гидростатических аппаратов системы цилиндр — поршень.

Один из таких аппаратов представлен на рис. 4 (Береснев и др., 1970). Аппарат состоит из малого и большого мультипликаторов, контейнера, вентили и гидравлического привода (привод на рисунке не изображен).

Всестороннее давление в рабочей камере контейнера создается малым (до $12\ 000\ \text{кг/см}^2$) и большим (до $20\ 000\ \text{кг/см}^2$) мультипликаторами. Этот аппарат может работать и при высокой температуре, которая создается трубчатой спиральной электрической печью, расположенной с внешней стороны контейнера. Для испытания образцов на сжатие и растяжение в этих аппаратах используются специальные устройства, которые размещаются непосредственно в рабочей камере контейнера и позволяют изучать механические свойства металлов и их сплавов.

Рассмотрим лишь некоторые из этих устройств. В устройстве, изображенном на рис. 5, для создания осевой нагрузки при растяжении образца используется гидрокстрозивная заготовка, размещаемая в матрице. Испытуемый образец одним концом при помощи резьбы закрепляется в заготовке, другим — в пробке, которая опирается на неподвижный стакан. Величина всестороннего давления в этой установке при испытании образцов определяется давлением, при котором заготовка выталкивается через матрицу. Использование заготовок с различной степенью текучести позволило проводить опыты при самых разных давлениях.

На рис. 6 представлена конструкция другого устройства, позволяющего проводить опыты только на сжатие. Это устройство представляет собой микроконтейнер, состоящий из ступенчатого цилиндра поршня, плунжера, верхней и нижней опорных плат, между которыми закрепляется образец. Ступенчатый цилиндр с обоих концов закрыт резьбовыми пробками. Осевая нагрузка при использовании этого устройства в гидростатах создается за счет разности площадей поршня и плунжера.

Аппаратура системы цилиндр — поршень — мультипликатор. Первые аппараты для создания высоких гидростатических давлений были разработаны П. Бриджменом в 1942 г. Аппарат конструкции П. Бриджмена (1948) для изучения механических свойств твердых тел представлен на рис. 7. Он состоит из трех отдельных прессов: нижний (В) служит для обеспечения механической поддержки конусного сосуда (А), средний (С) приводит в действие поршень (Д), который создает давление в рабочей камере, верхний Е предназначен для возвращения в исходное положение поршня нагрузочного цилиндра. Мультипликатор (на рисунке не изображен), связанный с рабочей камерой с помощью трубопровода, создает в ней предварительное давление.

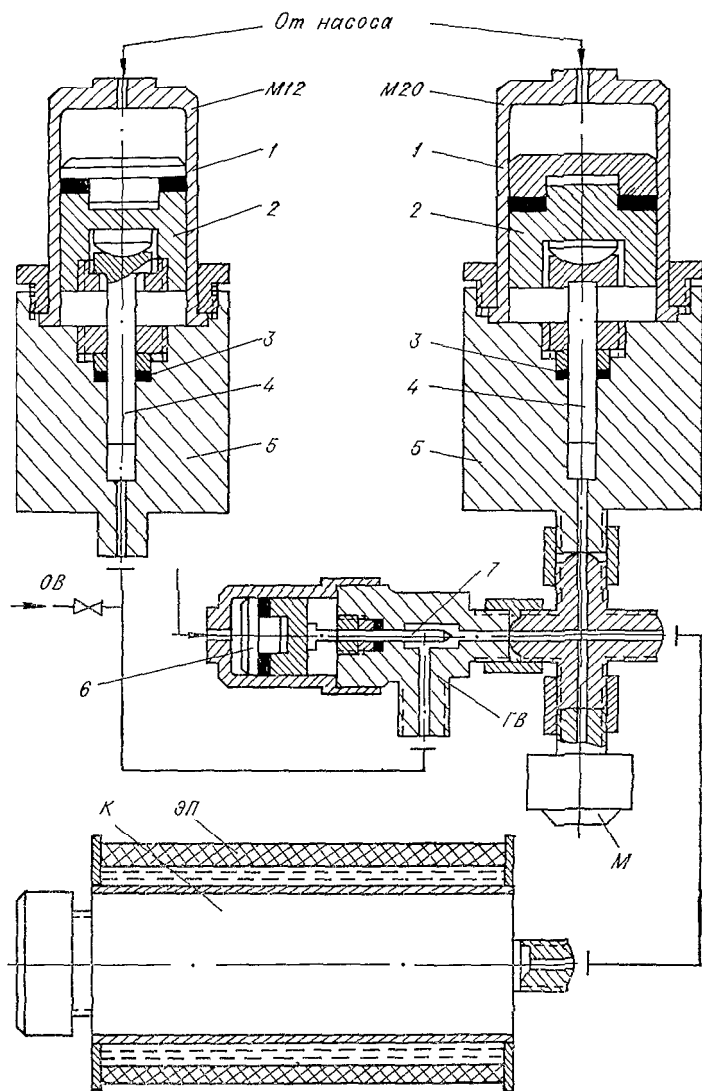


Рис. 4. Гидростатический аппарат системы цилиндр — мультипликатор.

M12 — малый мультипликатор; M20 — большой мультипликатор; ГВ — гидравлический вентиль; М — манометр; ЭП — электрическая печь; К — контейнер; ОВ — запорный вентиль; 1 — силовой цилиндр; 2 — поршень; 3 — сальниковое уплотнение; 4 — плунжер; 5 — цилиндр; 6 — поршень; 7 — игла.

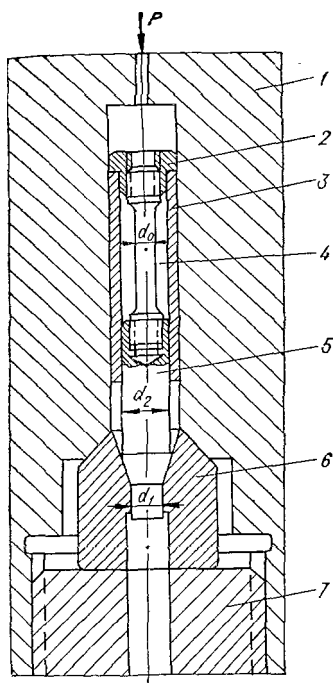


Рис. 5. Гидростатический аппарат системы цилиндр — мультипликатор для испытания материалов на растяжение.

1 — контейнер; 2 — захват; 3 — труба; 4 — образец; 5 — экструзивная заготовка; 6 — матрица; 7 — поджимная гайка.

Нижний и средний прессы в общей раме аппарата скреплены тремя колопнами, верхний — двумя. Сосуд блока высокого давления имеет форму конуса с уклоном 1 : 12 и размещается в массивной оправке, канал которой имеет соответствующий ему конус. Для предотвращения частого разрушения оправка в аппарате Бриджмена изготавливается из трех составных тонких дисков. Такой блок высокого давления (с рабочей камерой диаметром 12,45 мм и 100 мм) выдерживает до 50 циклов нагружений давлением 30 000 кг/см² при контактном давлении на сопрягаемых поверхностях конуса с оправкой 10 000 кг/см².

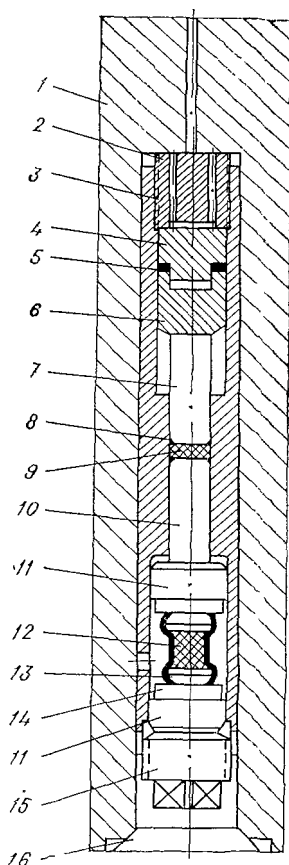


Рис. 6. Гидростатический аппарат системы цилиндр — мультипликатор для испытания материалов на сжатие.

1 — контейнер; 2 и 15 — резьбовые пробки; 3 — малый контейнер; 4 — поршень; 5 — уплотнительная прокладка; 6 — опорная плита; 7 и 10 — штоки; 8 — антиэкструзивное кольцо; 9 — прокладка; 11 — опорная плита; 12 — образец; 13 — чехол; 14 — наконечник, 16 — затвор.

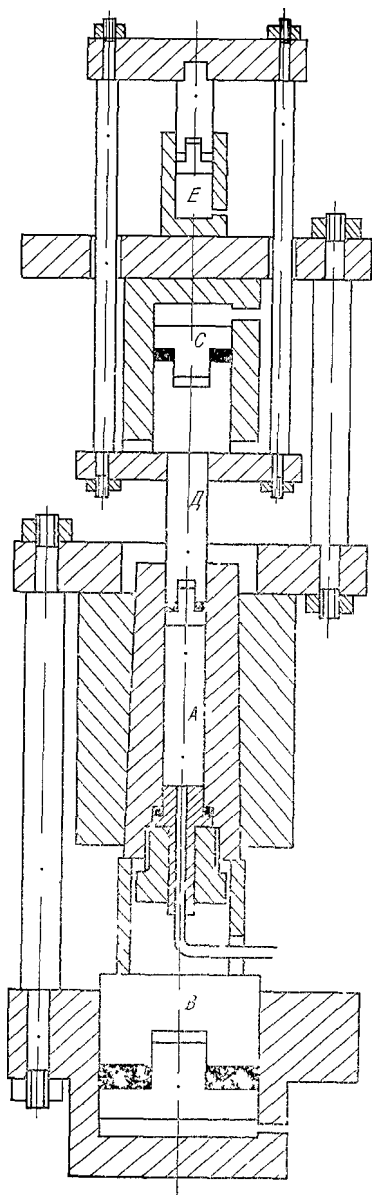


Рис. 7. Гидростатический аппарат Бриджмена.

А — сосуд высокого давления; В — поршень механической поддержки; С — нагрузочный поршень; Д — нагрузочный плунжер; Е — поршень обратного хода.

Испытание образцов на растяжение и сжатие в таком аппарате производится с помощью скобы реверсора (рис. 8, б). Нагружение образца всесторонним и осевым давлением осуществляется одним и тем же поршнем. В начале движения поршень создает всестороннее давление, а затем (после соприкосновения с образцом) деформирует образец. Всестороннее давление в каждом опыте обуславливается подбором определенного количества жидкости, заполняющей рабочий объем камеры.

Измерение осевой нагрузки во время деформации образца производится с помощью компрессиметра (см. рис. 8, а), установленного на затворе в рабочей камере. Всестороннее давление измеряется манганиповым манометром сопротивления. Однако деформация во время опыта не может быть измерена, поскольку всестороннее давление меняется; получаемые при этом механические характеристики деформируемости образцов оцениваются величиной конечного давления.

Таким образом, аппарат Бриджмена позволяет получать довольно высокие давления, но не дает возможности изучать механические свойства твердых тел при постоянном давлении. Несколько позже для испытания металлов С. И. Ратнер (1949) описал упрощенный гидростатический аппарат, в котором постоянство всестороннего давления поддерживалось при помощи мультипликатора. Этот аппарат способен создавать низкое всестороннее дав-

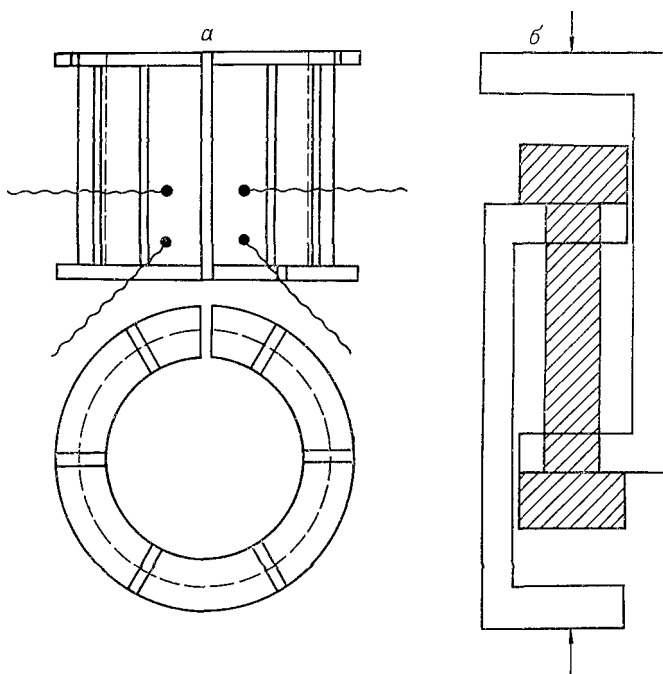


Рис. 8. Компрессметр для регистрации осевого усилия (а); скоба-реверсор для испытания образцов на растяжение (б).

ление, не превышающее 4000 кг/см^2 , что не удовлетворяет современным требованиям.

В дальнейшем аппараты системы цилиндр — поршень — мультипликатор были построены во многих лабораториях как в Советском Союзе, так и за рубежом. Они отличались лишь отдельными конструктивными элементами и пределами давлений.

На рис. 9 представлен аппарат, описанный В. А. Гладковским и М. И. Олейником (1957), который изготовлен на базе одноплунжерного пресса. Блок высокого давления в нем представляет собой одпослойный цилиндр. Образец скрепляется с затвором и поршнем при помощи резьбы. Растяжение образца производится методом выталкивания поршня из рабочей камеры всесторонним давлением. Противодействующее давление обеспечивается поршнем силового цилиндра пресса. Осевая нагрузка во время опыта измеряется тензодатчиками, наклеенными па соединительный шток, который находится в камере высокого давления. Чтобы исключить влияние на них давления, в камеру помещаются компенсационные датчики. Деформация образца измеряется по смещению штока, на свободном конце которого закрепляется круглая балочка с наклеенными тензодатчиками, что дает возможность производить автоматическую запись значений

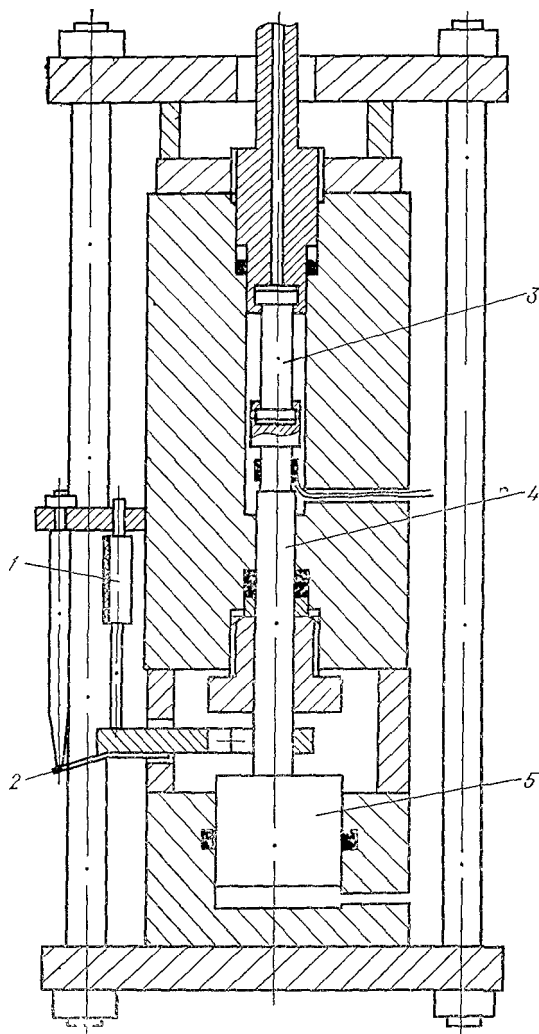


Рис. 9. Гидростатический аппарат В. Гладковского, М. Олейника (1957).

1 — индикатор часового типа; 2 — упругий элемент;
3 — образец; 4 — плунжер, 5 — поршень.

деформации образца, осевой нагрузки и всестороннего давления. Конструкция рассматриваемого аппарата имеет существенные недостатки, которые обуславливаются неудобством монтажа и демонтажа образца, отсутствием замкнутости измерительной цепи деформации образца, низким рабочим давлением (не более 3000 кг/см^2) и недостатками других конструктивных элементов.

В 1958 г. в Институте физики высоких давлений (Москва) был изготовлен аппарат (Рябишин и др., 1958), позволяющий

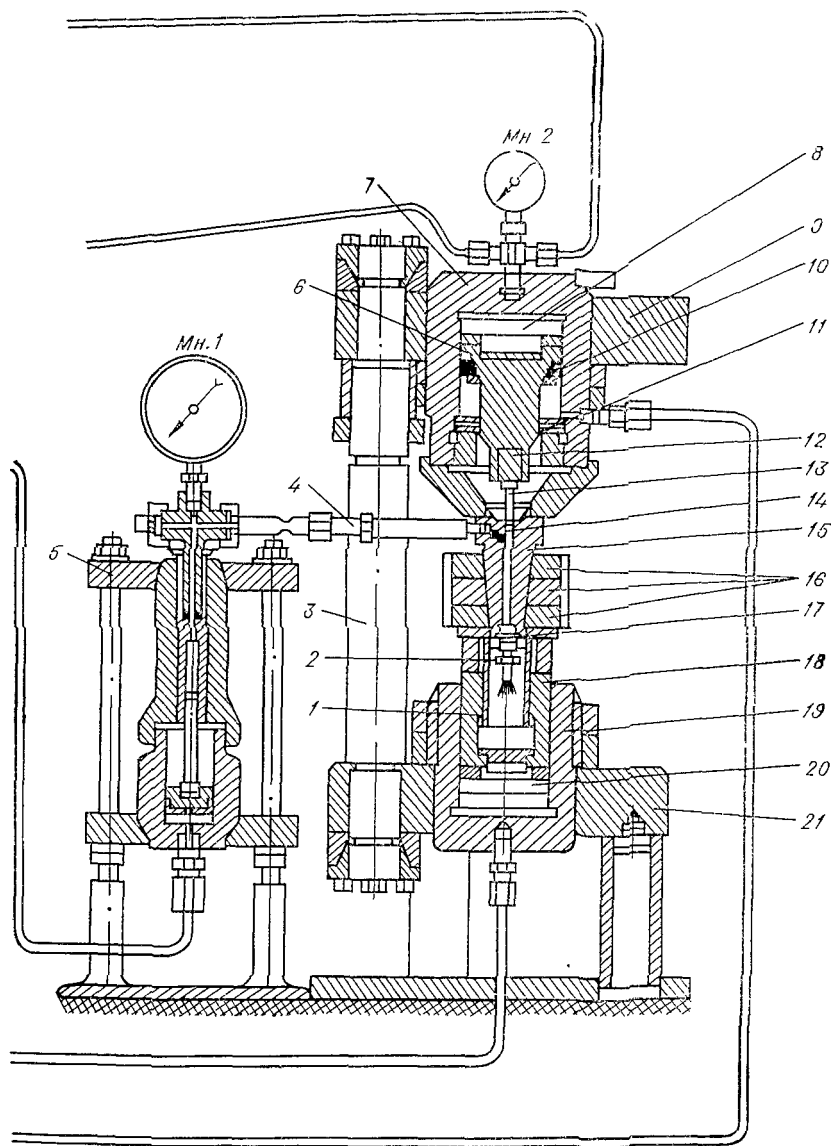
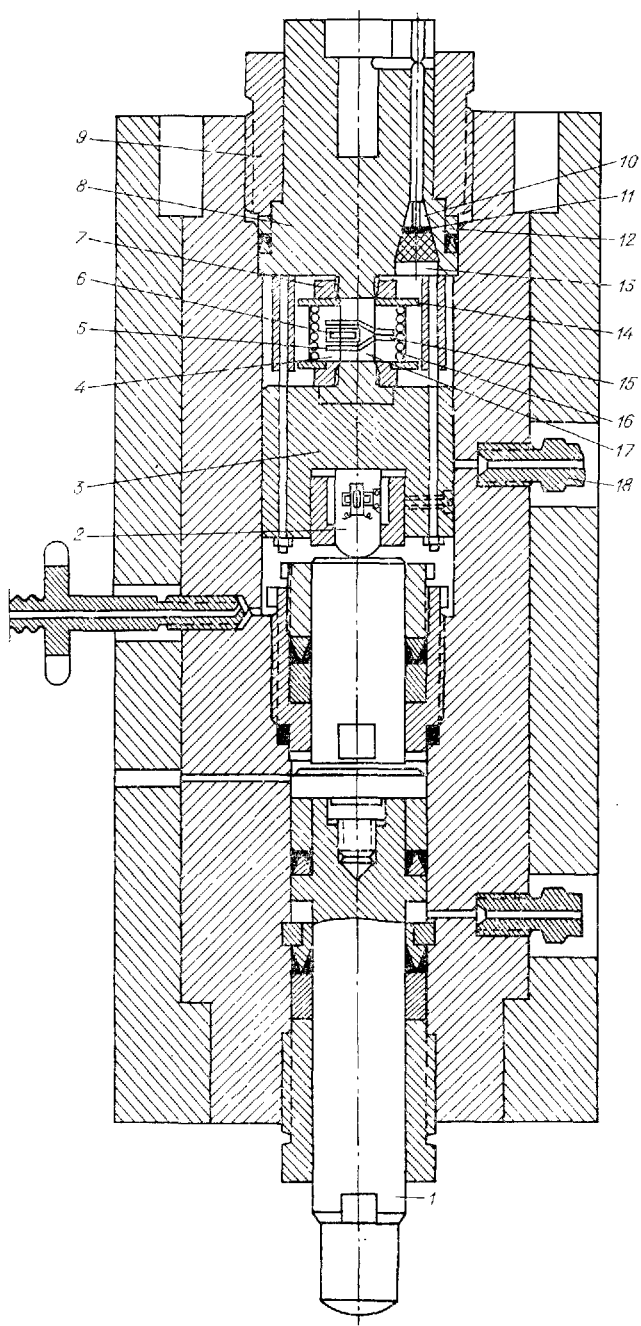


Рис. 10. Гидростатический аппарат Института физики высоких давлений (Москва).

1 — резьбовая опорная втулка; 2 — электроввод; 3 — колонна; 4 — соединительная труба; 5 — мультипликатор; 6 и 8 — поршни; 7 — цилиндр; 9 и 21 — траверсы; 10 и 11 — уплотнительные кольца; 12 — сферическая пята; 13 — плунжер; 14 — уплотнительное устройство; 15 — сосуд высокого давления; 16 — оправка; 17 — затвор; 18 — нижний цилиндр; 19 — цилиндр; 20 — поршень; МН — манометры.



проводить испытания металлов на растяжение под давлением до 30 000 кГ/см² (рис. 10). По конструкции этот аппарат аналогичен аппарату Бриджмена, но устройство его отдельных узлов имеет существенное отличие. Аппарат состоит из четырех основных узлов: большого мультипликатора, блока высокого давления, малого мультипликатора и гидропривода (гидропривод на схеме не показан). Большой мультипликатор имеет верхний и нижний цилиндры, закрепленные в траверсах. Траверсы скреплены тремя колоннами. Между поршнями, заключенными в силовые цилиндры, размещается блок высокого давления. Верхний цилиндр служит для нагружения камеры давлением, нижний — для создания внешней переменной механической поддержки конуса со стороны оправки. Малый мультипликатор сконструирован по типу пресса. Цилиндры низкого и высокого давления скрепляются рамой, состоящей из двух траверс и колонн. Мультипликатор соединяется с рабочей камерой при помощи соединительной трубки. Деформация образца регистрируется по смещению верхнего поршня, его механические характеристики оцениваются величиной конечного давления, что не обеспечивает измерение нагрузки при испытании образца в промежуточной стадии. Это является существенным недостатком в аппаратах такого типа.

К группе аппаратов системы цилиндр — поршень — мультипликатор можно отнести также гидростатические аппараты, разработанные специально для исследования деформируемости горных пород.

В 1962 г. Л. А. Шрейнер, Б. В. Байдюк, Н. Н. Павлова с соавторами описали аппарат, сконструированный на базе пресса ПГ-100 (рис. 11), в котором датчики измерения осевой нагрузки и деформации образца размещались непосредственно в рабочей камере и позволяли автоматически производить запись изменения нагрузки и деформации на диаграммную ленту. Однако всестороннее давление, создаваемое этим аппаратом, не превышало 5000 кГ/см².

В 1963 г. М. П. Волярович, Д. Б. Балашов с соавторами описали аппарат, позволяющий развивать рабочее давление до 10 000 кГ/см² (рис. 12). Этот аппарат состоит из идентичных по конструкции большого и малого мультипликаторов. В большом мультипликаторе, в канале цилиндра высокого давления, заключается рабочая камера, которая, с одной стороны, герметично закрывается пробкой и поджимается гайкой, а с другой — порш-

Рис. 11. Гидростатический аппарат для испытания горных пород на сжатие.

1 — нагружающий поршень; 2 — измеритель осевой нагрузки; 3 — прижим; 4 — накладка; 5 и 6 — упругие элементы; 7 — накидная гайка; 8 — пробка; 9 — резьбовая втулка; 10 — электровод; 11 и 12 — уплотнительные кольца; 13 — термopapa; 14 — электроизоляционный диск; 15 — полукольцо; 16 — нагреватель; 17 — пята; 18 — патрубков.

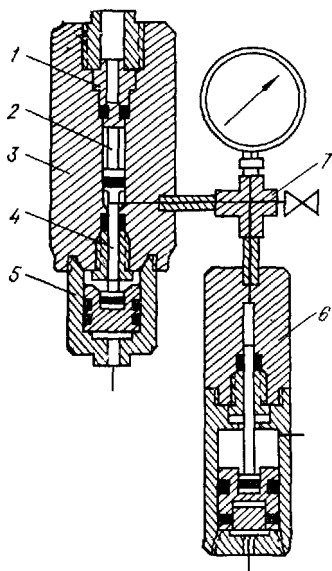


Рис. 12. Гидростатический аппарат Института физики Земли (Москва).

1 — затвор; 2 — образец; 3 — цилиндр; 4 — плунжер; 5 — силовой цилиндр; 6 — мультипликатор; 7 — крестовина.

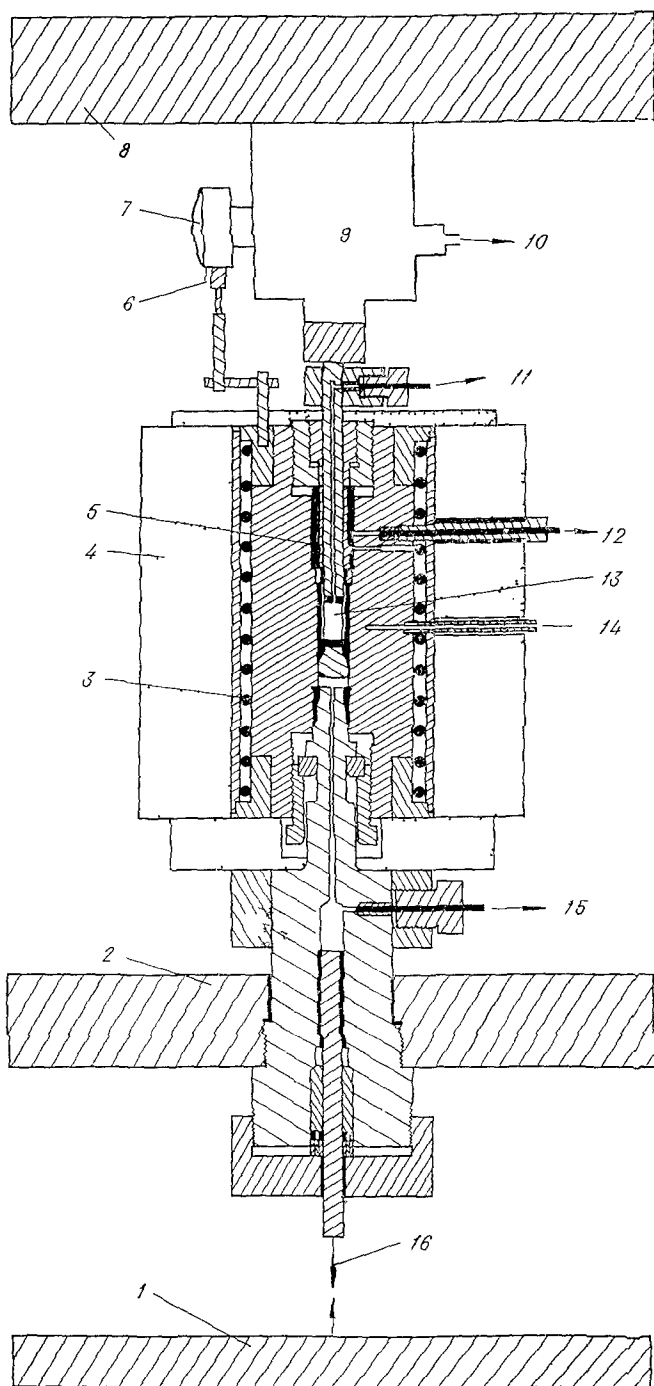
нем. Полости цилиндров высокого давления обоих мультипликаторов через крестовину соединяются трубопроводом. Всестороннее давление в рабочей камере этого аппарата создается малым мультипликатором, осевая нагрузка на образце — плунжером большого мультипликатора. Нагрузка и деформация образцов измеряются тензодатчиками, расположенными в камере.

Однако как в этом аппарате, так и во всех вышеописанных системы цилиндр — поршень — мультипликатор постоянно всестороннего давления поддерживается ручным методом при помощи мультипликатора, что значительно усложняет эксплуатацию этих аппаратов.

Для упрощения эксплуатации необходимо было найти такое техническое решение, которое позволило бы автоматически поддерживать постоянное рабочее давление в камере этих аппаратов при деформации образцов.

Д. С. Миринский, Я. И. Шурин, Э. А. Тонкова в 1967 г. создали аппарат высокого давления, обеспечивающий постоянство всестороннего давления во время опыта посредством гидравлической связи мультипликатора и пресса осевого нагружения (рис. 13). Аппарат состоит из пресса осевого нагружения, мультипликатора, вентили предварительного давления и механического привода. Пресс и мультипликатор расположены под углом 90° друг к другу и связаны тремя силовыми рамами. Для создания внешней механической поддержки конусного цилиндра и поджатия уплотнений в соединениях магистрали высокой стороны, а также для механического разъема рабочей камеры с затвором в верхней раме, кроме пресса осевого нагружения встроены отдельные прессы.

При испытании образцов давление в рабочей камере создается мультипликатором, а осевая нагрузка — прессом. Гидравлическая связь осуществляется соединением верхних полостей цилиндров мультипликатора и пресса. Во время осевого нагружения нагнетаемая насосом жидкость подается в нижнюю полость мультипликатора. При движении поршень вытесняет жидкость из верхней полости цилиндра мультипликатора и подает



ее в цилиндр пресса. Таким образом, штоки мультипликатора и пресса перемещаются в одном направлении и поддерживают объем магистралей высокой стороны постоянным. В этом аппарате, в отличие от ранее описанных, можно создавать высокое всестороннее давление (до 20 000 кг/см²), но только в том случае, когда испытываемые материалы при высоких давлениях не оказывают сопротивления осевой нагрузке или оно незначительно. При испытании же горных пород, сопротивляемость которых при давлении резко возрастает (200—500%), подобная гидравлическая связь не обеспечивает постоянства всестороннего давления вследствие возрастания осевой нагрузки на штоке осевого нагружения, что вызывает неравнозначное смещение поршней мультипликатора и пресса.

Для поддержания постоянного всестороннего давления во время опыта Д. Григгс, В. Миллер и др. (Griggs, Miller, 1952; Griggs, Turner, Heard, 1960) использовали в своих аппаратах гидравлический домкрат, который подключался к магистрали высокой стороны. На рис. 14 представлена схема одного из таких аппаратов, состоящего из однослойного цилиндра, мультипликатора и двухпоршневого пресса. Нижний силовой цилиндр пресса служит гидравлическим домкратом (мультипликатор и пресс на схеме не показаны). Центральный канал цилиндра, заключающий рабочую камеру, с одной стороны закрывается затвором с встроенным в нем уплотненным поршнем, с другой — уплотнительным устройством с подвижным штоком конструкции Джонсона и Ньюхола. Мультипликатор через канал в стенке затвора соединяется с рабочей камерой.

При испытании образцов давление в рабочей камере и кольцевой полости уплотнительного устройства подвижного штока создается мультипликатором. Под действием поршня пресса нагрузочный шток осуществляет деформацию образца, изменяет объем в рабочей камере и приводит к повышению всестороннего давления. Избыточное давление, в свою очередь, действует на шток затвора, перемещает поршень гидравлического домкрата и выталкивает шток. В этом случае домкрат поддерживает всестороннее давление в рабочей камере постоянным.

Высокая температура в рабочей камере этого аппарата создается при помощи внешнего нагревателя, размещаемого снаружи цилиндра. Осевая нагрузка измеряется датчиком давления, расположенным на нагрузочном штоке вне камеры. Деформация образца регистрируется по смещению штока. Показания нагрузки и деформации записываются на диаграммную ленту потенциометром Брауна.

Рис. 14. Гидравлический аппарат с внешним нагревом.

1 и 8 — неподвижные плиты; 2 — подвижная плита; 3 — электрическая печь; 4 — теплоизоляция; 5 — уплотнение Ньюхола; 6 — отвод к самописцу; 7 — пидфактор; 9 — динамометр; 10 — выход к самописцу; 11 — вход от насоса; 12 — вход от мультипликатора; 13 — образец; 14 — термометр; 15 — вывод к мультипликатору; 16 — гидравлический домкрат.

Аппарат Григгса, Мюллера и Херда одновременно позволял также проводить испытания образцов горных пород при действии порового давления, нагнетаемого специальным источником давления через центральный канал в нагрузочном штоке. Позднее конструкция этого аппарата была несколько усовершенствована: был использован внутренний нагрев рабочей камеры с применением внешнего охлаждения, что позволило при этих же параметрах давления (5000 кг/см^2) повысить рабочую температуру с 500 до 800°C (рис. 15). Для связи электрического нагревателя

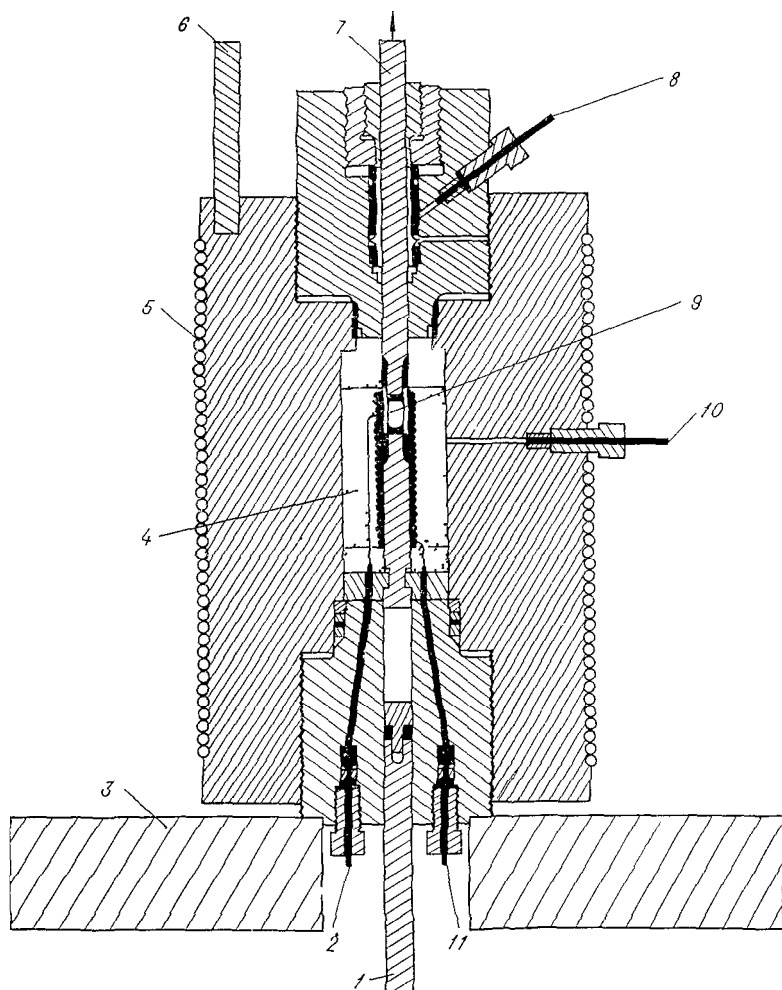


Рис 15 Гидростатический аппарат с внутренним нагревом.

1 — уравновешивающий поршень 2 — вывод термодпары 3 — подвижная плита;
4 — теплоизоляция 5 — кольцо водяного охлаждения 6 — шпур 7 — плунжер,
8 и 10 — входы от мультипликатора 9 — образец 11 — электрод нагревателя

ля и термопары с источником питания и регистрирующими приборами в нижний затвор блока высокого давления были встроены электрические вводы. Для герметизации рабочей камеры сделан второй затвор, в котором размещается нагрузочный шток с уплотнительным устройством конструкции Джонсона и Ньюхолла. На внешней поверхности цилиндра размещается водяная рубашка. Соединение рабочей камеры с мультипликатором осу-

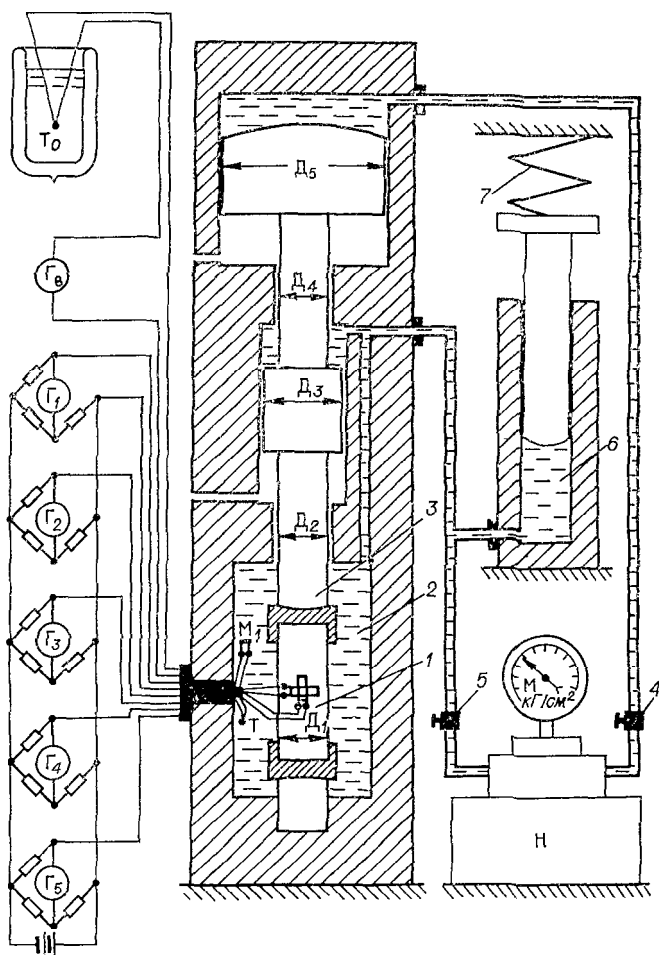
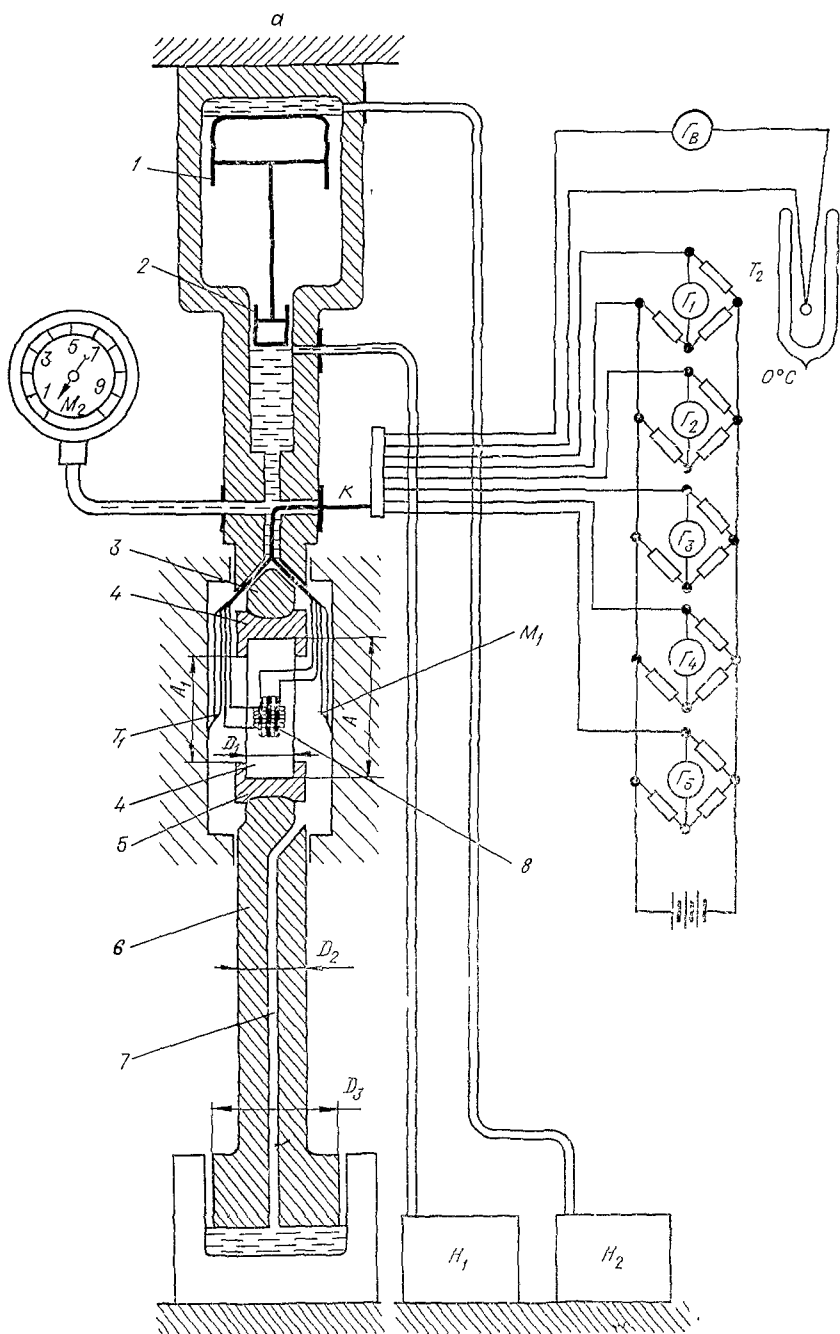
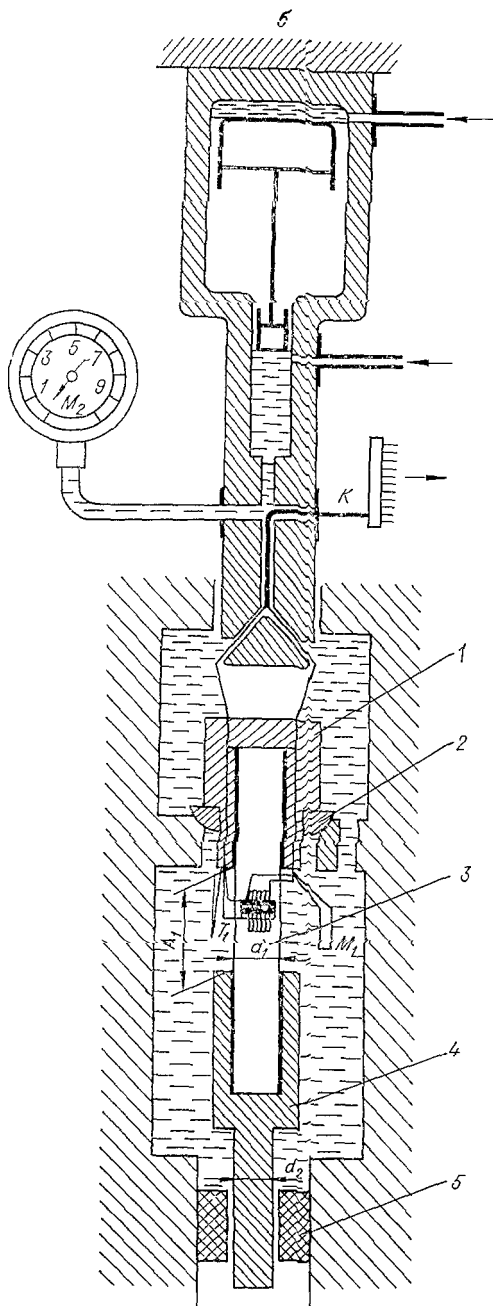


Рис. 16. Гидростатический аппарат для испытания горных пород под давлением.

1 — образец; 2 — жидкость; 3 — поршень; 4 — и 5 — вентили; 6 — жидкость; 7 — упругий элемент; Н — насос высокого давления; М — манганиновый манометр; Т — рабочая термопара; Т₀ — термопара холодильного слая; Г_В — гальванометр; Г₁—Г₅ — гальванометры мостовой схемы.





ществляется через канал, расположенный непосредственно на боковой стенке цилиндра.

Недостатком этих аппаратов является низкий предел рабочего давления, плохой доступ в рабочую камеру при монтаже и демонтаже испытуемого образца, несовершенная схема измерений деформации образца во время опыта. Кроме того, эти аппараты сложны по конструкции.

В отличие от описанных аппаратов гидростатический аппарат А. Н. Ставрогина и В. С. Георгиевского (1968) имеет более совершенную конструкцию. Использование в нем гидравлического аккумулятора (вместо домкрата) для поддержания постоянного давления во время опыта значительно упрощает его устройство и эксп-

Рис. 17. Гидростатический аппарат для испытания горных пород при пропорциональном нагружении.

a — на сжатие; 1 и 2 — поршни; 3 — затвор; 4 — образец; 5 — наконечник; 6 — поршень пропорционального нагружения; M_1 — манганиновый манометр; M_2 — пружинный манометр; T_1 — рабочая термодара; T_2 — термодара холодного ссыла; K — колодка; N_1 и N_2 — насосы высокого и низкого давления; Γ_B — гальванометр;

Γ_1 — Γ_5 — гальванометры мостовой схемы; 6 — на растяжение; 1 — захват; 2 — прокладка; 3 — образец; 4 — захват поршень; 5 — уплотнительное кольцо.

луатацию (рис. 16). Аппарат состоит из блока высокого давления, нагрузочного блока, механического насоса и гидравлического аккумулятора. Гидравлический аккумулятор является отдельным самостоятельным узлом: он состоит из силового цилиндра с уплотненным поршнем, пакета пружин и рамы (рама на схеме не изображена), имеющей нижнюю и верхнюю траверсы, которые скреплены двумя колоннами. Гидравлический аккумулятор при помощи трубопровода связывается с рабочей камерой. В магистраль высокого давления жидкость нагнетается насосом; осевое давление создается поршнем и определяется величиной давления жидкости, нагнетаемой в полость силового цилиндра. Постоянство всестороннего давления во время опыта обеспечивается гидравлическим аккумулятором. Деформация образца измеряется тензодатчиками, показания которых осциллографом записываются на фотобумагу. Этот аппарат работает при более высоких давлениях (до 10 000 кг/см²), чем гидравлический аппарат Григгса с соавторами, однако с его помощью нельзя изучать механические свойства горных пород при повышенных температурах.

Рассмотрим гидравлический аппарат, описанный А. Н. Ставрогиним в 1961 г. Градиент давления обеспечивается при помощи подбора сечения рабочих площадок затвора и в процессе нагружений отношение осевого давления к всестороннему поддерживается постоянным в течение всего опыта. Аппарат (рис. 17) состоит из пресса марки «Шоппер», сменных блоков и гидравлического привода, в котором заключены два механических насоса. Затвор блока высокого давления имеет большой и малый диаметры. Меньшим затвор входит в канал цилиндра рабочей камеры, большим — в специальный цилиндр, установленный на нижней плите пресса. Рабочие полости цилиндра и камеры гидравлически связаны через центральный канал затвора.

Предварительное всестороннее давление в рабочей камере создается механическим насосом (Π_1). Жидкость, нагнетаемая в полость силового цилиндра, действует на поршень осевого нагружения, который при движении создает в камере необходимое рабочее давление. Вследствие этого затвор благодаря различию диаметров перемещается вверх и деформирует образец. Применение затвора с двумя различными рабочими диаметрами позволило упростить эксплуатацию аппарата, так как оператору в этом случае достаточно определить лишь величину всестороннего давления, осевое же давление рассчитывается.

Двухпоршневые аппараты системы цилиндр — поршень — поршень. Впервые конструкция двухпоршневого гидростатического аппарата системы цилиндр — поршень — поршень была разработана Д. Григгсом (Griggs, 1936). В 1954 г. Х. Пью и Д. Грэн (Pugh, Green, 1954) создали несколько усовершенствованный аппарат, в котором механическая поддержка конусного

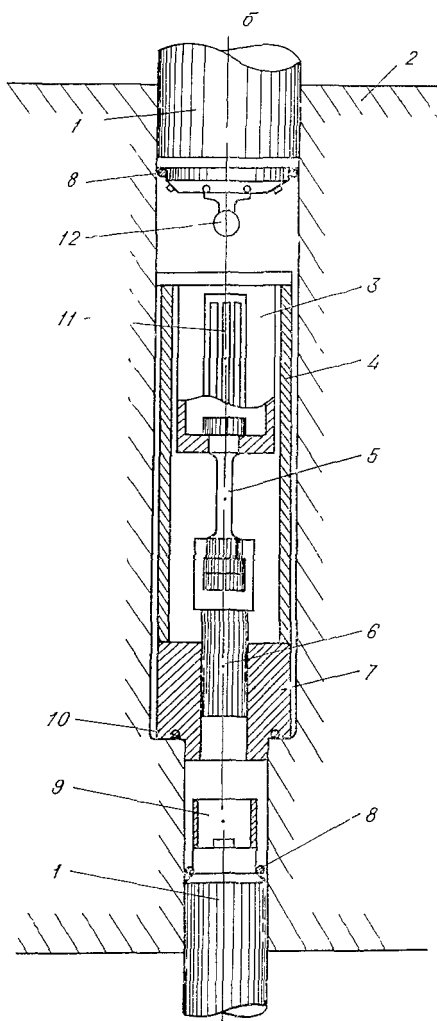
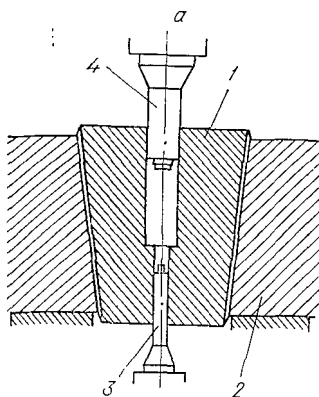


Рис. 18. Гидростатический аппарат высокого давления системы цилиндр — поршень — поршень с механической поддержкой.

а — схема блока высокого давления: 1 — сосуд высокого давления; 2 — оправка; 3 — нижний поршень; 4 — верхний поршень. *б* — схема испытания образца: 1 — поршень; 2 — сосуд высокого давления; 3 — датчик нагрузки; 4 — опорная труба; 5 — образец; 6 — плунжер; 7 — цилиндр; 8 и 10 — уплотнительные кольца; 9 — втулка; 11 — тензодатчики; 12 — датчики давления.

цилиндра обеспечивается автоматически (без использования прессы) при помощи специальной кольцевой площадки в канале конусного цилиндра. †

Этот аппарат (рис. 18, *а*) состоит из двухпоршневого прессы, блока высокого давления и гидравлического привода (пресс и гидропривод на рисунке не изображены). Блок высокого давления имеет конусный ступенчатый цилиндр, оправку, опирающуюся на неподвижную плиту прессы, верхний большой поршень и нижний малый поршень. Большой канал цилиндра образует рабочую камеру, в которой размещается устройство для испытания образцов на растяжение, состоящее из опорной трубы, датчика

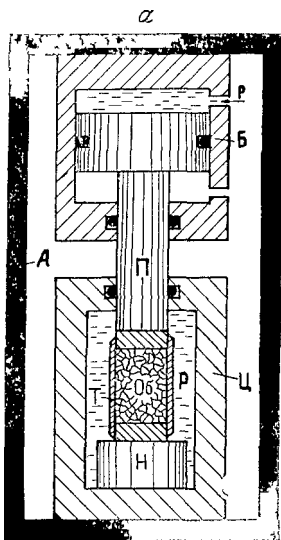
нагрузки, опорного цилиндра и плунжера (см. рис. 18, б). Верхняя головка образца при помощи резьбы закрепляется в корпусе датчика нагрузки, нижняя — в плунжере.

Всестороннее давление в рабочей камере создается большим поршнем при помощи верхнего пресса. Давление действует на плунжер, выталкивает его из рабочей камеры и растягивает образец. Одновременно оно действует на площадку ступеньки цилиндра, вдвигая его в оправку. Для достижения необходимого рабочего давления и поддержания его постоянным в ходе опыта нижний малый поршень поднимается в такое положение, где корпус датчика нагрузки не касается опорной трубы. При этом верхний поршень вдвигается в канал цилиндра, а нижний перемещается вниз. Аппарат Пью и Грина позволяет производить испытания образцов при постоянном рабочем давлении до $15\,000\text{ кг/см}^2$.

В дальнейшем гидростатический аппарат несколько измененной конструкции был описан японскими исследователями (Nishihara, Tanaka, Moramatsu, 1965); в отличие от аппарата Пью и Грина этот аппарат не имеет механической поддержки и создает всестороннее давление, не превышающее 5000 кг/см^2 .

Двухпоршневые гидростатические аппараты системы цилиндр — поршень — поршень конструктивно отличаются от аппаратов системы цилиндр — поршень — мультипликатор. Они компактны и просты в эксплуатации. Однако их конструкция не лишена недостатков. Так, введенные через подвижный поршень электрические провода, соединяющие датчики с приборами для измерения высоких давлений, становятся хрупкими и часто обрываются. Кроме того, в этих аппаратах нельзя испытывать образцы при повышенных температурах из-за отсутствия надежной связи нагревателя, размещенного в рабочей камере с внешним источником питания, и измерительными приборами.

Все рассмотренные типы гидростатических аппаратов высокого давления можно описать тремя принципиальными схемами. На первой (рис. 19, а) представлен аппарат системы цилиндр — поршень, состоящий из жесткой рамы (А), нагрузочного блока (Б) и блока высокого давления (В). Аппараты, изготовленные по этой схеме, содержат один источник давления — поршень, которым создается всестороннее и осевое давление.



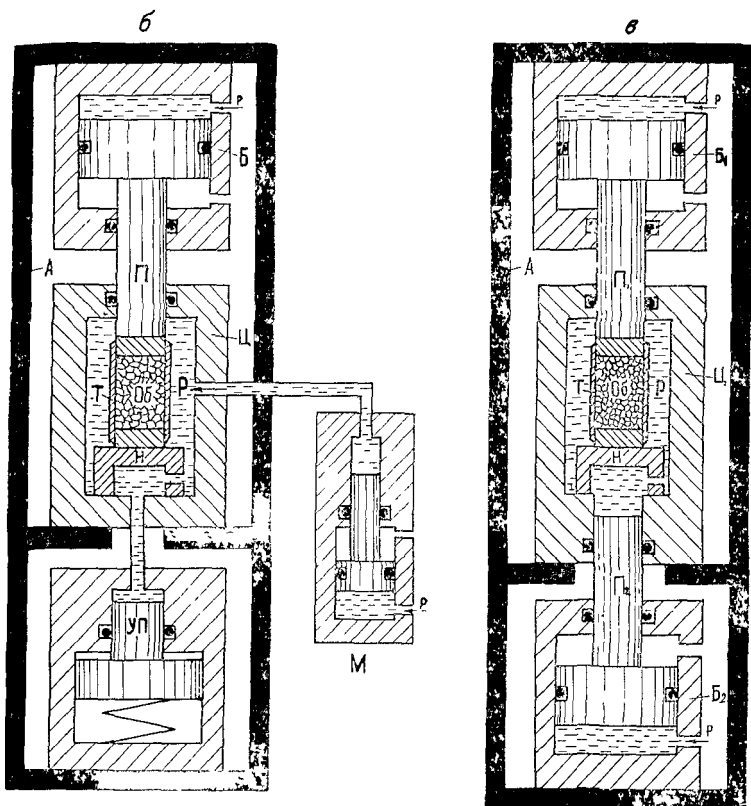


Рис. 19. Типы гидростатических аппаратов высокого давления.
 а — цилиндр — поршень; б — цилиндр — поршень — мультипликатор; в — цилиндр — поршень — поршень.
 А — жесткая рама; Б — нагрузочный блок; Ц — блок высокого давления; Об — образец; П — поршень; Н — наковальня; УП — уравновешивающий поршень; Р — среда, передающая давление; М — мультипликатор; Т — тара.

На второй схеме (см. рис. 19, б) изображен аппарат системы цилиндр — поршень — мультипликатор, состоящий из жесткой рамы (А), нагрузочного блока (Б), блока высокого давления (Ц), мультипликатора (М) (или компрессора) и уравновешивающего поршня (УП). Аппараты, изготовленные по этой схеме, имеют два источника давления: поршень (создает осевое давление) и мультипликатор (всестороннее); во время опыта поддерживает постоянным давление уравновешивающий поршень.

И наконец, на третьей схеме (см. рис. 19, в) представлен аппарат системы цилиндр — поршень — поршень, состоящий из жесткой рамы (А), нагрузочных блоков — верхнего (Б₁) и нижнего (Б₂) — и блока высокого давления (Ц). В этом аппарате оба поршня служат источниками давления: один создает осевое, другой — всестороннее.

Совершенствование конструкций отдельных узлов существующих гидростатических аппаратов не дает возможности изменить их принципиальную схему нагружения давлением, вследствие чего исследование деформационных свойств горных пород при высоких температурах на этих аппаратах связано с определенными трудностями.

Аппараты первого типа просты по конструкции, надежны в работе, но не позволяют воспроизводить повторные опыты при одном и том же давлении. Аппараты второго типа сложны по конструкции, трудоемки в эксплуатации и мало надежны в работе. Аппараты третьего типа не позволяют осуществлять надежно внутренний нагрев рабочей камеры. Кроме того, во всех аппаратах не представляется возможным при высоких температурах проводить испытания горных пород со снятием диаграмм напряжения — деформация измерением скоростей упругих волн.

В результате поисков наиболее рациональной конструкции гидростатического аппарата нами был разработан и сконструирован гидростатический аппарат системы плавающий цилиндр — поршень, схема которого описывается ниже.

УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ПРИНЦИПЫ ИХ РАБОТЫ

При конструировании аппаратов высокого давления одной из главных задач является обеспечение герметичности рабочей камеры. Применяемые уплотнители для герметизации подвижных и неподвижных соединений в зависимости от характера сил, обеспечивающих зажатие сред, передающих давление, делят на три группы. К первой относятся контактные уплотнения типа металл — металл, представляющие собой металлическую прокладку и подвижное устройство. Примером таких уплотнений могут быть чечевичные уплотнения с линзообразной поверхностью (Циклис, 1960).

Ко второй группе относятся уплотнения с малым зазором; в них зажатие среды, передающей давление, обеспечивается за счет вязкости самой среды и возникновения в ней больших сил трения при истечении в малом зазоре. Такими уплотнениями являются пары с малым зазором и с регулируемым зазором (Newhall, 1957). Эти уплотнения широко применяются в поршневых манометрах и гидрокомпрессорах (Жоховский и др., 1959; Thomson, Newhall, 1953). Теория этих уплотнений подробно разработана М. К. Жоховским (1959).

Наконец, к третьему типу относятся контактные комбинированные уплотнения, состоящие из эластичной прокладки (резина или фторопласт) и металлического кольца. В этих уплотнениях окончательное контактное давление в металличе-

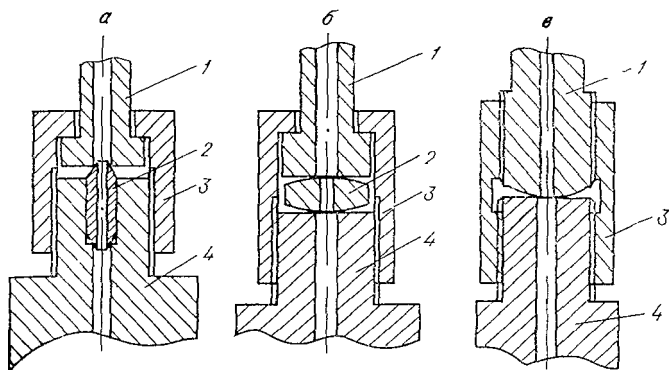


Рис. 20. Контактные уплотнения: конусное (а), чечевичное (б), сферическое (в).

1 — трубопровод; 2 — вкладыш; 3 — стяжная гайка; 4 — штуцер.

ком кольце обеспечивается давлением, возникающим в эластичной прокладке. Предварительное давление в прокладке таких уплотнений создается поджатием гайки или запираемой средой (Bridgman, 1952; Макаров, 1965; Newhall, 1957) либо специальным гидравлическим устройством (Борзунов, Миринский, 1959).

Контактные чечевичные и сферические уплотнения. Контактное уплотнение металл — металл состоит либо из двух уплотняющих поверхностей п чечевицы, либо только из двух уплотняющих поверхностей. Чечевицы бывают конусными или линзообразными, твердость их несколько выше, чем уплотняющих поверхностей.

На рис. 20, а представлено уплотнение с конической чечевицей, центральный канал в которой несколько меньше, чем каналы соединяемых магистралей. Коническая расточка уплотняемых поверхностей имеет угол 60° . Угол конуса чечевицы, как правило, делается меньше угла гнезда ответной детали, что позволяет создавать на уплотняющих поверхностях контактное запирающее давление в непосредственной близости от центрального канала и обеспечивать надежную герметичность соединения до давлений 14000 кг/см^2 .

Уплотнение с линзообразной чечевицей (см. рис. 20, б) аналогично вышеописанному, но его уплотняющие поверхности имеют плоскость, строго перпендикулярную к оси канала соединения. Угол раствора линзы в чечевице составляет 150° . Центральный канал чечевицы имеет несколько меньший диаметр, чем каналы патрубков соединения. Такое уплотнение поджимается до появления на контактных поверхностях пластической деформации материала, которая обеспечивает надежную герметичность соединения. Это уплотнение работает при более высоких давлениях (до $20\,000 \text{ кг/см}^2$).

Разновидностью липзового контактного уплотнения металлов металлы является сферическое (см. рис. 20, в), в котором герметичность соединения обеспечивается без применения чечевицы. В этом типе уплотнения на одной из уплотняющих поверхностей, имеющей большую твердость, делается сфера (радиусом 14 мм) высокой чистоты ($\nabla 8$). Ответная уплотняющая поверхность имеет плоскость, перпендикулярную к центральной оси канала, диаметр которого несколько больше диаметра канала сферического уплотнения. При поджатии такого соединения прикладывается усилие, которое обеспечивает герметичность соединения на контактных поверхностях ответных деталей вследствие пластической деформации материала. Это уплотнение может надежно работать при давлениях до 20 000 кг/см². В основу работы таких уплотнений положен принцип клина. Давление запираемой жидкости деформирует чечевицу в радиальном направлении и заклинивает ее между уплотняющими поверхностями соединения, что автоматически создает контактные давления, превышающие давления запираемой среды, в магистрали высокой стороны.

Такая конструкция уплотнений широко применяется в аппаратах высокого давления для подсоединения трубопроводов и скрепления отдельных узлов и регистрирующих приборов, например манометров.

Уплотнение с регулируемым зазором. Для герметизации подвижных штоков в гидростатических аппаратах используются уплотнения с регулируемым зазором. Впервые такое уплотнение в аппаратах типа цилиндр — поршень — мультипликатор было применено Дж. Хендиным (Handin, 1957). Несколько позднее в подобном же аппарате это уплотнение (см. рис. 15) использовали Греггс с соавторами (Griggs, Turner, Heard, 1960). Уплотнение состоит из цилиндра, штока, втулки, уплотнительных колец и двух поджимных гаек. Сопрягаемые поверхности втулки и штока механическим способом доводятся до высокой чистоты ($\nabla 10$ — $\nabla 11$) при зазоре в 10—20 мк. Втулка, размещаемая в канале цилиндра, с обеих сторон герметично уплотняется мягкими кольцами и поджимается гайкой. Образующаяся при этом замкнутая полость по внешнему диаметру втулки через канал соединяется с внешним источником давления. Необходимая величина зазора между втулкой и штоком достигается за счет того, что в этой полости создается гидростатическое давление, которое регулируется так, чтобы вытекаемая из рабочей камеры жидкость поддерживалась на необходимом уровне. Обычно величину минимального зазора и силу трения в уплотнениях с регулируемым зазором определяют путем вращения штока, как это делается в поршневых манометрах. В гидростатических же аппаратах такой контроль осуществить технически не представляется возможным, поэтому эти уплотнения не нашли широкого применения.

Контактные комбинированные уплотнения. Для герметизации подвижных и неподвижных штоков, поршней, затворов в гидростатических аппаратах высокого давления используются обычно контактные комбинированные уплотнения, в которых контактное давление в металлическом кольце поддерживается давлением, возникающим в эластичной прокладке. Наиболее простым комбинированным уплотнением является сальниковое (рис. 21), состоящее из мягкой прокладки (резина, фторопласт), двух металлических колец и резьбовой втулки; при помощи втулки в прокладке периодически восстанавливается необходимое давление.

Из числа контактных комбинированных уплотнений в гидростатических аппаратах широко применяются дифференциальные *, основанные на принципе некомпенсированной площади, предложенном Бриджменом в 1913 г.

Свободную поверхность, как известно, Бриджмен называл некомпенсированной площадью. В этом уплотнении коэффициент отношения давления в прокладке и давления запираемой среды подбирается расчетным путем. Осовая сила Q в плавающем теле находится по формуле

$$Q = (\pi/4)(D^2 P),$$

где D — диаметр плавающего тела; P — давление запираемой жидкости.

После определенных математических преобразований можно получить распределение осевого P_z и радиального P_r давления в прокладке (Макаров, 1965):

$$P_z = (P_z)_0 e^{-4Rf/(D+d)}; \quad P_r = RP_z = R(P_z)_0 e^{-4Rf/(D+d)},$$

где $R = P_r/P_z$ — коэффициент радиального давления; f — коэффициент трения в прокладке.

Дифференциальными называют такие уплотнения, в которых заключено плавающее тело (стержень, кольцо, клин), позволяющее автоматически создавать на сопрягаемых поверхностях большее давление, чем давление запираемой среды (Макаров, 1965). При нагружении такого уплотнения на большую рабочую площадку плавающего тела действует давление запираемой среды, на меньшую — давление, возникающее в прокладке.

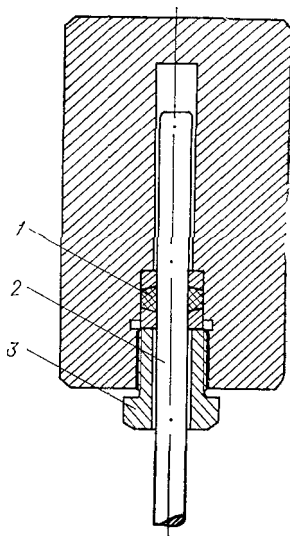


Рис. 21. Сальниковое уплотнение.

1 — прокладка; 2 — плунжер; 3 — поджимающая гайка.

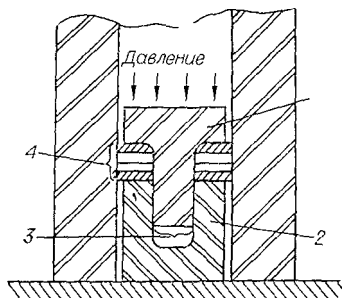


Рис. 22. Дифференциальное уплотнение с плавающим стержнем (грибковое уплотнение Бриджмена).

1 — грибок; 2 — втулка; 3 — некомпенсированная площадь, 4 — прокладка.

Из практики известно, что уплотнение с плавающим телом работает лишь в том случае хорошо, если отношение давлений находится в пределах $1,07 \leq P_r/P_z \leq 1,20$.

Конструкция дифференциального уплотнения с плавающим стержнем была впервые разработана Бриджменом. Это уплотнение (рис. 22) состоит из грибка, втулки, уплотнительной прокладки и антиэкструзивного кольца. При тщательном подборе материалов и отношений рабочих площадей грибка это уплотнение может удерживать запираемую среду в сосуде до давления 30 000 кг/см². Слабым местом в конструкции этого уплотнения являются втулка и стержень грибка. Во втулке возникают сжимающие напряжения, значительно превышающие давления запираемой среды. Стержень хвостовика подвергается большим растягивающим давлениям, возникающим в прокладке, что приводит часто к отрыву стержня грибка. Кроме того, давление, возникающее в прокладке, деформирует канал цилиндра и при движении поршня гидроэкструзивная прокладка затекает в образовавшийся зазор между стенкой цилиндра и штоком. Это ведет к возрастанию напряжений и появлению дополнительной деформации канала цилиндра.

Позднее Д. Циклис (1965) описал конструкцию дифференциального уплотнения с плавающим кольцом (рис. 23). Это уплотнительное устройство состоит из плавающего кольца, двух втулок, мягкой прокладки, опорной шайбы и поджимной гайки; неподвижно закреплено в специальной проточке канала цилиндра. Его преимущество состоит в том, что оно исключает необходимость точной доводки канала цилиндра. Уплотнение с плавающим кольцом позволяет герметизировать самые тонкие штоки. Кроме того, эта конструкция дает возможность уплотнять полые поршни большого диаметра в цилиндрах высокого давления, где не допускается утечка жидкости из рабочей камеры.

Однако конструкция уплотнения с плавающим кольцом, применяемая для герметизации подвижных штоков в блоках высокого давления, имеет большие габариты, что не позволяет использовать его в большинстве аппаратов высокого давления.

Малогабаритными дифференциальными уплотнениями служат кольцевые уплотнения (рис. 24), состоящие из металлических колец прямоугольной или клиновидной формы и резиновых О-образных или прямоугольных колец (Newhall, 1953). Неком-

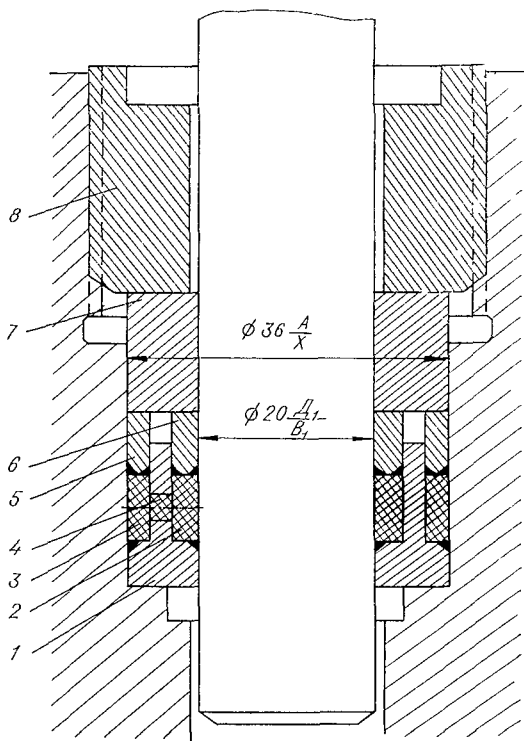


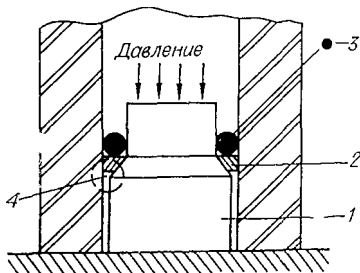
Рис. 23. Дифференциальное уплотнение с плавающим кольцом.

1 — плавающее кольцо; 2 и 3 — прокладки; 4 — уравновешивающая прокладка; 5 и 6 — опорные кольца; 7 — втулка; 8 — поджимная гайка.

непескованной площадью в этих уплотнениях является площадка нижней поверхности кольца. Ее величина может изменяться от полной площади кольца (квадратное кольцо) до площади, равной кольцевому зазору между затвором и каналом цилиндра (треугольное кольцо). Ввиду сравнительно небольшой некомпенсированной площади в этих уплотнениях предъявляются более высокие требования к чистоте уплотняемой поверхности каналов. Выбор материала для металлических колец определяется величиной рабочего давления. При относитель-

Рис. 24. Клиновидное дифференциальное уплотнение.

1 — поршень; 2 — клиновидное кольцо; 3 — О-образное кольцо; 4 — некомпенсированная площадь.



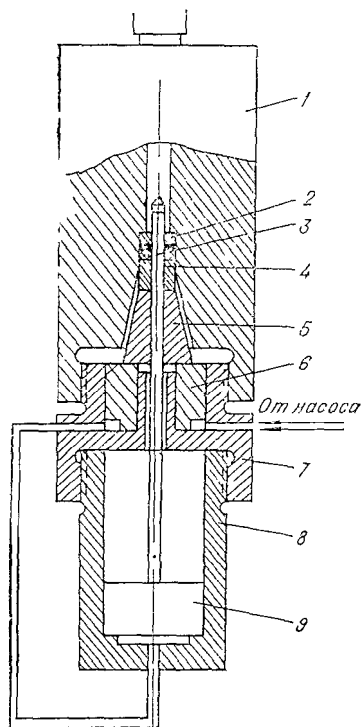


Рис. 25. Сальниковое уплотнение с автоматическим поджатием.

1 — цилиндр высокого давления; 2 — сальник; 3 — плунжер, 4 — втулка, 5 — конус; 6 — кольцевой поршень; 7 — стяжная муфта; 8 — цилиндр, 9 — поршень.

по низких давлениях обычно используются мягкие материалы — медь, различные латуни и бронзы. При более высоких давлениях применяют бериллиевую бронзу и закаленные алюминиевые сплавы. Однако время службы колец ограничено в связи с изменением их геометрической формы, вызываемой пластической деформацией материала колец. Неподвижные кольца могут использоваться многократно, подвижные, как правило, имеют одноразовое применение.

С целью обеспечения продолжительной работы уплотнительных колец и увеличения надежности герметизации подвижных штоков В. А. Борзуновым и Д. С. Миринским в 1959 г. было разработано гидравлическое устройство (рис. 25), обеспечивающее автоматическое поджатие сальникового уплотнения.

Это устройство в дальнейшем нашло широкое применение в различных узлах гидростатических аппаратов высокого давления. Оно состоит из цилиндра, кольцевого поршня с кольцевым дифференциальным уплотнением, подпятника и конической втулки. Подбор всех диаметров поршня и штока осуществляется таким образом, чтобы в прокладке уплотнения создавалось давление на 10—20% больше, чем давление запираемой среды. Такое уплотнение, автоматически поджимаемое прессом, может работать в течение длительного периода без замены уплотнительной прокладки при давлениях до 20 000—25 000 кг/см². Однако такой способ уплотнения подвижных соединений требует увеличенных габаритов узлов и усложненной конструкции аппаратов высокого давления.

ИЗМЕРЕНИЕ ВСЕСТОРОННЕГО ДАВЛЕНИЯ В ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Измерение давления сжимаемой среды в гидростатических аппаратах производится абсолютными и относительными ма-

нометрами путем уравнивания противодействующей силой, значение которой может быть определено довольно точно.

К абсолютным манометрам относятся жидкостные и поршневые. В жидкостных давление определяется весом столба жидкости. Среди таких манометров широко известен ртутный манометр, состоящий из десяти столбов ртути, заключенной в трубки высотой по 17,5 м. Несмотря на большие габариты, этот манометр широко используется в метрологии и в настоящее время.

Поршневые манометры можно разделить на четыре основных типа: 1) с простым неуплотненным поршнем; 2) с простым поршнем в цилиндре с противодавлением; 3) с ординарным дифференциальным поршнем и 4) с двойным дифференциальным поршнем. Принципы работы и конструкция поршневых манометров хорошо описаны в ряде работ (Верещагин, Александров, 1939; Жоховский, 1952, 1959). Ртутные и поршневые манометры сложны по конструкции и неудобны в эксплуатации, поэтому в тех случаях, когда нет необходимости измерять давление с очень высокой точностью, пользуются относительными манометрами.

В относительных манометрах для измерения всестороннего давления используется не противодавление, а различные материалы с упругими свойствами. При конструировании таких манометров материал и форму упругого элемента подбирают таким образом, чтобы он не подвергался явлению гистерезиса. Одним из наиболее распространенных манометров этого типа является манометр с трубчатой пружиной. Его конструкция и принцип действия достаточно хорошо описаны М. К. Жоховским (1952) и Д. С. Циклисом (1965). Эти манометры широко используются в различных гидростатических системах для измерения давлений, не превышающих $25\,000\text{ кг/см}^2$, точность измерения давления с помощью таких манометров ограничена (ошибка достигает 3—4%). Нашей промышленностью выпускаются также образцовые относительные манометры, позволяющие измерять давление с более высокой точностью (с погрешностью 0,5—1%). Однако предел измерения давлений их ограничен 6000 кг/см^2 . В гидростатических аппаратах рассматриваемые манометры подсоединяются обычно в гидравлической системе к магистрали высокой стороны при помощи различных дополнительных устройств: цилиндров, тройников и соединительных муфт, что усложняет конструкцию гидростатических аппаратов и снижает надежность их работы.

Этих недостатков лишены манганиновые манометры, которые работают по принципу изменения электрического сопротивления при действии на них всестороннего давления. Впервые такие манометры были применены в гидростатических аппаратах П. Бриджменом (1935). Для их изготовления используется манганиновая проволока, представляющая собой сплав меди (86%), марганца (11%) и никеля (3%). Одной из основных ха-

рактистик манганинового манометра является пьезокоэффициент $K=1/R_0 \cdot \Delta R/P$, где R_0 — сопротивление катушки при атмосферном давлении; ΔR — изменение сопротивления.

Исследования по усовершенствованию конструкции манганиновых манометров (Алексеев, Бурова, Иванова, 1964) способствовали широкому использованию их в гидростатических аппаратах для измерения всестороннего давления. Авторы этой работы экспериментально показали, что манганиновые манометры могут использоваться как приборы, регистрирующие все стороннее давление в гидростатических аппаратах с высокой точностью. Чувствительным элементом манганиновых манометров является спираль из манганиновой проволоки марки ПЭМС диаметром 0,08—0,1 мм и сопротивлением 50—200 Ом. Эта спираль располагается в канавке керамического каркаса катушки, форма и габариты которой могут быть произвольными. К концам манганиновой спирали дуговой сваркой привариваются концы медной проволоки диаметром 0,1—0,2 мм, с помощью которых катушка подсоединяется к электровводам. На катушку надевается защитный чехол из фторопласта, после чего она подвергается термообработке. Изготовленный таким образом манганиновый манометр работает стабильно до 30 000 кГ/см². Его погрешность при измерении давлений до 15 000 кГ/см² составляет 0,5%, при более высоких давлениях не превышает 1,5% (Атанов, Иванова, 1971). Для измерения всестороннего давления манганиновый манометр размещается либо непосредственно в рабочей камере, либо в специальной камере, которую встраивают в магистраль высокой стороны. При работе с агрессивными средами манганиновый манометр изолируют — помещают в герметичный чехол, заполненный жидкой средой, способной передавать гидравлическое давление.

СОЗДАНИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР В ГЕРМЕТИЧНЫХ КАМЕРАХ МАЛОГО ОБЪЕМА

Для создания высокой температуры в гидростатических аппаратах высокого давления используется как внешний, так и внутренний нагрев. При внешнем нагреве блок высокого давления размещается в цилиндрической печи; при этом способе нагревается вся конструкция блока. Внешний нагрев рабочей камеры позволяет значительно упростить конструкцию блока высокого давления и обеспечить безградиентный нагрев рабочей зоны в камере. Однако при внешнем нагреве резко снижается прочность блока высокого давления, которая ограничивается давлениями для большинства сталей до 3 000 кГ/см² при 700—600°C.

Чтобы увеличить несущую способность блока, применяется внутренний нагрев. Электрическая печь заключается непо-

средственно в рабочей камере блока высокого давления, наружная часть которого охлаждается проточной водой, что позволяет обеспечить нормальную температуру цилиндров блока высокого давления (60°C) при рабочей температуре $1\,000^{\circ}\text{C}$ и давлении $10\,000\text{ кг/см}^2$ (Paterson, 1964).

Конструкция таких электрических нагревателей, работающих в жидких средах, имеет форму трубки, изготовляемой из высокоомной проволоки (нихром, вольфрам, молибден, платинородий и др.). Проволока наматывается на керамическую трубку в виде биффилярной намотки и тщательно теплоэлектронизируется различными материалами (слода, асбест, керамика и др.). При этом образуется экран, предотвращающий отдачу тепла на стенки цилиндра. Наряду с нагревателями, изготовленными из проволоки, применяются нагреватели из трубок нихрома, нержавеющей стали, тантала и платины, обладающих низкими сопротивлениями из-за большого сечения площадей трубок. При создании высокой рабочей температуры в камере такие нагреватели потребляют большое количество тока, что ограничивается сечениями электровводов. Изготовление трубки с одинаковой толщиной стенки затруднительно. Поэтому трубчатые нагреватели широкого применения не нашли.

КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУР

Существует несколько методов измерения температур в рабочих камерах гидростатических аппаратов: термопарный, метод измерения по излучению и шумовой.

Термопарный метод наиболее точный. Для измерения температур используются преимущественно хромель-алюмелевая и платино-платинородиевая термопары: термopа хромель (+) — алюминель (—) довольно устойчива к окислению, обладает высокой механической прочностью и позволяет измерять температуры от 0 до 1100°C ; платино (—) — платино $+10\%$ родия (+) термopа применяется для измерения более высоких температур (до 1600°C) и более устойчива к окислению, чем хромель-алюмелевая, но при высоких давлениях и температурах эти термopы становятся ломкими и часто выходят из строя.

Термopы вводят в рабочую камеру при помощи электровводов различной конструкции (Циклис, 1965; Лебедев, 1962). В одних случаях термopарная проволока, не прерываясь, проходит через электроввод непосредственно в рабочую камеру, в других она прерывается, и разорванные концы ее привариваются к электровводу. Способ непрерывного введения термopы в рабочую камеру позволяет измерять рабочую температуру с более высокой точностью. При способе прерывного введения термopар отмечаются значительные погрешности при измерении рабочих температур, которые обусловлены градиентом темпе

ратур в местах соединения термопары с вводами. Для устранения этих недостатков В. П. Бутузов, Г. П. Шаховский, М. Г. Гоникберг (1965), а также С. С. Бокша, Г. П. Шаховский (1961) применили дифференциальные термопары, холодный спай которых располагается в зоне ввода термопары в рабочую камеру (рис. 26). Температура холодного спая измеряется либо термометром сопротивления, либо специальной термопарой. В настоящее время описано большое количество разнообразных конструкций дифференциальных термопар, позволяющих измерять рабочие температуры в гидростатических аппаратах с высокой точностью.

В более ранних работах наряду с термопарным методом использовался также метод измерения температур по инфракрасному излучению (Калашиков, Верецагин, 1956), источником которого служила электрическая печь, заключенная в рабочей камере. При нагреве электрической печи инфракрасное излучение через кварцевое окно принимается фотодатчиком ФС-А-1, с помощью которого и производится регистрация температуры. Однако наличие оптических окон в рабочих камерах гидростатических аппаратов не позволяло создавать высокие давления, вследствие чего этот метод измерения температур под давлением не нашел широкого применения.

Шумовой метод измерения температур в гидростатических аппаратах так же, как и метод измерения температур по инфракрасному излучению, исключает влияние давления на показания датчика сопротивления. Принцип действия шумового термометра основан на флуктуации напряжений, связанных с тепловым возбуждением решетки, в которой нет направленного электрического тока. При воздействии температуры в термометре возникают тепловые шумы, интенсивность которых не зависит от величины абсолютного давления и химического состава среды, передающей давление.

В настоящее время исследователи используют для измерения температур под давлением только термопарный метод. В тех же случаях, когда измеряемая температура значительно превышает температуру плавления материалов, из которых изготовлены термопары, или когда не представляется возможным ввести термопару во время работы в интересующую нас зону рабочей камеры, измерение температуры производится по показаниям мощности тока в электрической цепи нагревателя. Для этого температуру в рабочей камере определяют по тарировочной термопаре и строят кривую зависимости температуры от мощности тока. Учитывая линейную зависимость изменения температуры от мощности электрического тока, можно во время эксперимента по показаниям мощности тока найти значение рабочей температуры в каждый отдельный момент. Таким способом определяют температуры вплоть до 10 000—15 000°C (Циклис, 1965).

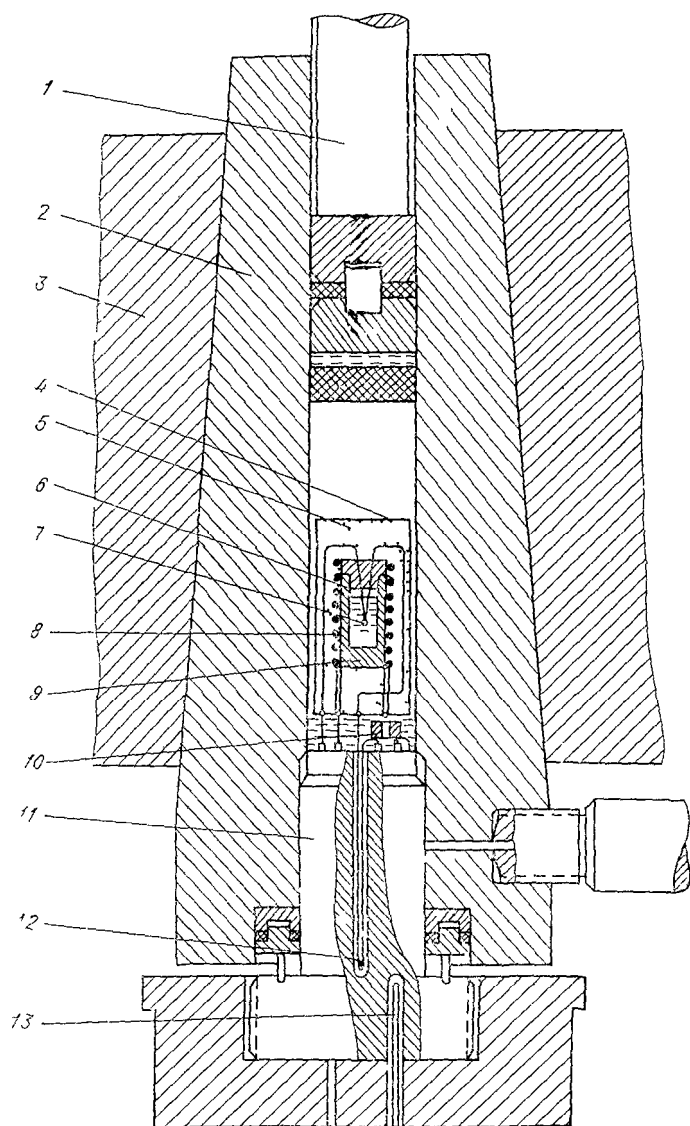


Рис. 26. Монтаж дифференциальной терморпары в камере высокого давления.

1 — поршень, 2 — конусный срез, 3 — оправка; 4 — чехол тепловой камеры, 5 — теплоизолятор; 6 — образец; 7 — рабочая терморпара, 8 — электрическая печь, 9 — тигель, 10 — манганиновый манометр; 11 — электроввод, 12 — холодный спай, 13 — контрольная терморпара.

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Современная импульсная техника и радиоэлектронная аппаратура позволяют изучать распространение коротких высокочастотных импульсов в упругой среде под давлением. При этом испытуемый образец, размеры которого во всех направлениях во много раз превышают длину распространяющейся волны, обычно рассматривают как бесконечную среду, а волны — как плоские волны, скорости которых определяются модулями упругости среды (Adem, 1954; Mc-Skimin, 1956; Силаева, 1959). Для определения скорости упругой волны при импульсном методе измеряемым параметром является время прохождения упругого импульса через испытуемый образец. Если через образец (рис. 27) длиной l с помощью пьезоэлектрического датчика-преобразователя послать короткий ультразвуковой импульс длительностью τ и частотой f , то упругая волна, пройдя через образец за время $t=l/v$, будет принята пьезоэлектрическим датчиком-приемником, расположенным на противоположной стороне образца. Отраженная волна пойдет в обратном направлении, вновь отразится и вернется к приемнику через интервал времени τ и 2τ . Процесс последовательных отражений упругой волны в образце будет продолжаться до полного затухания волны. Импульсы ультразвука, принятые приемником, после усиления наблюдаются на осциллограмме в виде ряда последовательных затухающих импульсов, разделенных интервалами времени, равными T , $3T$ и т. д.

Импульсный метод широко используется как отечественными, так и зарубежными исследователями для изучения физико-механических свойств горных пород, минералов, металлов и других веществ под давлением (Волярович,

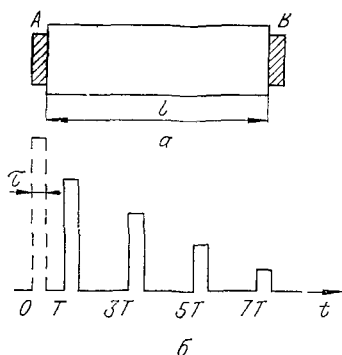


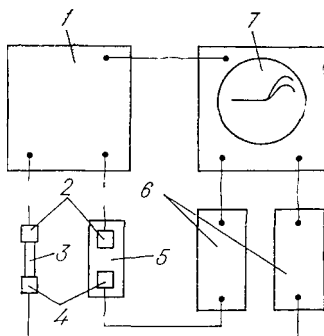
Рис. 27. Прохождение ультразвукового импульса в образце.

a — схема размещения излучателя А и приемника В, b — положение отраженных импульсов на экране осциллографа. (Пунктиром показан запускающий импульс.)

1966; Берч, 1964; Воропов и др., 1958; Лебедев и др., 1972). При использовании этого метода, как отмечает М. П. Волярович (1966), точность измерения скорости распространения ультразвуковых колебаний определяется в основном погрешностью измерения времени, за которое проходит упругий импульс через образец.

Рис. 28. Ультразвуковая аппаратура с акустической линией задержки.

1 — генератор прямоугольных импульсов Г5-4Б; 2 — датчики-излучатели; 3 — образец; 4 — датчик-приемник; 5 — акустическая линия задержки; 6 — усилители УШ-10; 7 — двухлучевой осциллограф С1-12.



В 1968 г. Д. В. Корнеев описал схему ультразвуковой установки (рис. 28), состоящей из генератора, двух широкополосных усилителей, двухлучевого осциллографа, акустической линии задержки и двух пар пьезоэлектрических датчиков: излучателей и приемников. Генератор вырабатывает синхронные прямоугольные импульсы с амплитудой 120 В и возбуждает датчики-излучатели, которые генерируют ультразвуковые упругие колебания. Последние распространяются по исследуемому образцу и акустической линии задержки и принимаются датчиками-приемниками, преобразуясь в электрические сигналы. Эти сигналы усиливаются широкополосными усилителями и передаются на осциллограф. Синхронность возбуждения датчиков-излучателей и запуска горизонтальной развертки осциллографа обеспечивается генератором синхронизации. Скорость распространения ультразвуковых колебаний в образце при действии высоких давлений определяется разницей показаний шкалы рабочей и эталонной акустических линий задержки в начале и конце опыта. Этот метод измерения имеет высокую чувствительность и позволяет определять скорости распространения упругих волн до 200 мм/мкс. Подобная схема измерительной установки применялась в ряде работ (например, Берч, 1964) для изучения распространения упругих волн в образцах горных пород в условиях высоких давлений и температур.

ГИДРОСТАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ СИСТЕМЫ ПЛАВАЮЩИЙ ЦИЛИНДР — ПОРШЕНЬ

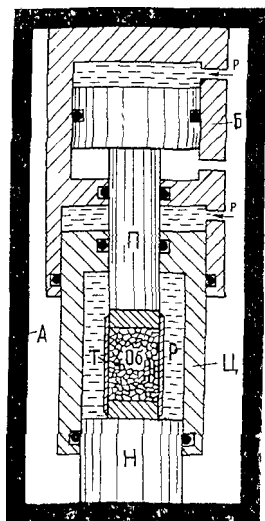
Экспериментальное изучение глубинных процессов Земли в лабораторных условиях проводится, как правило, с привлечением аппаратуры высокого давления. С появления первых работ по исследованию поведения горных пород под давлением прошло более полувека, однако стандартной гидростатической аппаратуры высокого давления до сих пор не разработано. Экспериментатор, ставя задачу по изучению деформированности пород при высоких термодинамических параметрах, вынужден начинать свою работу с конструирования и изготовления необходимой ему аппаратуры. Основные трудности в создании аппаратов высокого давления для исследования деформационных свойств горных пород обусловлены, тем, что, во-первых, горные породы неоднородны (поэтому испытываемые образцы применяют больших размеров), во-вторых, в связи с увеличением несущей способности материала блока высокого давления нагреватель помещают внутрь камеры, что требует увеличения компрессируемого объема, а следовательно, увеличения габаритов аппарата. Другая трудность заключается в том, что испытания пород должны проводиться при постоянном давлении, которое поддерживается автоматически специальным устройством. В существующих аппаратах эти устройства представляют собой сложный конструктивный узел, а их встраивание в гидравлическую схему аппаратов снижает надежность их работы и усложняет конструкцию.

Для исследования деформационных свойств горных пород при высоких термодинамических параметрах в лаборатории экспериментальной тектоники ИГиГ СО АН СССР была разработана универсальная аппаратура, позволяющая создавать более высокие давления и температуры. Главным ее звеном является гидростатический аппарат системы плавающий цилиндр — поршень, который выгодно отличается от существующих аппаратов. Он позволяет создавать два независимых давления — одно автоматически поддерживается постоянным, что дает возможность испытывать горные породы при высоких термодинамических параметрах как на сжатие, так и на растяжение со снятием диаграммы напряжение — деформация.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА АППАРАТА

На рис. 29 представлена блок-схема гидростатического аппарата системы плавающий цилиндр — поршень, который содержит жесткую раму (А), нагрузочный блок (Б), блок высокого давления (Ц). Такая конструкция аппарата дает возможность делать блок высокого давления взаимозаменяемым, т. е. для аппарата может изготавливаться серия блоков с различными рабочими объемами камер и другими конструктивными особенностями. Это обуславливается необходимостью максимально использовать шкалу давлений. Например, для получения надежных экспериментальных результатов при испытании металлов под давлением обычно применяют стандартные гагаринские образцы диаметром 5 мм и высотой 30 мм. Поскольку горные породы по своей структуре являются неоднородным материалом, рекомендуется применять экспериментальные образцы диаметром не менее 12 мм и высотой 35 мм.

Рис. 29. Схема гидростатического аппарата системы плавающий цилиндр — поршень. А — жесткая рама; Б — нагрузочный блок; Ц — блок высокого давления; Об — образец; П — поршень; Н — наковальня; Т — герметичная тара; Р — жидкость.



Конструкция аппарата позволяет создавать самым блоком два независимых давления — боковое и дифференциальное — и во время опыта поддерживать одно из них постоянным. Гидростатическое давление в рабочей камере создается способом напрессовки ступенчатого цилиндра на затвор и поршнем при вдвигании его в рабочую камеру. При нагружении камеры давлением ступенчатый цилиндр в промежуточном положении ограничивается с одной стороны жидкостью, заключенной в рабочей полости ступенчатого цилиндра, с другой — жидкостью, заключенной в полости цилиндра нагрузочного блока, что обеспечивает условия во время нагружения ступенчатому цилиндру автоматически перемещаться в пужном направлении. Эта особенность конструкции аппарата дает нам право назвать его аппаратом системы плавающий цилиндр — поршень.

КОНСТРУКЦИЯ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО АППАРАТА СИСТЕМЫ ПЛАВАЮЩИЙ ЦИЛИНДР — ПОРШЕНЬ

Рабочая схема конструкции гидростатического аппарата системы плавающий цилиндр — поршень изображена на рис. 30. Она включает в себя нагрузочный блок, блок высокого давления, тарельчатый гидравлический подъемник и гидравлический привод.

Нагрузочный блок представляет собой четырехколонный пресс с двумя силовыми цилиндрами, расположенными в верхней траверсе. Он состоит из нижней и верхней траверсы. В верхней закреплен блок цилиндров, в которых заключены поршни осевого и бокового нагружения. Нижняя и верхняя траверсы скреплены четырьмя колоннами. На нижней плите траверсы размещается блок высокого давления, который имеет контейнер, состоящий из ступенчатого цилиндра, оправки затвора

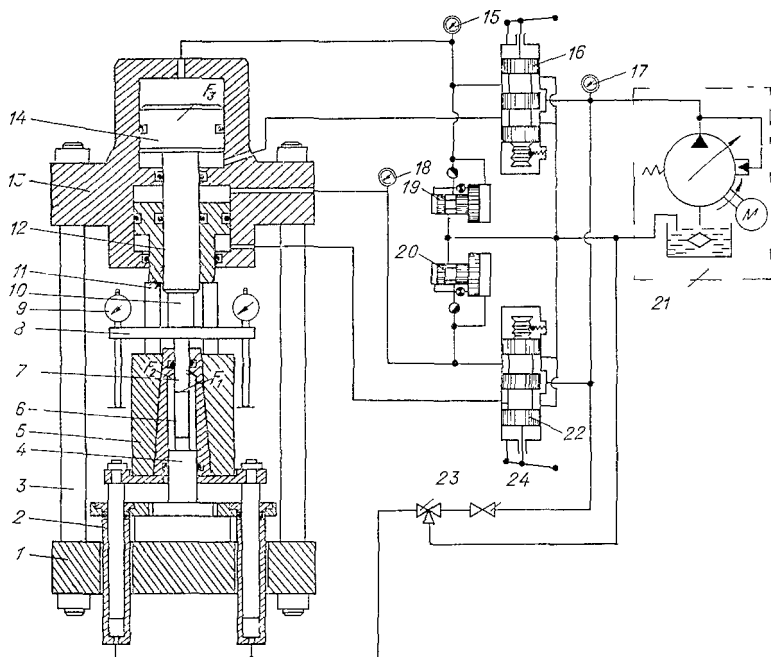


Рис. 30 Гидростатический аппарат системы плавающий цилиндр — поршень с механическим приводом

1 — нижняя траверса, 2 — гидроподъемник, 3 — колонна, 4 — затвор, 5 — контейнер, 6 — образец, 7 — нагрузочный поршень, 8 — коромысло, 9 — измеритель деформации, 10 — измеритель осевой нагрузки, 11 — опорное полукольцо, 12 — поршень бокового нагружения, 13 — блок цилиндров, 14 — поршень осевого нагружения, 15, 17 и 18 — манометры, 16 и 22 — распределители, 19 и 20 — регулируемые дроссели, 21 — механический регулируемый насос, 23 — трехходовой вентиль, 24 — запорный вентиль, F_1 , F_3 и F_4 — рабочие площади поршней, F_2 — площадка защелки

с электровводами и нагрузочного поршня. В рабочей камере блока находится образец. Между поршнями осевого и бокового нагружения и нагрузочным поршнем и оправкой контейнера встроены съемные силоизмеритель и опорные полукольца, являющиеся одновременно компенсаторами хода поршней нагрузочного блока. На затворе размещается тарельчатый гидроподъемник, состоящий из двух опорных колец и двух цилиндров.

Гидравлический привод содержит механический насос, распределитель с двумя уплотненными золотниками, три манометра, два регулируемых дроссельных клапана, запорный вентиль и трехходовой вентиль.

После монтажа образца на затворе контейнер вместе с тарелкой гидроподъемника под собственным весом опускается вниз и садится уплотнительным кольцом на затвор. В камеру через канал для штока заливается рабочая жидкость до уровня уплотнительного верхнего кольца, после чего в канал вводится нагрузочный шток с закрепленным на нем коромыслом. На торце штока устанавливается силоизмеритель, который поджимается поршнем осевого нагружения. На внешний цилиндр контейнера устанавливают полукольца и поднимают их поршнем бокового нагружения. Для этого золотник 16 распределителя переводится в нейтральное положение, а золотник 22 — в положение, при котором жидкость нагнеталась бы в верхнюю полость цилиндра бокового нагружения. В этом случае контейнер надвигается на неподвижный затвор и сжимает жидкость в рабочей камере до необходимого давления. Осевое давление в образце создается при действии на шток поршня осевого нагружения, для чего золотник 22 переводится в нейтральное положение, а золотник 16 — в верхнее. При этом жидкость нагнетается в верхнюю полость цилиндра осевого нагружения. При вдвигании нагрузочного штока в рабочую полость в камере возникает избыточное давление вследствие уменьшения компрессируемого объема. При постоянном давлении жидкости в верхней полости цилиндра бокового нагружения избыточное давление, действуя на заплечико, выталкивает ступенчатый цилиндр и тем самым компенсирует объем в рабочей камере. При соответствующем выборе отношений площадей поршня и заплечика боковое давление в камере в процессе всего опыта остается постоянным.

При демонтаже образца поршни осевого и бокового нагружения возвращаются в верхнее положение. Освобожденные опорные полукольца и силоизмеритель удаляются за пределы блока, после чего из канала извлекается нагрузочный шток. При нейтральном положении золотников 16 и 22 вентиль 24 открывается, а сливной вентиль закрывается. Жидкость насосом нагнетается в цилиндры гидроподъемника, верхняя тарелка, действуя на контейнер, снимает его с затвора и освобождает

ет тем самым доступ к образцу. Отработанная жидкость стекает в желоб обоймы и по специальному каналу сливается в отстойник. Такая конструкция аппарата позволяет использовать сменные блоки высокого давления с различными объемами рабочих камер, выбор которых может определяться условиями опыта.

Нагружение образцов неравными давлениями в этом аппарате производится непосредственно самим блоком высокого давления, в котором гидравлическое боковое давление в кольцевой рабочей камере создается вследствие напрессовки ступенчатого цилиндра на неподвижный затвор. При этом поршень бокового нагружения через съемные опорные полукольца действует на оправку. Осевое давление на образце создается нагрузочным штоком под действием поршня осевого нагружения.

Переменная механическая поддержка ступенчатого цилиндра со стороны внешнего цилиндра контейнера осуществляется автоматически при действии рабочей жидкости на площадку заплечика ступенчатого цилиндра. Сопрягаемые поверхности внутреннего и внешнего цилиндров изготавливаются конусными. При подборе площадок поперечного сечения нагрузочного штока F_1 , поршней осевого F_3 и бокового F_4 нагружения, площадки заплечика F_2 соотношением $F_1/F_2 = F_3/F_4$ в процессе опыта обеспечивается постоянство бокового давления.

КОНСТРУКЦИЯ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ АППАРАТА

Основными узлами гидростатического аппарата являются нагрузочный блок и блок высокого давления.

Нагрузочный блок аппарата выполняет роль генератора осевых нагрузок, который при действии на внешний цилиндр и верхний поршень блока высокого давления создает всестороннее и осевое давление в рабочей камере. Представленный на рис. 31 нагрузочный блок состоит из нижней и верхней траверс, двух силовых цилиндров и четырех колонн. Нижняя траверса 1 представляет собой массивную плиту из штамповой стали 4ХС, нормализованной до твердости HRC 38. Верхняя траверса имеет нижний стакан из стали 20Х твердостью HRC 38-42 и верхнюю обойму 13 из стали 30ХГСА твердостью HRC 48-52. В верхней траверсе заключены два силовых цилиндра: нижний цилиндр 5 с кольцевым поршнем и верхний 14 с поршнем 18. Оба цилиндра изготовлены из высоколегированной стали 30ХГСА твердостью HRC 50-54. Поршни в цилиндрах уплотнены дифференциальными и кольцевыми уплотнениями. Нижняя и верхняя траверсы скреплены колоннами с помощью гаек. Необходимый просвет между поршнями и нижней траверсой обеспечивается заплечиками на колоннах. Верхний цилиндр закрывается уплотненной пробкой из стали твердостью HRC

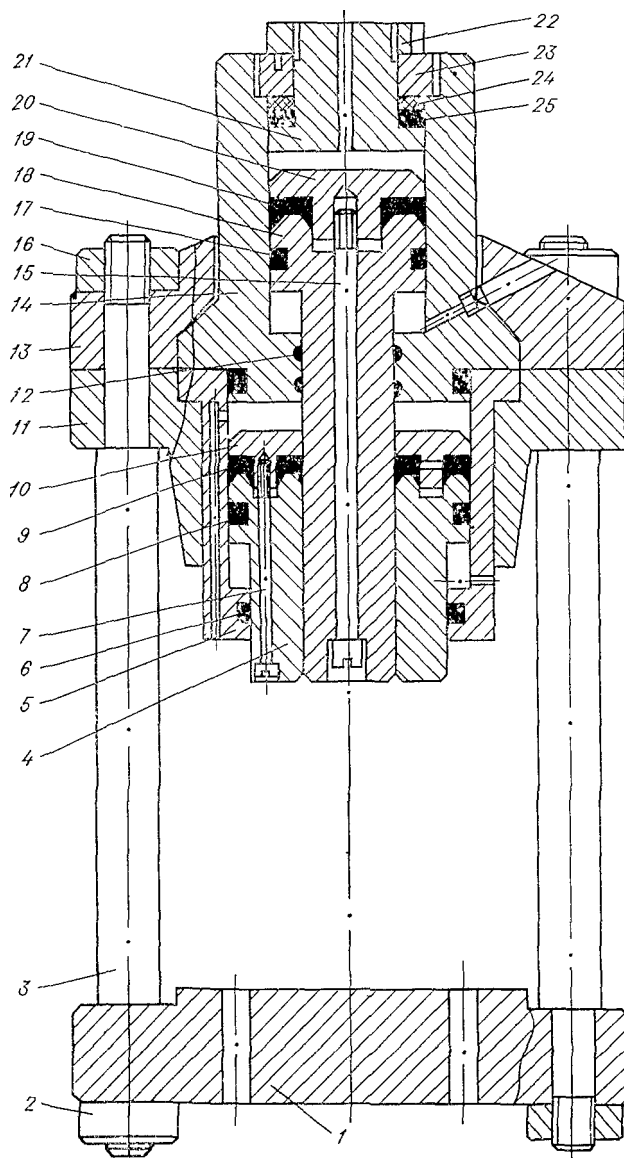


Рис. 31. Нагрузочный блок.

1 — нижняя траверса; 2 и 16 — стяжные гайки; 3 — колонна; 4 — поршень бокового нагружения; 5 — нижний силовой цилиндр; 6, 8, 9, 12, 17, 19 и 25 — уплотнительные кольца; 7 и 15 — стяжные винты; 10 — кольцо; 11 и 13 — верхние траверсы; 14 — верхний силовой цилиндр; 18 — поршень; 20 — грибок; 21 — пробка, 22 и 23 — резьбовые втулки, 24 — поджимное кольцо.

50-54 и поджимается втулками. Подробнее уплотнительные устройства поршней описываются ниже в специальном разделе.

Выбор размеров и материалов элементов конструкции нагруженного блока определяется приближенными теоретическими и эмпирическими соотношениями исходя из максимальных рабочих параметров осевых усилий и давлений в рабочих цилиндрах. Коэффициент запаса прочности элементов конструкций выбирается в соответствии с известными расчетными положениями (Беляев, 1965; Пономарев и др., 1958).

Блок высокого давления сконструирован так, что его контейнер, состоящий из ступенчатого цилиндра и оправки, является подвижным. Это позволяет производить нагружение образцов двумя независимыми давлениями непосредственно самим блоком. При этом всестороннее давление в рабочей камере создается при напрессовке ступенчатого цилиндра на неподвижный затвор, который опирается на неподвижную плиту пресса, осевое — нагруженным штоком. Такая конструкция блока улучшает условия монтажа и демонтажа образцов электрического нагревателя и обеспечивает проведение опытов по изучению деформации пластичных и хрупких материалов как при растяжение, так и на сжатие при высоких давлениях и температурах.

На рис. 32 представлена конструкция блока высокого давления, состоящего из контейнера, затвора, нагруженного штока и внешней измерительной цепи деформации образца. Контейнер, в свою очередь, состоит из ступенчатого цилиндра, оправки и внешнего цилиндра. Ступенчатый цилиндр, изготовленный из стали 45ХНМФА твердостью HRC 46—48, имеет заплечико и конус. Оправка изготовлена из стали 30ХГСА твердостью HRC 52-54, внутренний канал оправки выполнен в виде ответного конуса. Сопрягаемые конусные поверхности, имеющие угол 1° к центральной оси, механически подогнаны по краске, что позволяет проконтролировать их контактную поверхность на прилегание. Внешний цилиндр изготовлен из стали 40Х твердостью HRC 44-46. С внутренней поверхности канала цилиндра сделана спиральная канавка, которая замыкается с обеих сторон кольцевыми канавками, снабженными сквозными отверстиями, соединяющимися с патрубками для подсоединения трубопровода, по которому подается охлаждающая жидкость. Внешний цилиндр и оправка скреплены горячим способом.

Затвор блока состоит из опорной пяты, обоймы, изготовленной из стали 30ХГСА твердостью HRC 48-52, цилиндра из стали 35ХГСА твердостью HRC 54-56 и конуса из стали Р18 твердостью HRC 60-62. Обойма и цилиндр скреплены горячим способом. Перед запрессовкой конуса в цилиндр на его поверхность наносится электроизолирующий уплотнительный слой, через который пропускаются электрические провода. Методика покрытия и укладки электрических проводов описана ниже. Нагруженный шток изготавливается из стали Р18

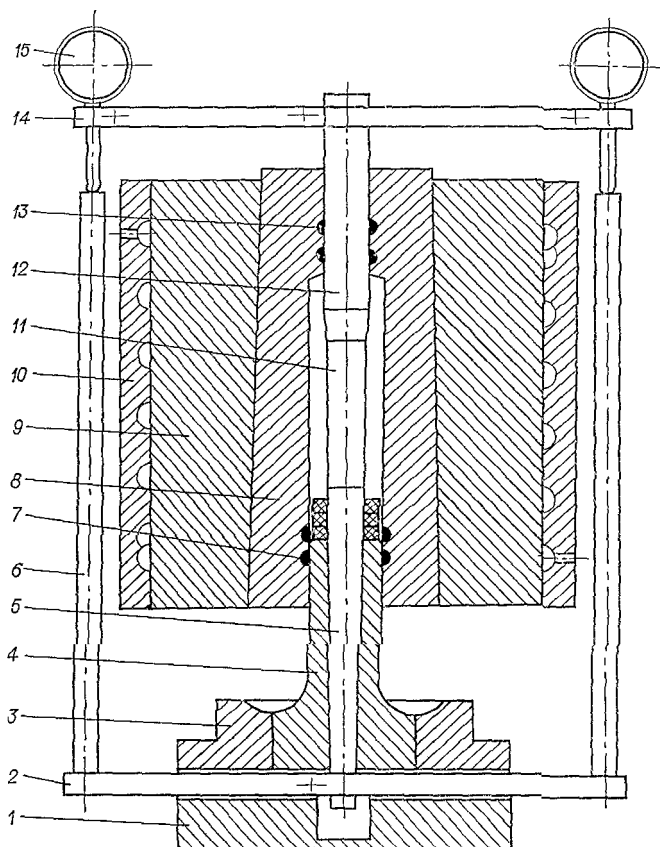


Рис. 32. Блок высокого давления.

1 — опорная пята; 2 и 14 — коромысло; 3 — обойма; 4 — цилиндр; 5 — конус; 6 — штанга; 7 и 13 — уплотнительные кольца; 8 — ступенчатый цилиндр; 9 — оправка; 10 — внешний цилиндр; 11 — образец; 12 — нагрузочный шток; 15 — индикатор часового типа.

твердостью HRC 60-62. На конце штока имеется конус под углом 5° к оси штока длиной 10—15 см. Поверхность штока механически доводится до высокой частоты ($\nabla 9$). Измерительная цепь деформации образца состоит из верхнего коромысла, закрепленного на нагрузочном штоке, и нижнего, закрепленного на нижней части конусного штока. На обоих концах нижнего коромысла закреплены две штанги. В верхнем коромысле крепятся измерители деформаций. В рассматриваемой схеме блока высокого давления затвор и шток уплотняются капроновыми кольцами. Контейнер, затвор и нагрузочный шток являются узлами, материал которых работает в упруго-пластичном режиме. Для того, чтобы определить их линейные размеры и оценить максимально допускаемые нагрузки, эти дета-

ли подвергаются проверочному расчету на прочность. Методы расчета на прочность изложены в ряде работ (Бриджмен, 1948; Беляев, 1957; Пономарев и др., 1958; и др.).

При спрессовке цилиндров горячим и холодным способами на контактных поверхностях возникают остаточные деформации, в результате которых на сопрягаемых поверхностях цилиндров снижаются расчетные давления, что ограничивает получение более высоких давлений. Это ограничение можно обойти, применив переменную механическую поддержку, при которой тангенциальные сжимающие напряжения на сопрягаемых поверхностях цилиндров увеличиваются по мере возрастания давления во внутреннем канале цилиндра.

Такой метод позволяет прикладывать к цилиндру внешние давления в соответствии с возрастанием давления в рабочей камере.

Блок высокого давления в нашем аппарате сконструирован так, что во время нагружения рабочей камеры давлением поддержка ступенчатого цилиндра и постоянство рабочего давления в камере обеспечиваются автоматически. Это достигается благодаря связи площадок заплечика ступенчатого цилиндра, верхнего штока с поршнями нагрузочного блока соотношением

$$F_1/F_2 = F_3/F_4.$$

Линейные размеры основных элементов блока и площадки заплечика подбираются так, что при нагружении блока давлением контактные давления на сопрягаемых конусных поверхностях ступенчатого цилиндра и оправки при максимальном рабочем давлении не превышают допустимых напряжений.

По методике расчета посадки конусов (Справочник машиностроителя. Т. III, 1951) определяются размеры рабочей камеры, диаметры сопрягаемых конусных поверхностей ступенчатого

цилиндра и его оправки и общая компоновка контейнера (рис. 33). Контактное давление на сопрягаемой конусной поверхности можно найти из выражения

$$P_k = Q/f\pi d_{cp}l, \quad (1)$$

где Q — осевая нагрузка, возникающая при действии всестороннего давления на заплечико ступенчатого цилиндра; f — коэффициент трения при запрессовке цилиндра в оправку; d_{cp} — средний диаметр конуса; l — длина контактной конусной поверхности цилиндра.

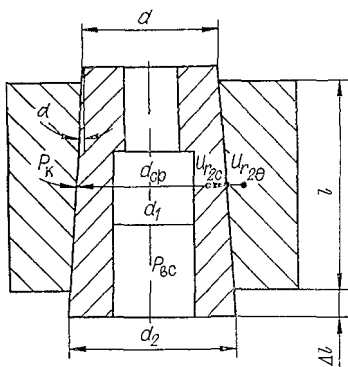


Рис. 33. Схема основных элементов контейнера.

Осевая нагрузка, обеспечивающая запрессовку ступенчатого цилиндра в оправку, определяется по формуле

$$Q = P_{\text{вс}} \cdot F_4.$$

Контактное давление $P_{\text{к}}$ находится из соотношения

$$P_{\text{к}} = P_{\text{вс}} \cdot F_4 / f \pi d_{\text{ср}} l. \quad (2)$$

Определяем необходимую величину контактного давления при нагружении камеры рабочим давлением:

$$P_{\text{к}} = P_{\text{вс}} \cdot (1 - R_2^2) / (2 - R_1^2 - R_2^2), \quad (3)$$

где $R = r_1/r_{\text{к}}$ — отношение внутреннего радиуса r_1 ступенчатого цилиндра к радиусу $r_{\text{к}}$ посадочной поверхности; $R_2 = r_{\text{к}}/r_2$ — отношение радиуса посадочной поверхности к наружному радиусу r_2 оправки цилиндра.

Контактное максимальное давление обычно ограничивается прочностью материала оправки цилиндра и должно быть

$$R_{\text{к max}} \leq 0,8 \sigma_{\text{T}_2},$$

где σ_{T_2} — предел текучести материала оправки цилиндра.

Влияние внешнего давления со стороны оправки цилиндра на работу ступенчатого цилиндра оценивается при помощи уравнения Ламе для тангенциальных напряжений:

$$(\sigma_t)_{r_1} = P_{\text{вс}} [(1 + R^2)/(1 - R^2)] - P_{\text{к}} [2/(1 - R^2)]. \quad (4)$$

Припуск на запрессовку ступенчатого цилиндра в оправку можно определить из расчетных данных радиального перемещения сопрягаемых поверхностей обоих цилиндров при действии одновременно внутреннего давления и продольной силы.

Радиальное перемещение на сопрягаемой наружной поверхности ступенчатого цилиндра $U_{r_{2\text{с}}}$ находим из выражения

$$U_{r_{2\text{с}}} = U_{r_{\text{кв}}} + U_{r_{\text{к.о}}}, \quad (5)$$

где $U_{r_{\text{кв}}}$ — радиальное перемещение на наружной поверхности при действии внутреннего давления; $U_{r_{\text{к.о}}}$ — радиальное перемещение на наружной поверхности при давлении со стороны оправки цилиндра.

Эти значения перемещений определяем по формулам:

$$U_{r_{\text{кв}}} = P_{\text{вс}} r_2 / E \cdot [(2R^2 - \mu R^2)/(1 - R^2)], \quad (6)$$

$$U_{r_{\text{к.о}}} = P_{\text{к}} r_2 / E \cdot [(1 + R^2)/(1 - R^2) - \mu].$$

Подставляя значения (6) в выражение (5), получаем

$$U_{r_{2c}} = r_2/E \cdot \{P_{вс} [(2R^2 - \mu R^2)/(1 - R^2)] - \\ - P_k [(1 + R^2)/(1 - R^2) - \mu]\}. \quad (7)$$

Радиальное перемещение сопряжений внутренней поверхности оправки цилиндра определяем по формуле

$$U_{r_{2\theta}} = P_k r_2/E \cdot [(1 + R^2)/(1 - R^2) + \mu]. \quad (8)$$

Смещение ступенчатого цилиндра относительно оправки цилиндра во время нагружения рабочей камеры давлением находим из соотношения

$$\Delta l = (U_{r_{2c}} + U_{r_{2\theta}})/2 \operatorname{tg} \alpha, \quad (9)$$

где α — угол конуса сопрягаемых поверхностей ступенчатого цилиндра и оправки цилиндра.

Затвор блока высокого давления является сложным и ответственным узлом, так как выполняет роль поршня электропровода и опорной пяты (рис. 34). Он состоит из цилиндра, обоймы и конуса. При нагружении затвора давлением верхняя часть его поддерживается рабочим давлением, а нижняя — обоймой, которая напрессовывается на цилиндр горячим способом. Разность температур обоймы и цилиндра для обеспечения сборки рассчитывается по формуле

$$t = [(\nabla_{\max} + \delta_0)/\alpha d] \cdot 10^{-3}, \quad (10)$$

где Δ_{\max} — наибольший натяг посадки; δ_0 — минимальный необходимый зазор при сборке; α — коэффициент линейного расширения; d — номинальный диаметр сопрягаемых поверхностей цилиндра и обоймы.

Контактное давление на сопрягаемых поверхностях цилиндра и обоймы после спрессовки можно определить из выражения

$$P = [\Delta_{\max}/d] \cdot 10^{-3} / [(C_1/E) + \\ + (C_2/E)], \quad (11) \quad \text{где}$$

$$C_1 = \{[1 + (d_1/d_k)^2]/[1 - \\ - (d_1/d_k)^2]\} - \mu_1;$$

$$C_2 = \{[1 + (d_k/d_2)^2]/[1 - \\ - (d_k/d_2)^2]\} + \mu;$$

μ и μ_1 — коэффициенты Пуассона; E — модуль упругости мате-

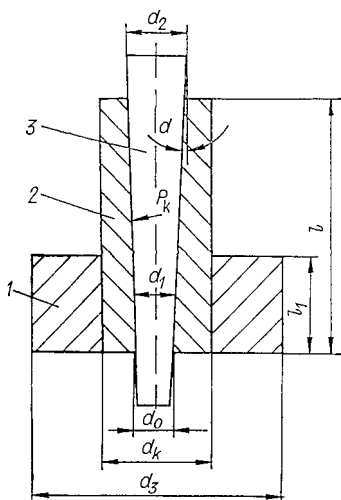


Рис. 34. Схема расчета затвора. 1 — обойма, 2 — цилиндр, 3 — конус.

риала. Наибольшие напряжения, возникающие в цилиндре и обойме, находятся по формулам

$$\sigma_1 = 2P/[1 - (d_1/d_2)^2], \quad (12)$$

$$\sigma_2 = [1 + (d_k/d_3)^2] \cdot [1 - (d_k/d_3)^2].$$

Эти расчеты применимы только при напаях, не превышающих предел упругости материала на сопрягаемых поверхностях соединения обоймы с цилиндром.

Посадка конуса в цилиндр осуществляется через электроизоляционный уплотнительный слой, в котором пропущены медные провода.

Правильный выбор конуса обеспечивает нормальную работу электропровода и герметичность соединения. Контактное давление на сопрягаемых поверхностях конуса и цилиндра затвора определяется из соотношения (1), в котором осевое усилие Q , возникающее в конусе при действии на него рабочего давления, равно:

$$Q = P_{вс} \cdot \pi D^2/4. \quad (13)$$

Давление в уплотнительном слое ограничивается пределом текучести медных проводов и должно быть

$$\sigma_k \leq 0,8\sigma_t.$$

Кроме радиальных давлений цилиндр затвора воспринимает еще и продольную силу N , возникающую при действии всестороннего давления на площадь F торца верхней части цилиндра. В этом случае в поперечном сечении цилиндра возникает напряжение

$$\sigma_z = N/F_{ср} = P_{ср} [(d_3^2 - d_2^2)/(d_3^2 - d_{ср}^2)], \quad (14)$$

где $d_{ср}$, d_2 и d_3^* — диаметры цилиндра. Величина радиального перемещения на наружном радиусе рабочей части цилиндра равна

$$U = P_{тк}/E \cdot [(2R^2 - \mu R^2)/(1 - R^2)], \quad (15)$$

где $R = r_{ср}/r_k$ — отношение среднего радиуса конуса к радиусу цилиндра.

Определение радиального перемещения на рабочей части цилиндра очень важно, так как связано с обеспечением гарантированного зазора при движении затвора в канале ступенчатого цилиндра.

УСТРОЙСТВА МАЛОГАБАРИТНЫХ ПОДВИЖНЫХ УПЛОТНЕНИЙ

В настоящее время для герметизации рабочих камер в блоках высокого давления в основном применяются комбинированные уплотнительные устройства типа уплотнения Бриджмена с некомпенсированной площадью и кольцевые клиновидные уплотнения, которые состоят из мягкой прокладки и антиэкструзивного кольца из бериллиевой бронзы или мягкой стали. Эти уплотнительные кольца обычно используются для однократного нагружения. В подвижных соединениях уплотнительные кольца в большинстве случаев сами являются подвижными, и при создании давлений в них возникают большие силы трения, вследствие чего на трущихся уплотнительных поверхностях часто образуются царапины и задиры, что выводит из строя поршень с цилиндром. При высоких температурах надежность герметизации в подвижных соединениях резко снижается, так как уплотнительные кольца во время создания давления находятся в области горячей зоны. В связи с этим нами разработаны два вида уплотнительных устройств, капроновое самоподжимающее уплотнение, работающее при давлениях от 0 до 15 000 кг/см², и дифференциальное клиновидное уплотнение, использующееся при создании давлений от 0 до 20 000 кг/см².

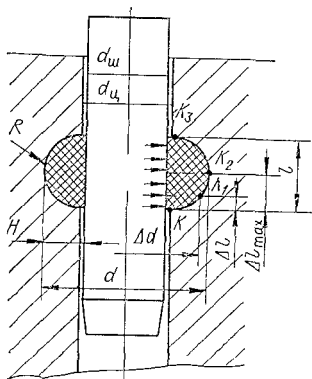


Рис. 35. Капроновое самоподжимающее уплотнение.

Капроновое самоподжимающее уплотнение. Схема конструкции малогабаритного капронового самоподжимающего уплотнения показана на рис. 35. В теле цилиндра выбирается кольцевая канавка, имеющая в сечении форму полукруглости радиусом R . В канавку помещается капроновое кольцо, которое имеет сечение, соответствующее канавке, наружный диаметр кольца делается на 0,1 мм меньше внутреннего диаметра канавки. При этом размер внутреннего диаметра кольца меньше диаметра канала цилиндра на 0,2—0,3 мм. Более удобные соотношения размеров (мм):

| Диаметр канала цилиндра | Ширина канавки | Глубина канавки | Радиус канавки |
|-------------------------|----------------|-----------------|----------------|
| 20 | 4,6 | 2,5 | 2,3 |
| 25 | 5,0 | 2,7 | 2,5 |
| 30 | 6,0 | 3,4 | 3,0 |

При соблюдении этих размеров капроновое кольцо без труда вставляется в кольцевую канавку цилиндра. Для этого

его изгибают в виде восьмерки, затем перегибают пополам и заводят в кольцевую канавку. Далее кольцо расправляют по канавке и технологическим штоком запрессовывают в канавку. Технологический шток на конце имеет конус под углом 5° к оси на длине 20 мм. Диаметр технологического штока на 0,1 мм меньше диаметра рабочего штока. Для захода рабочего штока в уплотнительное кольцо один из его концов изготавливается в виде конуса под углом 5° длиной 15 мм. Рабочий шток в уплотнительное кольцо запрессовывается под большим усилием, что создает на уплотняемых поверхностях высокое радиальное давление и обеспечивает надежное запираание жидкости в рабочей камере.

Радиальное давление на контактных поверхностях определяется из соотношения

$$P_r = Q/f\pi dl,$$

где Q — нагрузка, действующая на шток при запрессовке; f — коэффициент трения прокладки; d — диаметр штока; l — длина контактной поверхности кольца.

Диаметры штока и капала цилиндра выбираются таким образом, чтобы при максимальной осевой нагрузке шток не заклинивало в капале цилиндра. Капроновое кольцо, поставленное в канавку без зазора, обеспечивает при введении рабочего штока высокое удельное давление на контактных поверхностях. Избыточное удельное давление на контактных поверхностях определялось также опытным путем. Для этого изготавливались специальные образцы из материала, обладающего способностью пластически деформироваться. Опыты проводились в цилиндре со сквозным центральным каналом диаметром 20 мм. В качестве уплотнительных колец использовались капроновые и фторопластовые кольца. Испытуемый образец имел меньший диаметр, чем капал цилиндра, но больший, чем внутренний диаметр колец. В центральную замкнутую часть кольцевого зазора цилиндра через просверленный сбоку канал мультипликатором нагнеталась жидкость до возникновения в образце пластической деформации. Было испытано несколько образцов из различных материалов: дюралюминия, меди и латуни. Во всех образцах образовывалась плейка в области уплотнительных колец. Это давало возможность приблизительно определять избыточное радиальное давление; оно оказалось на 2—5% больше давления жидкости в рабочей камере.

Принципиальная схема работы капронового кольца такова. Шток, вставленный в кольцо с большим натягом, вызывает по внутренней и наружной поверхностям радиальное удельное давление P . Ширина в контактной поверхности уплотнительного кольца на штоке ограничивается крайними точками k и k_3 . При действии на капроновое кольцо рабочей жидкости давлением P_z оно деформируется на величину Δl и точка k

занимает положение k_1 . Благодаря кривизне канавки поджатое кольцо продолжает оставаться в этом положении даже после снятия давления. При повторных циклах нагружения камеры давлением на уплотняющих поверхностях сохраняется высокое предварительное контактное давление. Многолетняя эксплуатация самоподжимающего капронового уплотнения такой конструкции показала, что эти уплотнения работают без замены до нескольких десятков циклов повторных нагружений при давлениях от 0 до 15 000 кг/см². Капроновое кольцо выходит из строя в основном из-за загрязнения его контактных поверхностей со штоком в процессе снятия давления в камере. Для предотвращения этого перед уплотнительным кольцом в отдельной кольцевой канавке размещается грязезащитное кольцо из фторопласта, на поверхности которого напосажаются продольные риски, обеспечивающие свободное прохождение рабочей жидкости к уплотнительному кольцу. Защищенное таким образом уплотнительное кольцо работает более продолжительное время. Износостойкость его наступает по достижении центра канавки (точка k_2).

Дифференциальное клиновидное уплотнение. Вторым уплотнением, применяющимся в нашем аппарате, является клиновидное; оно разработано нами по типу уплотнения Ньюхола (Newhall, 1957). В уплотнении Ньюхола некомпенсированная площадь обеспечивается разностью контактных площадей антиэкструзивного кольца с поршнем, в нашем — плавающим клином, который размещается между антиэкструзивным кольцом и прокладкой. В зависимости от разности контактных площадей антиэкструзивного кольца и клина на уплотняемых поверхностях создается более высокое контактное давление (рис. 36). Уплотнение состоит из антиэкструзивного кольца, изготовленного из бериллиевой бронзы и термообработанного до твердости HRC 40-42, уплотнительного фторопластового кольца, ограничивающего бронзовое кольцо твердостью HRC 40-42 и резьбовой втулки, изготовленной из стали 40X твердостью

HRC 48-50. Кольца собираются на шток и поджимаются резьбовой втулкой. Собранный шток вставляется в капал цилиндра, поверхность которого механически обрабатывается до $\nabla 8 - \nabla 9$ чистоты.

Для нормальной работы дифференциального клиновидного уплотнения

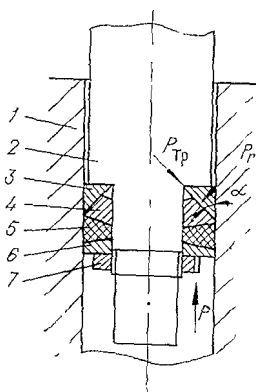


Рис. 36. Дифференциальное клиновидное уплотнение.

1 — цилиндр, 2 — поршень; 3 — антиэкструзивное кольцо; 4 — плавающее кольцо; 5 — уплотнительное кольцо, 6 — ограничивающее бронзовое кольцо; 7 — резьбовое кольцо.

разность площадей плавающего кольца подбирается такой, чтобы соблюдалось условие $1,2 \leq P_r/P \leq 1,25$.

Контактное давление P_r в антиэкструзивном кольце определяется из выражения

$$P_r \sin \alpha = P - F_{\text{тр}} \cos \alpha,$$

где $F_{\text{тр}}$ — сила трения;

$$P_r = (P - F_{\text{тр}} \cos \alpha) / \sin \alpha = (P - p_{\text{тр}} f \cos \alpha) / \sin \alpha$$

(f — коэффициент трения в плоскости антиэкструзивного и плавающего колец).

Такая конструкторская уплотнительного устройства позволяет без замены колец использовать его при многократных нагружениях до давлений 20 000 кг/см².

УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НАГРУЗОЧНОГО БЛОКА

Для герметизации поршней в силовых цилиндрах нагрузочного блока в нашем аппарате применяются широко известные в технике высоких давлений дифференциальные уплотнения и резиновые кольца круглого сечения. Резиновые кольца используются для запираания жидкости в нижних полостях цилиндров. Размеры резиновых колец и соответствующие размеры канавок выбираются по ГОСТу 9833-61.

Для надежного запираания рабочей жидкости в цилиндрах со стороны верхних полостей герметизация поршней осуществляется дифференциальными уплотнениями с плавающим стержнем и кольцом. Эти уплотнительные устройства работают по принципу декомпенсированной площади: давление запираемой жидкости, воспринимаемое стержнем или кольцом, передается уплотнительному кольцу, имеющему меньшую площадь. Разность площадей стержня и уплотнительного кольца позволяет автоматически создавать на уплотнительных поверхностях давления, превышающие давление запираемой жидкости. При проектировании дифференциальных уплотнений конструктор может влиять на надежность уплотняемых поверхностей подвижных поршней подбором рабочих площадей плавающего стержня и прокладки. Применение дифференциального уплотнительного устройства для уплотнения поршней большого диаметра позволяет полностью исключить утечку запираемой жидкости при условии $1,07 \leq P_r/P \leq 1,15$.

Дифференциальное уплотнение с плавающим стержнем, представленное на рис. 37, а, состоит из поршня, прокладки, плавающего стержня и антиэкструзивных колец.

Размеры площадей стержня и прокладки можно определить из выражения

$$Q = (\pi/4) \cdot D^2 \cdot P,$$

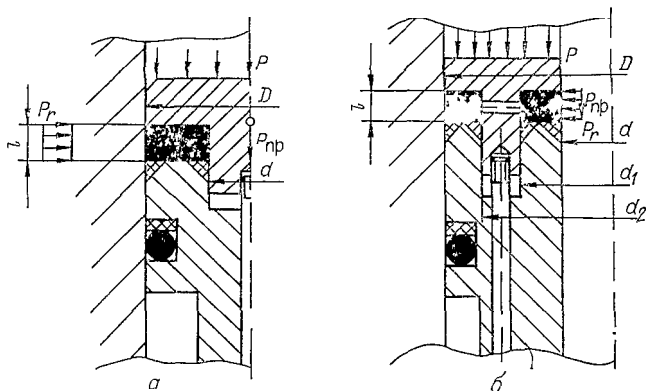


Рис. 37. Дифференциальное уплотнение нагруженного блока.

а — уплотнение с плавающим стержнем, *б* — уплотнение с плавающим кольцом.

4

где Q — усилие, возникающее в стержне при действии рабочей жидкости; D — большой диаметр стержня.

Давление в прокладке $P_{пр}$ определяется по формуле

$$P_{пр} = (Q \cdot \pi/4)(D^2 - d^2),$$

где d — малый диаметр стержня.

Если прокладки изготавливаются из резины, то приближенно можно принять $P_{пр} = P_r$. Высота прокладки при этом обычно колеблется от 5 до 10 мм.

Дифференциальное уплотнение с плавающим кольцом (см. рис. 37, б) состоит из полого поршня, плавающего кольца, резиновых прокладок и антиэкструзивных колец. Выбор рабочих площадок плавающего кольца и прокладок находится по формулам

$$Q = P(\pi/4)(D^2 - d^2), \quad P_{пр} = Q(\pi/4) \cdot [(D^2 - d_2^2) + (d_1^2 - d^2)],$$

где Q — усилие, возникающее в кольце под действием запираемой жидкости; D , d , d_1 и d_2 — диаметры плавающего кольца.

При работе с вышеописанными уплотнениями для уменьшения трения и предотвращения преждевременного износа уплотнительных прокладок каналы цилиндров обрабатываются до чистоты $\nabla 9$. Как показал опыт, усилия на преодоление трения при этих условиях значительно снижаются; утечка жидкости через уплотнительную поверхность исключается.

КОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ОСЕВОЙ НАГРУЗКИ

Измеритель осевой нагрузки одновременно служит и акустическим датчиком. Схема его конструкции представлена на рис. 38. Он включает цилиндр из стали ЧОХ, НРС 48-50,

пята и кольцо из стали ШХ-15 твердостью HRC 60-62. На внешнюю поверхность канала кольца (симметрично на противоположных сторонах) наклеены два рабочих тензодатчика сопротивления. В канале размещены акустический датчик-излучатель, который крепится с помощью шайбы и пружинного кольца. В ней же свободно размещаются два компенсационных тензодатчика сопротивления. На цилиндре крепится центрирующая шайба.

Пята и кольцо запрессовываются во внешний цилиндр с гарантированным натягом. Величина натяга подбирается такой, чтобы контактные давления не вызывали пластической деформации на сопрягаемых поверхностях пяты и кольца. Эти натяги можно определить расчетным путем из выражения

$$P = \delta/d \cdot \{10^{-3}/[(C_1/E) + (C_2/E)]\},$$

в котором отношение диаметров C_1 и C_2 выражается так:

$$C_1 = \{[1 + (d_1/d)^2]/[1 - (d_1/d)^2]\} - \mu;$$

$$C_2 = \{[1 + (d_1/d_2)^2]/[1 - (d_1/d_2)^2]\} + \mu,$$

причем μ_1 и μ_2 — коэффициенты Пуассона для обхватываемых кольца и пяты и обхватывающего цилиндра; δ — расчетный натяг, мк; d , d_1 и d_2 — диаметры обхватываемых кольца и пяты и обхватывающего цилиндра; E_1 и E_2 — модули упругости материала втулки и цилиндра.

Наибольшее напряжение в цилиндре (напряжение растяжения на поверхности сопряжения) находим по формуле

$$\sigma_2 = \{[1 + (d/d_2)^2]/[1 - (d/d_2)^2]\} \cdot P.$$

Требуемое усилие для запрессовки определяется из выражения

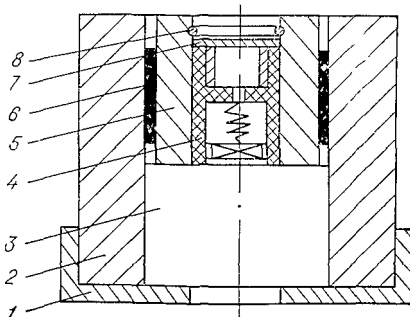
$$Q = P f \pi d l,$$

где d — диаметр сопряжения; l — длина сопрягаемой поверхности.

При нагружении измерителя давлением пяты с кольцом сжимаются. Тензодатчики, закрепленные на кольце, деформируются и изменяют свое омическое сопротивление. Включение тензодатчиков в мостовую измерительную электрическую цепь дает возможность надежно регистрировать усилия от 50 до 30 000 кГ/см² с записью на диаграммную ленту.

Рис. 38. Измеритель осевой нагрузки.

1 — центрирующее кольцо; 2 — цилиндр; 3 — пята; 4 — акустический датчик; 5 — сплошной цилиндр; 6 — тензодатчик; 7 — шайба; 8 — пружинное кольцо.



МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Изучение деформации горных пород при высоких термодинамических параметрах связано с выяснением поведения пород в условиях глубинных зон Земли. Основной трудностью при этом является создание сложнапряженной обстановки, когда главные напряжения по величине отличаются друг от друга. В настоящее время нет достаточно удовлетворительной теории по разрушению горных пород в условиях высоких давлений и температур, поэтому нет и полного объяснения тому, что для приведения породы в пластическое состояние при растяжении необходимо приложить большее всестороннее давление, чем при сжатии. Кроме того, Д. Григгс (Griggs, 1936), Дж. Хендин (Handin, 1953) и другие исследователи показали, что сухая и мокрая породы при испытаниях в условиях сложнапряженного состояния имеют различные значения прочности и хрупкопластического перехода. Мы можем моделировать два экстремальных условия в земной коре: сухая порода испытывает давление только вышележащих слоев, мокрая — вышележащих слоев и поровое.

Разница прочностей пород при различных видах нагружения была впервые открыта Беккером (1914), который обнаружил, что для хрупкопластического перехода карарского мрамора при растяжении требуется всестороннее давление около 3500 кг/см^2 , в то время как при испытании на сжатие — только 600 кг/см^2 . Сжатие и растяжение — это два крайних случая поведения породы по отношению к всестороннему давлению, необходимому для перехода ее от хрупкого к пластическому состоянию.

УСТРОЙСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ НАГРУЖЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ТРЕХОСНЫМ НЕРАВНЫМ ДАВЛЕНИЕМ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Наличие даже самых современных гидростатических аппаратов еще не решает до конца вопросы, связанные с изучением деформационных свойств горных пород при высоких термоди-

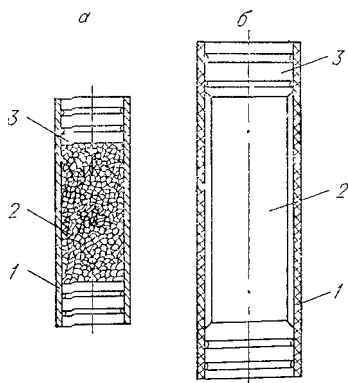
намитических параметрах. При проведении эксперимента в условиях высоких давлений и температур приходится решать такие сложные задачи, как изоляция образцов от среды, передающей давление, нагрев образца, ввод в рабочую камеру большего числа электровводов, нагружение образца давлениями, регистрация термодинамических параметров, механических характеристик образца во время опыта и т. п.

Тара для герметизации образцов. Испытание цилиндрических образцов из горючих пород на сжатие и растяжение под гидростатическим давлением производится обычно в герметичном чехле (таре) который ограждает образец от среды, передающей давление. Конструкция тары для герметизации образцов при испытании их под давлением в условиях комнатных температур сравнительно проста. Когда же образцы испытываются в условиях повышенных температур, исследователи сталкиваются с большими трудностями. Еще в 1914 г. Т. Карман (Karman, 1914) для герметизации образцов применял тару из медной фольги, швы которой соединялись при помощи пайки. Позднее Бриджмен (1955), Д. Григгс, Дж. Хендин (Griggs, Handin, 1960) и другие исследователи в качестве тары использовали медную трубку, концы которой закрывали пробками, а стыки запаивали. Тара такой конструкции применяется и в настоящее время, но она имеет ряд существенных недостатков — не обеспечивает надежную герметизацию образца при приложении осевого давления из-за низкой прочности шва. На образец во время пайки накладываются различные вторичные факторы, обусловленные нагревом образца.

Нами разработана новая конструкция герметичной тары для изоляции образца от внешней среды. Она состоит (рис. 39, а) из тонкостенной трубки, образца и двух стальных пробок, верхней и нижней, на цилиндрической поверхности которых имеются кольцевые канавки. Герметизация сопрягаемых поверхностей трубки и пробок осуществляется под давлением. При этом медная трубка, деформируясь, затекает в кольцевую канавку пробки и на кромках канавки образуется плотный металлический контакт. Такой способ уплотнения обеспечивает надежную герметичность соединения и изоляцию образца от внешней среды при самых различных внешних условиях.

Рис. 39. Схема упаковки образца в герметичной таре.

а — тара с образцом (1 — тонкостенная трубка, 2 — образец, 3 — пробка); б — герметичный эластичный чехол (1 — хлорвиниловая трубка; 2 — тара с образцом, 3 — пробка).



Упаковка образца и герметизация тары осуществляются следующим образом. Образец помещается в медную трубку, которая с обеих концов закрывается пробками. Собранный тара с образцом закладывается в хлорвиниловую трубку (см. рис. 39, б), которая также герметично закрывается пробками. При действии жидкости под давлением на хлорвиниловую трубку, отделяющую тару от жидкости, на медную передается давление, вследствие чего она деформируется и затекает в кольцевые канавки стальных пробок, на кромках которых возникает высокое контактное напряжение, обеспечивающее надежную герметичность тары.

Обжатая таким образом тара извлекается из хлорвиниловой трубки и подвергается испытанию в гидростатическом аппарате в условиях высоких давлений и температур.

Надежность изоляции образца в предлагаемой таре при действии на нее гидростатического давления значительно возрастает благодаря наличию некомпенсированной площади конструкции уплотнения.

Электрический нагреватель петельчатого типа. Нагрев исследуемого образца в рабочих камерах под высоким давлением может быть внешним и внутренним. При внешнем контейнер высокого давления помещается либо в термостатированный сосуд, либо внутрь электрической печи. Важным преимуществом этого способа нагрева является то, что представляется возможность измерять температуры с более высокой точностью и создавать безградиентный нагрев рабочей зоны.

Идея применения внутреннего нагрева заключается в спланировании термических нагрузок, возникающих на стенках контейнера высокого давления. При внутреннем нагреве нагреватель помещается внутрь контейнера. Зазор между стенками цилиндра контейнера и нагревателя тщательно теплоизолируется, а сам контейнер снаружи охлаждается проточной водой. В этих условиях в рабочей зоне при высоких давлениях можно создавать более высокие температуры.

Конструкция таких нагревателей имеет спираль из высокоомной проволоки (нихром, молибден и др.), намотанной на керамическую или кварцевую трубку, которая служит каркасом нагревателя. Снаружи проволока тщательно теплоизолируется чаще всего слюдой и асбестом. Однако применение таких нагревателей в гидростатических аппаратах неудобно из-за их больших габаритов и частого выхода из строя по причине межвиткового замыкания. Для устранения этих недостатков нами разработан электрический нагреватель петельчатого типа (рис. 40), который состоит из нижнего и верхнего колец, изготавливаемых из электроизоляционного материала (форстерит, асбоцемент и др.), спирали, электротеплоизоляционного слоя, термопары и электроизоляционных колец. Во внутренней части

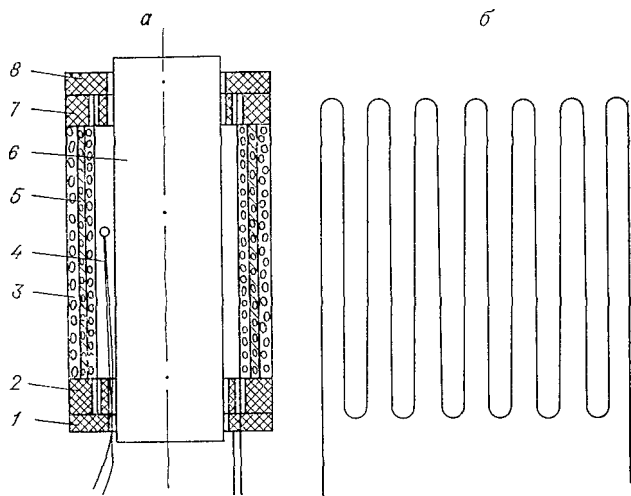


Рис. 40. Электрический нагреватель петельчатого типа.
1 и 8 — теплоэлектроизоляционные кольца; 2 и 7 — соединительные кольца; 3 — теплоизоляция; 4 — термопара; 5 — электрод; 6 — образец; 9 — развертка спирали.

нагревателя размещается образец. Как показал опыт, на изготовление нагревателя такой конструкции требуется меньше времени, чем на изготовление нагревателя спирального типа, а прочность и надежность его при работе значительно выше. Электрический нагреватель петельчатого типа позволяет снизить градиент температуры в рабочей зоне и повысить нагрев.

Изготовление нагревателя производится в следующем порядке. Перед армированием колец спиральной проволокой керамические кольца, имеющие по окружности отверстия, закрепляются на оправке. Затем по типу движения челнока проволока в определенной последовательности продевается в отверстия колец; образуется петельчатообразная спираль. Концы проволоки выводятся в одну сторону. На проволоку с наружной части нагревателя наматывается многослойная теплоэлектроизоляция в последовательности слюда — шнуровой асбест. После намотки конструкция нагревателя становится жесткой; на внутренней части нагревателя проволока остается открытой. Через специальные отверстия в нижнем кольце пропускается термопарная проволока. Спай термопары помещается в керамическую трубку внутри нагревателя, между спиралью и образцом. На торцевой части колец нагревателя устанавливаются электротеплоизоляционные кольца, внутренний диаметр которых подгоняется плотно по образцу. Это позволяет уменьшить конвекцию тепла и снизить градиент температуры на образце.

Ввод термопар и электрических проводов в рабочую камеру.

Ввод термопары в рабочую камеру аппаратов высокого давления для измерения температур очень трудоемок. Иногда их вводят непрерывными и термостатируют свободные концы. Иногда для исключения побочных т. э. д. с. применяют дифференциальные термопары, холодный спай которых размещается в области электровводов в рабочей камере. Температура холодного спая определяется либо термометром сопротивления, либо с наружной стороны к нему подводится термопара. Применяются и такие конструкции термопар, в которых т. э. д. с. исключаются методом компенсации. Все эти методы не лишены недостатков. Термопарная проволока, находящаяся под давлением, становится хрупкой, часто обламывается. Замена термопар производится обычно вместе с конусом, что вызывает определенные технические трудности.

Нами разработаны два способа ввода термопар в рабочую камеру. На рис. 41, а изображена схема ввода разорванной термопары через обратный конус. При этом концы основной термопары свариваются при помощи электродуговой сварки. К свободным концам термопары серебряным припоем прикрепляются наконечники. Обратный конус изготавливается из высоколегированной стали и имеет центральный канал, через который

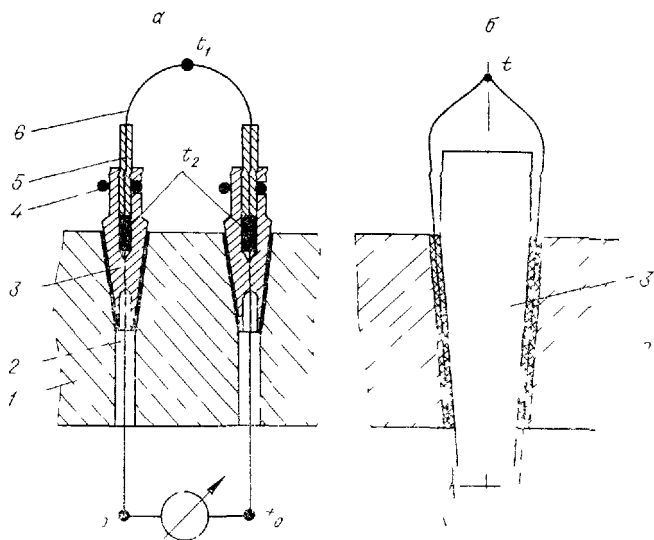


Рис 41. Ввод термопар в рабочую камеру

а — ввод разрывной термопары (1 — корпус затвора, 2 — термопарная проволока, 3 — конус, 4 — пружинное кольцо, 5 — наконечник, 6 — термопара), б — ввод неразрывной термопары через электроизоляционный уплотнительный слой (1 — термопарная проволока, 2 — корпус затвора, 3 — конус).

пропускается термоэлектрод из термопарной проволоки. Со стороны основания конус заваривается серебряным припоем и обрабатывается до твердости HRC 52. После этого конус тщательно очищается, обезжиривается, на его поверхность наносится клей БФ-2, затем он просушивается в сушильном шкафу при 120°C. На поверхность клея наносится электроизоляционный уплотнительный слой, состоящий из окиси железа и силикатного клея. После затвердевания его на воздухе конус помещается в сушильный шкаф и выдерживается при 150°C в течение двух часов. Поверхность гнезда в корпусе затвора после тщательной механической обработки также покрывается клеем БФ-2 и просушивается при 120°C. Убедившись, что поверхности электроизоляционного покрытия не имеют вздутий и раковин, конус помещают в гнездо корпуса затвора и запрессовывают легкими ударами молотка. Затвор с электропроводами обжимается гидравлическим давлением, проверяется сопротивление электроизоляции каждого термоэлектрода в отдельности (сопротивление должно быть не менее 50 МОм). После опрессовки затвора основная термопара пятачками вставляется в гнездо конуса и стопорится пружинными кольцами, что обеспечивает надежный электрический контакт.

На рис. 41, б представлена схема вводов термоэлектродов в рабочую камеру через электроизоляционный уплотнительный слой по образующей конусного штока. Такая конструкция ввода имеет большие преимущества перед вводами через обратный конус. Она позволяет вводить в рабочую камеру большое число электродов из термопарной проволоки и электрических проводов. Конусный шток изготавливается из высоколегированной стали твердостью HRC 58-62. Конусная поверхность штока тщательно обезжиривается, на нее наносится ровный слой клея БФ-2, который высушивается при 120°C в течение часа. На слой клея наносится ровный слой смеси, приготовленной из окиси железа и силикатного клея, после чего конус подогревается электрической лампой. На этот слой по окружности вдоль конуса накладываются электроды из термопарной проволоки и медных проводов, которые перед укладкой обматываются в области контакта шелковой нитью и пропитываются клеем БФ-2. Уложенные электроды по конусу закрепляются тонкой нитью, на них наносится следующий слой смеси. После затвердевания этого слоя конус помещается в сушильный шкаф и выдерживается в течение двух часов при 150°C. Гнездо в корпусе обезжиривается, и на конусную поверхность наносится тонкий слой клея БФ-2, который просушивается при 120°C. Затем конус запрессовывается в гнездо затвора.

Устройство для испытания сухих образцов на сжатие и растяжение. Испытание образцов горных пород на сжатие и растяжение в условиях высоких давлений и температур стало возможным после того, как были разработаны новые конструк-

ции тары для герметизации образцов и электрического нагревателя петельчатого типа.

На рис. 42 представлена схема испытания образцов на сжатие, состоящая из ступенчатого цилиндра, затвора, манганинового манометра, теплоэлектроизоляционного кольца, конуса штока затвора, электрического нагревателя, термопары, образца, заключенного в трубку, закрытую с обеих сторон пробками, и нагрузочного штока. Манганиновый манометр, термопара и электрический нагреватель монтируются на затворе и соединяются с электровводами при помощи электрического разъема (на рисунке не показан). Образец устанавливается на

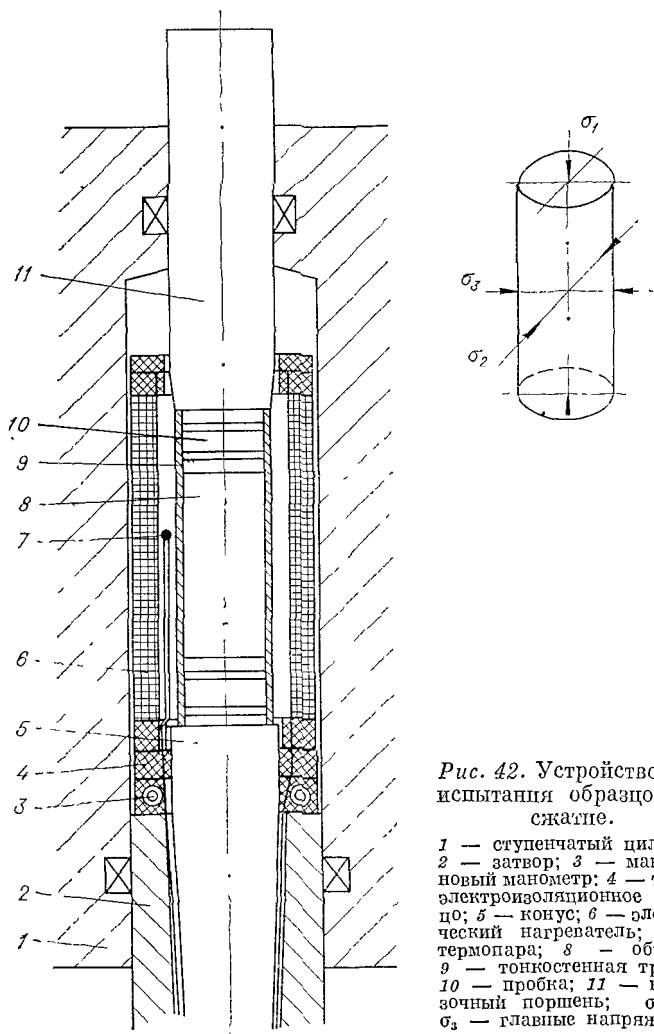


Рис. 42. Устройство для испытания образцов на сжатие.

1 — ступенчатый цилиндр; 2 — затвор; 3 — манганиновый манометр; 4 — теплоэлектроизоляционное кольцо; 5 — конус; 6 — электрический нагреватель; 7 — термопара; 8 — образец; 9 — тонкостенная трубка; 10 — пробка; 11 — нагрузочный поршень; σ_1 , σ_2 , σ_3 — главные напряжения.

штоке и центрируется нижним кольцом нагревателя. Свободный объем в камере заполняется жидкостью, которая является средой, передающей давление.

Главные компоненты напряжений в образце при испытании на сжатие распределяются таким образом: $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ($\sigma_1 = P_{вс} + \Delta P_{ос}$ — напряжение, возникающее в продольной оси образца, $\sigma_2 = \sigma_3 = P_{вс}$ — напряжение, возникающее на боковой поверхности образца).

На рис. 43 представлена схема испытания образцов на растяжение, которая состоит из ступенчатого цилиндра, затвора,

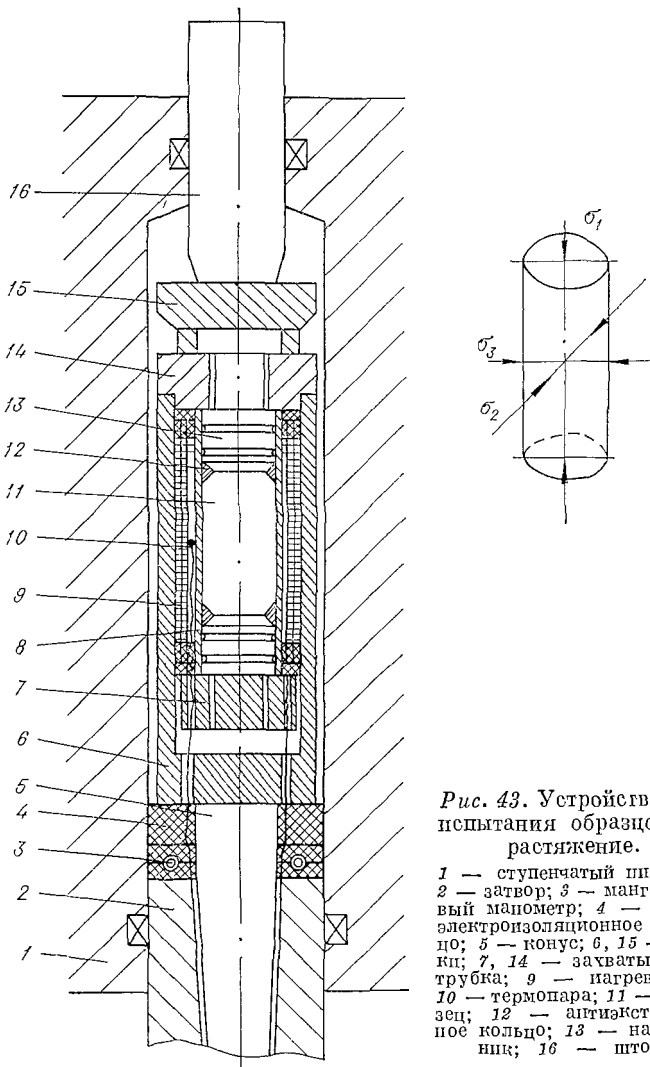


Рис. 43. Устройство для испытания образцов на растяжение.

1 — ступенчатый цилиндр; 2 — затвор; 3 — манганиновый манометр; 4 — тепло-электронизляционное кольцо; 5 — конус; 6, 15 — винты; 7, 14 — захваты; 8 — трубка; 9 — нагреватель; 10 — термопара; 11 — образец; 12 — антиэкструзивное кольцо; 13 — наконечник; 16 — шток.

манганпшного манометра, электротеплоизоляционного кольца, конусного штока, нагрузочного штока и реверсора (состоящего из нижней и верхней вилок, двух шайб, электрического нагревателя, термодары, заключенного в трубке образца, с обеих сторон закрытого наконечниками). По линии раздела образца с наконечниками устанавливаются конусные антиэлектрозивные кольца. Наконечники с вкладышами закрепляются при помощи резьбовых втулок. Шайбы заплечиками опираются на торцы вилок. Термодара и нагреватель соединяются с электродами через разъем. Испытание образца на растяжение производится при действии нагрузочного штока на верхнюю вилку реверсора, нижняя вилка, в свою очередь, опирается на конусный шток затвора. При сближении сухарей с опорными поверхностями вилок образец по оси разгружается, боковое же давление остается постоянным. Главные компоненты напряжений в образце распределяются так: $\sigma_1 < \sigma_2 = \sigma_3$ (см. рисунок), ($\sigma_1 = P_{вс} - \Delta P_{ос}$ — напряжение, в продольной оси образца).

Чтобы во время опыта не произошло разделение образца с наконечниками, σ_1 не должно принимать отрицательного значения.

Устройство для испытания образцов на сжатие и растяжение с независимым поровым давлением. Для изучения горных пород при независимом поровом давлении нами разработано специальное устройство, схема которого представлена на рис. 44. Образец заключается в медную гильзу. Гильза с одной стороны закрывается штоком, который является продолжением образца, с другой — пробкой с отверстием и обжимается по способу, описанному выше для герметичной тары. На затворе монтируется электрический нагреватель с термодарой. Электросвязь нагревателя и термодары с внешним источником питания и регистрирующими приборами осуществляется через электрические вводы. На хвостовике штока в специальной капавке устанавливается резиновое уплотнительное кольцо, после чего на затвор опускается ступенчатый цилиндр. Затем камера сверху заполняется рабочей жидкостью и в нее вводится образец со штоком. Свободный конец гильзы подвигается на хвостовик конусного штока и уплотняется резиновым кольцом. При создании рабочего давления медная гильза обжимается и задавливается в свободные капавки, что обеспечивает надежную герметизацию на протяжении всего опыта.

Поровое давление подается в образец встроенным в аппарате специальным источником давления — мультипликатором, который соединяется со штоком-затвором (мультипликатор на схеме не показан). Жидкость через канал в штоке поступает в образец, предварительно обжатый всесторонним давлением, создаваемым в рабочей камере.

Во время испытания как при растяжении, так и при сжатии поровое давление $P_{п}$ по своей величине всегда должно быть

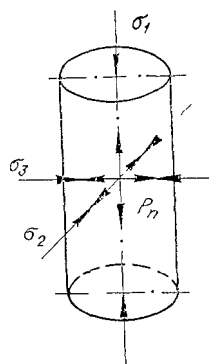
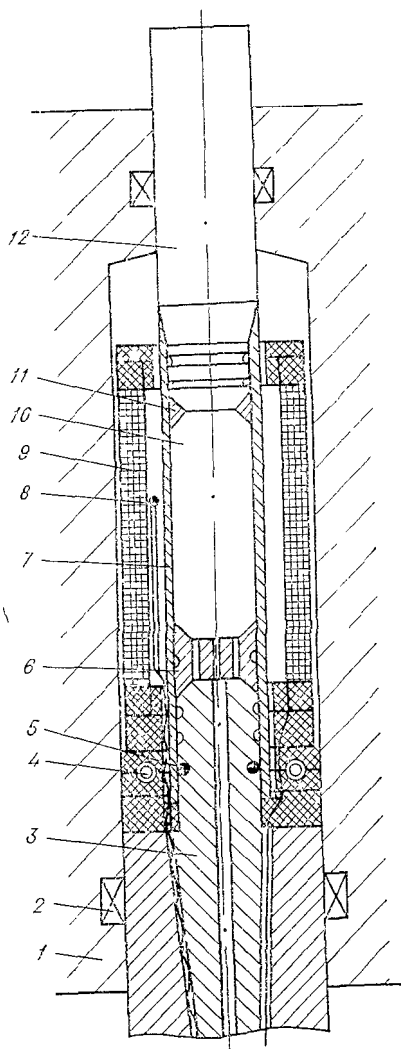


Рис. 44. Устройство для испытания образцов на сжатие и растяжение с независимым поровым давлением.

1 — ступенчатый цилиндр; 2 — затвор; 3 — конус; 4 — манганиновый манометр; 5 — уплотнительное кольцо; 6 и 11 — антиэкструзивные кольца; 7 — тонкостенная трубка; 8 — термопара; 9 — электрический нагреватель; 10 — образец; 12 — шток.

меньше всестороннего давления $P_{вс}$. В противном случае происходит разуплотнение трубки со штоком.

При нагружении образца тремя независимыми давлениями (в соответствии с принципом эффективного напряжения Терцаги) все нормальные напряжения в твердом каркасе породы уменьшаются на P_n . Чтобы определить значения эффективных главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 , необходимо заменить внешнее давление эффективным всесторонним: $P_{вс} - P_n$. Нормальное напряжение σ_n и скалывающее τ на любой плоскости, парал-

лельной σ_2 и наклоненной под углом θ к σ_1 , могут быть рассчитаны по формулам

$$\sigma_{\pi} = \{[(\sigma_1 + \sigma_3)/2] - [(\sigma_1 - \sigma_3)/2]\} \cos 2\theta,$$

$$\tau = [(\sigma_1 - \sigma_3)/2] \sin 2\theta.$$

Измерение термодинамических параметров и механических характеристик. При исследовании твердых тел под давлением для измерения термодинамических параметров и механических характеристик используются различные измерительные приборы и датчики-преобразователи. Последние размещаются в рабочей камере вместе с испытуемым образцом, а измерительные приборы — за ее пределами. Их электрическая связь осуществляется с помощью герметичных вводов, состоящих из обратного конуса и электрического провода. Ввод такой конструкции электродов в рабочую камеру в большом количестве по техническим трудностям невозможен, а следовательно, использование необходимого числа датчиков-преобразователей ограничивается.

В нашем аппарате электрические провода в рабочую камеру вводятся по поверхности образующей обратного конуса. Благодаря такому техническому решению количество вводов увеличивается, расширяются возможности для одновременного применения большего числа измерительных схем.

Контроль всестороннего давления. Для измерения высокого давления в гидростатических аппаратах наиболее удобны манганиновые манометры. Их высокая чувствительность позволяет проводить надежные измерения давлений до 30 000 кг/см² с погрешностью менее 1,5%; при давлениях до 15 000 кг/см² погрешность измерения составляет 0,5% (Атанов, Иванова, 1971). В нашем аппарате используются два типа манганиновых манометров: манометр конструкции К. А. Алексеева (имеющий керамическую катушку, в канавке которой размещается спираль из манганиновой проволоки) и манганиновый манометр в виде кольца, разработанный нами для работы при повышенных температурах. Конструкция такого манганинового манометра представлена на рис. 45. Корпус манометра состоит из двух разъемных колец, изготовленных из абсцемента и скрепленных между собой винтами. В одном из колец проточена канавка, в которой размещается спираль из манганиновой проволоки марки ПЭМС диаметром 0,08 мм и сопротивлением

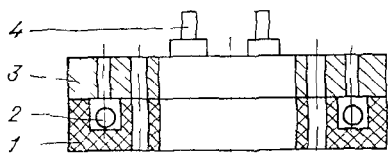


Рис. 45. Манганиновый манометр.
1 — керамическое кольцо, 2 — спираль для манганиновой проволоки, 3 — верхнее кольцо, 4 — электрод.

100 Ом. К спирали, навитой из манганиновой проволоки дуговой электросваркой, привариваются концы из медной проволоки, при помощи которых спираль подсоединяется к электродам. Для свободного доступа к спирали среды, передающей давление, в верхнем кольце манометра имеются отверстия. Изготовленный таким образом манганиновый манометр термообрабатывается по методике Ю. А. Атанова и Е. М. Ивановой. Пьезокоэффициент манометра определяется по формуле

$$K = (1/R_0) \cdot (\Delta R/P),$$

где R_0 — сопротивление манганинового манометра; ΔR — изменение сопротивления от давления.

Градуйровка нашего рабочего манганинового манометра производилась по эталонному манганиновому манометру, полученному из ВНИИФТРИ в 1968 г. При градуировке оба манометра одновременно помещались в рабочую камеру. Электрическая связь с источником питания и регистрирующими приборами осуществлялась через электровводы. Рабочий манганиновый манометр включался в измерительную цепь по мостовой схеме (рис. 46), состоящей из магазина сопротивлений $P33$, усилителя постоянного тока ТДА-3 и потенциометра ЭПП-09. Усилитель постоянного тока имеет пять ступеней усиления: 2,5; 5; 10; 25; и 50, что позволяет производить градуировку шкалы давления на пять пределов измерения: 20 000, 16 000, 12 000, 8000 и 4000 кГ/см². При этом первые два предела дают возможность измерять давления более грубо — ошибка 1—2%, а остальные — с точностью до 1%.

Блок-схема измерительной цепи эталонного манганинового манометра состоит из постоянного моста МОД-58 и микроамперметра М-195/1.

Градуйровка рабочего манганинового манометра производилась ступенчато через каждые 1000 кГ/см²; нагрузка давлением и разгрузка во время тарировки манометра проводится

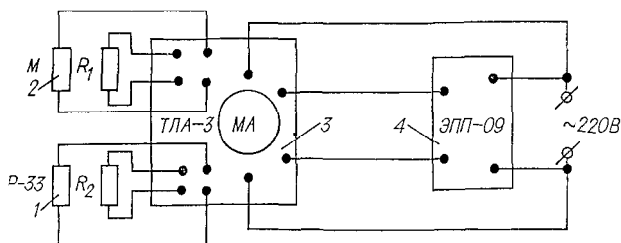


Рис. 46. Блок-схема измерения гидростатического давления.

1 — магазин сопротивлений; 2 — манганиновый манометр;
3 — тензометрический усилитель; 4 — электронный самописец;
 R_1 и R_2 — балластные сопротивления.

по несколько раз, что дает возможность более точно определять отклонение движка потенциометра в зависимости от давления и получать градуировочную кривую.

Определение осевой нагрузки. Измерение осевой нагрузки с автоматической записью на диаграммную ленту представляет технически трудную задачу. Для этого нами специально разработана измерительная блок-схема (рис. 47), позволяющая включать сплюсмеритель, описанный в главе II. Эта схема состоит из потенциометра (ЭПП-09), тензометрического усилителя (ТДА-3), магазина сопротивлений (РЗЗ), балластного сопротивления, рабочих и компенсационных тензодатчиков. Тензодатчики сопротивления включаются в измерительную цепь по мостовой схеме. Во избежание разбалансировки моста рабочим током тензодатчики, составляющие плечи моста R_1 и R_2 , R_3 и R_4 , подбираются одинакового сопротивления. Зависимость осевого усилия между показаниями прибора и измеряемой величиной можно установить путем тарировки или приближенно методом расчета:

$$\theta = f(E, F, \varepsilon),$$

где E — модуль упругости кольца; F — площадь кольца; ε — деформация кольца. Деформация кольца определяется при помощи тензодатчиков сопротивления, наклеенных на кольцо, и рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \Delta R / K' R,$$

где R — сопротивление рабочих тензодатчиков; ΔR — приращение сопротивления; K — чувствительность датчика.

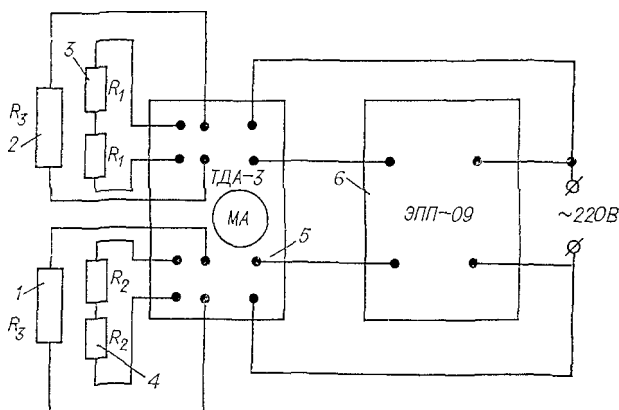


Рис. 47 Блок-схема измерения осевой нагрузки.

1 и 2 — балластные сопротивления, 3 — рабочие тензодатчики, 4 — компенсационные тензодатчики, 5 — тензометрический усилитель, 6 — электронный самописец

Тарировка силоизмерителя производится под прессом при помощи эталонного динамометра. Эталонный динамометр и силоизмеритель устанавливаются под пресс и подключаются к регистрирующим приборам. Показания силоизмерителя записываются на диаграммную ленту потенциометром ЭПП-09. Шкала потенциометра имеет пять пределов чувствительности и соответственно градуируется отдельно по каждому пределу. Эти пределы устанавливаются усилителем, который имеет следующие коэффициенты усиления: 2,5; 5; 10; 25 и 50. Силоизмеритель может измерять осевые нагрузки $15 \cdot 10^3$; $7,5 \cdot 10^3$; $3 \cdot 10^3$; $1,5 \cdot 10^3$ и $0,75 \cdot 10^3$ кг/см². Это дает возможность для каждого отдельного испытания в зависимости от прочности образцов выбрать шкалу усилий, следовательно, изменять точность измерения осевых нагрузок. Практически шкалы нагрузок на всех пределах имеют линейную зависимость, чувствительность их колеблется от 10 до 60 кг.

Создание и регистрация температуры под давлением. Если нагрев образца производить плавно, с постоянной скоростью, то через некоторое время в каждой его точке устанавливается квазистационарный режим изменения температуры. Он характеризуется: 1) параболической зависимостью распределения температуры в образце, 2) независимым от времени после достижения постоянного режима градиентом и 3) постоянной величиной градиента поля температуры. Квазистационарный режим нагрева желателен во всех опытах, проводимых при высоких температурах. Однако практически такие условия в рабочих камерах высокого давления создать трудно из-за их малых объемов и большого отвода тепла стенками цилиндров, а также несовершенства конструкции нагревателей. Разные исследователи эту задачу решали по-разному. Очень важно разработать схему питания электрического нагревателя рабочим током, которая бы позволяла плавно регулировать ток в цепи и исключала плавки на термодатчики электрических измерительных схем. В литературе описываются различные устройства и схемы для плавного регулирования тока в нагревательной цепи (Алабужев, 1969; Берг, 1970; Ряпосов, 1972), которые могут быть использованы при исследовании деформации горных пород под давлением. Разработанная нами блок-схема для питания нагревателя электрическим током (рис. 48) имеет ручной привод, который позволяет плавно регулировать ток в электрической цепи. Блок-схема состоит из стабилизатора (СТ-2500), автотрансформатора (РНУ-250-2), разделительного трансформатора, вольтметра, амперметра и петельчатого электронагревателя. Напряжение и ток в цепи источника питания контролируются стрелочным вольтметром и амперметром. Омическое сопротивление нагревателя подбирается таким, чтобы напряжение в цепи при максимальной мощности не превышало 80 В, в противном случае возникают частые пробой изоляции вводов,

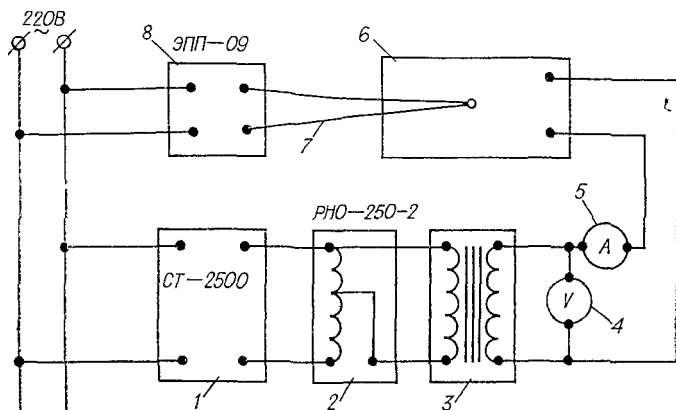


Рис. 48. Блок-схема питания электрического нагревателя и регистрация температуры.

1 — стабилизатор тока, 2 — автотрансформатор, 3 — разделительный трансформатор, 4 — вольтметр, 5 — амперметр; 6 — нагреватель, 7 — термопара, 8 — электронный самописец.

что приводит к короткому замыканию. Контроль температуры осуществляется хромель-алюмелевой термопарой. Показания температуры записываются на диаграммную ленту потенциометром ЭПП-09, шкала которого отградуирована на продольную температуру 1100°C . Такая схема позволяет менять режим нагрева и устанавливать нужную рабочую температуру в процессе опыта с минимальными колебаниями $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Электросвязь нагревателя с внешним источником питания осуществляется через электрические вводы, изолированные от корпуса. Омическое сопротивление электроизоляции вводов должно быть не менее 50 МОм.

Для регистрации температуры в рабочей камере нами использовались как разрывные, так и сплошные хромель-алюмелевые термопары (см. рис. 41). Наиболее выгодны разрывные термопары, так как их замена не требует разборки всего узла электровводов. Погрешности же показаний температуры разрывной термопары в отличие от сплошной не превышают 1%. Это подтверждается и теоретическими предположениями (Турчин, 1959).

Регистрация деформации образцов тензодатчиками. В процессе нагружения образца горной породы неравными высокими давлениями в нем наблюдается упругая и пластическая деформации. Для их измерения одновременно используются два метода: метод измерения при помощи тензодатчиков и метод измерения по смещению штока, причем во время опытов в некоторых пределах деформации эти методы друг друга дублируют. При помощи тензодатчиков устанавливается также и момент соприкосновения штока с образцом.

Метод измерения деформации тензодатчиков очень чувствителен и позволяет получать значения вплоть до деформаций 10^{-6} . Однако серьезным недостатком его является низкий предел измеряемых деформаций. Тензодатчики закрепляются на образце при помощи эпоксидного клея, приготовленного по рецепту А. Н. Ставрогина. Клей содержит смолу ЭД-5 — 82,2%, триэтаноламин — 5,35%, дибутилфтолат — 12,45%. Два тензодатчика располагались строго по оси образца на противоположных сторонах и два — по окружности. Для регистрации изменения сопротивления применялась измерительная блок-схема (рис. 49), состоящая из рабочего тензодатчика, балластного сопротивления, тензометрического усилителя (УТЧ-1), дополнительного регулируемого сопротивления (РЗЗ) и шлейфного осциллографа (Н-700). В осциллографе изменена кинематическая схема протяжки ленты, которая составляет 8 мм/мин, и встроены блок питания, позволяющий подключать осциллограф непосредственно к электрической сети переменного тока напряжением 220 В. Рабочий тензодатчик сопротивлением R_1 подключается в измерительную цепь по мостовой схеме, в которой в качестве плеч применяются переменное сопротивление R_2 (магазин сопротивлений РЗЗ) и сопротивления R_3 и R_4 . В процессе испытания образца каждый рабочий датчик подключается в отдельный независимый канал измерительной цепи, электрический сигнал которого усиливается и подается на рамку гальванометра. Проходящий луч через систему зеркал отклоняется в зависимости от величины сигнала и фиксируется на транспортируемую в кассете ленту. Отсчет производится от нулевой линии, которая записывается от отдельного гальванометра.

Деформацию образца при обычных условиях находим из выражения $\varepsilon = \Delta R / K' R$.

Измерение деформации в условиях всестороннего давления связано с некоторыми техническими трудностями из-за допол-

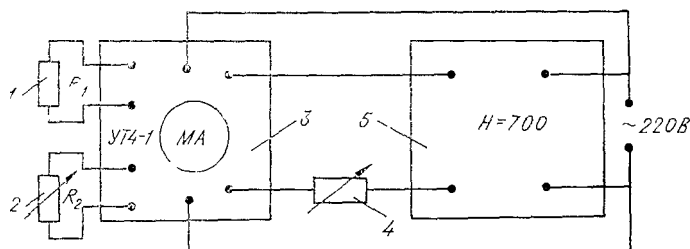


Рис. 49. Блок-схема измерения деформаций тензометрическим методом.

1 — рабочий тензодатчик, 2 — балластное сопротивление; 3 — тензометрический усилитель; 4 — дополнительное переменное сопротивление, 5 — осциллограф Н-700.

нительной деформации тензодатчика от приложения к нему всестороннего давления. Исключить эту деформацию при помощи компенсационных датчиков в камерах давления весьма сложно. Поэтому рабочие тензодатчики тарируются по давлению и температуре, т. е. получается зависимость $\Delta R = f(P, T)$. После этого деформация образца определяется по формуле

$$\varepsilon = \{\Delta R_{\Pi} - \Delta R_{P,T}\} / K'R,$$

где ΔR_{Π} — полное приращение сопротивления; $\Delta R_{P,T}$ — приращение сопротивления от всестороннего давления и температуры.

В нашем случае, когда измененный сигнал автоматически записывается на осциллограммную ленту, деформация находится из выражений

$$\varepsilon_1 = \mu (h_{n_1} - h_T) / K'R, \quad \varepsilon_2 = \mu (h_{n_2} - h_T) / K'R,$$

где h_{n_1}, h_{n_2} — отклонение луча; h_T — отклонение луча при тарировке; $\mu = \Delta R/h$ — масштаб цены деления.

Такой метод измерения деформации при тщательной тарировке рабочих тензодатчиков и балансировке измерительной схемы позволяет измерять деформацию с погрешностью до 1,5%.

Контроль деформации по смещению штока. Метод измерения деформации образца по смещению штока под высоким давлением впервые был предложен П. Бриджменом (1948). С его помощью он исследовал объемы различных веществ. В нашем гидростатическом аппарате методом смещения штока измеряется продольная деформация образца. Этот метод позволяет изучать в образцах горных пород большие деформации со снятием диаграмм напряжение — деформация вплоть до 30% деформации образца, а также исследовать трение — скольжение на плоскостях сдвига и скорости упругих волн в зависимости от всестороннего давления, температуры и дифференциального давления.

На рис. 50 изображена схема связи измерительных систем. Механическая измерительная система включает в себя конус, нагрузочный шток, которые изготавливаются из прочных материалов, нижнее и верхнее коромысла, две штанги и измерители деформации. Штоки, связанные при помощи коромысел, штанги и измерителей деформации, образуют жесткую измерительную цепь. Образец, заключенный между штоком и конусом, контролируется с высокой надежностью. После проведения тщательной тарировки системы по нагрузке такой способ позволяет измерять упругие деформации ε_y с погрешностью до 0,4%, а пластические — ε_{Π} — с погрешностью, пропорциональной увеличению деформации образца. В качестве измерителей

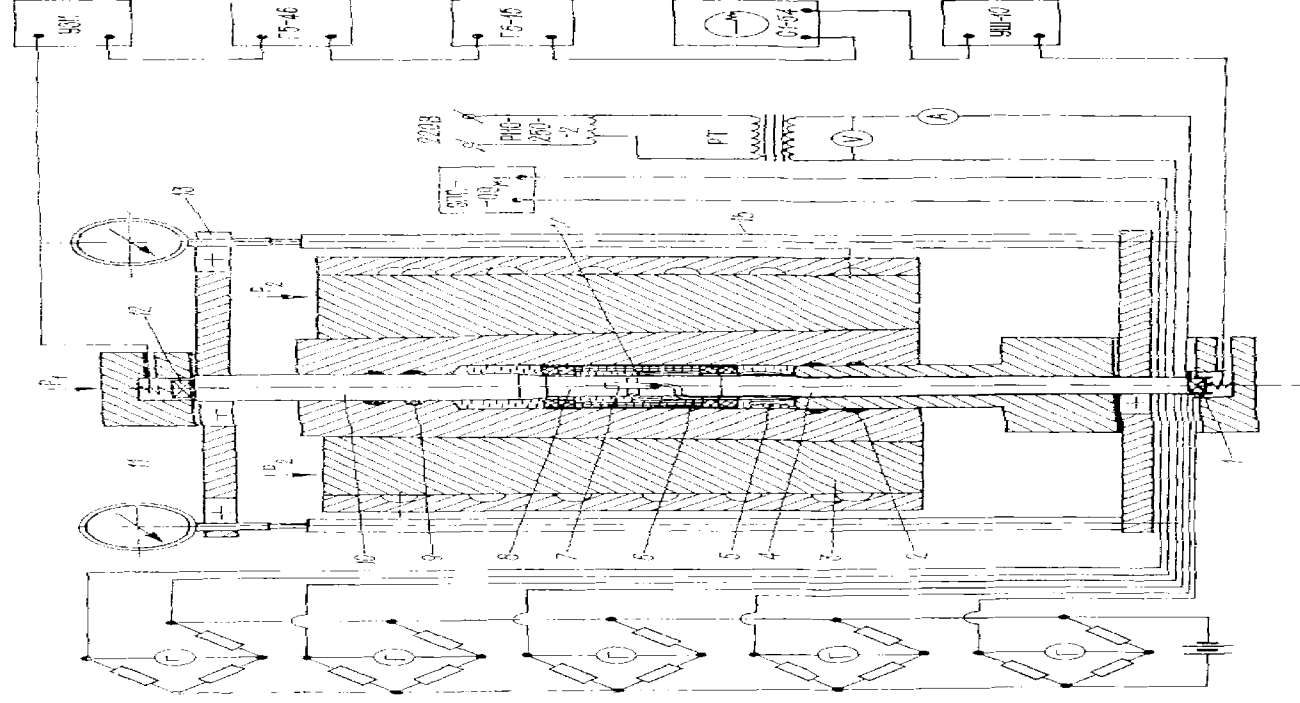


Рис. 50 Схема
для измерения
зависимости
сопротивления
термистора от температуры

Обозначения

- 1 и 12 — изоляция,
2 и 9 — упорные
лодки, 3 — колпачок,
4 — катушка, 5 — провод,
6 — индукционный нагреватель,
7 — термопара,
8 — обмотка, 10 — обмотка
преобразователя,
11 — измерительный
узел, 12 — обмотка,
13 — термистор, 14 —
индикатор, 15 — резистор
схема, 16 — источник
тока, 17 — источник
тока, 18 — источник тока

смещения штока могут использоваться индикаторы часового типа, позволяющие производить отсчет показаний смещения штока визуально, или индукционные и другие преобразователи, с помощью которых можно автоматически записывать значения деформаций на диаграммную ленту.

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР

Для исследования скоростей распространения упругих волн в твердых телах широко используется импульсный метод, в основе которого заложены идеи радиолокационной и радиоэлектронной техники.

Распространяющиеся в образце горной породы волны могут рассматриваться как плоские, скорости которых зависят от модуля упругости среды и ее плотности. Если, например, радиус цилиндрических образцов a относится к длине волны λ как $a/\lambda < 0,5$, то упругая волна распространяется в этом образце со стержневой скоростью. При $a/\lambda > 0,5$ скорость упругой волны будет соответствовать скорости в массиве (Силаева, 1959). Длина образца при этом должна быть такой, чтобы в ней укладывалось 4—5 длин волн (Берч, 1964). При соответствующем подборе пьезодатчиков по частоте ультразвуковой импульсный метод стало возможным применять в аппаратах высокого давления для изучения в горных породах скоростей упругих волн в зависимости от давления и температуры. Пьезодатчики (излучатель и приемник) закрепляются непосредственно на образце, на противоположных его торцах и находятся вместе с образцом в среде, передающей давление. Запускаемый генератором электрический прямоугольный импульс преобразовывается излучателем в механический импульс и посылается длительностью τ с частотой f через образец длиной l . Пропецивший через образец импульс принимается датчиком-приемником, расположенным на противоположной стороне образца, усиливается и регистрируется осциллографом. Скорость распространения упругого импульса в образце определяется по формуле

$$c_p = l/(t - t_{a3}),$$

где t — время, регистрируемое на осциллографе; t_{a3} — аппаратная задержка.

В нашем аппарате (см. рис. 50) пьезодатчики размещаются в рабочей камере на торцах поршня и контуслого штока, которые являются звуковыми. Скорость распространения

упругих волн вычисляется с учетом изменения длины образца, которая контролируется при помощи тензодатчиков, наклеенных на боковую поверхность образца, и по смещению поршня, регистрируемому внешней измерительной цепью. Скорость распространения упругих волн в образце рассчитывается по соотношению

$$c_{P,T} = l/(t - t_{a3})$$

($t_{a3} = t_{03} + t_{33}$ — аппаратная задержка, состоящая из электронной задержки t_{03} и задержки в звуководах t_{33}). Для определения задержки прохождения импульса в звуководах в зависимости от давления и температуры было изготовлено несколько образцов различной длины из стали Р18 твердостью НРС 62-63, т. е. из того же материала, из которого изготовлены звуководы. С каждым последующим нагружением образцы помещались в рабочую камеру различной длины (разница составляла 10 мм). Это давало возможность более точно установить приращение временной задержки прохождения импульса в звуководах в условиях повышенных давлений и температур.

Нагружение образца давлением производилось сначала всесторонним давлением, а затем осевым вплоть до 35 000 кГ/см². Отсчет показаний временной задержки прохождения импульса осуществлялся через каждые 1000 кГ/см². Нагружение образцов производилось с одновременным их нагревом до 500°C; были получены усредненные значения приращения скоростей упругих волн в звуководах. Для измерения скорости упругих волн в образцах горных пород используется стандартная радиоэлектронная аппаратура. Блок-схема электронной аппаратуры представлена также на рис. 50. Она состоит из генератора (Г5-4Б), усилителя запускающих импульсов, пьезоизлучателя, пьезоприемника, широкополосного усилителя (УШ-10) и осциллографа (СГ-54). Генератор вырабатывает короткие импульсы амплитудой 100—120 В, которые подаются на усилитель запускающих импульсов. Импульс длительностью 0,2—0,5 мкс, усиленный в 7—10 раз, возбуждает пьезоизлучатель. Пройденные через образец упругие колебания принимаются пьезодатчиком-приемником. Преобразованный сигнал усиливается широкополосным усилителем и падает на вход осциллографа. Скорость прохождения упругого импульса отсчитывается с момента посылки импульса генератором и начала первого вступления на осциллограф электроно-лучевой трубки. Одновременность возбуждения пьезодатчика-излучателя и запуска горизонтальной развертки осциллографа осуществляется генератором синхронизирующих импульсов. Отсчет показаний времени распространения упругих волн производится по лимбу электронной задержки генератора с точностью $\pm 0,5$ мкс.

ВЛИЯНИЕ ВСЕСТОРОННЕГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОКАЗАНИЯ ТЕНЗОДАТЧИКОВ

Плани экспериментально исследовалось влияние всестороннего давления на поведение двух связующих: клея БФ-2 и эпоксидного, состоящего из смолы ЭД-5—82,2%, тристапаламина — 5,35% и дибутилфталата — 12,4%. Для этого на цилиндрический стержень из победита ВК-8 наклеивалось по четыре тензодатчика на бумажной подложке марки 2ПЖБ. В первом случае наклейка тензодатчиков производилась клеем БФ-2 по методике, описанной Д. Т. Анкудиновым и К. Н. Мамаевым (1968). На подготовленную поверхность цилиндра наносился тонкий слой клея, который в течение 15 мин сушился на воздухе, затем одновременно нижнюю поверхность подложки тензодатчика и поверхность цилиндра покрывали вторым слоем клея. Тензодатчики через папиросную бумагу и мягкую прокладку с усилием 4—5 кг/см² прижимали к цилиндру. После этого цилиндр с закрепленными датчиками подвергался тепловой обработке в муфельной печи по приведенному режиму:

| Нагрев, °С | Время нагрева, мин | Выдержка, мин |
|------------|--------------------------|------------------|
| 70 | 50 | 60 |
| 140 | 70 | 120 |
| 180 | 40 | 120 |

Во втором случае наклейка тензодатчиков производилась эпоксидным клеем под давлением по методу А. П. Ставрогина. На обработанную поверхность образца наносился слой клея и прикладывались тензодатчики, которые затем обматывались папиросной бумагой. Приготовленный таким образом образец заключали в хлорвиниловую трубку, герметично закрытую пробками, после чего трубку с образцом помещали в жидкостную камеру и выдерживали под давлением 200 кг/см² в течение 18—20 ч. Качество приклейки тензодатчиков проверяли на контрольном стенде, нажимая на тензодатчик мягким предметом до момента отклонения стрелки гальванометра. Приклейка считалась удовлетворительной, когда относительная деформация после прекращения нажатия не превышала 10—15%. Сопротивление изоляции при наклейке составляло не менее 50 МОм. Цилиндр с наклеенными тензодатчиками закреплялся на затворе (см. рис. 50) при помощи установочных шайб.

Электрическая связь с регистрирующей аппаратурой осуществлялась через электровводы, проходящие в электроизоляционном уплотнительном слое по образующей конуса затвора. Для электровводов использовались медные провода в шелковой оплетке диаметром 0,4 мм. Ввод медных проводов в рабочую камеру производился по вышеописанной методике. Тензодатчики включались в электрическую измерительную цепь по двум схемам: в схему, регистрирующую изменение деформации

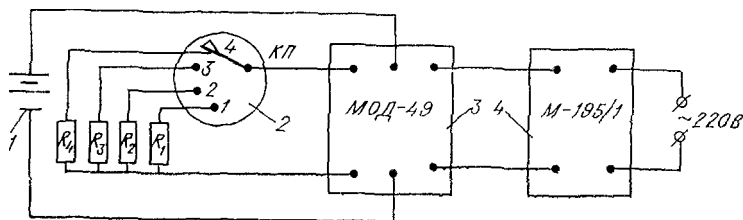


Рис 51. Измерительная блок-схема с последовательным включением тензодатчиков.

1 — источник постоянного тока, 2 — переключатель, 3 — мост постоянного тока, 4 — микроамперметр

тензодатчиков гальванометром, и схему с автоматической записью измененного сигнала на осциллограммную ленту. Блок-схема, регистрирующая деформацию с помощью гальванометра, представлена на рис. 51. Она состоит из двухполюсного шестиконтактного переключателя, моста постоянного тока (МОД-49), микроамперметра (М-195/1) и источника питания постоянного тока.

Мост МОД-49 в измерительную цепь включался по схеме двойного моста. Отсчет показаний деформаций тензодатчиков при нагружении всесторонним давлением производился ступенями через 1000 кг/см^2 . Каждый тензодатчик включался в измерительную цепь в порядковой последовательности. Температура в рабочей камере при этом контролировалась хромель-алюмелевой термопарой. Показания снимались в том момент, когда температура в рабочей камере не отличалась от комнатной. Отсчеты брались как при нагрузке, так и при разгрузке. Эксперименты показали, что при разгрузке опытные точки имеют большой разброс, однако построенные по ним кривые подобны.

На рис. 52 представлены две группы экспериментальных кривых $\varepsilon = f(P)$. Кривые 1—3 получены при закреплении тензодатчиков на победитовом образце эпоксидным клеем ЭД-5. Каждая кривая является усредненной

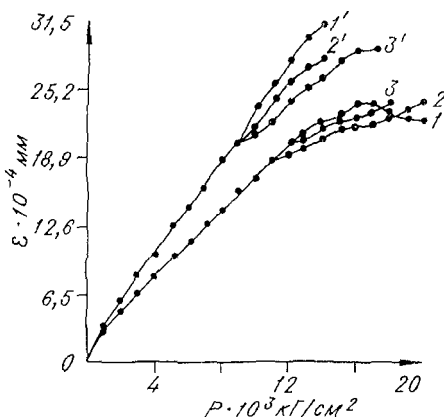


Рис. 52. Влияние всестороннего давления на деформации тензодатчиков.

1—3 датчики, закрепленные клеем ЭД-5, 1'—3' датчики, закрепленные клеем БФ-2.

для четырех тензодатчиков. Все кривые, полученные при нагружении в области давлений от 1000 до 11 000 кг/см², имеют хорошее совпадение и сохраняют линейный характер изменения деформации. В области давлений, лежащей за пределами 11 000 кг/см², показания деформации отклоняются от линейной зависимости. Это связано с потерей механической прочности клея. При давлениях до 16 000 кг/см² часто разрывалась проволока чувствительного элемента тензодатчика. Неустойчивая работа тензодатчиков наблюдалась выше 10 000 кг/см². На это обращалось внимание и другими исследователями (Розанов и др., 1973). Устами наблюдались отклонения от линейной зависимости и в области давлений от 0 до 1000 кг/см², связанные с большой погрешностью измерения начального давления.

Кривые I' — $3'$ получены при работе с закрепленными тензодатчиками на победитовом образце при помощи клея БФ-2. Каждая кривая также является усредненной для четырех тензодатчиков. Все кривые в пределах давлений от 1000 до 9000 кг/см² имеют расхождения в 1,5%. Неустойчивая работа тензодатчиков наблюдалась раньше, а характер поведения кривых говорит о большой деформации тензодатчиков. Для проверки работоспособности клея БФ-2 и ЭД-5 в обычных условиях применялась тарировочная упругая балочка. Тензодатчики наклеивали на нее по вышеописанной методике. Перемещение упругой балочки измерялось часовым индикатором. В процессе нагружения снимались экспериментальные кривые, которые отражали линейную зависимость деформаций тензодатчиков от всестороннего давления и имели хорошее совпадение в широком диапазоне деформаций.

Проводились опыты и по определению влияния стенки медного герметичного чехла на показания деформации образца. Для этого применялись образцы из стали Р18 твердостью HRC 60-62. Два образца заключали в герметичный чехол, состоящий из медной гильзы толщиной стенки 0,3 мм и двух пробок. Другие два образца исследовались без чехла. В первом случае клеим ЭД-5 тензодатчики закреплялись на поверхность гильзы, в другом — непосредственно на образце. Образцы подвергались гидростатическому давлению. Отсчет велся через каждые 1000 кг/см² (рис. 53). Кривая 1 характеризует деформацию образца с гильзой, кривая 2 — без нее. При статистической обработке кривых установлено, что они разнятся между собой в пределах 7%. Эта величина очень мала, и при опытах ее можно не учитывать.

Для определения погрешности механической измерительной цепи были проведены многочисленные эксперименты. Вместо рабочего образца использовался эталонный, представляющий собой цилиндрический стержень диаметром 18 мм и длиной 35 мм. Этот образец под действием давления обладал такой

низкой сжимаемостью, что она нами пренебрегалась. В результате многократных нагружений образца гидростатическим и осевым давлением в широком интервале температур была установлена деформация элементов аппарата, составляющих измерительную систему. Она складывается в основном из упругой деформации штоков и поршней. Суммарное значение деформаций измерительной системы выразим через Δ . Его делим на число измерений n , получаем среднее значение абсолютной погрешности S . Составляя таблицу поправок, находим величину поправки $\Delta V = S$, которую можно выразить в табличной или графической форме. Теперь из каждого значения суммарной погрешности Δ вычитаем систематическую составляющую l , находим случайную составляющую погрешности X . Для оценки возможных средних величин случайной погрешности подсчитываем ее среднеквадратичное значение:

$$\sigma = \sqrt{\sum X^2/n}.$$

Среднеквадратичная ошибка деформации в наших опытах не превышает 0,008 мм. (По этой методике оценивались среднеквадратичные ошибки для всех измерительных систем.)

При получении экспериментальных результатов изменения физических величин приходится сталкиваться с определенными трудностями. Аппаратура высокого давления позволяет контролировать условия опыта и измерения размеров образца косвенным и прямым методами. Погрешность измерительных приборов тесно связана с непосредственной градуировкой их и совокупностью следующих основных факторов: погрешностью показаний прибора, погрешностью эталонного образца, по которому устанавливается шкала прибора, погрешностью связанной с отклонением нормальной температуры, погрешностью, связанной с влиянием давления на датчик-преобразователь, погрешностью от параллакса.

Для определения суммарной погрешности метода измерения по отдельным составляющим используется, как правило, суммирование случайных погрешностей. Если отдельные составляющие суммарной погрешности являются независимыми, а их рассеивание характеризуется величинами депрессий D_{X_i} ,

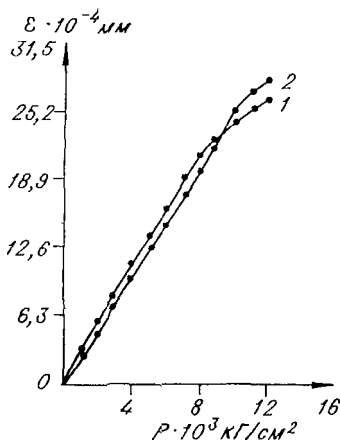


Рис. 53. Деформация стенки капсулы в зависимости от всестороннего давления.

1 — деформация образца без капсулы; 2 — то же с капсулой.

D_{x_2}, \dots, D_{x_n} , то среднеквадратичная погрешность метода измерения определяется по формуле

$$\sigma_{\text{сум}} = \sqrt{D_{x(\text{сум})}}.$$

где $D_{x(\text{сум})} = D_{x_1} + D_{x_2} + \dots + D_{x_n}$. Предельная погрешность метода измерения

$$\Delta \text{lim}_{\text{сум}} = 3\sigma_{\text{сум}}.$$

При распределении погрешностей отдельных составляющих по нормальному закону (что отвечает практически условиям в измерительной технике) предельная погрешность определяется по формуле

$$\Delta \text{lim}_{\text{сум}} = \sqrt{\Delta_{\text{lim}1}^2 + \Delta_{\text{lim}2}^2 + \dots + \Delta_{\text{lim}n}^2},$$

где $\Delta_{\text{lim}1}, \Delta_{\text{lim}2}, \dots, \Delta_{\text{lim}n}$ — предельные погрешности составляющих.

Предельная относительная погрешность метода находится из выражения

$$m = (\Delta \text{lim}_{\text{сум}}/y) \cdot 100\%$$

(y — измеряемая величина).

Таким методом нами определена максимальная погрешность для всех измерительных систем. Она составляет для всестороннего давления 1—1,3%, для дифференциального — 1—1,5%, температуры — 1,2%, деформации образца по смещению штока — 1%, деформации образца тензодатчиками — 1—1,3% и скорости упругих волн 1—1,2%.

ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ГОРНЫХ ПОРОД

Проведение экспериментов по деформированию горных пород при высоких давлениях и температурах связано с изучением нарушений сплошности и складкообразования в породах, залегающих в недрах Земли. Наблюдения показывают, что на прочность и пластичность горных пород влияют прежде всего вид напряженного состояния и среда, заполняющая пустоты в породе. Экспериментальной характеристикой течения материала и его разрушения считается диаграмма напряжение — деформация, с помощью которой можно в первую очередь определить, при каких условиях образуются нарушения сплошности в породах, и сопоставить опытные данные с натурными. Если для металлов критерии течения Мизеса и Треска дают хорошую сходимость, то для горных пород они являются мало применимыми.

Для исследования были взяты две разновидности пород глубинного происхождения: ультраосновная порода — оливинсодержащий энстатит с крупнозернистой плотной текстурой, темно-зеленого цвета, и основная порода — базальт с мелкозернистой плотной стеклообразной текстурой, черного цвета, с отдельными зернами оливина, реже пироксена в виде включений. Эти породы относятся к хрупким материалам, которые в обычных условиях разрушаются без видимой пластической деформации.

Оливинсодержащий энстатит взят из скважины в районе Мончегорска с глубины 725 м. Он имеет гнидиоморфную структуру (средний размер зерен 1—2 мм в диаметре) и сложен в основном зернами энстатита чаще неправильной формы. Оливин представлен обычно пидиоморфными, реже стеблевидными зернами и составляет 5—10% от общей массы породы. В оливине часто проявляется спаянность. Зерна как оливина, так и ромбического пироксена ориентированы закономерно в одном направлении. Плотность оливинсодержащего энстатита 3,24 г/см³, прочность при одноосном сжатии σ раз составляет 1150 кг/см². Образцы для испытания выбуривались алмазным сверлом из одного куска керна в направлении его оси и имели цилиндрическую форму, их диаметр, равнялся 16 мм, высота 32 мм.

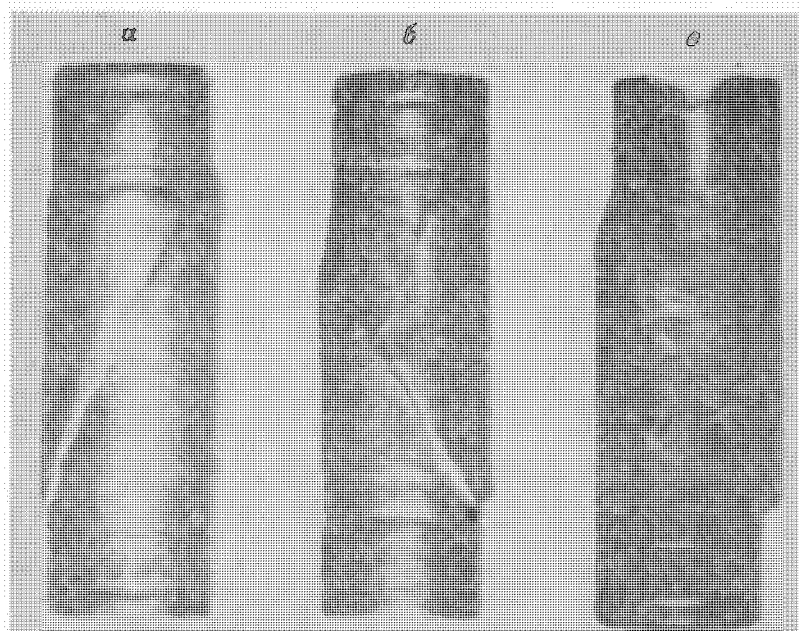
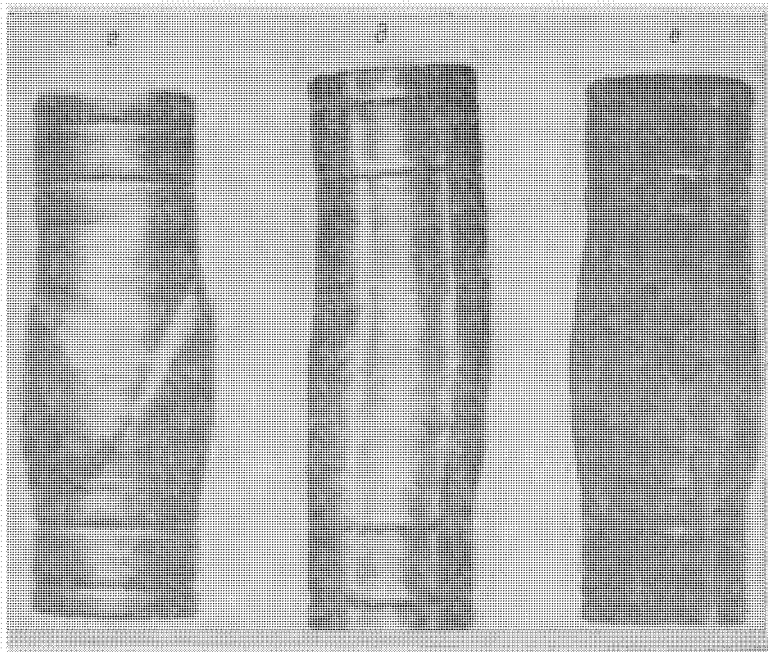


Рис. 54. Разрушение образцов уксатитита при сжатии в условиях
 δ — 300, ϵ — 500°C) и 10 000 кг/см²

С точностью 0,01 мм контролировалась параллельность их и перпендикулярность к образующей цилиндра. Все образцы для испытания помещались в тару и герметизировались под давлением по методике, описанной в главе III.

Опыты на сжатие проводились в условиях всесторонних давлений 2000, 3000, 5000 и 10 000 кг/см² при температурах 25, 300 и 500°C. Полученные количественные данные о предельных состояниях позволяют построить диаграммы напряжение — деформация, которые наглядно показывают влияние давления на предел прочности и пластичности породы. Переход от упругого состояния в пластическое во всех опытах происходил при деформации 1—2%. В процессе эксперимента образцы разрушались скалыванием в виде сдвига или пластической текли, цилиндрический образец приобрел бочонкообразную форму (рис. 54). Эти явления хорошо иллюстрируются также на диаграммах рис. 55. Хрупкое разрушение образцов происходило обычно при всесторонних давлениях в 2000 кг/см² и температуре 25°C (кривая 1). При этом на кривой наблюдается после максимума падение дифференциальной нагрузки до величины, обусловленной трением на плоскостях сдвиговых поверхностей образца. При повышенных температурах (300, 500°C) падения напряжения не наблюдалось (кривые 2 и 3). С повышением все-



повышенных температур при давлениях 2000 кг/см^2 (*a* — 25°C , *b* — 25°C , *c* — 300°C , *e* — 500°C).

стороннего давления падение дифференциальной нагрузки после разрушения образца несколько снижается (4). Кривые 5 и 6, отражающие состояние образца при повышенных температурах, по форме аналогичны кривым 2 и 3, но отличаются значением дифференциальной нагрузки. При испытании образцов в условиях 5000 кг/см^2 и температурах 25 , 300 и 500°C падения дифференциальной нагрузки не наблюдается вплоть до деформации, равной 14% (кривые 7—9). При всесторонних давлениях $10\,000 \text{ кг/см}^2$ деформация распространяется по всему образцу, зона разрыва расширяется и кривые напряжение—деформация приобретают более плавный перегиб. По мере увеличения деформации дифференциальная нагрузка возрастает вплоть до образования сдвига в образце (кривые 10 и 11). Кривые 12 и 13 отражают повышенную пластичность образца с двумя площадками текучести. Сдвиг в этих образцах наступал после $10,3\%$ деформации.

На рис. 56 приводятся фотографии аншлифов продольного сечения образца 8-кратного увеличения, подвергнутых деформации при всестороннем давлении $10\,000 \text{ кг/см}^2$. Фото *a* представляет структуру зрнстатитита недеформированного образца. При температуре 25°C разрушение цилиндрических образцов происходит с образованием косого сдвига по одной плоскости

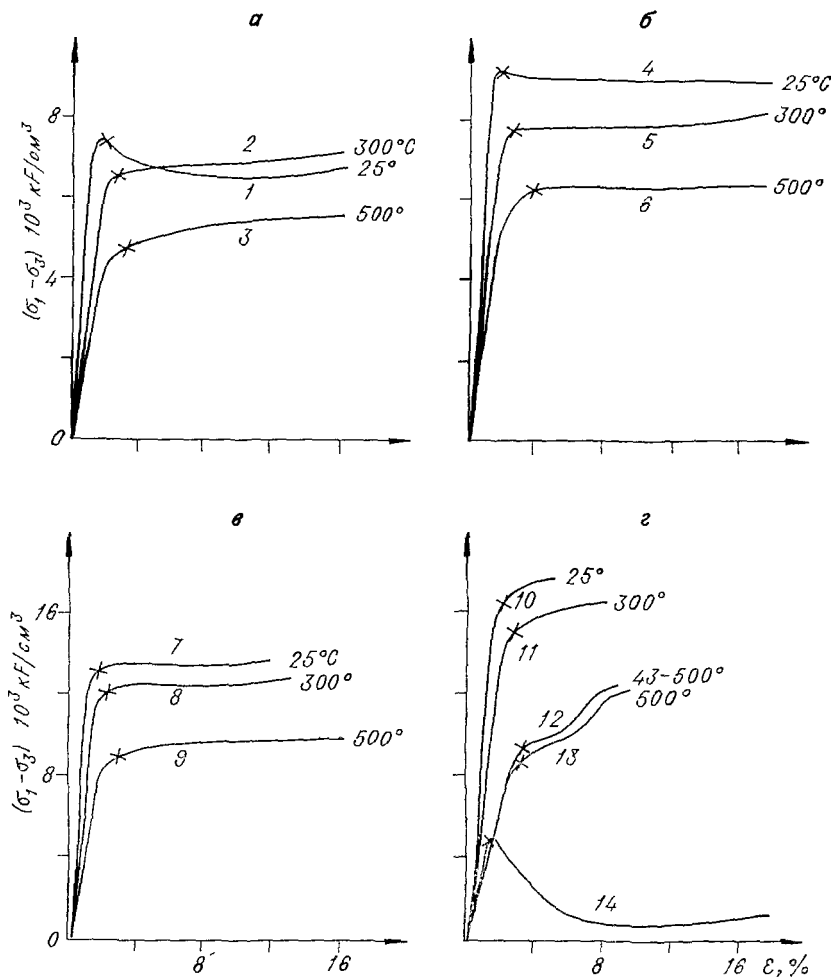


Рис. 55. Диаграммы напряжение — деформация для образцов оливинсодержащего энстатитита.

с дроблением зерен породы, локализующейся в узкой зоне (фото б). Сосредоточение грунн раздробленных зерен вызывает наибольшие пластические деформации породы. Бесструктурные полосы (светлые зоны на фото) указывают на полное дробление зерен посредством смятия и истирания материала по границам плоскостей сдвига, что приводит к понижению сил сцепления на плоскостях сдвига и уменьшению дифференциальной нагрузки. На фото в представлен образец, испытанный при 300°C. По всей площади его продольного разреза наблюдается равномерное распределение разрушенных зерен (светлые зоны). При

достижении деформации в 8,5% в нем формировалась главная трещина для косого сдвига (показана стрелкой). При меньших же пределах деформации в образцах сдвига не наблюдается.

На фото *г* показан образец, испытанный при 500°C. В нем разрушенные зоны (белый цвет) сосредоточиваются локально вокруг отдельных неразрушенных зерен. Они вытягиваются перпендикулярно оси приложения дифференциальной нагрузки и создают условия для разворота и изгиба неразрушенных зерен.

На фото *д* представлен образец, испытанный с поровым давлением в 9000 кГ/см². Этот образец разрушался по двум пересекающимся плоскостям. Зона смятия зерен в породе на плоскостях разрушения значительно расширяется. Дифференциальная нагрузка резко снижается (рис. 55, 14).

Испытания образцов горных пород на растяжение под давлением и при высокой температуре стало возможным только после разработки новой конструкции тары для герметизации образцов и усовершенствования резерсора, разработанного Бриджменом. В процессе нагружения при помощи этих устройств продольная и две поперечные компоненты напряжений изменяются независимо друг от друга. При этом представляется возможным изучать разрыв образцов в широких пределах давлений. В настоящее время имеется ограниченное число работ, где бы описывались результаты о предельных состояниях в образцах горных пород, полученные методом растяжения. Эти работы выполнены в основном зарубежными авторами (Griggs и др., 1960; Pandin, 1953). Такого рода исследования представляют большой научный интерес. Это связано с тем, что для получения остаточной деформации пучки большие всесторонние давления, чем при сжатии. Как показывают эксперименты Херда на известняке (Heard, 1960), сжатие и растяжение — это два крайних предела поведения породы по отношению к всестороннему давлению. Промежуточные главные напряжения при нагружении изменяются от минимума (сжатие) до максимума (растяжение), а всестороннее давление перехода плавно и монотонно меняется в пределах этих границ.

Испытания на растяжение проводились на образцах цилиндрической формы, имеющих те же размеры, что и образцы, используемые при сжатии. Образцы заключались в герметичную тару, конструкция которой описана выше. Полученные нами данные показывают, что пластичность и прочность породы увеличиваются по мере возрастания всестороннего давления и температуры. Для перехода ее в пластическое состояние необходимы большие давления, чем при сжатии, что согласуется с данными Григгса, Херда, Хендина и других авторов. При давлениях до 5000 кГ/см² и температурах 25 и 300°C образцы разрушаются без заметного удлинения. Разрыв наступает резко и сопровождается щелчком. Плоскость разрыва имеет наклон



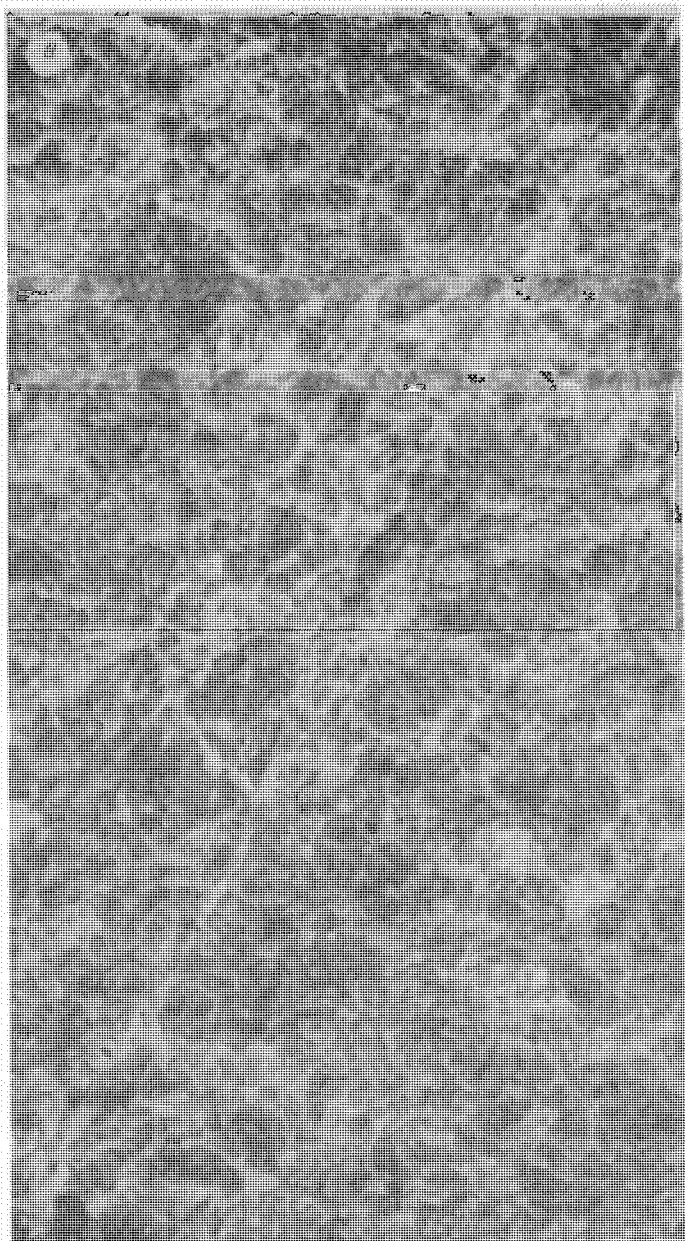


Рис. 56. Изменение энстатита после опыта (сечение продольной оси образца).

a — исходная структура. Давление $10\,000\text{ кг/см}^2$, температуры: 25°C (б), 300°C (в), 500°C (г) и 500°C плюс $P_H = 9000\text{ кг/см}^2$ (д).





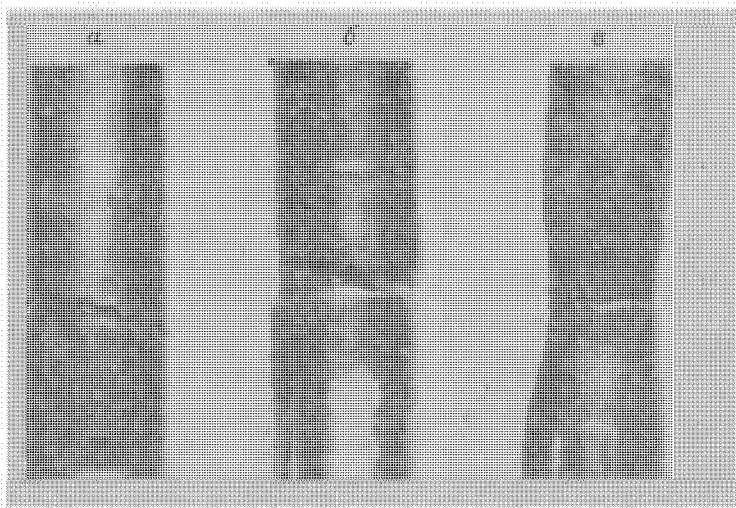


Рис. 57. Разрушение образцов зистатитита при растяжении.
 $a \rightarrow P = 5000 \text{ кг/см}^2, T = 25^\circ\text{C}; b \rightarrow P = 5000 \text{ кг/см}^2, T = 500^\circ\text{C}; c \rightarrow$
 $P = 5000 \text{ кг/см}^2, T = 320^\circ\text{C}.$

лов под углом 85° к оси образца (рис. 57, а). С повышением температуры образцы удлиняются; например, образец (рис. 57, б), испытанный при 500°C , имел деформацию 4,4% и разрушался после образования пояски, который, очевидно, является началом зарождения шейки для пластического течения короды. Образец из мелкозернистого мрамора, испытанный при 320°C , имеет вполне сформированную шейку, что характеризует высокую пластичность мрамора. При разрушении плоскость разрыва имела прямой угол к оси образца (см. рис. 57, в). При этом деформация его является равномерной и не искажает геометрической формы сечения шейки. Кривые, полученные при испытании на растяжение, представлены на рис. 58. В этих опытах использовалась схема, в которой осевая компонента напряжений изменяется методом разгрузки, т. е. создается необходимое всестороннее давление $P_{\text{вс}} = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Затем при постоянном

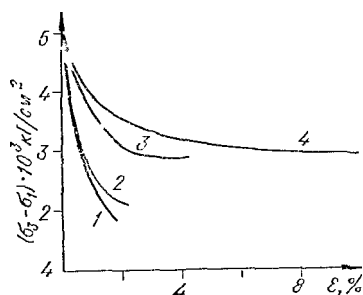


Рис. 58. Диаграмма напряжение — деформация, полученная при растяжении зистатитита.

Давление 5000 кг/см^2 , температуры: 1 — 25°C , 2 — 300°C , 3 — 500°C , 4 — 320°C , 5000 кг/см^2

всестороннем давлении $P_{вс} = \sigma_2 = \sigma_3$ по оси образца производилась разгрузка $\sigma_1 = P_{вс} - \Delta P_{ос}$ до момента, пока в образце не наступит разрыв. При построении кривых напряжения — деформация дифференциальные напряжения откладываются из точки предельного всестороннего давления, так как отсюда начинается отсчет деформации образца и дифференциальной нагрузки. Кривые 1—3, представленные на этом рисунке, характеризуют поведение оливинсодержащего энстатитита, а кривая 4 — мрамора. Видно, что оливинсодержащий энстатитит становится предрасположенным к пластической деформации при давлении 5000 кГ/см² и температуре 500°C, тогда как мрамор при таком же давлении и температуре 320°C обладает высокой текучестью, разрыв наступает, как только деформация превысит 12%.

Щелочной оливиновый базальт, взятый из Долины Озер в Центральной Монголии, состоит из оливина, моноклининого шроксена, плагиоклаза и стекла (~20%). Удельный вес породы равен 2,78 г/см³, прочность при одноосном сжатии составляет 1400 кГ/см². Образцы для испытания выбуривались из одного блока строго в одном направлении. Для ограждения от среды, передающей давление, они заключались в герметичную тару. Испытания проводились при всестороннем давлении 5000 и 10 000 кГ/см², температурах 25, 300 и 500°C. Внешний вид разгруженных образцов представлен на рис. 59, а кривые напряжение—деформация изображены на рис. 60. В условиях всестороннего давления 5000 кГ/см² (а) и температуре 25°C (кривая 1) базальт разрушается хрупко, с треском. Все образцы при разрушении имеют косой сдвиг под углом 30° к оси образца, а контур сдвига, прослеживающийся по поверхности образца, приобретает зубчатую форму. Кривая 1 отражает зависимость и острый максимум перед потерей дифференциальной нагрузки. По мере повышения температуры в базальте возникает пластическая деформация (плавный перегиб кривых 2 и 3). Кривая 2 отражает две четко выраженных площадки текучести, кривая 3—их выполаживание. В обоих случаях потеря дифференциальной нагрузки происходит после второго максимума; образцы разрушаются с образованием косого сдвига (см. рис. 59, а—в). Контур сдвига на поверхности образцов имеет распылчатый вид. У образца в он выражен более четко. Значение угла сдвига с повышением всестороннего давления и температуры понижается.

При давлении 10 000 кГ/см² (см. рис. 60, б) и температурах 25, 300 и 500°C (кривые 1—3 соответственно) внешний вид разрушения образцов не имеет характерных отличий от образцов, испытанных при 5000 кГ/см², однако в редких случаях сдвиг в них происходит по двум пересекающимся плоскостям, которые имеют одинаковый наклон к оси образца (см. рис. 59, г). Кривые 1—3 на рис. 60, б (напряжение — деформация) отличаются

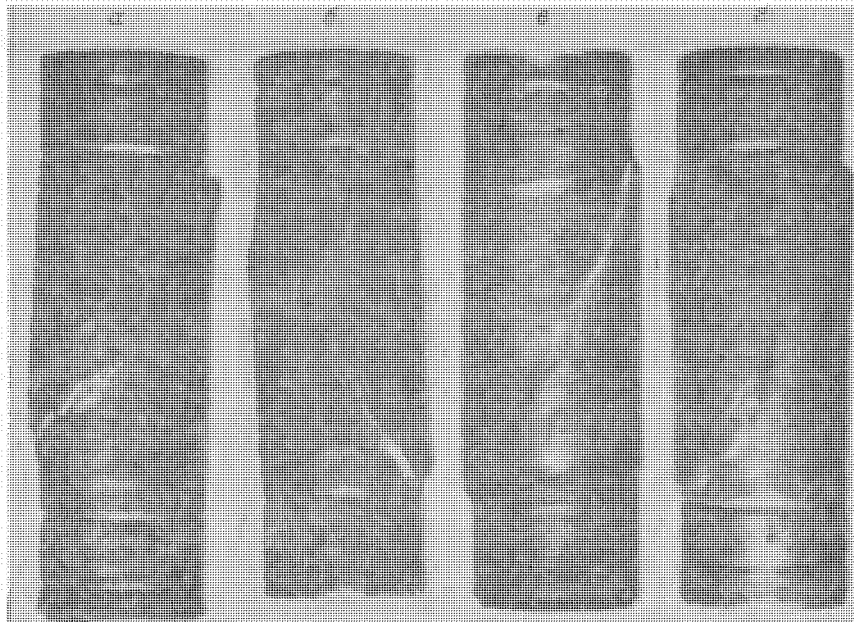


Рис. 59. Разрушение образцов базальта при сжатии.

$P=5000 \text{ кг/см}^2$, температуры: *а*— 25°C ($P=10\,000 \text{ кг/см}^2$), *б*—25, *в*—300, *г*— 500°C .

от кривых 1—3 (на *а*) плавным перегибом при изменении наклона кривой. Во всех опытах этой серии отсутствует вторая площадка текучести. Это указывает на то, что всестороннее давление значительно превышает предел прочности породы. Кривые напряжение — деформация, полученные при испытании базальта в аналогичных условиях, не имеют второй площадки текучести (Griggs, Handin, 1960; Griggs, Turner, Heard, 1960). Предельная же прочность наших образцов по сравнению с данными Д. Григгса отличается незначительно.

В отличие от сухих прочность образцов при наличии порового давления значительно ниже. На сжатие были испытаны два образца с поровым давлением $9\,000 \text{ кг/см}^2$. Прочность их оказалась на 47% ниже, чем сухих образцов. Разрушение в обоих образцах происходило по одной плоскости сдвига. Дифференциальная нагрузка после максимума резко падала (кривая 4 на рис. 60, *а*). Если сдвиг в базальте (продольное сечение образцов) при 25°C и давлении 5000 кг/см^2 (рис. 61, *а*) формируется в узкой зоне с несколькими ответвлениями трещин в виде нитей, а отдельные зерна оливина и шпороксена в породе никак не влияют на развитие трещиноватости, то с повышением давления и температуры отдельные включенные зерна играют в разру-

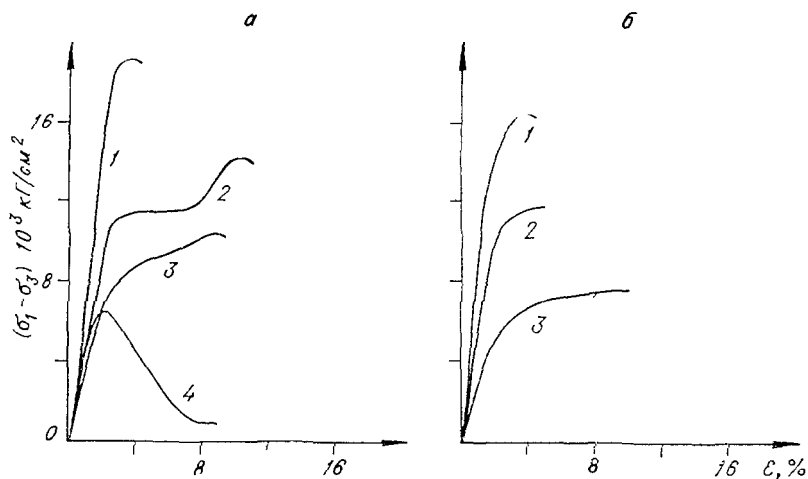


Рис. 60. Диаграммы напряжение — деформация, полученные при сжатии базальта.

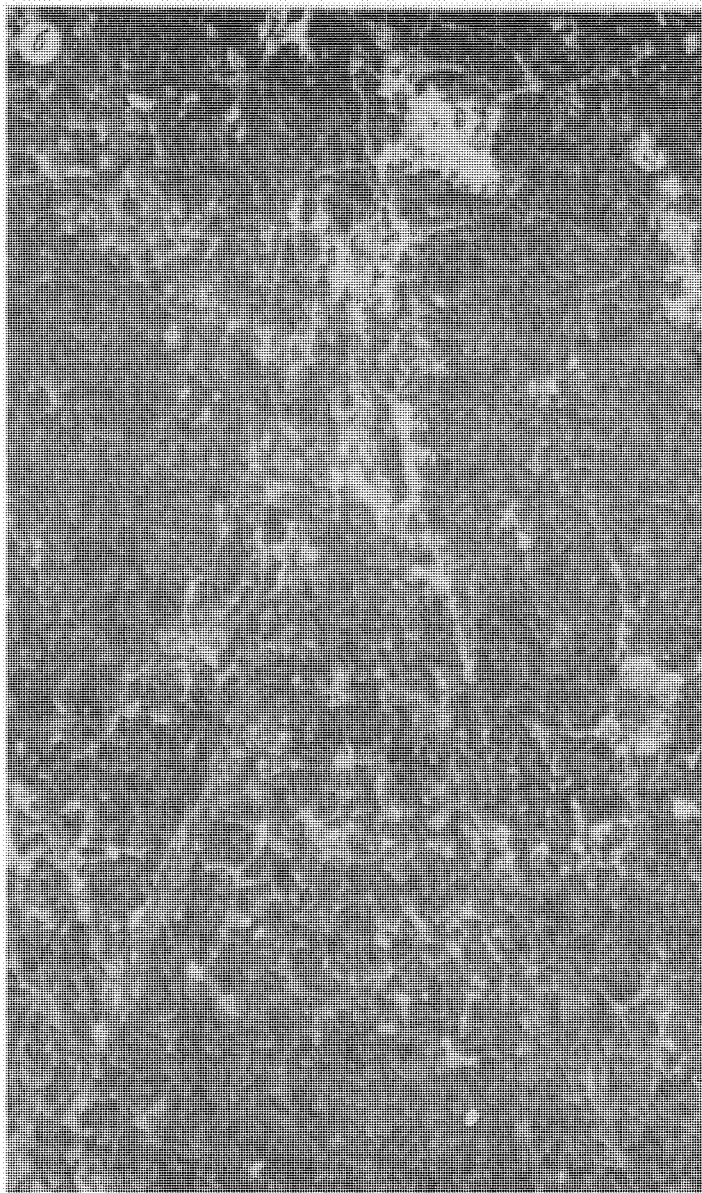
шении породы большую роль (см. рис. 61, б). Образец деформировался при давлении $10\,000\text{ кг/см}^2$ и 500°C . В нем от каждого включенного в породе зерна распространяются лучи трещин различной формы, которые показывают, что по границам зерен концентрируются высокие напряжения, в результате чего в структуре породы происходят разрывы, зарождаются новые трещины.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН ПЕРЕХОДА ОТ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ К ПЛАСТИЧЕСКОМУ ТЕЧЕНИЮ

Полученные количественные и качественные данные по разрушению образцов горных пород позволяют установить область хрупкопластического разрушения. Хрупкое разрушение количественно характеризуется резким изменением наклона кривой напряжение — деформация в точке максимума, качественно — отсутствием остаточной деформации в образце после опыта. Иначе говоря, деформация, имеющая линейную зависимость, достигает критического значения, после чего следует сдвиг или разрыв с частичной потерей дифференциальной нагрузки. Пластическое течение характеризуется отсутствием острых изломов на кривой напряжение — деформация и наличием остаточной деформации. Относительная деформация при этом приобретает значение не менее $2,5\%$. Перегиб некоторых кривых недостаточно четкий, поэтому выбор точки перехода носит



Рис. 61. Структура базальта после опыта.
а — образец разрушен при $P = 5000 \text{ кг/см}^2$ и.



(сечение продольной оси образца).

$T = 25^{\circ}\text{C}$; б — $P = 10000 \text{ кг/см}^2$ и $T = 500^{\circ}\text{C}$.

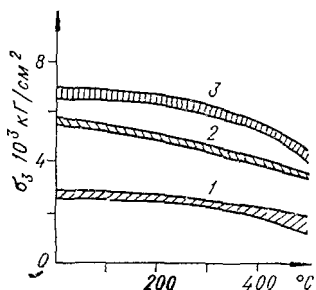


Рис 62 Диаграмма хрупкопластического перехода

1 — энстатитит при сжатии 2 — энстатитит при растяжении 3 — базальт при сжатии

несколько произвольный характер. В связи с этим хрупкопластическому переходу свойственна не точно «определенная линия», а зона, находящаяся в пределах 1% деформации. Таким образом, хрупкопластический переход в оливинсодержащем энстатитите при сжатии можно представить кривой 1 (рис. 62), построенной в зависимости от всестороннего давления и температуры.

Значения, лежащие ниже этой кривой, относятся к хрупкому разрушению (образцы разрушаются без остаточной деформации с разделением на две или более частей). При давлениях, относящихся к области, лежащей выше этой кривой, образцы имеют остаточную деформацию. Они после определенной пластической деформации могут также разделяться на части по типу косого сдвига или разрыва.

Понятие «хрупкий» является в значительной степени условным, так как хрупкое разрушение горной породы всегда вызывается пластической деформацией (Бриджмен, 1955; Мак-Клинток, Аргон, 1970).

Испытание образцов оливинсодержащего энстатитита при растяжении в условиях всестороннего давления и при температуре до 500° С показывает, что хрупкопластическая переходная зона лежит несколько выше (кривая 3 на рис. 62), чем для образцов, испытанных на сжатие. Это различие определяется поверхностными условиями — наличием микротрещин, царапин на поверхности образцов, в которые затекает медная гильза под действием гидростатического давления, разрывая трещину (по аналогии с клином). Вследствие этого разрыв в образцах горных пород начинает развиваться, как правило, на наружной поверхности, тогда как при сжатии трещины на поверхности образца под всесторонним давлением залечиваются.

Переходная зона хрупкопластического состояния для базальта при сжатии имеет более высокие значения давлений (рис. 62, 2), чем для оливинсодержащего энстатитита. Это объясняется порфировым строением стекловатой массы структуры базальта, который имеет большую предельную прочность и способность разрушаться хрупко с незначительной остаточной деформацией. Разрушение обычно сопровождается образованием большого числа трещин, концентрирующихся у главного сдвига.

**ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ
ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСТОЯНИЯ
ГОРНЫХ ПОРОД В НЕДРАХ ЗЕМЛИ**

При изучении механизма образования деформационных элементов в структуре земной коры невозможно выявить без экспериментальных данных, полученных при высоких давлениях и температурах, какие факторы влияют на их формирование. Эти характеристики соотношения деформируемости между природными давлениями и экспериментальными выражаются различными способами. В начальной стадии исследования они носят качественный характер, что хорошо используется в тектонике. При более четком количественном знании о деформационных явлениях в породе их описывают математическими уравнениями или изображают графиками, физический смысл которых заключается в выяснении соотношений между действующими на материал силами и степенью деформации.

Опыт, накопленный в механике, физике и тектонике, показывает, что дислокации, разрывы и другие деформационные элементы в твердых телах определяются внешней системой сил и механическими свойствами материалов. Соотнесение экспериментальных данных на геологические объекты при изучении поверхностных обнажений, скважин, шахт или физических моделей, при помощи которых объясняют физические или геологические наблюдения, дает желаемые результаты в том случае, когда имеется достаточно фактических данных. Однако в настоящее время подробно ни механические, ни физические состояния пород глубинных зон Земли хорошо не изучены. Имеющиеся данные по механическим свойствам пород и минералам в основном получены при всесторонних давлениях менее $10\,000\text{ кг/см}^2$ (Воларович и др., 1974; Кларк, 1969).

Влияние таких параметров, как высокая температура или поровое давление, при которых породы становятся более подвижными, изучены крайне слабо. В то же время совершенно очевидно, что изменение напряжений и температур обуславливает состояние земной коры и мантии, которые становятся механически неустойчивыми. Физическая природа тектонических действий недостаточно ясна.

Во время тектонической деформации распределение напряжений в породе не является гидростатическим. Течение в горных породах развивается в различных направлениях в зависимости от преобладающих напряжений. Полная конечная деформация, несмотря на то, что она каким-то образом связана с напряженным состоянием, зависит также от путей развития. Определить, какие соотношения существуют между деформациями и напряжениями, наблюдаемыми в породе, как нам представляется, можно только экспериментально.

Рассмотрим сжатие образцов породы при действии гидростатического давления. В этом случае при деформации не наблюдается видимого изменения форм образцов, меняется лишь их объем, который после снятия давления быстро восстанавливается. При упругопластической деформации образцы после снятия давления не приобретают первоначальной формы в силу остаточной деформации. Необратимое сжатие можно рассматривать как исчезновение пористости в результате плотной подгонки один к одному пороодообразующих минералов.

Если на породу действует не гидростатическое давление, то характер процесса деформации породы более сложен. Например, при одностороннем сжатии пород, которое широко применяется в производственных испытаниях, две из трех главных составляющих действующей на породу силы сжатия равны нулю. При таком нагружении в породе возникают трещины или разрывы различной формы, которые могут отличаться друг от друга как ориентировкой, так и формой. При замерах длины и площади сечения образцов в процессе испытания можно наблюдать эффекты изменения объема породы между стадией упругой и обратной деформаций и стадией необратимой остаточной деформации, вызванной давлением определенной величины, возникающим сразу или постепенно в результате длительного действия.

Известно, что большинство горных пород, подвергающихся воздействию одностороннего сжатия, ведут себя как хрупкие тела, иначе говоря, раскалываются или необратимо деформируются. При воздействии же одновременно и осевого давления, т. е. в условиях трехосного сжатия, породы могут пластически деформироваться (до 20%) без нарушения сплошности.

При общем наблюдении над изменением формы породы или над разрывными дислокациями в ней необходимо попытаться понять внутреннюю перестройку структуры под воздействием напряжения, так как и изменение формы, и разрывы являются наружным выражением перестройки. В случае, когда порода деформируется без разрыва, это явление представляется более простым, чем то, при котором происходит разрыв. Механизмы внутреннего сцепления кристаллов и минералов, принадлежащих к различным видам пород, и сцепления в кристаллах, обусловленного ионными или внутриатомными связями, которые существуют между атомами, слагающими кристаллическую решетку, остаются еще не совсем ясными. Многие авторы (Гогель, 1969; Хиллс, 1967) считают, что природу деформации в этом случае понять весьма трудно. При этом необходимо учитывать и другие факторы, такие, например, как температура и химический состав насыщающих породу растворов.

Различные виды деформаций происходят в основном одновременно. Если нанести на диаграмму значения, соответствующие

щие каждому процессу элементарной деформации и каждому из разрывов в изучаемом образце породы, можно выяснить, какие из рассмотренных элементарных деформаций играют наиболее важную роль — упругие или пластические. Иногда значения напряжений в породе свидетельствуют о том, что два вида деформации происходят одновременно, но с неравными скоростями.

Экспериментальные количественные значения пределов прочности для некоторых пород не могут подлежать прямой интерпретации при изучении тектолических деформаций. Многие из этих деформаций протекают очень медленно, и предел прочности для пород может быть значительно ниже.

При деформации пород большую роль играют возникающие в ней разрывы в особенности при низких всесторонних давлениях, соответствующих небольшим глубинам земной коры.

При проведении опытов по сжатию и даже по растяжению образцов возникающие разрывы, как правило, имеют косую ориентировку и обычно образуют угол меньше 45° по отношению к оси главного максимального давления. Первая стадия развития разрыва не улавливается; можно только отметить, что она начинается с того момента, когда давление по определенной тангенциальной составляющей приходит в определенное соотношение с нормальной составляющей давления. В области намечающейся плоскости разрыва распределение напряжений изменяется. Напряжения на краях плоскости разрыва увеличиваются, в результате разрыв разрастается в боковом направлении, а величины напряжений уменьшаются. Таким образом, равномерное распределение напряжений нарушается. Когда поверхность разрыва достигает определенной величины, трещина превращается в разлом, а образовавшиеся при этом блоки начинают смещаться.

После того, как возникает смещение по плоскости разрыва, тангенциальная составляющая давления, ориентированная вдоль этой плоскости, резко уменьшается, а коэффициент динамического трения становится меньше коэффициента статического трения. Блоки при этом приобретают по отношению друг к другу заметную скорость движения, которая зависит от действия величины нормального давления на эти блоки. В результате инерции движущихся блоков положение равновесия может нарушиться. При прекращении движения возникает режим напряжений, существенно отличный от режима первоначального состояния. Такой режим движения, очевидно, существует при землетрясениях. Разлом в каждой определенной породе зарождается лишь выше некоторой глубины, поскольку ниже, как показывают экспериментальные данные, в породах возникает пластическая деформация, что препятствует развитию напряже-

ний, достаточных для образования разрыва. Однако при быстром увеличении нагрузки эти разрывы могут возникать на больших глубинах, что согласуется с данными многих исследователей.

Анализ трения — скольжения в плоскостях разлома при движении не вызывает значительных трудностей. Используя законы трения в твердом теле и зная экспериментальный угол трения, можно установить для отдельных пород горизонтальную и вертикальную силы тяжести; при этом следует учитывать также поровое давление жидкости и газов на глубине. Происхождение же гидростатических давлений остается неясным, тем более, что мы не можем сказать, как и когда они возникают в процессе тектонической эволюции.

Экспериментальное изучение деформации горных пород в различных термодинамических обстановках способствует решению актуальных вопросов, относящихся к геологии, сейсмологии и тектонофизике. Особый интерес приобретают исследования хрупкого и пластического состояния горных пород в условиях высоких давлений и температур при медленных деформациях. Для технического обеспечения подобных исследований привлекаются специальная аппаратура высокого давления и различные методики.

Обзор описанных в литературе конструкций гидростатических аппаратов высокого давления, предназначенных для изучения деформируемости твердых тел под давлением, показывает, что они достигли большого технического совершенства. В настоящее время состояние твердых тел исследуется под гидростатическим давлением до 30 кбар.

Однако в одних аппаратах не представляется возможным проводить точные измерения напряжений и деформаций, поскольку в них отсутствуют устройства, обеспечивающие постоянство напряженного состояния. Другие же аппараты конструктивно так усложнены, что становятся ненадежными в работе.

Известно, что в гидростатических аппаратах нагружение образца давлением осуществляется трехосным сжатием: жидкостью по двум осям главных напряжений, поршнем по третьей оси. Чтобы получить точную информацию о напряженном состоянии испытуемого образца, необходимо одно из давлений, создаваемое жидкостью или поршнем, в процессе опыта поддерживать постоянным. В соответствии с этими требованиями нами разработан гидростатический аппарат типа плавающий цилиндр—поршень, который включает все необходимые элементы, а в то же время его конструкция довольно проста. Последнее достигается благодаря техническому решению сделать контейнер в блоке высокого давления подвижным, что позволяет самим блоком нагружать испытуемые образцы по двум осям жидкостью, а по третьей—поршнем. Кроме того, соответствующий подбор размеров поршней и заплечика цилиндра контейнера обеспечивает автоматически одно из давлений постоянным.

Это делает возможным проводить испытания образцов на сжатие и растяжение при повышенных температурах и с высокой точностью измерять их линейные и физические параметры. Надежность работы такого аппарата значительно повышается, так как в магистрали высокого давления имеется всего лишь два сопрягаемых соединения.

Применительно к разработанному нами аппарату сконструированы различные устройства (герметичная тара, реверсор, нагреватель, датчик усилий), обеспечивающие исследование горных пород целого комплекса физико-механических характеристик. В процессе отработки аппаратуры проводились опыты на металлах, горных породах, в результате которых выявлено, что созданная аппаратура в отличие от существующей имеет несомненные преимущества и, по-видимому, найдет применение в различных областях науки и производства.

Алабужев Б. А. Установка дифференциального и производного термического анализа.— В кн.: Экспериментальные исследования по минералогии. Новосибирск, «Наука», 1969, с. 31—33.

Алексеев К. А., Хошуля Ю. П. Манганиновый манометр для измерения статического давления до 20 000 кг/см².— «Усп. физ. наук», 1966, т. 88, вып. 1, с. 68—79.

Алексеев К. А., Дурова Л. Л., Иванова Е. М. Электрические манометры сопротивлений. М., Стандартгиз, 1964, с. 46—61. (Тр. ВНИИФТРИ, вып. 75).

Анкудинов Д. Т., Мамаев К. Н. Малогазовые тензодатчики сопротивления. М., «Машиностроение», 1968. 185 с.

Атанов Ю. А., Иванова Е. М. Исследование манганиновых манометров сопротивления при высоких давлениях.— В кн.: Исследования в области высоких давлений. М., 1971, с. 52—69. (Тр. ВНИИФТРИ, вып. 5(35))

Банди Ф. Физика высоких давлений. М., ИЛ, 1963. 298 с.

Баюк Е. И. Электрические и механические свойства горных пород при высоких давлениях.— В кн.: Электрические и механические свойства горных пород при высоких давлениях. М., «Наука», 1966, с. 16—36.

Беликов Б. П., Александров К. С., Рыжова Т. В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М., «Наука», 1970. 170 с.

Беляев Б. М. Сопротивление материалов. М., «Наука», 1965. 580 с.

Беляев Б. М. Труды по теории упругости и пластичности. М., Гостехиздат, 1957. 258 с.

Берг Л. Г. Введение в термографию. М., «Наука», 1970. с. 230.

Береснев Б. И., Ивков В. П. Лабораторный гидравлический компрессор высокого давления. — «Приборы и техника эксп.», 1961, № 5, с. 162—165.

Береснев Б. Л., Верещагин Л. Ф., Рябинин Ю. Н., Ливинц Л. Д. Некоторые проблемы больших пластических деформаций металлов при высоком давлении. М., Изд-во АН СССР, 1960. 195 с.

Береснев Б. И., Мартынов Е. Д., Родионов К. П., Булычев Д. К., Рябинин Ю. Н. Пластичность и прочность твердых тел при высоких давлениях. М., «Наука», 1970. 210 с.

Берч Ф. Скорость продольных волн в горных породах при давлениях до 10 кбар.— В кн.: Ультразвук в геофизике. М., «Мир», 1964, с. 240—251.

Бокна С. С., Шаховский Г. П. Аппаратура сверхвысокого давления с одновременно получением высоких температур.— «Приборы и техника эксп.», 1958, № 3, с. 86—90.

Борзунов В. А., Миринский Д. С. Уплотнение штоков мультипликаторов высокого давления.— «Приборы и техника эксп.», 1959, № 3, с. 152—155.

Борзунов В. А., Семин В. П. Общая аппаратура, применяемая в экспериментах с высокими давлениями. М., Стандартгиз, 1960. 125 с. (Тр. ВНИИФТРИ, вып. 46 (106)).

- Брандес М. Механические свойства материалов под гидростатическим давлением.— В кн.: Механические свойства материалов под высоким давлением. М., «Мир», 1973, с. 19—74.
- Бриджмен П. В. Физика высоких давлений. М., ОНТИ, 1935. 256 с.
- Бриджмен П. В. Новейшие работы в области высоких давлений. М., ИЛ, 1948. 297 с.
- Бриджмен П. В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М., ИЛ, 1955. 467 с.
- Бутузов В. П., Миринский Д. С., Кац Г. С. Новая аппаратура сверхвысокого давления.— В кн.: Экспериментальные исследования в области глубоких процессов. М., «Наука», 1962, с. 25—26.
- Бутузов В. П., Шаховский Г. А., Гоникберг М. Г. Аппаратура высокого давления.— В кн.: Труды Института кристаллографии АН СССР. М., Изд-во АН СССР, 1955, с. 45—49.
- Верещагин Л. Ф., Александров Б. С. Манометр на 10 000 кг/см² по типу свободного поршня.— «Технич. физика», 1939, № 9, с. 16—19.
- Верещагин Л. Ф., Семерчан А. А., Исаков В. Г., Рябинин Ю. Н. Малогабаритный гидравлический пресс на 1 кг.— «Приборы и техника эксл.», 1960, № 5, с. 49—52.
- Волярович М. П. Исследования физических свойств горных пород при высоких давлениях и температурах.— В кн.: Электрические и механические свойства горных пород при высоких давлениях. М., «Наука», 1966, № 37, с. 5—15.
- Волярович М. П., Балашов Д. Б., Томашевская В. А., Павлоградский В. А. Исследование скоростей упругих волн в образцах горных пород при совместном воздействии всестороннего давления и одностороннего сжатия.— «Докл. АН СССР», 1963, т. 149, № 3, с. 210—213.
- Волярович М. П., Баюк Е. И., Левыкин А. И., Томашевская И. С. Физико-механические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. М., «Наука», 1974. 220 с.
- Волярович М. П., Томашевская И. С., Бручев И. Г. Исследование скоростей продольных волн на сжатие.— В кн.: Электрические и механические свойства горных пород при высоких давлениях. М., «Наука», 1966, с. 118—129.
- Воронов Ф. Ф., Верещагин Л. Ф., Муравьев В. И. Импульсная установка для измерения скорости распространения ультразвуковых волн.— «Приборы и техника эксл.», 1958, № 3, с. 81—85.
- Гладковский В. А., Олейник М. И. Установка для исследования механических свойств металлов под высоким гидростатическим давлением.— В кн.: Физика металлов и металловедение. М., 1957, т. 6, вып. 3, с. 531—576.
- Гогель Ж. Основы тектоники. М., «Мир», 1969. 439 с.
- Давыдов Б. Я. Об уравнении состояния твердых тел.— «Изв. АН СССР. Серия геофиз.», 1956, № 12, с. 16—19.
- Жемочин Б. Н. Теория упругости. М., Госстройиздат, 1957. 293 с.
- Житомирский В. К. Уплотнения. М., «Машиностроение», 1964. 294 с.
- Жоховский М. К. Техника измерения давления и разряжения. М., Машигиз, 1952. 250 с.
- Жоховский М. К. Теория и расчет приборов с неуплотненным поршнем. М., Машигиз, 1959. 230 с.
- Каван Н., Эндо С. Получение сверхвысоких давлений методом составной сферы.— «Приборы для научных исследований», 1970, № 8, с. 78—81.
- Калашников Я. А., Верещагин Л. Ф. Измерение температуры под высоким давлением по инфракрасному излучению и некоторые явления в газах при этих условиях.— «Технич. физика», 1956, № 26, с. 26—29.
- Кардашев Д. А. Синтетические клеп. М., «Химия», 1964. 180 с.
- Кларк С. (ред.). Справочник физических констант горных пород. М., «Мир», 1969. 541 с.
- Корндорф Б. А. Техника высоких давлений в химии. М., Госхимиздат, 1952. 250 с.

Корниец Д. В. Исследование упругих свойств горных пород при высоких гидростатических давлениях.— В кн.: Геофизический сборник. Киев, «Наукова думка», 1968, № 24, с. 32—38.

Лебедев Е. Б. Экспериментальные исследования в области глубинных процессов. М., Изд-во АП СССР, 1962. 185 с.

Лебедев Т. С., Корниец Д. В., Шаповал В. И., Корчин В. А. Упругие свойства горных пород при высоких давлениях. Киев, «Наукова думка», 1972. 183 с.

Лившиц Л. Д., Мартынов Е. Д. Лабораторная установка компримирования жидкости до 20 кат.— «Приборы и техника эксп.», 1963, № 3, с. 168—171.

Лихарев К. К. К практике построения диаграммы истинных напряжений.— «Зав. лаб.», 1949, № 11, с. 49—53.

Лучицкий И. В., Громин В. И., Ушаков Г. Д. Деформация гипербазитов при высоких давлениях и температурах. Новосибирск, 1971, с. 48—56.

Лучицкий И. В., Громин В. И., Ушаков Г. Д., Надолжный В. А. Деформация мрамора в субхрустальной обстановке.— «Докл. АН СССР», 1968, т. 179, № 4, с. 951—953.

Мазур-Джуриловский Ю. Д. Некоторые особенности применения проволочных преобразователей при высоких гидравлических давлениях.— В кн.: Горное давление, сдвигание горных пород и методика маркишейдерских работ. Л., 1962, с. 302—306. (Сб. тр. ВПИИ, № 55.).

Макаров Т. В. Уплотнительные устройства. М., «Машиностроение», 1965. 192 с.

Маклюток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение металлов. М., «Мир», 1970. 443 с.

Миринский Д. С., Шурин Я. И. Регулируемый насос НГР-2000.— «Приборы и техника эксп.», 1972, № 3, с. 96—98.

Миринский Д. С., Шурин Я. И., Тонкова Э. А. Работа по физике твердого тела. Вып. 1. Новосибирск, 1967, с. 37—41.

Огибалов П. М., Кийко И. А. Очерки по механике высоких параметров. М., Изд-во МГУ, 1966. 215 с.

Платен Б. Многоорлищевой аппарат высокого давления и высоких температур.— В кн.: Современная техника сверхвысоких давлений. М., «Мир», 1964, с. 191—216.

Пономарев С. Д., Бигерман В. Л., Лихарев К. К., Макушин В. М., Малинин Н. Н., Федосеев В. И. Расчеты на прочность в машиностроении. Т. II. М., «Машиностроение», 1958. 440 с.

Пью Х. Л. Механические свойства материалов под высоким давлением. М., «Мир», 1973. 295 с.

Ратнер С. И. Исследование пластической деформации в цветных металлах. «Технич. физика», 1949, т. 19, вып. 3, с. 28—31.

Розанов Б. В., Максимов Л. Ю., Васильева Р. С., Салпий Н. Г., Кадаков В. С. Устройства для испытания материалов под высоким гидростатическим давлением со снятием диаграмм деформирования.— «Зав. лаб.», 1973, № 4, с. 474—475.

Рябикин Ю. Н., Верещагина Л. Ф., Балашов Д. Б., Лившиц Л. Д. Аппаратура для механических исследований металлов при давлениях до $30\,000\text{ кГ/см}^2$.— «Приборы и техника эксп.», 1958, № 3, с. 79—85.

Ряпосов А. П. Разработка метода и аппаратуры для исследования фазовых равновесий под высоким давлением и изучение сульфидов и селенидов пятой Б-подгруппы. Автореф. канд. дис. Новосибирск, 1972. 32 с.

Спасаева О. П. Методика изучения упругих свойств образцов горных пород под давлением.— Изв. АН СССР. Серия геофиз., 1959, № 2, с. 67—71.

Смирнов-Аляев Г. А. Метод построения действительной кривой растяжения по данным испытания металла на прессе Гагарина.— В кн.: Экспериментальные методы определения напряжений и деформаций в упругой и пластической зонах. М., ОНТИ ИКТД, 1935. 450 с.

Справочник машиностроения. под ред. Е. А. Чудакова. Т. III. М., «Машиностроение», 1951. 1098 с.

Ставрогин А. Н. Исследование горных пород в сложных напряженных состояниях.— «Горн. ж.», 1961, № 3, с. 63—67.

Ставрогин А. Н., Георгиевский В. С. Влияние вида нагружения на процесс деформирования горных пород.— В кн.: Горное давление, сдвигание горных пород и методика маркшейдерских работ. Л., 1968, с. 279—287. (Тр. ВНИИ, сб. 70.).

Стишов С. М., Тихомирова Н. А., Методы введения термодар в камеры высокого давления.— «Приборы и техника эксп.», 1965, № 5, с. 251—252.

Стронг Г. Современная техника сверхвысоких давлений. М., «Мир», 1964. 385 с.

Туриччи А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. М., Энергоиздат, 1959. 681 с.

Ушаков Г. Д. Ввод пескопильных проводов в камеру высокого давления.— «Приборы и техника эксп.», 1972, № 4, с. 208—209.

Ушаков Г. Д. Тара для герметизации горных пород под давлением. Авт. свид. № 395309 от 28 мая 1973.— «Бюлл. изобретений», № 35 от 28 авг. 1973 г.

Хендин Д. Прочность и пластичность.— В кн.: Справочник физических констант горных пород. М., «Мир», 1969, с. 340—372.

Целиков А. И., Розанов В. В., Максимов Л. Ю. Оборудование для обработки материалов с использованием высоких гидростатических давлений.— В кн.: I Всесоюзное совещание по физике и технике высоких давлений. Донецк, 1973, с. 17—18.

Циклис Д. С. Техника физико-механических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях. М., «Химия», 1965. 415 с.

Шапошников Н. А. Механические испытания материалов. М., Машиноз., 1951. 320 с.

Шаховский Г. П. Мультипликатор для исследований при сверхвысоких давлениях и высоких температурах.— «Приборы и техника эксп.», 1960, № 5, с. 121—124.

Шрейнер Л. А., Байдюк Б. В., Павлова П. Н., Якушев В. П., Сферина И. Д., Кузьменкова Г. Е., Смирнова Н. В., Кирсанова А. Т., Толстова Л. И. Деформационные свойства горных пород при высоких давлениях и температурах. М., «Недра». 1968. 270 с.

Adams F. D. An experimental contribution to the question of the depth of zone of flow in the Earth's Crust.— «J. Geol.», 1912, v. 20, p. 97—118.

Adams F. D., Nicholson J. T. An experimental investigation into the flow of marble.— «Phil. Roy Soc.», ser. A. 1901, v. 195, p. 367—401.

Adams F. D., Coker E. G. An experimental investigation into the flow of rocks.— «Amer. J. Sci.», 1910, v. XXIX, p. 465—485.

Adam J. On the axially-Symmetric steady wave propagation in elastic circular rods.— «Quart. Appl. Math.», 1954, v. 12.

Bandy F. P. Calibration techniques in ultrahigh-pressure apparatus. «J. Eng. Ind.», 1961, v. 83, p. 207—214, also in trans. «ASME», ser. B. 1961, v. 83, N 2, p. 207—214.

Basset J. Echanges thermiques dans l'azote et l'hydrogene aux ultra-pressions jusque 6000 kg/cm².— «Comp. Rend.», 1936, v. 24, p. 203.

Böker R. The Mechanism of Plastic Deformation in crystalline Bodies Dissertation, Techn. Hochschule. Aachen, 1914. 95 с.

Brandes M. «Pace Instr. Mech. Precyzynej.», 1962, v. 10, № 1, p. 19—151.

Bridgman P. W. Thermoelectromotive force, Peltier heat and Thompson heat under pressure.— «Proc. Am. Acad. Arts Sci.», 1918, v. 53, p. 269.

Bridgman P. W. The measurement of hydrostatic pressure to 30 000 kg/cm².— «Proc. Am. Acad. Arts Sci.», 1940, v. 74, p. 11—30.

Bridgman P. W. Compression of thirty—nine substances to 10 000 10 000 kg/cm².— «Proc. Am. Acad. Arts Sci.», 1946, v. 76, p. 55—70.

Bridgman P. W. The physics of high pressure. London (G. Bell and Sons Ltd), 1958.

Griggs D. T. Deformation of rocks under high confining pressures. 1. Experiments at room temperature. — *J. Geol.*, 1936, v. 44, N 5, p. 541—577.

Griggs D. T. Hydrolytic weakening of quartz and silicates. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1967, v. 14, N 1—4, p. 19—31.

Griggs D. T., Miller W. B. Deformation of Yule marble. Pt. 1. — *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1952, v. 62, p. 722—735.

Griggs D. T., Handin J. Observations on fracture and a hypothesis of earthquakes. — *Geol. Soc. Amer. Mem.*, 1960, v. 79, p. 347—364.

Griggs D. T., Turner F. J., Heard H. C. Deformation of rocks at 500 to 800°C. — *Geol. Soc. Amer. Mem.*, 1960, v. 79, p. 39—104.

Handin J. An application of high pressure in geophysics, experimental rocks deformation. — *Trans. Amer. Soc. Mech. Engineers*, 1953, v. 75, N 3, p. 315—324.

Handin J., Griggs D. Deformation of Yule marble. — *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1951, v. 62, N 8, p. 863—885.

Handin J., Heard H. C., Macouirk J. N. Effects of the intermediate principal stress on the failure of limestone, dolomite and glass at different temperatures and strain rates. — *J. Geophys. Res.*, 1967, v. 72, N 2, p. 611—640.

Hall H. T. Some highpressure, high—temperature apparatus design considerations, equipments. — *J. Phys. Chem.*, 1958, v. 59, p. 267.

Hardy H. R., Jr. Design and construction of facility for research on the inelastic behaviour of geologic materials. — *Canada Dept. Mines Sc. Tech. Surveys. Mines Branch, Research Report*, R. 165, 1965, p. 139.

Heard H. C. Transition from brittle fracture to ductile from in Solenhofen limestone as function of Temperature, confining pressure and interstitial fluid pressure. — *Geol. Soc. Amer. Mem.*, 1960, v. 79, p. 193—226.

Hietenyi Я. Handbook of experimental stress analysis. N. Y., J. Wiley and Sons, 1950.

Lloyd E. C., Hutten V. O., Johnson D. P. Compast multianvil wedgetupe high pressure apparatus. — *J. Res. Natl. Bur. Stands.*, 1959, v. 63, p. 83—91.

Nishihara M., Tanaka K., Hamada H. Proceedings of the 8th Japan Congress on Testiny Materials. Kyoto, Japan, 1965, p. 73—79.

Johnson D. P., Newhall D. H. The piston gauge as a precise pressure measuring instrument. — *Trans. ASME*, 1953, v. 75, p. 301.

Karman T. Festigkeitversucke unter allseitigem Druck. — *Zeit Ver. Deutsch. Ind.*, 1911, v. 55, S. 1749—1757.

Mogi K. The influence of the demensions of specimens on the fracture strenght of rocks. Comparison between the strength of rock specimens and that the Earth's Crust. — *Bull. Earthquake Res., Ins. Tokyo Univ.*, 1962, v. 70, N 1, p. 175—185.

Marrell S. A. F. The effect of triaxial stress systems on the strength of rocks at atmospheric temperatures. — *Geoph. J. Roy. Astron. Soc.*, 1965, v. 10, 3, p. 231—281.

Mc Skimin H. J. Ultrasonic measurement techniques applicable of small solid specimens.— «J. Acoust. Soc. Amer.», 1950, v. 22, p. 413.

Mc Skimin H. J. Propagation of longitudinal waves and shear waves in cylindrical rods at high frequencies.— «J. Acoust. Soc. Amer.», 1956, v. 28, p. 484.

Newhall D. H. Hydraulically driven pumps. — «Industrial and Engineering Chemistry», 1957, v. 49, N 12, p. 1949—2003.

Paterson N. S. Triaxial testing of materials of press up to 10 000 kg/cm².— «J. Inst. Engr. Australia», 1964, Bd 36, p. 23—29.

Pugh H., Li D., Green D. Progress Report on the Behaviour of Materials under high hydrostatic pressure. MERL Plasticity Rep. 103, National Engineering Lab., East Kildride. Glasgow, 1954.

Pełczyński T., Pawłock J. Prace Zakładu obróbki plastycznej. Politechniki Warszawskiej, 1959, p. 61—72.

Ros M., Eiepinge A., Eigennoess. Materialpruef Versuchanstalt.— «Ind. Baum Gewerbe», Zurich, 1929, Bd 34, S. 35—40.

Terzaghi. Theoretical Soil Mechanics, N. Y. John Wiley and Sons, 1943. 305 c.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| Введение | 3 |
| <i>Глава I. Краткий обзор литературы по аппаратуре высокого давления</i> | 5 |
| Квазигидростатические аппараты высокого давления | 5 |
| Гидростатические аппараты высокого давления | 7 |
| Уплотнительные устройства и принципы их работы | 32 |
| Измерение всестороннего давления в гидростатических аппаратах | 39 |
| Создание высоких температур в герметичных камерах малого объема | 40 |
| Контроль температур | 41 |
| Методы изучения распространения упругих волн в твердых телах под высоким давлением | 44 |
| <i>Глава II. Гидростатический аппарат системы плавающий цилиндр — поршень</i> | 46 |
| Принципиальная схема аппарата | 47 |
| Конструкция гидростатического аппарата системы плавающий цилиндр — поршень | 48 |
| Конструкция основных узлов аппарата | 50 |
| Устройства малогабаритных подвижных уплотнений | 58 |
| Уплотнительные устройства нагрузочного блока | 61 |
| Конструкция измерителя осевой нагрузки | 63 |
| <i>Глава III. Методы исследования деформационных свойств горных пород при высоких давлениях и температурах</i> | 64 |
| Устройства, обеспечивающие нагружение образцов трехосным неравным давлением при высоких температурах | 64 |
| Измерение скоростей распространения упругих волн в условиях высоких давлений и температур | 82 |
| Влияние всестороннего давления на показания тензодатчиков | 84 |
| <i>Глава IV. Изучение деформации горных пород</i> | 89 |
| Определение зон перехода от хрупкого разрушения к пластическому течению | 101 |
| Интерпретация экспериментальных данных для характеристики состояния горных пород в недрах Земли | 105 |
| <i>Заключение</i> | 109 |
| <i>Литература</i> | 111 |

Геннадий Дмитриевич Ушаков

**АППАРАТУРА
И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ
ДЕФОРМАЦИЙ ГОРНЫХ ПОРОД
{при высоких давлениях и температурах}**

**Ответственный редактор
Игорь Владимирович Лучицкий**

*Редактор Н. Г. Рязанова
Художественный редактор М. Ф. Глазырина
Художник М. М. Погребинский
Технический редактор Г. Я. Герасимчук
Корректоры М. В. Ржевцева, Л. А. Паршина*

Сдано в набор 15 марта 1977 г. Подписано к печати 2 сентября 1977 г. МН
02068. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага машиномелованная. 7,5 печ. л., 7,5 уч.-изд. л.
Тираж 1000 экз. Заказ № 468. Цена 75 коп.

Издательство «Наука», Сибирское отделение. 630099, Новосибирск, 99, Со-
ветская, 18.
4-я типография издательства «Наука». 630077, Новосибирск, 77, Стапислав-
ского, 25.