

Н. Н. Павлова

**ДЕФОРМАЦИОННЫЕ
И КОЛЛЕКТОРСКИЕ
СВОЙСТВА
ГОРНЫХ ПОРОД**



МОСКВА «НЕДРА» 1975

Павлова Н. Н. Деформационные и коллекторские свойства горных пород. М., «Недра», 1975, с. 240.

В работе изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований деформационных и прочностных свойств горных пород различных генетических типов, а также коллекторских свойств пород-коллекторов нефти и газа при различных напряженных состояниях, характерных для первых десяти—пятнадцати километров земной коры.

Дан анализ существующих теоретических представлений о деформации и разрушении твердых тел в условиях объемных напряженных состояний. Описан принципиально новый подход к оценке процесса деформации и разрушения пород, основанный на рассмотрении влияния особенностей объемных деформаций на несущую способность пород.

Показаны направления практического использования результатов исследований деформационных, прочностных и коллекторских свойств пород при решении ряда конкретных задач нефтяной геологии, сверхглубокого бурения и разработки нефтяных и газовых месторождений.

Книга предназначена для научных работников нефтяной и газовой промышленности, занимающихся вопросами геологии, разработки и бурения.

Табл. 62, ил. 53, список лит. — 225 назв.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Решение многих задач геологии глубинных зон Земли, нефтяной геологии, бурения глубоких скважин и разработки нефтяных и газовых месторождений связано с развитием механики горных пород. К числу ее основных направлений, определяющих успешное освоение глубоких зон Земли, относится изучение деформационных и коллекторских свойств горных пород при высоких термодинамических параметрах.

Это направление получило широкое развитие главным образом в последние годы, в связи с практическим освоением глубин свыше 5 тыс. м.

Известна общая тенденция к росту глубин как в разведочном, так и в эксплуатационном бурении на нефть и газ. Так, за последнее десятилетие средняя глубина эксплуатационных скважин возросла на 14, а разведочных на 24%, при этом объемы бурения скважин глубиной свыше 3000 м составили приблизительно 20% от общего объема бурения. Растет число эксплуатационных скважин глубиной свыше 4,5—5 тыс. м, разведочные скважины проектируются на глубины более 7 км. Для изучения геологического строения и вещественного состава пород глубинных зон Земли, а также для оценки перспектив поисков месторождений полезных ископаемых на больших глубинах, в Советском Союзе проводится бурение ряда сверхглубоких скважин (10—15 км).

Проблема значительного повышения эффективности поисков, разведки и разработки глубоко залегающих месторождений нефти и газа, особенно в районах, где уже ведется их добыча, в текущем пятилетии выделена как одна из основных.

В плане этой проблемы поставлена задача изучения коллекторских свойств пород при высоких давлениях и температурах. В связи со сложностью и трудоемкостью экспериментальных исследований физических свойств пород при высоких термодинамических параметрах к решению этой задачи привлекаются многие коллективы (МИНХиГП, ИГиРГИ, ВНИИ Геофизика и др.).

В секторе экспериментальной геомеханики ИГиРГИ исследования деформационных и прочностных свойств пород при параметрах давлений и температур, типичных для глубин до 15—20 км, были начаты под руководством проф. Л. А. Шрейнера еще в 1956—1958 гг.

Настоящая монография обобщает результаты экспериментальных исследований деформационных и коллекторских свойств различных горных пород, выполненных автором или под его руководством, главным образом в последние годы.

Исследования проводились при наиболее характерных для верхних участков земной коры напряженных состояниях равномерного и неравномерного трехосного сжатия при одновременном действии порового давления насыщающей жидкости и температуры.

Результаты изучения деформационного поведения, коллекторских свойств и процесса разрушения пород в этих условиях проанализированы с привлечением современных теоретических представлений о процессах деформации и разрушения твердых тел, развитых в физике твердого тела и механике сплошных сред. Обсуждены особенности деформационного поведения горных пород как неоднородных пористых сред и обоснована теоретически и экспериментально зависимость всех физико-механических свойств пород от объемных деформаций, определяющих несущую способность, а следовательно, и сопротивление пород разрушению.

Детально рассмотрены в монографии характерные особенности механизма остаточной деформации пород при неравномерном объемно-напряженном состоянии. Установлено, что в условиях, типичных для глубин до 8—10 км, у большинства горных пород остаточная деформация сопровождается разуплотнением их структуры, обуславливающим рост коэффициентов пористости и проницаемости.

Показаны направления практического использования результатов изучения коллекторских, деформационных и прочностных свойств горных пород в условиях объемных напряженных состояний и температур при решении ряда задач геологии, бурения и разработки месторождений нефти и газа. Обсуждены некоторые аспекты методики оценки обратимых и необратимых изменений коэффициента пористости при отборе кернов пород, рассмотрены условия возникновения необратимого уплотнения песчано-алевритовых коллекторов в процессе разработки месторождений нефти и газа, разуплотнения пород под действием тектонических напряжений, а также вопросы прогнозирования деформационного поведения и прочности пород при проводке сверхглубоких скважин.

При проведении экспериментальных исследований большая помощь автору была оказана сотрудниками сектора экспериментальной геомеханики ИГиРГИ Г. Е. Кузьменковой, А. А. Фоминым, Г. Н. Юрель, Г. А. Федоровой и другими, которым автор приносит большую благодарность.

В обсуждении отдельных разделов и работы в целом принимали участие: Л. А. Шрейнер, Б. В. Байдюк, М. Ф. Мирчинк, М. П. Воларович, Б. И. Воздвиженский, В. А. Амиян, многие замечания которых автор с благодарностью постарался учесть.

Глава I

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД В ВЕРХНИХ ЧАСТЯХ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Напряженное состояние, которое испытывают горные породы в земной коре, называемое горным давлением, возникает как результат действия различных факторов: гравитационных сил, тектонических напряжений, давления насыщающих породу жидкостей (газов) и др.

Наиболее характерным видом объемного напряженного состояния горных пород в земной коре является трехосное сжатие. При этом в отличие от внутренних областей Земли, где предполагают равномерное трехосное напряженное состояние, вблизи ее поверхности, т. е. в верхних частях земной коры, бывают различные отклонения от равномерного всестороннего сжатия [27, 35, 128, 164, 183, 215]. Возможными случаями являются как неравномерное всестороннее сжатие, так и смена одной или двух компонент сжимающих напряжений — растягивающими [34, 192, 193].

Неравномерное объемное напряженное состояние определяется двумя параметрами: величиной среднего нормального σ_0 или эффективного $\sigma_{эф}$ напряжения и интенсивностью напряжений σ_i , характеризующей степень неравномерности напряженного состояния.

В общем случае неравномерного напряженного состояния при учете действия тектонических напряжений и давления насыщающей жидкости p_n параметры $\sigma_{эф}$ и σ_i могут быть выражены следующим образом:

$$\sigma_{эф} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i h_i (1 + K_1 + K_2)}{3} - \eta p_n; \quad (1.1)$$

$$\sigma_i = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \sqrt{\frac{(1 - K_1)^2 + (1 - K_2)^2 + (K_1 - K_2)^2}{2}}, \quad (1.2)$$

где h — глубина залегания; γ_i — объемный вес породы; $0 \leq \eta \leq 1$ — безразмерный коэффициент, учитывающий степень воздействия пластового давления на скелет породы [10, 62, 143, 160, 168]; K_1

и K_2 — безразмерные коэффициенты, равные: $K_1 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$, $K_2 = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$; σ_1 , σ_2 , σ_3 — максимальное, среднее и минимальное главные нормальные напряжения.

В верхних частях земной коры вероятны следующие напряженные состояния:

1) случай упругого состояния при спокойном залегании пород: $K_1 = K_2 = k$, где $k = \frac{\nu}{1 - \nu}$ (ν — коэффициент Пуассона);

2) случай релаксации напряжений (равномерного всестороннего сжатия): $K_1 = K_2 = 1$;

3) случай неравномерного объемно-напряженного состояния, учитывающий влияние тектонических напряжений: $K_1 \neq K_2$, причем значения K_1 и K_2 могут быть как положительными, так и отрицательными, большими и меньшими единицы.

Об абсолютных величинах и характере распределения напряжений в верхних частях земной коры представляется возможным судить по результатам инструментального изучения естественных напряжений в горных выработках (шахты, рудники, основания гидросооружений). В качестве метода измерений главных компонент тензора напряжений наиболее широко используется метод разгрузки, основанный на измерении деформаций керна, после его отделения от сплошного массива [34, 35, 85].

В Советском Союзе распространен вариант метода разгрузки — метод торцевых измерений на забое скважины [85].

Для определения трех главных нормальных напряжений методом разгрузки на выбранном участке проводятся три скважины во взаимно перпендикулярных направлениях. В каждой скважине деформации разгрузки керна в плоскости забоя регистрируются в трех направлениях. Оси главных нормальных напряжений в массиве пород могут быть направлены произвольно. Однако измерительные скважины должны быть ориентированы по направлению главных нормальных напряжений, чтобы центральная часть торца скважины находилась в условиях однородного напряженного состояния. Исходя из этого, выбору схемы размещения скважин должны предшествовать приближенные определения напряжений.

К настоящему времени в разных странах мира методом разгрузки выполнены десятки тысяч измерений напряжений на глубинах от нескольких метров до трех километров. При этом только на территории Советского Союза исследованы напряжения в 30 конкретных участках земной коры, всего же изучено свыше 100 объектов в различных районах земного шара [35].

Измерения позволили выявить основные особенности напряженного состояния горных пород в верхних частях земной коры: преобладание сжимающих напряжений, существенную неравномерность напряженного состояния, различия в отношении максималь-

ного главного нормального напряжения к минимальному в разных тектонических зонах.

Так, было установлено, что для осадочного чехла платформенных областей наиболее характерен случай упругого напряженного состояния при отношении горизонтальных напряжений $\sigma_2(\sigma_3)$ к вертикальной σ_1 , равном $\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = 0,2 \div 0,5$ [35].

В пластичных разностях пород осадочного чехла (например, в хемогенных породах) распределение напряжений часто близко к гидростатическому ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$).

Участки аномальных напряжений (горизонтальные компоненты напряжений превосходят вертикальную $\sigma_1 \approx \gamma H$) наиболее характерны для складчатых областей [34, 35, 85]. В Хибинском массиве Кольского полуострова, например, измерениями установлено, что горизонтальные напряжения превышают вертикальные, обусловленные весом вышележащих пород, более чем в десять раз [128].

Почти горизонтальное положение большой оси эллипсоида напряжений, вплоть до глубин 1—2 км, отмечено при измерениях напряжений и на других участках земной коры (Саяны, Тянь-Шань, Украинский щит, Австралия, Португалия), что подтверждает достаточную общность этого явления [34, 85].

Заслуживают большого внимания результаты оценки величин касательных напряжений. Анализируя данные о суммарных тектонических движениях за последние 30 млн. лет и сейсмичности за несколько десятков лет, М. В. Гзовский подсчитал, что максимальные касательные напряжения τ_{\max} на щитах составляют 100 ± 50 кгс/см², а в складчатых областях могут достигать 1000 ± 500 кгс/см² [183].

Н. К. Булин [34] приводит результаты расчета τ_{\max} для рудника Хибин (Кольский полуостров): $\tau_{\max} \approx 200$ кгс/см². По данным Хаста [192, 193], величины τ_{\max} в массиве кристаллических пород Скандинавии достигают нескольких сотен кгс/см², при этом горизонтальные напряжения значительно превышают вертикальные.

Изложенное выше показывает, что поле естественных напряжений в земной коре неоднородно как по величине, так и по соотношению отдельных составляющих. Это особенно характерно для складчатых областей и кристаллических щитов, недислоцированный осадочный чехол платформ обычно характеризует более однородное поле напряжений.

Наиболее важным выводом из проведенного изучения напряжений в горных породах земной коры является вывод о преобладающем влиянии в региональном плане напряжений сжатия и неравномерности напряженного состояния. Растягивающие напряжения обычно носят локальный характер.

Исследования подтверждают линейный рост вертикальных напряжений с глубиной и приближительное соответствие их величин гравитационным напряжениям, рассчитанным, исходя из среднего объемного веса слагающих толщ пород.

Горизонтальные напряжения только в чехле платформ иногда отвечают упругому состоянию: $\sigma_2 = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_1$. В большинстве же случаев, особенно в породах щитов и складчатых областей, они не обнаруживают зависимости от гравитационных сил и, по-видимому, определяются современными тектоническими напряжениями [34, 35, 85].

Выводы из анализа измерений напряжений подтверждаются и результатами оценки напряжений по данным гидравлического разрыва пластов. В этом случае величина минимального главного нормального сжимающего напряжения оценивается по давлению, при котором начинается образование трещины в процессе гидроразрыва [66, 135].

Ориентировка образованной при гидроразрыве трещины обычно совпадает с минимальной компонентой горного давления.

Из опыта гидравлического разрыва пластов [3, 191, 200, 215] следует, что величина критического давления q , при котором начинается расширение трещины, может быть как меньше расчетного значения вертикальной составляющей горного давления

$$q = (0,3 - 0,85) \gamma_{\text{ср}} H, \quad (1.3)$$

так и существенно больше его.

Обобщая результаты измерений горного давления в реальных условиях залегания пород, можно заключить, что для горного массива наиболее общим случаем напряженного состояния горных пород является неравномерное трехосное напряженное состояние сжатия.

Следует отметить также, что для реальных условий залегания горных пород в ряде случаев характерно и значительное отклонение величины пластового давления насыщающих породы жидкостей от гидростатического давления, связанное с влиянием тектонических напряжений и особенностей геологического строения месторождений нефти и газа [129].

Глава II

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ОБЪЕМНО-НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЙ

§ 1. Физические основы процесса деформации горных пород в условиях объемно-напряженных состояний

Горная порода представляет собой сложную деформируемую систему, отдельные звенья которой в виде минеральных зерен, скоплений цементирующего вещества и других элементарных образований могут быть распределены в объеме породы различным образом.

Это распределение допускает существование в породе пустот и микропустот, называемых пораами, определяющих компактность (сплошность) ее структуры, а также трещин и микротрещин, интенсивностью развития которых связывается степень разрушения породы.

Вещественный состав породы определяется процентным содержанием в ней минералов скелета и цементирующего вещества.

Каждый из составляющих породу минералов характеризуется своим комплексом упругих, пластических и прочностных свойств.

Связь между минералами в консолидированной породе осуществляется через контакты, различающиеся в разных породах по вещественному составу, форме, протяженности и ряду других особенностей.

Известно, что в одной и той же породе как размеры минеральных зерен, так и характер скоплений цементирующего вещества и их распределение могут изменяться в весьма широких пределах. Исходя из этого, горная порода в общем случае может рассматриваться как неоднородная среда. С неоднородностью состава и строения пород связана их пространственная неравнопрочность, т. е. неоднородность по упругим, пластическим, прочностным и другим физико-механическим свойствам.

Неоднородностью обусловлены и различные особенности деформационного поведения пород, в частности, процесс распределения по объему породы локальных деформационных нарушений, возникающих в отдельных зернах или по их контактам.

Локальные деформационные нарушения при определенном напряженном состоянии породы зависят от локальных особенностей внутреннего строения и обусловленных этим строением сил связи.

Горные породы отличает разнообразие типов внутрикристаллической и межкристаллической связи.

Из различных типов сил связей, соединяющих атомы в структурах неорганических соединений, для большинства структур минералов горных пород характерен ионный (гетерополярный) тип. Значительно реже встречаются соединения с гомеополярным, ковалентным, металлическим и вандерваальсовским типами связи [29].

Установлено, что между типом кристаллической структуры и физико-механическими свойствами твердых тел существует корреляция [38].

Так, соединения с металлическим типом сил связи, структура которых характеризуется плотной упаковкой, отличает высокая пластичность, слабая зависимость свойств от температуры, высокая электропроводность.

Для кристаллов с ионным типом сил связи, структуры которых имеют минимальные расстояния между разноименными ионами, характерны ограниченная пластичность и умеренная электропроводность. Соединения с ковалентными типами сил связи (с фиксированным числом жесткоориентированных связей) отличаются высокой хрупкостью и малой электропроводностью, зависящей от примесей и температуры.

Существенные различия между металлами и неметаллическими соединениями обусловлены не только различиями их структур, но и основных свойств их дефектов [38].

Для атомов металлов характерно образование структур, в которых число связей превышает число валентных электронов, т. е. металлическая связь является ненасыщенной. При такой связи существует стремление к образованию структур плотнейших (типа шаровых) и плотных упаковок. Основные и характерные для металлов свойства — высокая электропроводность и металлический блеск свидетельствуют о том, что валентные электроны обобществляются и могут двигаться в объеме всего кристалла. С особенностями структуры атомов металлов и, в частности, с наличием свободных электронов, движущихся по всему объему кристалла, связана большая, чем в кристаллах неметаллических соединений, подвижность различных дефектов кристаллической решетки (точечных и линейных дислокаций).

Движение дислокаций, как известно [38, 65, 87], обуславливает развитие процесса пластической деформации.

При упругом же взаимодействии дислокаций с точечными дефектами, атомами примесей, границами блоков и зерен, а также друг с другом возникает высокая локальная концентрация растягивающих напряжений, вызывающих развитие микротрещиноватости, облегчающей последующее разрушение тела.

Неметаллические структуры с ионными и ковалентными типами сил связи обладают свойствами, оказывающими еще большее, чем у металлов, влияние на процесс движения дислокаций. В этих соединениях подвижность дислокаций ограничена, что сказывается на развитии в них пластической деформации.

Так, например, в ионных кристаллах (сюда относятся щелочно-галогенные минералы NaCl , KCl , LiF , галогениды серебра AgBr , AgCl , карбонатные минералы CaCO_3 , MgCO_3 ; окислы кварца SiO_2 , корунд Al_2O_3 и др.) на геометрию и свойства дислокаций кроме обязательного требования минимума упругой энергии накладывается еще и требование электрической нейтральности. Это ограничивает число возможных плоскостей скольжения. Движение как краевых, так и винтовых дислокаций в таких кристаллах приводит к зарождению заряженных дефектов, которые вызывают электростатическое взаимодействие, усложняя процесс движения дислокаций. На это взаимодействие существенное влияние оказывают ионы различных примесей.

У ковалентных кристаллов (алмаза, кремния и др.), в связи с направленностью сил связей, отмечается повышенная жесткость решетки. Это также сильно затрудняет подвижность дислокаций, проявляющуюся только при повышенных температурах (порядка $2/3$ от температуры плавления) [65].

Исследование дислокаций в кристаллах со структурой алмаза [38] показало, что дислокации в ковалентных кристаллах отличаются геометрически от дислокаций в металлах. Они обычно характеризуются цепочкой свободных связей вдоль своей оси, различным образом взаимодействующих, изменяя структуру дислокации в процессе движения. Перестройка дислокации происходит как вследствие перераспределения электронов, так и за счет диффузии атомов. Оба эти процесса вызывают локальные закрепления дислокаций, для снятия которых требуется определенная энергия активации.

Рассмотрение особенностей характерных внутрикристаллических типов сил связи объясняет меньшую пластичность минералов горных пород по сравнению с металлами, обуславливающую в значительной степени и меньшую пластичность горных пород.

На процесс деформации горных пород, в связи со спецификой их строения, особое влияние оказывают молекулярные связи по границам зерен.

Границы зерен в горных породах, в отличие от металлов, характеризуются значительно меньшими силами связи по сравнению с силами связи внутри зерен. Часто межзерновые связи, кроме того, экранируются прослойками менее прочного цементирующего вещества.

Ослабленность связей по границам зерен, особенно в диапазоне сравнительно небольших величин всестороннего сжатия, обуславливает высокую вероятность межкристаллического механизма

деформации горных пород в условиях напряженного состояния, характерного для изучаемого интервала глубин земной коры.

Процесс межзернового сдвижения должен сопровождаться разрывом связей, при этом возможно образование различных микро-разрывных нарушений (микротрещин).

Основываясь на литературных данных [155, 156] и учитывая особенности реальной структуры горных пород, можно остановиться на трех возможных схемах образования межзерновых микротрещин, совпадающих по направлению с максимальным сжимающим напряжением σ_1 (рис. 1, а, б, в).

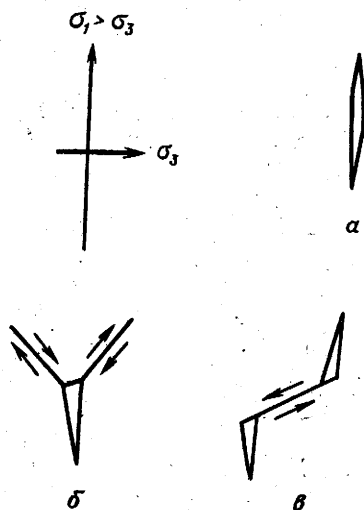


Рис. 1. Схемы образования межзерновых микротрещин в условиях неравномерного трехосного сжатия

него из трех зерен обладает более высоким коэффициентом Пуассона ν , чем два других, поскольку при этом появляется дополнительное «раздвигающее» давление, равное

$$P_1 = (\nu_1 - \nu_2) E \epsilon_1 \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (\text{II.1})$$

где ϵ_1 — продольная деформация породы вдоль направления σ_1 , α — угол между направлениями скольжения по границе зерна и деформацией ϵ_1 , E — модуль упругости.

Раскрытость «b» и длина «l» образовавшейся микротрещины должны быть пропорциональны размеру верхнего зерна

$$lb \approx kd. \quad (\text{II.2})$$

Согласно первой схеме (рис. 1, а), при сдвигении двух зерен на их границе образуется изолированная осевая микротрещина.

По второй схеме (рис. 1, б) микротрещина образуется при взаимном проскальзывании трех соседних зерен, по третьей (рис. 1, в) при движении зерна вдоль границы контакта, наклоненной к направлению действия максимального сжимающего напряжения σ_1 , на обоих концах этой границы возникают осевые микротрещины.

Во всех случаях раскрытость микротрещин совпадает с направлением действия минимального напряжения сжатия ($\sigma_2 = \sigma_3$).

Большая или меньшая вероятность реализации одной из описанных схем зависит от ряда причин.

Так, например, вероятность осуществления процесса по второй схеме возрастает, если минерал верх-

Большая вероятность возникновения микротрещин во всех случаях появляется при наличии на скользящих контактах податливых связей (например, малопрочного и пластичного цемента).

Роль границ зерен, как наиболее податливого звена в структуре породы, уменьшается с ростом сил прижатия зерен друг к другу, т. е. в условиях увеличения общего уровня всестороннего сжатия, при котором происходит деформирование породы.

В этом случае влияние границ зерен на общую деформацию горных пород постепенно сводится к тому влиянию, которое оказывают границы зерен в металлах, препятствуя движению дислокаций.

Из краткого рассмотрения физических особенностей деформации горных пород следует, что при напряженном состоянии, характерном для верхних частей земной коры, межкристаллическое скольжение является более вероятным механизмом деформации, чем внутрикристаллическое. Об этом свидетельствуют как меньшая эффективность дислокационного механизма у горных пород по сравнению с металлами, так и анализ факторов, интенсифицирующих процесс деформации по границам зерен у горных пород (неоднородность состава и распределения минеральных зерен и цементирующего вещества и др.).

В условиях неравномерного объемно-напряженного состояния, как было показано, вероятным процессом наряду с межзерновым скольжением является развитие микротрещиноватости по границам зерен.

Процесс трещинообразования по границам зерен возможен при величинах отношения сопротивления разрушению собственно минеральных зерен и контактов между ними, больших единицы. Поскольку с ростом величины среднего нормального напряжения прочность контактов возрастает, этот процесс должен затухать при определенных, разных для различных пород, значениях всестороннего сжатия.

Физическую картину влияния деформационной микротрещиноватости на процесс общего разрушения пород в настоящее время можно представить лишь в сугубо гипотетическом виде. Она может основываться на идее общего уменьшения несущей способности породы в результате развития процесса трещинообразования.

Единственным направлением детального изучения особенностей процесса деформации и разрушения горных пород с установлением границ преимущественного развития деформации того или иного механизма в настоящее время, по-видимому, является экспериментальное исследование этого процесса в контролируемых условиях с применением для оценки различных эффектов деформации их количественного изучения.

§ 2. Методы аналитического изучения процессов деформации и разрушения горных пород

Аналитическое изучение процессов деформации и разрушения горных пород основывается на использовании известных методов теорий упругости, пластичности и прочности твердых тел. В основе этих методов механики сплошной среды лежат модельные представления, установленные эмпирическим путем при механических испытаниях различных материалов и определенным образом формализованные. Физические представления о деформации и разрушении твердых тел практически используются лишь для качественного обоснования феноменологических моделей твердых тел.

В основе перечисленных теорий механики сплошных сред лежат фундаментальные понятия о напряжении и деформации. Последние в рассматриваемой точке тела выражаются тензорами второго ранга.

Тензор напряжений

$$T_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix}, \quad (II.3)$$

состоящий из трех нормальных напряжений σ_x , σ_y и σ_z и трех касательных τ_{xy} , τ_{xz} и τ_{yz} , может быть представлен в виде суммы

$$T_{\sigma} = T_{\sigma_0} + D_{\sigma}, \quad (II.4)$$

шарового тензора T_{σ_0} , соответствующего равномерному всестороннему сжатию или растяжению в точке

$$T_{\sigma_0} = \begin{vmatrix} \sigma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{vmatrix}. \quad (II.5)$$

и D_{σ} девиатора напряжений тензора, характеризующего напряжение сдвига в данной точке

$$D_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma_0 & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma_0 \end{vmatrix}. \quad (II.6)$$

В этих выражениях значение σ_0 равно

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z). \quad (II.7)$$

При $D_{\sigma} = 0$ в точке имеет место лишь равномерное всестороннее сжатие или растяжение. При таком напряженном состоянии сохраняется подобие формы деформирующего тела исходной

форме, т. е. отсутствует ее искажение, связанное с деформациями сдвига.

Если шаровой тензор равен нулю $T_{\sigma_0}=0$, то под действием девиатора напряжений происходит лишь изменение формы тела, связанное с деформациями сдвига.

В общем случае, когда $T_{\sigma_0} \neq 0$ и $D_{\sigma} \neq 0$, происходит одновременное изменение объема и формы тела.

Тензор деформаций T_{ϵ} равен

$$T_{\epsilon} = \frac{1}{3} T_{\epsilon_0} + D_{\epsilon}. \quad (II.8)$$

Он также может быть представлен в виде суммы шарового тензора деформаций T_{ϵ_0} , соответствующего объемному сжатию либо расширению

$$T_{\epsilon_0} = \begin{vmatrix} \epsilon_0 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_0 \end{vmatrix}, \quad (II.9)$$

и девиатора деформаций D_{ϵ} , характеризующего изменение формы тела, обусловливаемое сдвигами:

$$D_{\epsilon} = \begin{vmatrix} \epsilon_x - \frac{1}{3} \epsilon_0 & \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \frac{1}{2} \gamma_{xz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \epsilon_y - \frac{1}{3} \epsilon_0 & \frac{1}{2} \gamma_{yz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{xz} & \frac{1}{2} \gamma_{yz} & \epsilon_z - \frac{1}{3} \epsilon_0 \end{vmatrix}. \quad (II.10)$$

В этих выражениях ϵ_0 — относительное изменение объема тела при деформации, равное

$$\epsilon_0 = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z. \quad (II.11)$$

В отличие от других материалов, и прежде всего металлов, горные породы вследствие своих структурных особенностей обладают повышенной чувствительностью к влиянию шарового тензора напряжений T_{σ_0} . Это влияние проявляется как в более заметном, чем у других материалов, изменении объема породы при действии T_{σ_0} , так и в значительном увеличении ее сопротивления сдвигу, когда дополнительно к девиатору напряжений на горную породу действует шаровой тензор T_{σ_0} .

Теоретический и практический интерес к изучению влияния обеих составных частей тензора на деформационные свойства и процесс разрушения горных пород связан с разными аспектами рассмотрения деформационного поведения пород в условиях объемно-напряженного состояния.

Характер влияния равномерного всестороннего сжатия определяется исходной пористостью (пустотностью) породы и прочностью ее скелета. Высокопористые породы с малопрочным скелетом по свойствам приближаются к грунтам, для которых зависимость объема V от внешнего давления $\sigma_{\text{он}}$ имеет вид, представленный на рис. 2 [55].

Из рис. 2 видно, что при увеличении всестороннего сжатия $\sigma_{\text{он}}$ объем уменьшается сначала почти линейно (см. участок ca кривой I) до значения $\sigma_{\text{он}}$, соответствующего прочности скелета $\sigma_{\text{ос}}$ (точка a на кривой I). После преодоления прочности скелета начинается интенсивное нелинейное уменьшение объема, которое при некотором значительном остаточном увеличении плотности (вследствие ликвидации пористости) вновь замедляется (см. часть кривой I после точки b).

Принято считать [55], что на первой стадии сжатия (участок ca , рис. 2) поведение породы отвечает модели упругого тела, на втором (участок кривой ab , рис. 2) протекает необратимая деформация объема, о величине которой можно судить по кривой разгрузки (кривая II , рис. 2).

На третьей стадии (часть кривой I после точки b , рис. 2) поведение породы вновь приближается к модели упругого тела.

Можно предполагать, что чем меньше исходная пористость породы, тем позднее должна наступать вторая стадия деформации, т. е. тем монотоннее должна быть общая кривая зависимости объема пород от давления.

Следует отметить, что в связи с изучением влияния горного давления на коллекторские свойства горных пород в последние годы большое внимание уделяется теоретическому рассмотрению упругой деформации консолидированных горных пород-коллекторов нефти и газа в условиях равномерного всестороннего сжатия [2, 61, 63, 66, 142, 149, 150, 160, 167, 169, 170].

В результате проведенных исследований было установлено, что поведение пористых пород даже на первой стадии их деформации не соответствует поведению модели упругого тела.

Как известно, зависимость между объемной деформацией ε_v и напряжением $\sigma_{\text{он}}$ у сплошных идеально упругих тел имеет линейный характер

$$-\varepsilon_v = -\frac{\Delta V}{V} = \frac{3(1-2\nu)}{E} \sigma_{\text{он}} = \beta \sigma_{\text{он}}, \quad (\text{II.12})$$

где $\sigma_{\text{он}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ — среднее нормальное напряжение; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; β — коэффициент сжимаемости ($\beta = \text{const}$).

Как уже указывалось, в условиях залегания породы-коллекторы обычно насыщены газом или соответствующим флюидом (пластовой водой, нефтью) под давлением $p_{\text{п}}$. Поровое давление изменяет величину шарового тензора

$$T_{\sigma_{\text{он}}, p_{\text{п}}} = \begin{vmatrix} \sigma_{\text{он}} - \eta p_{\text{п}} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\text{он}} - \eta p_{\text{п}} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\text{он}} - \eta p_{\text{п}} \end{vmatrix}, \quad (\text{II.13})$$

где η — коэффициент, характеризующий передачу порового давления скелету породы.

С учетом порового давления выражение (II.12) можно переписать следующим образом

$$-\epsilon_v = \beta (\sigma_{\text{он}} - \eta p_{\text{п}}). \quad (\text{II.14})$$

Из выражений (II.12) и (II.14) следует, что коэффициент сжимаемости β идеально упругого тела является постоянной величиной:

$$\beta = \text{const}. \quad (\text{II.15})$$

Это условие в пределах изменения от единиц до нескольких десятков тысяч кгс/см² подтверждается для минералов [30] и плотных горных пород [24, 155], хотя и в этом случае из рассмотрения необходимо исключать небольшой участок в начале кривой, в пределах которого отмечается нелинейная зависимость деформации от напряжения, связанная, по-видимому, с закрытием исходных микротрещин в теле.

Поскольку условие (II.15) не подтверждается при экспериментальном деформировании пористых пород, были предложены и исследованы модели пористых сред.

Разработанные рядом исследователей [143, 160, 177, 179] модели, как это можно видеть на рис. 3, существенно отличаются от сплошной среды.

В модели В. Н. Щелкачева (рис. 3, а) гранулированная пористая среда моделировалась с помощью равновеликих шаров из

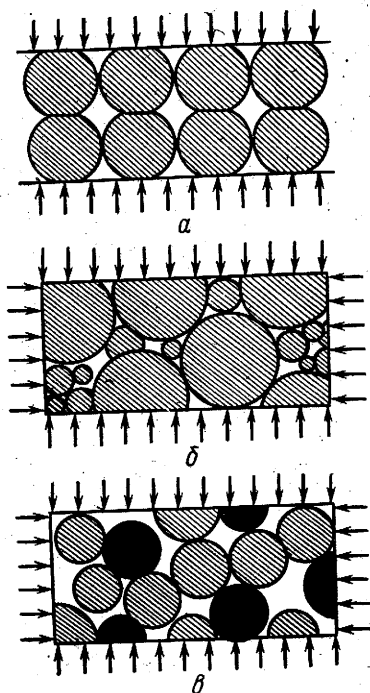


Рис. 3. Модели гранулярных пористых сред [63]

одинакового материала, в модели Г. Брандта (рис. 3, б) — с помощью шаров разного диаметра и также из одинакового материала, в модели И. Фетта (рис. 3, в) — с помощью равновеликих шаров двух различных материалов.

Анализ деформационного поведения моделей с использованием теории Герца об упругом сжатии шаров позволил получить следующие выражения для зависимости коэффициента сжимаемости пор моделей пористых сред β_{π} от величины эффективного напряжения $(\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})$ [63]:

модель В. Н. Щелкачева

$$\beta_{\pi} \approx 1,4 \left[\frac{3(1-\gamma_{\text{ТВ}}^2)}{E_{\text{ТВ}}} \right]^{2/3} (\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})^{-1/3}; \quad (\text{II.16})$$

модель Г. Брандта

$$\beta_{\pi} \approx 6,53 \left(\frac{1-\gamma_{\text{ТВ}}^2}{E_{\text{ТВ}}} \right)^{2/3} (\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})^{-1/3}; \quad (\text{II.17})$$

модель И. Фетта

$$\beta_{\pi} \approx \frac{2}{K_{\pi}} \left[f_1^2 \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} \right) + f_2^2 \left(\frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) + f_1 f_2 \left(\frac{1+\nu_1^2}{E_1} + \frac{1+\nu_2^2}{E_2} \right) \right] (\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})^{-1/3}. \quad (\text{II.18})$$

В выражениях (II.16), (II.17) и (II.18) коэффициент η принят равным единице, $E_{\text{ТВ}}$ и $\nu_{\text{ТВ}}$ — соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала шаров; в уравнении (II.18) E_1 и ν_1 ; E_2 и ν_2 — модули Юнга и коэффициенты Пуассона соответственно для шаров с высокой и низкой упругостью; K_{π} — коэффициент пористости моделей.

Сравнение теоретических зависимостей (II.16), (II.17), (II.18) с экспериментальными данными для разных песчаников, проведенное В. М. Добрыниным [63], показало, что они качественно подобны последним, хотя хорошего количественного совпадения получено не было.

Лучшее количественное совпадение, по-видимому, возможно при значительно большем приближении структур моделей к структурам реальных пород-коллекторов. В подобных моделях основное внимание должно быть уделено учету особенностей контактов между зернами скелета пород. При этом, возможно, появится необходимость учета касательных напряжений на контактах зерен [63]. Интересное предложение обосновывается И. Феттом в его работе [167], где предлагается моделировать консолидированные пористые породы с помощью модели из резиновых шаров, в случае сжатия по форме приближающихся к кубикам.

В работе [63] было исследовано также влияние естественных трещин и микротрещин на объемную деформацию пород на при-

мере модели, представленной на рис. 4. При этом было принято, что продольная деформация трещин меньше влияет на изменение объема породы, чем поперечная, и ею можно пренебречь. В этом случае коэффициент сжимаемости трещинного объема пустотного пространства породы равен

$$\beta_{\pi}^T \approx -\frac{1}{\xi} \left[\frac{1}{b} \frac{db}{d(\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})} \right]_{p_{\pi} = \text{const}}, \quad (\text{II.19})$$

где b — средняя раскрытость трещин; $\xi = \frac{V_{\Phi}}{V_{\pi}^T}$, где V_{π}^T — полный объем трещины по гладким стенкам; V_{Φ} — фактический объем трещины за вычетом объема неровностей на стенках и объема материала, заполняющего трещину (рис. 5, а и б), препятствующих ее смыканию.

Количественную оценку величины коэффициента сжимаемости β_{π}^T В. М. Добрынин провел на примере ряда простейших моделей трещин (рис. 5, а, б, в) [63].

Он установил, что для модели, представленной на рис. 5, а, будет следующая зависимость β_{π}^T от $(\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})$:

$$\beta_{\pi}^T = \frac{2}{3} \xi \left[\frac{1 - \nu_{\text{ТВ}}^2}{1 - 2\nu_{\text{ТВ}}} \beta_{\text{ТВ}} \right]^{2/3} (\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})^{-1/3}; \quad (\text{II.20})$$

для модели, представленной на рис. 5, б,

$$\beta_{\pi}^T \approx 1,05 \left[\frac{(1 - \nu_{\text{ТВ}}^2)}{(1 - 2\nu_{\text{ТВ}})} \beta_{\text{ТВ}} \right]^{2/3} (\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})^{-1/3}; \quad (\text{II.21})$$

для модели, представленной на рис. 5, в,

$$\beta_{\pi}^T \approx \frac{\pi(1 - \nu_{\text{м}}^2) + 2 \frac{(1 - 2\nu_{\text{м}})}{(1 - 2\nu_{\text{ТВ}})}}{6(1 - 2\nu_{\text{м}})} \beta_{\text{м}} \frac{(\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})_i}{(\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})}; \quad (\text{II.22})$$

где $(\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})_i$ — концентрация напряжений в местах «перемычек» в трещине. При превышении ее критического значения в этих местах начинается неупругое смыкание; $\nu_{\text{м}}$ — коэффициент Пуассона матрицы породы.

Сравнение зависимостей (II.20), (II.21), (II.22) с экспериментальными для трещинных известняков показало устойчивое качественное соответствие форм кривых, хотя количественное совпадение получить не удалось вследствие грубой схематизации реальной структуры пород, характеристика истинной трещиноватости которой к тому же отсутствовала.

Несмотря на несовершенство предложенных моделей пористых и трещинных пород-коллекторов, их исследование позволило сделать ряд весьма важных выводов.

Во-первых, с их помощью удалось дать качественную оценку влиянию структуры пород на зависимость коэффициента их сжимаемости от давления. Во-вторых, и это особенно важно, с помощью моделей было установлено, что коэффициент сжимаемости реальных горных пород не является постоянной величиной, а связан функциональной зависимостью с величиной эффективного напряжения ($\sigma_{\text{он}} - p_{\text{г}}$).

Этот вывод имеет принципиальное значение, поскольку из него следует, что известные уравнения теории упругости нельзя механически переносить на осадочные горные породы, отличающиеся от сплошных сред наличием пор, трещин и других пустот.

Особенности структуры большинства горных пород (наличие пустот различной формы) опре-

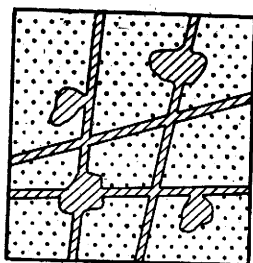


Рис. 4. Модель трещинно-кавернозной породы

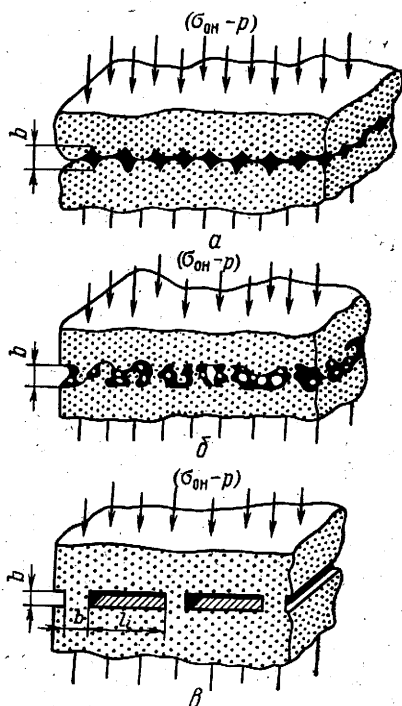


Рис. 5. Модели трещин
 b — раскрытость трещин

деляют необходимость особого подхода при разработке теории их деформации.

В последние годы в этом направлении предприняты первые шаги, позволившие дать основы теории обратимой (упругой) объемной деформации пористых сред.

Ф. Гассман [170] предложил рассматривать горные породы как дифференциально упругие тела, отдельные структурные компоненты которых (минеральные зерна) уподобляются при этом упругим телам, к которым применены решения теории упругости.

Для такой модели Гассманом и Био [150] были рассмотрены изотермические деформации пористых тел, не содержащих в порах минеральных включений. При этом были выделены упругие

константы, характерные для деформации пористых пород, насыщенных жидкостью под давлением.

В. М. Добрынин [63], основываясь на теории Био—Гассмана, рассмотрел упругие деформации чистых однородных коллекторов без минеральных включений в условиях равномерного всестороннего сжатия, дополнив эти исследования изучением влияния температуры на объемные деформации пород-коллекторов.

Для определения объемных деформаций пористых сред были введены три коэффициента сжимаемости:

коэффициент сжимаемости скелета породы (собственно породы)

$$\beta_{\text{ск}} = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma_{\text{он}}} \right)_{p_{\text{п}}, t} = -\frac{1}{V} \left[\frac{\partial V}{\partial (\sigma_{\text{он}} - p_{\text{п}})} \right]_{p_{\text{п}}, t}; \quad (\text{II.23})$$

коэффициент сжимаемости пор породы

$$\beta_{\text{п}} = -\frac{1}{V_{\text{п}}} \left(\frac{\partial V_{\text{п}}}{\partial \sigma_{\text{он}}} \right)_{p_{\text{п}}, t} = -\frac{1}{V_{\text{п}}} \left[\frac{\partial V_{\text{п}}}{\partial (\sigma_{\text{он}} - p_{\text{п}})} \right]_{p_{\text{п}}, t}; \quad (\text{II.24})$$

коэффициент сжимаемости твердой фазы породы

$$\begin{aligned} \beta_{\text{тв}} &= -\frac{1}{V_{\text{тв}}} \left[\frac{\partial V_{\text{тв}}}{\partial \sigma_{\text{он}}} \right]_{(\sigma_{\text{он}} - p_{\text{п}}), t} = -\frac{1}{V_{\text{тв}}} \left[\frac{\partial V_{\text{тв}}}{\partial p_{\text{п}}} \right]_{(\sigma_{\text{он}} - p_{\text{п}}), t} = \\ &= -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma_{\text{он}}} \right)_{(\sigma_{\text{он}} - p_{\text{п}}), t} = -\frac{1}{V} \left[\frac{\partial V}{\partial p_{\text{п}}} \right]_{(\sigma_{\text{он}} - p_{\text{п}}), t}, \end{aligned} \quad (\text{II.25})$$

где индексы у скобок показывают, что частные производные взяты при постоянной величине пластового давления $p_{\text{п}}$, постоянной температуре t и при постоянной разности напряжений $(\sigma_{\text{он}} - p_{\text{п}})$; V , $V_{\text{тв}}$ и $V_{\text{п}}$ — соответственно объемы породы, твердой фазы и пор.

Уравнения объемных деформаций имеют следующий вид:

$$-\left(\frac{\partial V}{\partial \sigma_{\text{он}}} \right) = \beta_{\text{ск}} d(\sigma_{\text{он}} - p_{\text{п}}) + \beta_{\text{тв}} dp_{\text{п}}; \quad (\text{II.26})$$

$$-\left(\frac{\partial V_{\text{п}}}{\partial \sigma_{\text{он}}} \right) = \beta_{\text{п}} d(\sigma_{\text{он}} - p_{\text{п}}) + \beta_{\text{тв}} dp_{\text{п}}; \quad (\text{II.27})$$

$$-\left(\frac{\partial V_{\text{тв}}}{\partial \sigma_{\text{он}}} \right) = \frac{1}{1 - K_{\text{п}}} \beta_{\text{тв}} d(\sigma_{\text{он}} - p_{\text{п}}) + \beta_{\text{тв}} dp_{\text{п}}, \quad (\text{II.28})$$

где $K_{\text{п}}$ — коэффициент пористости породы.

Между коэффициентами сжимаемости пористой породы и коэффициентом ее пористости имеет место следующее соотношение [63, 172, 218, 221]:

$$\beta_{\text{ск}} = K_{\text{п}} \beta_{\text{п}} + \beta_{\text{тв}}. \quad (\text{II.29})$$

В. М. Добрынин [63] распространил изложенную теорию деформаций пористой среды также на случай деформации однородного

пористого тела, содержащего глинистые включения в порах (не входящие в состав скелета и не влияющие на сжимаемость скелета), дав следующие уравнения для объемной деформации такого типа:

$$-\left(\frac{\partial V}{V}\right)_t = \beta_{\text{ск}} d(\sigma_{\text{он}} - p_{\text{п}}) + \beta_{\text{тв}} dp_{\text{п}} - \alpha_{t_{\text{тв}}} dt; \quad (\text{II.30})$$

$$-\left(\frac{\partial V_{\text{п}}}{V_{\text{п}}}\right)_t = \beta_{\text{п}} d(\sigma_{\text{он}} - p_{\text{п}}) + \mu_{\text{р}} \beta_{\text{тв}} dp_{\text{п}} - \mu_{\text{т}} \alpha_{t_{\text{тв}}} dt; \quad (\text{II.31})$$

$$\begin{aligned} -\left(\frac{\partial V_{\text{тв}}}{V_{\text{тв}}}\right)_t &= \frac{1}{1 - K_{\text{п}}} \beta_{\text{тв}} d(\sigma_{\text{он}} - p_{\text{п}}) + \\ &+ \frac{1 - \mu_{\text{р}} K_{\text{п}}}{1 - K_{\text{п}}} \beta_{\text{тв}} dp_{\text{п}} - \frac{(1 - \mu_{\text{т}} K_{\text{п}})}{1 - K_{\text{п}}} \alpha_{t_{\text{тв}}} dt. \end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

В этих уравнениях $\beta_{\text{п}} = \frac{1 - \eta_{\text{гл}} \frac{\beta_{\text{вкл}}}{\beta_{\text{тв}}}}{1 - \eta_{\text{гл}}}$ (где $\eta_{\text{гл}}$ — относительное содержание глинистых включений в объеме пор породы и $\beta_{\text{вкл}}$ — коэффициент сжимаемости включений); $\mu_{\text{т}} = \frac{1 - \eta_{\text{гл}} \frac{\alpha_{t_{\text{вкл}}}}{\alpha_{t_{\text{тв}}}}}{1 - \eta_{\text{гл}}}$ (где

$\alpha_{t_{\text{тв}}}$ и $\alpha_{t_{\text{вкл}}}$ — соответственно коэффициенты объемного теплового расширения скелета породы-коллектора и минеральных включений в его порах).

Для практического использования вышеприведенных уравнений необходимо определение экспериментальным путем входящих в них коэффициентов сжимаемости ($\beta_{\text{ск}}$, $\beta_{\text{п}}$, $\beta_{\text{тв}}$, $\beta_{\text{вкл}}$), что обязывает наряду с теоретическими исследованиями проводить экспериментальные — в специальных установках высокого давления.

Поведение пористых горных пород на второй стадии объемной деформации (см. участок *ab*, рис. 2), связанной с неупругим уплотнением, практически не изучалось с помощью аналитических методов. В этом случае необходимо моделировать неупругую деформацию несплошной среды и разрушение на границах зерен, а также частично зерен в местах их контактов друг с другом. При рассмотрении этих процессов необходимо привлекать положения теорий пластичности и прочности, оперирующих уже с понятием девиатора напряжений.

Поведение пород на третьей стадии деформации (выше точки *b*, на рис. 2), в соответствии с предположениями, выдвинутыми в работе С. С. Григоряна [55], должно приближаться к поведению, описываемому уравнением (II.12) и характеризоваться одним коэффициентом сжимаемости.

Какие-либо данные, позволяющие проверить это предположение, в литературе отсутствуют.

В деформационном поведении горной породы, находящейся под совместным действием шарового тензора и девиатора напряжений, выделяются три следующих друг за другом процесса: процесс упругого изменения формы, процесс необратимой деформации формы и процесс разрушения.

А. В отличие от стадии упругой объемной деформации в условиях равномерного всестороннего сжатия, в процессе упругого сдвига под действием девиатора напряжений порода практически отвечает модели упругой сплошной среды и характерной для нее основной зависимости

$$D_{\sigma} = \frac{E}{1+\nu} D_{\epsilon}. \quad (\text{II.33})$$

Для оценки напряжений и деформаций изменения формы обычно пользуются не самими девиаторами D_{σ} и D_{ϵ} , а их вторыми инвариантами $Y_2(D_{\sigma})$ и $Y_2(D_{\epsilon})$, которые выражаются следующим образом:

$$Y_2(D_{\sigma}) = \frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]; \quad (\text{II.34})$$

$$Y_2(D_{\epsilon}) = \frac{1}{6} [(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_x - \epsilon_z)^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)]. \quad (\text{II.35})$$

Соответствующие им величины

$$T = +\sqrt{Y_2(D_{\sigma})}; \quad (\text{II.36})$$

$$\Gamma = +2\sqrt{Y_2(D_{\epsilon})} \quad (\text{II.37})$$

называются: T — интенсивностью касательных напряжений, Γ — интенсивностью касательных деформаций.

Вместо зависимости (II.33) можно записать

$$T = E\Gamma. \quad (\text{II.38})$$

В ряде экспериментальных работ последнего десятилетия [154, 156, 204, 205] в процессе упругой деформации горных пород под действием девиатора напряжений обнаружена интересная особенность деформационного поведения, ограничивающая применимость условия (II.38). Эту особенность иллюстрирует рис. 6 [156].

На рис. 6, а, б приведены кривые изменения продольной ϵ_z и поперечной ϵ_{θ} деформаций, относительного изменения объема $\frac{\Delta V}{V}$

и отношения $\frac{\epsilon_\theta}{\epsilon_z}$ для гранита при увеличении $T = \sigma_z - \sigma_{\text{он}}$ в атмосферных условиях (рис. 6, а) и при гидростатическом давлении $\sigma_{\text{он}} = 10^8 \text{ Н/м}^2$ (рис. 6, б).

Из рис. 6, а следует, что если ϵ_z изменяется с ростом $T = \sigma_z$ почти линейно на всем протяжении деформирования, то ϵ_θ еще на ранней стадии развития начинает отклоняться от прямой линии, в результате чего происходит увеличение объема породы (см. кри-

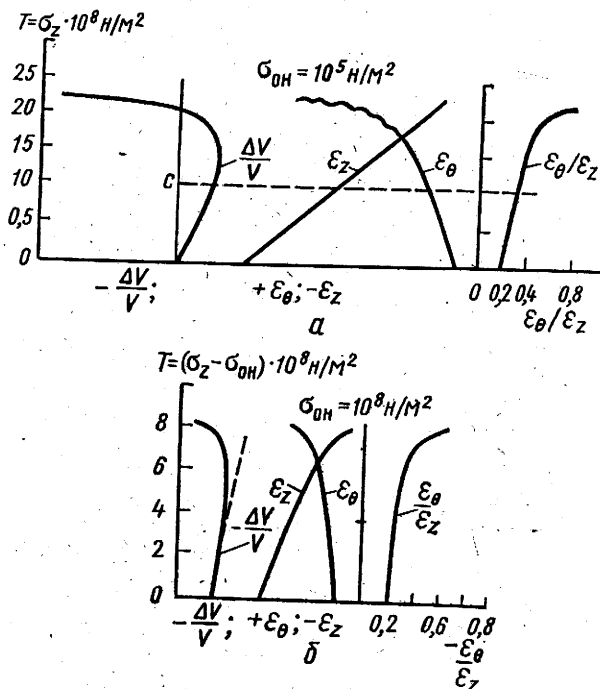


Рис. 6. Диаграммы деформаций гранита [156].

а — $\sigma_{\text{он}} = 10^5 \text{ Н/м}^2$; б — $\sigma_{\text{он}} = 10^8 \text{ Н/м}^2$; ϵ_z и ϵ_θ — продольная и поперечная деформации образца в %; $\Delta V/V$ — изменение объема в %

вую $\frac{\Delta V}{V}$ на рис. 6, а). Отмеченное увеличение объема вызвано развитием микротрещин, ориентированных в направлении действия максимального напряжения (в результате чего их раскрытость увеличивает поперечное сечение породы).

Гидростатическое сжатие несколько снижает этот эффект (рис. 6, б), что связано с его влиянием на развитие микротрещиноватости.

На рис. 7 приведена обобщенная схема поведения горной породы при ее макроупругой продольной деформации (ϵ_z) в про-

цессе увеличения T [156]. Согласно этой схеме в процессе деформации упруго-хрупкой породы выделяются четыре стадии деформационного поведения, соответствующие:

стадия I — процессу закрытия исходных трещин;

стадия II — процессу деформации идеально упругого тела;

стадия III — процессу развития микротрещин в объеме тела;

стадия IV — процессу общего разрушения породы.

Стадия III, как показали эксперименты, начинается при $T = \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3}\right) T_p$, где T_p — значение разрушающей нагрузки.

Таким образом, зависимость (II.12), призванная описывать деформационное поведение породы в стадии упругой деформации, практически характеризует лишь небольшую часть общей диаграммы деформаций упруго-хрупкой породы (стадию II).

Б. Для изучения процесса необратимого изменения формы пластических материалов создана, как известно, достаточно разработанная теория пластичности [69, 72].

Теория пластичности основана на ряде постулатов, вытекающих из опыта механических испытаний пластичных металлов и позволивших создать феноменологические модели пластичных сред в рамках идеализированной сплошной среды.

Горные породы резко отличны по деформационному поведению от металлов в процессе неупругого деформирования.

Различие, прежде всего, заключается в виде так называемого условия пластичности. Переход металлов за предел текучести при объемном напряженном состоянии выражается с помощью условия Губера—Мизеса [72]

$$T = \text{const} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (\text{II.39})$$

где $\sigma_s = 2\tau_s$ — предел текучести материала при одноосном напряженном состоянии или в более простой форме (условие Треска—Сен-Венана):

$$\begin{aligned} 2|\tau_1| &= |\sigma_2 - \sigma_3| \leq \sigma_s; \\ 2|\tau_2| &= |\sigma_3 - \sigma_1| \leq \sigma_s; \\ 2|\tau_3| &= |\sigma_1 - \sigma_2| \leq \sigma_s. \end{aligned} \quad (\text{II.40})$$

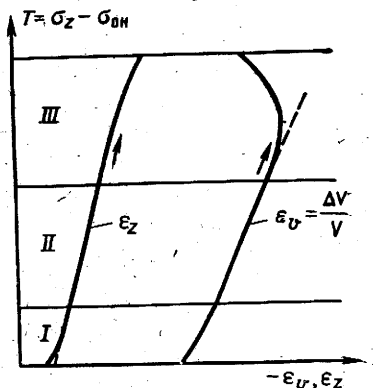


Рис. 7. Схема стадий продольной деформации пород (ϵ_z) с ростом девиатора напряжений T [156]

Применительно к горным породам правые части выражений (II.39) и (II.40) должны быть переменными величинами, зависящими соответственно от всестороннего сжатия в точке σ_0 либо от величины $\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$, которая интерпретируется как нормальное напряжение на площадке пластического сдвига.

Выражение (II.39), как было показано Ф. Шлейхером [217], записывается в этом случае следующим образом:

$$T = q\sigma = \sqrt{2\tau_s}, \quad (\text{II.41})$$

где $q = \text{const}$, а выражение (II.40) приводится к виду [90]:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) + \alpha(\sigma_1 + \sigma_3) = 2\tau_s, \quad (\text{II.42})$$

где α — коэффициент трения.

Из выражений (II.41) и (II.42) следует, что шаровой тензор оказывает упрочняющее действие на материалы в процессе развития в них неупругих деформаций.

Упрочнение может быть обусловлено как возрастанием коэффициента внутреннего трения, так и внутренними упругими силами межзерновой и междублочной породы.

В работе В. В. Новожилова [90] описание монотонного изменения условия пластичности вследствие упрочнения приводится для случаев, когда упрочнение полностью приписывается влиянию микроупругих эффектов или увеличению коэффициента внутреннего трения.

В первом случае коэффициент внутреннего трения принимается постоянным, зависимость между пластическими деформациями и макроскопическим тензором, характеризующим упругие напряжения [201], — линейной, а критерий (II.42) выражается следующим образом:

$$g^* = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) - \frac{1}{2}G^*(\epsilon_1^p - \epsilon_3^p) + \frac{1}{2}\alpha(\sigma_1 + \sigma_3) = \tau_s, \quad (\text{II.43})$$

где ϵ_1^p , ϵ_2^p , ϵ_3^p — главные компоненты тензора пластических деформаций ($\epsilon_1^p > \epsilon_2^p > \epsilon_3^p$); G^* — модуль упрочнения при сдвиге; τ_s — начальное пластическое сопротивление материала чистому сдвигу. Величины τ_s и G^* считаются постоянными.

При применении ассоциированного закона течения

$$d\epsilon_{ij}^p = h \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} dF \quad (\text{II.44})$$

в уравнении (II.44) $d\epsilon_{ij}^p$ — приращение пластической деформации вследствие приращения напряжения $d\sigma_{ij}$; h — множитель пропорциональности, именуемый функцией упрочнения, характеризующий степень достигнутого деформационного упрочнения и критерия на-

гружения $F = g^*$ получаем следующие соотношения между напряжениями и пластическими деформациями:

$$(d\varepsilon^p)_1 = \frac{1}{2}(1 + \alpha) h d g^*; \quad (d\varepsilon^p)_2 = 0; \quad (d\varepsilon^p)_3 = -\frac{1}{2}(1 - \alpha) h d g^*. \quad (\text{II.45})$$

В этих выражениях $(d\varepsilon^p)_j$ — главные значения тензора приращения пластических деформаций $d\varepsilon^p_{ij}$.

Из (II.45) следует, что

$$d\varepsilon^p = (d\varepsilon^p)_1 + (d\varepsilon^p)_2 + (d\varepsilon^p)_3 = \alpha h d g^* = \alpha [(d\varepsilon^p)_1 - (d\varepsilon^p)_2 - (d\varepsilon^p)_3] > 0. \quad (\text{II.46})$$

Таким образом, В. В. Новожилов установил, что если принять закон упрочнения в форме (II.43), то из ассоциированного закона течения следует, что всякая пластическая деформация должна сопровождаться остаточным монотонным увеличением объема.

К аналогичному результату приводит и использование в качестве критерия упрочнения выражения, согласно которому упрочнение приписывается увеличению коэффициента внутреннего трения.

Следует отметить, что если степень разрыхления структуры, вызываемого действием микроупругих сил, оказалась пропорциональной пути пластического деформирования, то при действии сил трения увеличение объема должно быть пропорционально работе, затрачиваемой на пластическое деформирование.

В. В. Новожилов [90] предполагает, что эффект разрыхления структуры при пластической деформации является статистическим результатом влияния дефектности строения твердого тела, а сам процесс разрыхления заключается в образовании микропор и микротрещин в деформируемом материале.

Если для металлов разрыхление структуры в процессе неупругой деформации составляет доли процента и им можно пренебречь, то у горных пород, особенно осадочных, увеличение объема достигает десятков процентов [14, 95, 101, 120, 121, 140] и разрыхление становится одной из основных особенностей процесса деформации.

Проведенное изучение структур деформированных пород [14] позволило выявить систему деформационных микротрещин, преимущественная ориентировка которых, как и следовало ожидать, совпадала с направлением максимального главного сжимающего напряжения.

В. Аналитическое изучение процесса разрушения горных пород построено на использовании достижений общей теории разрушения материалов, которая развивается сейчас в двух основных направлениях.

Первое из них, получившее наибольшее развитие, — феноменологическое. В феноменологических теориях, используемых в технике,

определяются условия, при которых в различных материалах начинают развиваться пластические деформации или разрушения.

Если принять за координаты некоторой точки главные нормальные напряжения, характеризующие напряженное состояние, которое вызывает нарушение прочности тела, то совокупность таких точек образует предельную поверхность разрушения.

Вид этой поверхности определяется выбранной теорией прочности, утверждающей преимущественное влияние одного или совокупности факторов на прочность материала, т. е. его предельное состояние.

Для оценки условий наступления предельного состояния горных пород наиболее часто применяется теория Мора, утверждающая зависимость сопротивления сдвига горных пород не только от касательных, но и от нормальных напряжений в данной точке тела.

Анализ результатов механических испытаний горных пород показывает, что они находятся в хорошем соответствии с этой теорией [80, 104, 111].

Условия прочности по этой теории изображаются в виде огибающей семейства кругов, построенных на основании нескольких опытов при различных сочетаниях главных напряжений σ_1 и σ_3 (среднее по величине напряжение в теории Мора не учитывается).

Теория Мора применима как к пластичным, так и к хрупким породам.

В последние годы было проведено несколько исследований при несимметричном объемно-напряженном состоянии. Результаты этих исследований иногда подтверждали независимость предельного состояния от средних нормальных напряжений [80], в других же случаях — свидетельствовали о существовании такой зависимости [190].

Для оценки прочности горных пород применяется и теория, учитывающая влияние среднего нормального напряжения. Эта теория характеризует зависимость удельной энергии изменения формы

от величины среднего напряжения $\sigma_{\text{окт}} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$. Теория касательного октаэдрического напряжения $\tau_{\text{окт}}$ относит условие пластичности не к плоскостям скольжения, а к октаэдрическим плоскостям тензора напряжений.

В общем виде условие пластичности, согласно этой теории, выражается уравнением

$$\tau_{\text{окт}} = f(\sigma_{\text{окт}}), \quad (\text{II.47})$$

где

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

$$\text{а } \sigma_{\text{окт}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}.$$

Условие прочности, согласно этой теории, представляет поверхность вращения: круговой конус, параболоид, так же как и согласно теории Мора (параболоид или гиперболоид).

Несколько лет назад была опубликована работа Р. М. Эйгеса и Ю. Я. Эстрина [144], в которой на основании анализа экспериментальных данных сделан вывод о том, что предельная поверхность разрушения для горных пород не является поверхностью вращения, а общая предельная зависимость имеет вид

$$\tau = f(\sigma_{\text{окт}}, \mu), \quad (\text{II.48})$$

где μ — критерий Лодэ, $\mu = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ характеризует влияние среднего нормального напряжения σ_2 .

Аналогичные выводы сделаны также в опубликованных недавно экспериментальных работах [9, 190].

В работе Б. В. Байдюка [9] сделана попытка разработать методику точного построения предельной поверхности, исходя из учета двух различных видов нарушения прочности — отрыва и сдвига. Он показал, что в наступлении предельного состояния у горных пород отрыв играет значительно большую роль, чем это следует из теории Мора. Возникновение отрыва оказалось возможным не только в точках предельной поверхности, относящихся к области растягивающих напряжений, но и в той части предельной поверхности, которая относится к области напряжений сжатия.

В этой работе зависимость (II.47) рекомендуется для случаев преимущественного сдвига. Для случая преимущественного отрыва рекомендуется применять обобщенную теорию максимальной упругой деформации в виде

$$\sigma_1 - \nu [\sigma_2 + \sigma_3] = f(\sigma_1), \quad (\text{II.49})$$

где функция $f(\sigma_1)$ определяется экспериментальным путем.

Точки перехода от преимущественного отрыва к преимущественному сдвигу определяются из системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} \tau_{\text{окт}} &= f(\sigma_{\text{окт}}) \\ \sigma_1 - \nu [\sigma_2 + \sigma_3] &= f(\sigma_1) \\ \mu &= \text{const} \end{aligned} \right\}. \quad (\text{II.50})$$

Второе направление является относительно новым и основывается на рассмотрении характерных типов разрушения: 1) разрушение, которое наступает после стадии макроупругого деформирования, и 2) разрушение, наступающее после стадии макропластической деформации.

Как было показано ранее, оба эти случая характеризуют общие признаки разрушения, а именно зарождение и развитие систем микротрещин уже в «недрах» процессов макроупругой или макропластической деформации пород.

Следовательно, общая задача состоит, во-первых, в аналитическом изучении упомянутых процессов микротрещинообразования в обоих случаях и, во-вторых, в соответствующем изучении процессов перехода трещинообразования в процессы общего разрушения.

В настоящее время аналитическим изучением в определенной степени может быть охвачен только процесс трещинообразования в условиях макроупругого деформирования, к которому применима развиваемая сейчас теория трещин хрупкого разрушения [16—18, 102, 174, 175].

Аналитическое изучение процесса разрушения второго типа начато в последнее время для металлов в связи с оценкой их прочности при циклическом нагружении [90, 91].

Основы теории хрупкого разрушения были заложены Гриффитсом [174, 175], который путем сопоставления скорости освобождения упругой энергии с увеличивающейся при этом поверхностью трещины установил критическое условие

$$\sigma l^{1/2} = \text{const} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi(1-\nu)^2}} \quad (\text{II.51})$$

для неустойчивого равновесия трещин длиной $2l$. В выражении (II.51) σ — внешнее критическое растягивающее напряжение; γ — поверхностное натяжение, зависящее для данного материала только от температуры.

Гриффитс положил начало так называемого энергетического подхода к изучению хрупкого разрушения.

В дальнейшем Ирвин [196, 197] и Орован [211] вместо γ ввели в рассмотрение эффективную плотность поверхностной энергии Y , в которую включается необратимая работа пластических деформаций в тонком слое вблизи поверхности трещин.

Величина Y зависит от температуры, скорости деформирования, структуры материала и др. Это позволило применить теорию Гриффитса к квазихрупким материалам.

В последующих работах Ирвин [197] свел условие предельного равновесия трещины к условию равновесия ее вершины. Вместо упругой энергии, освобождающейся при появлении всей трещины длиной $2l$, он рассмотрел только концентрированную упругую энергию у ее вершины. Введя вариацию этой энергии совместно с одновременной вариацией плотности поверхности энергии трещины, Ирвин получил критерий быстрого распространения трещины

$$\pi(1-\nu)^2 E^{-1} N^2 \geq Y_{\text{эфф}} \quad (\text{II.52})$$

для плоскодеформированного напряженного состояния или

$$\pi E^{-1} N^2 \geq Y_{\text{эфф}} \quad (\text{II.53})$$

для плосконапряженного состояния.

Величина N в выражениях (II.52) и (II.53), имеющая размерность дин/см^{3/2}, полностью определяет поведение поля напряжений и деформаций у края трещины. Ирвин назвал эту константу коэффициентом интенсивности напряжений. N входит в уравнение для компонент нормальных и касательных напряжений в окрестности вершины трещины [89, 197].

Как видно из выражений (II.52) и (II.53), константа N практически определяется через величины E , ν и $Y_{\text{эфф}}$ из условия стационарности свободной энергии. С другой стороны, она однозначно определяет напряжения у вершины трещины и, следовательно, обуславливает возможность решения задачи о трещине в рамках теории упругости.

Дальнейшее развитие теории хрупкого разрушения получила в работах Г. И. Баренблатта [16—18], введшего в рассмотрение модель вершины трещины в виде «клюва», плавно смыкающегося под действием концентрации конечных сил, суммарная величина которых названа модулем сцепления K .

Модуль сцепления выражается как

$$K = \int_0^d \frac{G(t) dt}{t^{1/2}}, \quad (\text{II.54})$$

где $G(t)$ — функция, характеризующая распределение сил сцепления, отличная от нуля только в концевой области трещины $0 \leq t \leq d$ и не зависящая от приложенной нагрузки (d — размер концевой части трещины).

Силы сцепления вводятся как внешние по отношению к упругой среде силы, приложенные к вершине трещины. В такой постановке задача полностью решается на основе статических уравнений теории упругости, которыми являются уравнения равновесия сил в объеме и на поверхностях. При этом, в отличие от решения для эллипсовидной трещины Ирвина, напряжения в вершине трещины являются конечными, что придает этой теории большую логическую стройность.

Поскольку рассматриваемое хрупкое тело по определению является линейно упругим, напряженное состояние представляется как сумма двух напряженных состояний: напряженного состояния, вычисленного без учета сил сцепления, и напряженного состояния, соответствующего одним лишь силам сцепления. Поэтому коэффициент интенсивности в общем случае следует представлять в виде суммы

$$N_t = N + N_r. \quad (\text{II.55})$$

Здесь N соответствует данным действующим нагрузкам и данной конфигурации трещины, но без учета сил сцепления (он фигурирует

в решении Ирвина); N_T соответствует той же конфигурации трещин от сил молекулярного сцепления и определяется как

$$N_T = \frac{K}{\pi}. \quad (II.56)$$

Найдя путем простых рассуждений, что $N_i = 0$, Г. И. Баренблатт получил

$$N_T = -N \quad (II.57)$$

или

$$\frac{K}{\pi} = -N. \quad (II.58)$$

Если воспользоваться выражениями (II.57) и (II.58), то можно выразить значение модуля сцепления K через $Y_{эфф}$, E и ν .

Значение K может быть также использовано вместо интенсивности напряжений Ирвина в выражениях для компонент напряжений в окрестностях трещины.

При изучении конфигурации трещины в целом аналогичные результаты получаются и при применении теории, предложенной для микротрещин М. Я. Леоновым и В. В. Панасюком [83] и разработанной В. В. Панасюком [102].

В этой теории используется модель, близкая к модели Г. И. Баренблатта.

Из рассмотренного выше следует, что, располагая экспериментально определенными значениями K , можно рассчитывать размеры трещины при действии однородного плоскодеформированного либо плосконапряженного состояния в теле с однородной структурой.

В работе В. В. Смирнова предложена методика определения относительной величины модуля сцепления $K_{отн}$

$$K_{отн} = \sqrt{\frac{E}{p_0}}, \quad (II.59)$$

где p_0 — предел текучести, определяемый по диаграмме вдавливания в породу плоского цилиндрического штампа на приборе УМГП-3 по стандартной методике [54].

В формуле (II.59) значения $K_{отн}$ и p_0 выражаются в относительных единицах в виде частного от деления, соответственно, на K и p_0 для некоторого эталонного материала, для которого известно абсолютное значение K , определенное известными из литературы трудоемкими методами [18].

Рассмотренные выше аналитические решения позволяют выявить характер развития в хрупком, либо квазихрупком теле отдельной трещины, возникшей в условиях плоскодеформированного, либо плосконапряженного состояния. Эти решения оказываются эффективными, например, при гидравлическом разрыве пласта [66, 135], когда процесс разрушения полностью может быть описан развитием отдельно взятой трещины.

Вопрос об одновременном развитии в теле систем взаимодействующих трещин при указанных выше видах напряженного состояния, а также о развитии отдельной трещины, но в условиях объемно-напряженного состояния, находится еще в стадии постановки, поскольку его решение встречает значительные математические трудности.

Вопрос об аналитическом изучении III и IV стадий (см. рис. 7) деформации, сопровождающейся развитием трещиноватости в объеме упругодеформирующегося тела, приводящей к росту объема и последующему разрушению тела, в настоящее время также еще не изучен.

Возникновение и развитие трещины в «недрах» пластической деформации находит свое аналитическое описание на основе дислокационного механизма. Экспериментально обоснованным механизмом в этом случае является механизм Коттрела, в котором обосновывается также ориентировка трещины [133]. Согласно этому механизму (рис. 8) трещина зарождается в месте встречи двух полос скольжения и распространяется в плоскости, на которой лежит нормаль к оси действия растягивающего или минимального сжимающего напряжения. Длина этой трещины в равновесном состоянии определяется следующим образом:

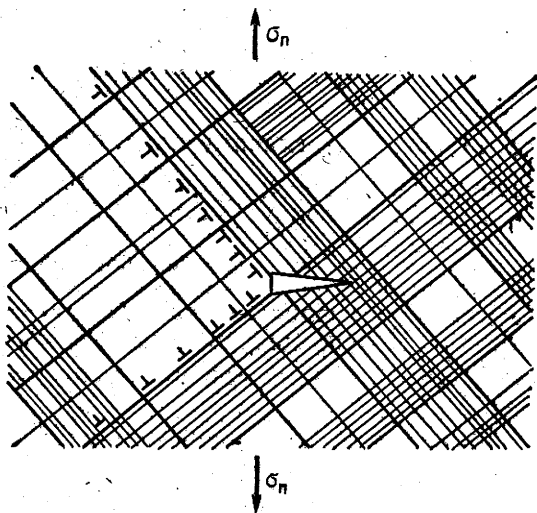


Рис. 8. Образование микротрещин при скоплении дислокаций

$$l = \frac{2\sigma_n \gamma}{\pi(1-\nu)\sigma_H^2} \quad (\text{II.60})$$

Здесь σ_n — нормальное напряжение в окрестности трещины, ориентированное, как показано на рис. 8, и равное в момент образования трещины: $\sigma_n = \frac{2,3\gamma}{n'b}$, где n' — число скопившихся дислокаций, приведших к образованию трещины, а b — вектор Бюргерса.

Следует отметить, что размер l , определяемый по формуле (II.60), приблизительно на порядок меньше реально наблюдаемых микротрещин в процессе эксперимента [133], что свидетельствует о несовершенстве предложенной теории, находящейся еще в стадии разработки.

Аналитическое описание разрушения, развивающегося в «недрах» пластической деформации тела, основывается поэтому на чисто феноменологическом использовании рассмотренных выше представлений о разрыхлении структуры и накоплении микронапряжений в процессе пластического деформирования. Основанное на этих представлениях условие разрушения имеет вид [91]

$$\mathcal{E}_p = \frac{A}{E_p} \left(1 - \frac{\sigma_0}{S}\right)^m, \quad (\text{II.61})$$

где \mathcal{E}_p — интенсивность пластических деформаций, равная

$$\mathcal{E}_p = \frac{1}{3} \sqrt{3} \sqrt{(\epsilon_1^p - \epsilon_2^p)^2 + (\epsilon_2^p - \epsilon_3^p)^2 + (\epsilon_3^p - \epsilon_1^p)^2}$$

где ϵ_1^p , ϵ_2^p , ϵ_3^p — главные пластические деформации материала до разрушения; E_p — суммарное разрыхление, численно равное отношению увеличению объема при деформации до разрушения;

$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ — среднее напряжение; S — сопротивление материала всестороннему разрыву; A — постоянная, равная $A = \beta_T \mathcal{E}_T^2$ (\mathcal{E}_T — предельное значение \mathcal{E}_p при разрушении путем чистого сдвига, β_T — коэффициент внутреннего трения); m — постоянная материала.

Если разрушение происходит после больших пластических деформаций, то входящие в (II.61) инварианты следует выражать в компонентах тензора логарифмических деформаций ϵ_1 , ϵ_2 и ϵ_3 , где $\epsilon_1 = \ln(1 + \epsilon_1)$; $\epsilon_2 = \ln(1 + \epsilon_2)$; $\epsilon_3 = \ln(1 + \epsilon_3)$.

Таким образом, при аналитическом описании процесса разрушения, вызванного развитием трещиноватости в пластической среде, параметры отдельно взятой трещины не рассматриваются, а используется некоторый интегральный показатель трещиноватости в теле в виде количественно определяемого роста объема от раскрытия трещин и микротрещин.

Из рассмотренного в этом параграфе материала следует, что наименее изученным и наиболее трудно описываемым аналитически является процесс зарождения и развития разрушения в твердом теле.

Поскольку у горных пород начало разрушения (возникновение микро- и макротрещин) относится к более ранней, чем у металлов, стадии нагружения, то, ввиду ограниченных возможностей функционального описания этого процесса, важное значение приобретают поиски решений, основанных на вероятностном описании. Последнее, как не требующее детерминированных связей, значительно уменьшает трудности аналитического описания процесса деформации и разрушения горных пород.

§ 3. Изучение процессов деформации и разрушения горных пород на основе статистической оценки особенностей их состава и строения

К настоящему времени работы, в которых прочностный анализ основан на предположении о наличии в твердых телах (или горных породах) соответствующим образом распределенных дефектов, уже получили значительное развитие [5, 26, 40, 41, 76, 121, 157, 159, 223].

Различие между концепциями разных авторов этого направления состоит в выборе свойств, приписываемых дефектам и их распределению. Реальные прототипы дефектов в структуре материала и их истинное распределение в объеме тела не рассматриваются. Поскольку при этом обычно принимается гипотеза о равномерном распределении дефектов в объеме тела, то вероятность разрушения возрастает с ростом объема и таким образом учитывается известное из практики влияние масштабного эффекта.

Основой первой группы статистических теорий [76, 223] является положение Гриффитса о наличии в теле ослабляющих его исходных трещин. Влияние этих слабых звеньев на прочность тела определяется вероятностью

$$P(\sigma_k) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_k}{\sigma_0} \right)^m \right], \quad (\text{II.62})$$

где σ_k — приложенное напряжение.

Согласно работе Т. А. Конторовой и Л. И. Френкеля [76], эта функция равна

$$P(\sigma_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\sigma_k - \bar{\mu})^2}{2v^2}}, \quad (\text{II.63})$$

В этих выражениях m , σ_0 и v — неизвестные параметры, позволяющие согласовывать выражения (II.62) и (II.63) с экспериментальными данными.

Дальнейшее развитие этих теорий было осуществлено в недавно опубликованных работах Б. Т. Брейди [157—159], в которых сделана попытка описать развитие процесса хрупкого разрушения на третьей и четвертой стадиях деформирования породы (см. рис. 7). Для этого Брейди ввел четыре гипотетических положения:

- а) распределение напряжений равномерно по всему объему образца;
- б) взаимодействие между микротрещинами отсутствует;
- в) объемные плотности как закрытых микротрещин ρ_{mc}^{cls} , так и открытых ρ_{mc}^{opt} пропорциональны плотностям микротрещин, активно участвующих в подготовке общего разрушения тела;

г) необходимая для разрушения тела критическая плотность микротрещин является постоянной величиной при любом напряженном состоянии.

Условие прочности имеет вид

$$B_1 (\rho_{mc}^{cls})_{\max} + B_2 (\rho_{mc}^{opt})_{\max} = B_3, \quad (II.64)$$

где B_1 , B_2 и B_3 — константы.

Согласно (II.64) общее разрушение наступает тогда, когда число микротрещин в теле возрастает настолько, что достигается высокая вероятность их объединения и образования общей поверхности разрушения. В работах [157, 158, 159] приведены выражения для практического определения значений $(\rho_{mc}^{cls})_{\max}$ и $(\rho_{mc}^{opt})_{\max}$, исходя из равномерного распределения микротрещин в породе.

Из теории Гриффитса [174, 175] следует, что условием наличия в теле открытых трещин является: $\sigma_3 \geq -\sigma_p$ (где σ_p — сопротивление разрыву). При $\sigma_3 < -\sigma_p$ в теле существуют только закрытые трещины, для которых, согласно работе [208], критерием прочности является

$$\tau_n - \tau_f \geq 2\sigma_p. \quad (II.65)$$

В работе [208] даны выражения для σ_n и τ_n в виде

$$\sigma_n = \frac{1}{4} (a_1 + a_2 \cos \psi); \quad \tau_n = \sqrt{\frac{1}{4} (b_1 + b_2 \cos 2\psi - \sigma_n^2)},$$

$$a_1 = 2\sigma_1 + (\sigma_2 + \sigma_3) + (\sigma_2 - \sigma_3) \cos 2\varphi;$$

$$a_2 = -2\sigma_1 + (\sigma_2 + \sigma_3) + (\sigma_2 - \sigma_3) \cos 2\varphi;$$

$$b_1 = 2\sigma_1^2 + (\sigma_2^2 + \sigma_3^2) + (\sigma_2^2 - \sigma_3^2) \cos 2\varphi;$$

$$b_2 = -2\sigma_1^2 + (\sigma_2^2 + \sigma_3^2) + (\sigma_2^2 - \sigma_3^2) \cos 2\varphi,$$

где ψ и φ — углы, определяющие ориентировку микротрещин по отношению к главным нормальным напряжениям σ_1 , σ_2 и σ_3 ; $\tau_f = \mu \sigma_n$, где μ — коэффициент трения.

Вторая группа статистических теорий принимает в качестве слабого звена более общий случай, включающий в себя не только трещину, но и определенным образом связанную с ней пластическую деформацию. При этом, согласно теории С. Д. Волкова [40, 41], под действием внешних сил в теле возникают как хрупкие, так и пластические трещины, общее число которых равно

$$q_k = (1 - p) q_y + p q_n, \quad (II.66)$$

где $p = \frac{N_n}{N}$ — вероятность пластического состояния, при котором

N_n — число микрообъектов, деформирующихся пластически, а N — общее число микрообъектов в теле; q_y и q_n — соответственно число хрупких и пластических микротрещин.

Статистическое условие прочности имеет вид

$$S_{\Pi} - \sigma_3 = C \sqrt{\theta}, \quad (II.67)$$

где C — постоянная материала; S_{Π} — сопротивление разрушению тела в микрообъемах; θ — модуль нормального распределения микрообъемов по величинам напряжений. Эта величина пропорциональна работе микроскопических напряжений A , т. е. $\theta = KA$, где K — постоянная величина.

Статистическая модель, разработанная для горных пород А. Н. Ставрогиным [121], отличается от модели Волкова значительно большей конкретизацией представлений о механизме деформации и разрушения микрообъема, принятого в качестве слабого звена.

В модели Ставрогина микроэлемент деформации и разрушения состоит из площадки длиной a , на которой реализуется сдвиг с постоянным модулем пластичности S_0 , при преодолении сопротивления τ , и площадки длиной b , по которой осуществляется отрыв при преодолении сопротивления σ_p . Из цепочки таких микроэлементов составляется ступенчатая поверхность микроразрушения. Условие предельного равновесия на площадке a имеет вид

$$\tau_1 = \tau - p, \quad (II.68)$$

где

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}; \quad p = \frac{x \sqrt{2}}{2} (\sigma_3 + \sigma_p); \quad x = \frac{b}{a}.$$

Условием выборки из объема тела вновь сдвигаемых микроэлементов является

$$\frac{\partial p}{\partial Q} \geq \frac{1}{2} \frac{\partial \tau}{\partial C}, \quad (II.69)$$

где

$$C = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}.$$

Как и во всех статистических теориях прочности, в этой теории распределение микроэлементов (числом N) принимается равномерным в объеме тела. По сопротивлению сдвигу число N распределяется соответственно закону нормального распределения

$$N = \frac{N_T}{\sqrt{2\pi} Q} e^{-\frac{(x-\tau)^2}{2Q^2}}, \quad (II.70)$$

где N_T — общее число способных к реализации микроэлементов сдвига; Q и x — некоторые постоянные величины.

Принимается, что модуль пластичности для каждой микроплощадки сдвига равен одной и той же величине S_0 . Постоянной величиной является также предельная деформация сдвига на микроплощадке, которая и представляет собой физический критерий

разрушения материала. После достижения этого критерия начинается разрушение по микроэлементу сдвига. Наибольшей вероятностью общего разрушения обладает поверхность ω , на которой больше микроэлементов сдвига, а следовательно, и больше вероятность встречи микроэлемента с меньшей предельной деформацией сдвига.

Объем материала, расположенный между микроповерхностями, деформируется лишь упруго. Физический смысл предела упругости заключается в возникновении первой (еще не сквозной) поверхности ω .

В результате большого объема экспериментальных исследований [118, 120, 121] установлено, что наиболее общим признаком, определяющим поведение горной породы, является параметр неравномерности напряженного состояния C , выражаемый как $C = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$. Этот параметр, как оказалось, связан простыми линей-

ными зависимостями с логарифмами всех основных показателей процесса деформации и разрушения породы — угла сдвига α , коэффициента Пуассона ν , числа микроэлементов N , величины пластической деформации до разрушения $\Delta \epsilon^p$, предела прочности τ_b , предела упругости τ_y .

Исключение составляет зависимость $\Delta \epsilon_1 = f(\Delta \tau)$, где $\Delta \epsilon_1 = \epsilon_1 - \epsilon_y$ и $\Delta \tau = \tau - \tau_y$, на которую C не оказывает никакого влияния, поскольку $\Delta \epsilon_1$ и $\Delta \tau$ связаны с C зависимостями аналогичного характера.

Из краткого анализа достижений в области создания теорий прочности, основанных на статистической модели породы, видно, что всем этим теориям присущ общий органический недостаток — в их основе лежит феноменологический подход к оценке процесса разрушения. Горная порода и в них представлена в виде гипотетической среды, в которой равномерно распределены микрообъемы ослабленного материала. В наиболее конкретных моделях [121] сделана попытка приблизить к реальным признакам породы размер микрообъемов путем сравнения его с размерами зерен. Это сравнение производится, однако, формально. С диаметром зерна связывается только длина площадки сдвига, следовательно, в качестве основного принимается механизм внутризернового скольжения.

§ 4. Обоснование единой схемы развития процессов деформации и разрушения горных пород при неравномерном трехосном сжатии и метод описания этих процессов

В первом параграфе данной главы уже рассматривались некоторые элементы состава и строения горных пород, которые могут оказывать влияние на процесс их деформации и разрушения. При этом подчеркивалось, что в пределах исследуемых глубин наиболь-

шую опасность должны представлять дефекты, вызванные наличием границ зерен в горных породах. Учитывая специфику связей на границах зерен, а также резко неоднородный характер процесса деформации по ним, можно считать, что этот процесс является определяющим, а роль предварительной пластической микродеформации до образования микротрещин на границах зерен является второстепенной.

В соответствии с этим истинное напряженное состояние горных пород обуславливается неоднородностью их строения и состава (материала зерен) и не может быть описано с помощью главных нормальных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 , рассчитанных исходя из предположения о сплошности и однородности материала породы.

Ниже рассматривается принципиально новый подход к оценке процесса разрушения, основанный на рассмотрении особенностей деформационного поведения пород как неоднородных сред и влияния этих особенностей на изменение несущей способности пород, определяющей их сопротивление разрушению.

Неоднородность пород предлагается характеризовать следующими показателями, оценивающими главным образом активное влияние границ зерен на процесс деформации и разрушения пород:

а) K_v — неоднородности минерального состава скелета

$$K_v = \frac{v_{\max}}{v_{\min}} \rho v_{\max}, \quad (\text{II.71})$$

где ρv_{\max} — отношение объемного содержания минерала с большим коэффициентом Пуассона v_{\max} к содержанию минерала с меньшим коэффициентом Пуассона v_{\min} ;

б) $K_s = \frac{1}{d_s}$ (II.72), где d_s — средний диаметр зерен;

в) K_{Π} — пустотности (пористости) породы;

г) K_c — свойств цементирующей прослойки.

$$K_c = \left(1 - \frac{\sigma_{isc}}{\sigma_{ism}}\right) \rho_c, \quad (\text{II.73})$$

где σ_{isc} и σ_{ism} — соответственно пределы текучести материала цемента и породообразующих минералов, а ρ_c — объемное содержание цементирующего материала в породе. Влияние выделенных показателей по-разному проявляется на различных стадиях деформации в условиях равномерного и неравномерного объемно-напряженных состояний.

Любое неравномерное напряженное состояние сжатия, характеризующееся главными нормальными напряжениями σ_1 , σ_2 и σ_3 , можно представить как сумму равномерного всестороннего сжатия σ_3 и дифференциального напряженного состояния, определяемого разностями $\sigma_1 - \sigma_2$ и $\sigma_2 - \sigma_3$. Первое из состояний, характеризующее коэффициентом сжимаемости $\beta = \varphi(\sigma_3)$, обуславливает

увеличение несущей способности материала, второе, оцениваемое значениями предела упругости $\tau_{iE} = \frac{\sigma_{iE} - \sigma_3}{2}$ и прочности $\tau_{ic} = \frac{\sigma_{ic} - \sigma_3}{2}$ породы, определяет уменьшение ее несущей способно-

сти, вследствие развития разуплотняющей породу микротрещиноватости, связанной с деформацией изменения ее формы (при значениях напряжений, больших предела упругости).

Величина τ_{iE} , так показывают экспериментальные данные, зависит от σ_3 . Поскольку β также зависит от σ_3 , можно записать, что

$$\tau_{iE} = f(\beta). \quad (II.74)$$

Конкретный вид функции $\beta = \varphi(\sigma_3)$ для разных пород, кроме σ_3 , зависит еще и от показателей состава и структуры пород, т. е.

$$\beta = \varphi_1(K_v, K_s, K_n, K_c, \sigma_3) \quad (II.75)$$

и, следовательно,

$$\tau_{iE} = f_1(K_v, K_s, K_n, K_c, \sigma_3). \quad (II.76)$$

Для оценки прочности породы вместо τ_{ic} удобнее пользоваться значениями $\Delta\tau_{ic} = \tau_{ic} - \tau_{iE}$, которое определяет сопротивление породы в процессе ее непрерывного деформационного разуплотнения после достижения предела упругости τ_{iE} при постоянном значении σ_3 .

Процесс разуплотнения протекает при непрерывном увеличении главной нормальной деформации сжатия ε_1 , в связи с чем для его характеристики вводится коэффициент, характеризующий интенсивность разуплотнения на единицу деформации

$$K_V = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta \varepsilon_1}. \quad (II.77)$$

Практически для сравнительной оценки свойств пород целесообразно использовать коэффициент предельного разуплотнения

$$K_{Vic} = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta \varepsilon_{1n}}, \quad (II.78)$$

где $\Delta \varepsilon_{1n}$ — остаточная деформация породы до разрушения при данной величине σ_3 .

Как и коэффициент сжимаемости, коэффициент предельного разуплотнения K_{Vic} для данной породы является однозначной функцией напряжения, т. е.

$$K_{Vic} = \varepsilon(\sigma_3). \quad (II.79)$$

Различия в значениях K_{vic} у разных пород связаны с зависимостью этого коэффициента также от показателей состава и структуры пород

$$K_{vic} = \varepsilon_1 (K_v, K_s, K_n, K_c, \sigma_3). \quad (II.80)$$

При $K_{vic} \approx 0$ деформация изменения формы тела протекает при практически ничтожном разуплотнении и модуль пластичности $E_{пл} \left(E_{пл} = \frac{\Delta \tau_{ic}}{\Delta \varepsilon_{пл}} \right)$ определяется только деформационным упрочнением. Последнее, как это следует из результатов испытаний металлов, практически не зависит от σ_3 . Исходя из этого, как модуль пластичности, так и $\Delta \tau_{ic}$, должны зависеть только от значения коэффициента предельного разуплотнения, т. е.

$$\Delta \tau_{ic} = F(K_{vic}). \quad (II.81)$$

Анализ и исследования, выполненные в этой главе, обобщают достижения теоретического направления исследований деформационного поведения и прочности горных пород в условиях различных объемно-напряженных состояний, типичных для верхних частей земной коры. Они свидетельствуют о том, что возможности функционального описания процессов деформации и разрушения горных пород еще достаточно ограничены и определяются степенью экспериментальной изученности этих процессов.

Методический подход к изучению и описанию процесса разрушения горных пород с учетом особенностей их состава и строения, обуславливающих неравномерность объемных деформаций пород при разных напряженных состояниях, был использован при постановке экспериментальных исследований, в основном подтвердивших правильность предложенного подхода. Поскольку к настоящему времени наименее изучены при равномерном всестороннем сжатии процесс неупругого уплотнения пород, а при неравномерном — разуплотнения и разрушения пород, экспериментальному изучению этих процессов было уделено основное внимание.

Глава III

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕФОРМАЦИОННЫХ, ПРОЧНОСТНЫХ И КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕМНЫХ НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

В настоящее время не существует стандартных методов и установок, которые могли бы обеспечить проведение полного комплекса исследований деформационных, прочностных и коллекторских свойств горных пород, необходимых для решения различных задач горного дела, геологии, бурения и разработки месторождений нефти и газа.

В большинстве случаев выбор (или разработка) методов исследований и экспериментальной аппаратуры определяется целью и конкретными задачами исследований.

Так, например, для изучения упругих и коллекторских свойств горных пород обычно используют установки высокого давления, основанные на гидростатическом принципе передачи давления на образец. При этом на образец, изолированный от жидкости, создающей равномерное всестороннее сжатие, одновременно действует давление насыщающей жидкости, а иногда и температура. Испытания по этой схеме обычно проводят в диапазоне давлений, при которых изменение объема пород происходит главным образом в результате упругих деформаций их порового пространства (без существенных необратимых деформаций в скелете или зернах породообразующих минералов).

В различных установках, разработанных для изучения физических и коллекторских свойств горных пород, в разных сочетаниях изучаются такие свойства, как сжимаемость, пористость, абсолютная и фазовая проницаемость, удельное электрическое сопротивление, скорости упругих волн и др. [1, 2, 4, 6, 12, 47, 49, 52, 57, 61, 81, 165, 166, 173].

В СССР широкое распространение получила установка УИПК (УИПК-М), предназначенная для определения физической и фазовой проницаемости в условиях, приближающихся к пластовым на глубинах залегания пород до 2,5—3 км.

Наиболее полный комплекс физических и коллекторских свойств горных пород представляется возможным исследовать на универ-

сальной петрофизической установке, разработанной в МИНХиГП совместно с СКБ Института нефтехимического синтеза АН СССР [61].

Эта установка позволяет изучать коэффициенты сжимаемости пор, пористости, физической и фазовой проницаемости пород, их удельное электрическое сопротивление, а также диффузионно-адсорбционную активность в диапазоне величин равномерного всестороннего сжатия от 25 до 1600 кгс/см², при давлении насыщающей жидкости до 250 кгс/см² и температурах до 250° С, т. е. в условиях, близких к пластовым, на глубинах до 6—7 км. В конструкции этой установки предусмотрена возможность проведения исследований не только в условиях равномерного, но и неравномерного объемно-напряженного состояния.

Деформационные свойства за пределами упругости и процессы разрушения горных пород изучаются при неравномерном объемно-напряженном состоянии. При этом в большинстве случаев испытания проводятся в условиях наложения так называемых простых напряженных состояний (одноосного сжатия или растяжения, изгиба, среза, кручения) на равномерное всестороннее сжатие.

Наибольшее распространение при изучении деформационных и прочностных свойств горных пород в условиях неравномерного объемно-напряженного состояния получила схема продольного сжатия в условиях всестороннего давления, создаваемого жидкостью, предложенная Т. Карманом еще в 1911 г. Основное преимущество схемы Кармана заключается в возможности изучения остаточных деформаций, предшествующих разрушению горных пород, в условиях их максимального развития.

Метод Кармана до настоящего времени является наиболее распространенным в экспериментальных исследованиях, проводимых как в СССР [11, 12, 48, 50], так и за рубежом [182, 189].

В течение опыта при испытании пород по методу Кармана измеряют все составляющие тензора напряжений и только одну компоненту тензора деформаций — продольную деформацию образца. Таким образом, эта методика не позволяет производить оценку изменений объема породы в процессе деформирования.

Следует отметить, что этот недостаток метода не устранен и в конструкциях установок последних лет, в связи с чем даже в справочных пособиях приводятся данные лишь по одной составляющей тензора деформаций [189].

В Советском Союзе в отличие от установок, применяемых в США, используют более современный вариант методики измерений, при котором в течение опыта измеряется полный тензор деформаций [11, 12]. В последние годы исследования, в которых измеряются все составляющие тензора деформаций, начинают получать распространение и за рубежом [156, 204, 205, 216].

Применение этого усовершенствованного варианта методики позволяет устанавливать строгие количественные зависимости между инвариантами тензора деформаций и напряжений.

Наряду со схемой Кармана, исследования горных пород в условиях неравномерного всестороннего сжатия проводятся также и по схеме так называемого простого нагружения (в этом случае при нагружении напряжения возрастают пропорционально одному параметру) [11, 118, 119].

Значительно меньшее распространение получили методы испытаний в условиях всестороннего давления на растяжение [153], срез [198], кручение [126, 188], изгиб [45] и др.

В большинстве установок испытания проводятся при постоянной скорости статической деформации порядка $10^{-1} \div 10^{-2} \%$ /с (скорости нагружения $10 \div 20$ кгс/см²/с), а при проведении испытаний пород на ползучесть скорости снижаются до $10^{-3} \div 10^{-8} \%$ /с [213, 214].

Исследования процессов деформации и разрушения горных пород применительно к поставленным в работе задачам нефтяной геологии и разработки месторождений нефти и газа потребовали выбора целого комплекса методов исследования, а также разработки специализированной экспериментальной аппаратуры.

В данной главе приводятся обоснование выбора определенного комплекса методов для наиболее полного исследования деформационных, прочностных и коллекторских свойств горных пород, а также краткое описание и техническая характеристика экспериментальных установок, разработанных группой сотрудников ИГиРГИ. Для проведения исследований были разработаны две экспериментальные установки, позволяющие изучать объемные упругие и остаточные (пластические) деформации, прочностные свойства и проницаемость горных пород при равномерном и неравномерном объемно-напряженном состоянии, давлении насыщающих жидкостей и температурах, эквивалентных средним параметрам давлений и температур на глубинах от сотен метров до 10—15 км и более.

Поскольку для горных пород земной коры при геологических и технических процессах характерен широкий диапазон длительности (скорости) деформаций, в разработанном комплексе методик и установок предусмотрена возможность проведения исследований влияния времени (скорости) на деформационные и прочностные свойства горных пород в двух направлениях: при переменных во времени тензорах напряжений и деформаций, а также при постоянном тензоре напряжений (испытания на ползучесть).

Определенный объем исследований проницаемости пород при стационарной фильтрации газа был проведен на установке высокого давления конструкции ВНИГНИ [53], а деформационных и прочностных свойств методом вдавливания штампа — на приборе УМГП-3 [54, 137—139].

§ 1. Выбор комплекса методов для полной характеристики деформационных, прочностных и коллекторских свойств горных пород

Характерной особенностью напряженного состояния горных пород в земной коре является его объемный характер при преобладающем влиянии сжимающих напряжений. Всестороннее сжатие вызывает у горных пород, в отличие от металлов, резкие изменения всех их свойств — упругих, пластических и прочностных. Это обуславливает выбор схем трехосного сжатия при постановке экспериментальных исследований. Выбору этих схем в качестве основных способствует еще и то обстоятельство, что большинство горных пород проявляет способность к остаточной (пластической) деформации только в условиях высокого всестороннего сжатия.

Помимо выбора схем весьма существенным является обоснование предельных параметров напряжений и их соотношений.

Требованиям наиболее полного изучения сжимаемости, объемных упругих деформаций горных пород и их проницаемости удовлетворяет схема равномерного всестороннего сжатия, характеризующаяся шаровым тензором напряжений (рис. 9, I схема). Эта схема используется главным образом для изучения изменений пористости и проницаемости коллекторов нефти и газа, в связи с чем в ней предусмотрено воздействие на породы внутрипорового давления, создаваемого жидкостью (керосином) или газом (азотом).

Параметры напряженного состояния при проведении испытаний по этой схеме определялись, исходя из заданной условно предельной изучаемой глубины залегания пород H , равной 10 км.

Величина эффективного давления на глубине $H=10$ км вычислялась по формуле

$$\sigma_{эф10} = H(\gamma_n - \gamma_{ж}), \quad (III.1)$$

где γ_n — средний объемный вес горных пород, равный $2,3 \div 2,5$ г/см³; $\gamma_{ж}$ — средний объемный вес насыщающей породу жидкости (керосина или воды).

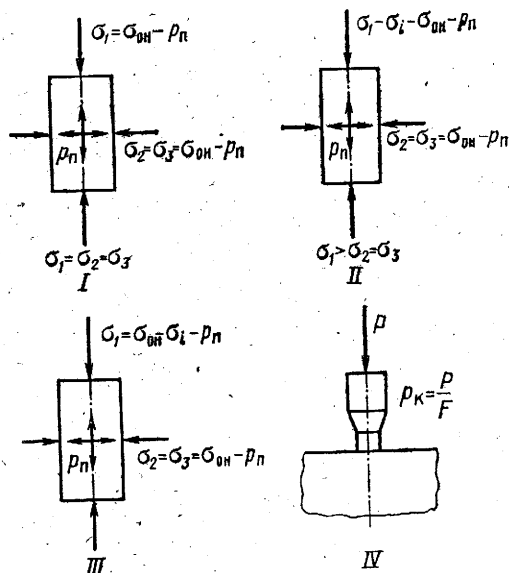


Рис. 9. Схемы напряженных состояний, используемые при проведении исследований

Принимая при приближенных расчетах $\eta = 1$, получим, что для моделируемой предельной глубины $\sigma_{\text{эф}10} = 1400 \div 1600$ кгс/см² при внутрипоровом давлении $p_{\text{п}}$ до 1000 кгс/см².

Схема неравномерного всестороннего сжатия, создаваемого путем наложения на равномерное объемное напряженное состояние сжатия деформирующей разности напряжений (девиатора напряжений) (рис. 9, II схема), выбрана в качестве основной при изучении деформаций пород за пределом текучести и прочностных свойств пород. Эта схема использовалась также для установления влияния неравномерного объемно-напряженного состояния на коллаторские свойства пород.

Изучение деформационных и прочностных свойств пород необходимо для решения многих задач горного дела и сверхглубокого бурения.

Как известно, сверхглубокое бурение в Советском Союзе проектируется на глубины до 15 км [25, 42, 43, 141]. Этим глубинам соответствуют следующие предельные параметры напряженного состояния пород:

а) при испытании сухих пород величина равномерного всестороннего сжатия $\sigma_{\text{он}15}$ равна:

$$\sigma_{\text{он}15} = \gamma_{\text{п}} H = 3450 \div 3750 \text{ кгс/см}^2,$$

а предельная величина избыточного (деформирующего) напряжения определяется прочностью горных пород при этих значениях $\sigma_{\text{он}}$. Можно принять, что $\sigma_{\text{ис}} = 5000 \div 10\,000$ кгс/см² (первая цифра характеризует средние значения прочности осадочных, вторая — метаморфических и магматических пород [7, 8, 96, 101, 140, 189]);

б) при испытании пород, насыщенных жидкостью под давлением, предельная величина эффективного давления определяется, исходя из заданной глубины $H = 10$ км,

$$\sigma_{\text{эф}10} = 1300 \div 1500 \text{ кгс/см}^2.$$

В ограниченном объеме, главным образом для уточнения вида кривых предельных напряженных состояний, была использована также схема продольного растяжения в условиях действия равномерного всестороннего сжатия постоянной величины (рис. 9, III схема).

В двух рассмотренных выше схемах установление строгих количественных зависимостей между напряжениями и деформациями обеспечивается соблюдением однородности напряженного и деформированного состояний в выделенном элементарном объеме образца, размеры которого определены таким образом, чтобы он обладал всеми характерными свойствами материала породы [111].

Для получения массовой информации о сравнительных значениях деформационных и прочностных свойств горных пород в условиях неравномерного объемного напряженного состояния, необходимой для характеристики относительной деформируемости по-

род в разрезах скважин или на выделенных площадях, был применен метод вдавливания штампа, предложенный Л. А. Шрейнером для оценки сопротивления горных пород разрушению при бурении (рис. 9, IV схема) [54, 137, 138].

Как известно, при вдавливании происходит сжатие некоторого объема породы под штампом в условиях бокового давления, создаваемого реакцией остального объема породы, окружающей данную деформируемую часть.

В отличие от напряженного состояния в двух ранее рассмотренных схемах, при вдавливании развивается резко неоднородное объемно-напряженное состояние.

При испытании пород по этой схеме с известным приближением моделируется элементарный акт воздействия зуба долота на породу при бурении — его вдавливание [139].

§ 2. Экспериментальная аппаратура и методики испытаний

Физические (сжимаемость, пористость, проницаемость, удельное электрическое сопротивление, скорости упругих волн и др.) и механические свойства (пределы упругости и прочности) горных пород, как было показано во II главе, при всех видах объемных напряженных состояний зависят от деформационного поведения пород. Исходя из этого, при разработке экспериментальной аппаратуры основное внимание было уделено измерениям объемных деформаций пород.

Для изучения механических и коллекторских свойств пород в условиях равномерного и неравномерного трехосного сжатия автором и Б. В. Байдюком совместно с группой конструкторов проектно-конструкторского бюро Института по переработке нефти (ВНИИ НП) была спроектирована установка УИМК [12]. Позднее была проведена модернизация одного из узлов этой установки, что позволило проводить определения объемных деформаций пород при совместном действии трехосного внешнего сжатия и внутривещного давления насыщающей жидкости [116, 140], а также изучать в этих условиях проницаемость пород.

Приспособление, позволяющее проводить на этой же установке испытания пород на растяжение в условиях равномерного всестороннего сжатия различной величины, было разработано Б. В. Байдюком.

На установке УИМК можно проводить изучение деформационных, прочностных и коллекторских свойств горных пород при термодинамических параметрах, характерных для глубин до 15—20 км (величины равномерного всестороннего сжатия до 5000 кгс/см², внутривещного давления насыщающей жидкости до 1500 кг/см², избыточного продольного напряжения до 15 000 кгс/см², температуры до 350° С).

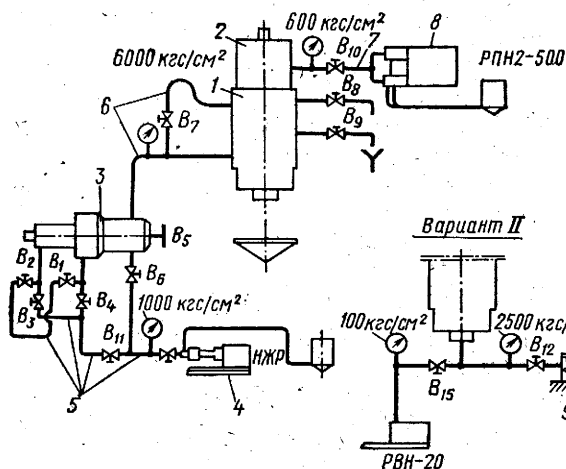
Установка УИМК (рис. 10) состоит из испытательной камеры высокого давления 1, в сборе с силовым цилиндром 2, с помощью

которого к образцу прикладывается избыточное продольное напряжение. Равномерное всестороннее сжатие образца в камере создается с помощью мультипликатора 3, повышающего давление масла, подаваемого от насоса НЖР 4. Насос соединен с мультипликатором линиями низкого давления (до 1000 кгс/см^2) 5, мультипликатор с камерой — линиями высокого давления 6.

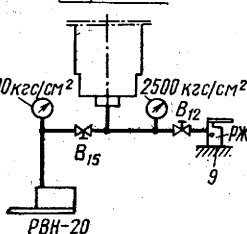
В силовом цилиндре давление создается с помощью двухплунжерного насоса РПН-2-500 8, соединенного с силовым цилиндром линией низкого давления 7.

При работе на установке, собранной по второму модернизированному варианту (рис. 10, вариант II), образец, установленный на

Вариант I



Вариант II



Вариант III

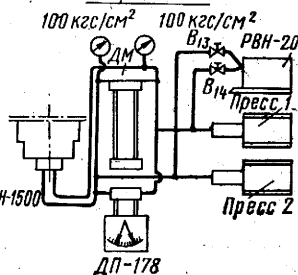


Рис. 10. Схема установки для изучения механических и коллекторских свойств горных пород (шифр УИМК)

пробке в камере высокого давления, подключается к линии, идущей от насоса РЖН-1500 9, подающего в образец жидкость под заданным давлением p_n после вакуумирования системы и образца.

При изучении проницаемости пород в условиях равномерного и неравномерного трехосного сжатия используется третий вариант сборки установки (рис. 10, вариант III). В этом случае в конструкции пробки, на которой крепится образец, предусмотрены подвод и отвод к образцу жидкости, фильтрация которой через образец осуществляется с помощью гидросистемы серийной установки УИПК-М.

Испытательная камера установки (рис. 11) состоит из двух основных узлов — собственно камеры 1 и силового цилиндра 2. Корпус камеры выполнен двухслойным, материал наружного цилиндра камеры — сталь марки 35ХНЗМФА, внутреннего — сталь марки 45ХНМФА.

В нижней части корпуса находится испытательная камера, в которой размещены: испытуемый образец породы 3, с упругими скобами—тензомерами для измерения продольной и поперечной деформаций образца и электронагревательным элементом. В верхней

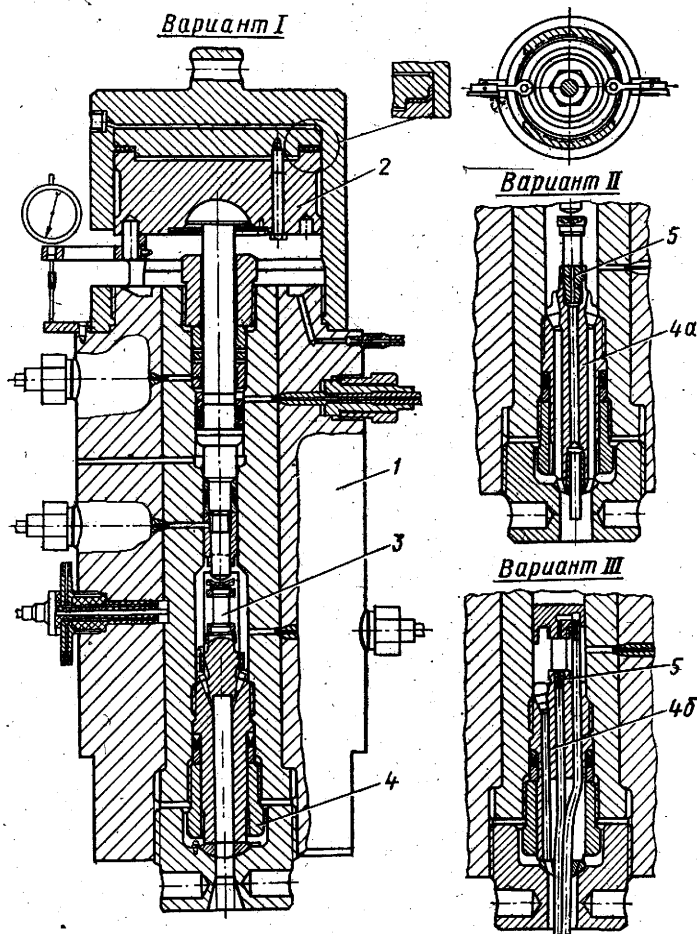


Рис. 11. Общий вид камеры высокого давления установки УИМК

части корпуса находится вспомогательная камера, назначение которой — поддержание постоянного давления в испытательной камере и разгрузка штока.

Конструкция камеры в трех вариантах сборки установки отличается только одним узлом — пробкой для крепления образца.

В первом варианте используется пробка без центрального отверстия, имеющая только четыре сверления для электровыводов

(рис. 11, узел 4). Во втором варианте установки пробка имеет дополнительное отверстие для подвода насыщающей жидкости под давлением к образцу (рис. 11, узел 4а), в третьем — два отверстия для трубок, подводящих и отводящих циркулирующую жидкость (керосин) (рис. 11, узел 4б).

Для измерения деформаций используются упругие тензометры—скобы с наклеенными на них тензодатчиками. В испытаниях при комнатной температуре применяются тензодатчики типа 2ПКП-10-100ГБ, наклеиваемые на скобы клеем БФ-6, при повышенных температурах — никельмолибденовые датчики конструкции Института машиноведения, наклеиваемые высокотемпературным клеем ВН-15Т.

Тензодатчики упругих измерителей продольных и поперечных деформаций соединены в мосты Уинстона, разбалансы показаний которых при испытаниях пород на равномерное всестороннее сжатие совмещаются по времени и регистрируются на одном графике с помощью двухкоординатного самопишущего прибора ПДС-021М. На графике одновременно отмечаются величины эффективных напряжений.

Влияние давления на показатели упругих тензометров оценивалось по данным предварительной их тарировки.

При проведении испытаний в условиях неравномерного всестороннего сжатия, кроме величин объемных деформаций породы, измеряется деформирующее продольное напряжение σ_1 . В этом случае в качестве упругого элемента используется либо верхняя часть пробки (рис. 11, узел 4), либо деталь 5 крепления образца к пробке (рис. 11, варианты II и III).

При испытаниях на неравномерное всестороннее сжатие совмещаются и регистрируются с помощью приборов ПДС-021М показания мостовых схем измерителей продольных (поперечных) деформаций и усилия, т. е. производится запись диаграмм деформаций.

Точность измерения деформаций и нагрузок с помощью применяемых упругих тензометров составляет $\pm 4—5\%$ для деформаций 100μ и нагрузок 100 кгс, давления ± 25 кгс/см².

Нагревательный элемент собран из нихромовой проволоки, навитой спирально внутри цилиндра из стеклопласта, герметизирующего и изолирующего область нагрева, благодаря чему при температуре в образце, равной 300°С, корпус камеры нагревается лишь до температуры 80—100°С. Сопротивление проволоки нагревательного элемента 50 Ом, сила тока около 3 А, потребляемая мощность 0,5 кВт. Температура измеряется в непосредственной близости от образца с помощью хромель-копелёвой термопары, точность измерения температуры $\pm 3^\circ\text{C}$.

Электрические линии к упругим тензометрам, нагревательному элементу и термопаре вводятся в камеру через специальные электропроводы, выполненные наборными из стеклотекстолита и золенгофенского известняка. С более детальным описанием установки

УИМК можно ознакомиться в ряде опубликованных работ [12, 94, 95, 140].

При проведении испытаний по I схеме (см. рис. 9) образец породы, предварительно экстрагированный, высушенный до постоянного веса и насыщенный керосином, вставляется в изолирующую тонкостенную оболочку из отожженной латуни, собирается с торцевыми накладками и упругими скобами для измерения деформаций. Затем образец крепится на пробке (4а, рис. 11) и вместе с ней помещается в испытательную часть камеры установки. Далее вся система подачи жидкости в образец вакуумируется и заполняется керосином. До начала проведения измерений образец подвергается медленному обжатию давлением, близким по величине к эффективному напряжению на глубине залегания породы, для частичного восстановления тех изменений в структуре породы, которые вызваны подъемом керна на поверхность [61, 143]. Затем давление снижается до начального уровня, равного нескольким десяткам атмосфер, производится балансировка показаний мостовых схем упругих измерителей и включается запись изменения во времени деформаций ε_1 и $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ на диаграмме прибора ПДС-021М. Величина всестороннего сжатия $\sigma_{\text{он}}$ изменяется в опыте ступенями, вначале (до 200 кгс/см²) меньшими — 50 кгс/см², а затем большими — 100—200 кгс/см². Внутрипоровое давление и температура в каждом опыте остаются постоянными. На каждой ступени изменения $\sigma_{\text{он}}$ по времени образец выдерживается до стабилизации значений деформаций.

В течение опыта измеряются длина и диаметр образца Δl и Δd в так называемой нейтральной части, свободной от влияния торцов. Длина нейтральной части $l_0 = 16$ мм (при общей длине образца 26—30 мм), диаметр $d_0 = 15,5$ мм.

Регистрируемые величины разбаланса напряжений приводятся в соответствие с измеряемыми параметрами Δl и Δd путем учета данных тарировок упругих скоб от давления и температуры.

Поскольку в каждом опыте температура остается неизменной, предварительная тарировка производится только для выявления влияния давления при заданной температуре. По измеренным величинам изменений Δl и Δd производится расчет значений главных относительных деформаций

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_0}; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \frac{\Delta d}{d_0}. \quad (\text{III.2})$$

Раздельное измерение деформаций отличает эту методику от методик суммарной оценки изменений объема пор, позволяя более полно характеризовать особенности механизма деформации. Это особенно важно при проведении испытаний в условиях высоких давлений, вызывающих необратимые деформации породы. Следует, однако, отметить несколько меньшую точность измерения упругих деформаций с помощью упругих скоб по сравнению с методом

суммарной оценки изменений объема порового пространства, особенно при низких величинах всестороннего сжатия.

В соответствии с поставленной задачей, уровень создаваемых гидростатических напряжений в ряде опытов превышает давление на глубине залегания породы, что позволяет изучать не только упругие деформации, но и условия нарушения упругой устойчивости пород.

На приборе УИМК можно одновременно изучать объемные деформации породы и коэффициенты проницаемости при равномерном и неравномерном трехосном сжатии, внутрипоровом давлении насыщающей жидкости и различных температурах.

В результате проведения испытаний по I схеме устанавливаются зависимости обратимых и необратимых изменений объема пород

$\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V_0}$ и коэффициента проницаемости от величины эффективного напряжения $\sigma_{эф}$. Объемная сжимаемость пород определяется по формуле

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma_{эф}} \right)_{T=\text{const}; p_n=\text{const}}, \quad (\text{III.3})$$

где β — коэффициент сжимаемости, $\text{см}^2/\text{кгс}$; V — текущий объем породы при давлении $\sigma_{эф}$, равный разности $V_0 - \Delta V$ (V_0 — объем образца при атмосферном давлении; ΔV — уменьшение объема при давлении $\sigma_{эф}$, $\text{кгс}/\text{см}^2$). Частная производная $\left(\frac{\partial V}{\partial \sigma_{эф}} \right)_{T, p_n}$ с доста-

точной точностью определяется путем графического дифференцирования зависимости; $\varepsilon_V = f(\sigma_{эф})_{T, p_n}$.

Коэффициенты сжимаемости порового пространства пород при величинах эффективного напряжения $\sigma_{эф}$ вычисляются по формуле, связывающей коэффициенты сжимаемости породы β , ее порового пространства β_n , твердой фазы $\beta_{тв}$ и коэффициент пористости K_n [63, 172, 218, 222],

$$\beta = \beta_n K_n + \beta_{тв}. \quad (\text{III.4})$$

Значения $\beta_{тв}$ определяются экспериментально по величинам объемных деформаций пород, деформируемых в условиях равенства внешнего всестороннего и внутрипорового давлений (испытания пород без изолирующей латунной оболочки).

В результате испытаний были установлены величины $\beta_{тв}$ для типичных разностей карбонатных пород, кварцевых и кварцево-полевошпатовых песчано-алевритовых пород.

Коэффициенты сжимаемости твердой фазы метаморфических и магматических пород определялись расчетным путем по данным о сжимаемости минералов и их содержанию в породе [155].

Испытания подтвердили вывод из ранее проведенных исследований о практической независимости коэффициентов сжимаемости

твердой фазы пород от давления в определенном диапазоне эффективных напряжений [4, 28, 63]. В дальнейшем при расчетах использовали следующие значения коэффициентов сжимаемости твердой фазы исследованных пород:

для известняков $\beta_{тв} = 0,25 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{кгс}$;

для кварцевых песчано-алевритовых пород $\beta_{тв} = 0,27 \times 10^{-5} \text{ см}^2/\text{кгс}$;

для полевошпатово-кварцевых пород с глинисто-карбонатным цементом $\beta_{тв} = 0,30 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{кгс}$;

для гнейсов и гранитов $\beta_{тв} = (0,18 \div 0,26) \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{кгс}$;

для ультраосновных пород (пироксенитов, оливинитов) $\beta_{тв} = (0,10 \div 0,21) \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{кгс}$.

Кроме коэффициентов сжимаемости пород и их порового пространства по результатам измерений объемных деформаций определяются изменения коэффициента пористости пород K_p под действием эффективного давления $\sigma_{эф}$:

$$K_p = \varphi(\sigma_{эф})$$

и устанавливается зависимость коэффициента проницаемости $K_{пр}$ от эффективного напряжения:

$$K_{пр} = f(\sigma_{эф}).$$

В зависимости от уровня создаваемых эффективных напряжений в испытаниях по I схеме представляется возможным изучать как упругие (обратимые), так и неупругие изменения коэффициентов пористости и проницаемости горных пород. Следует отметить, что при проведении испытаний и обработке их результатов были использованы многие положения методики изучения физических свойств пород, разработанной в лаборатории высокого давления при кафедре промышленной геофизики МИНХиГП [62, 63].

Исследования изменений коэффициентов проницаемости пород в условиях равномерного всестороннего сжатия и различных температур проводились также на установке ВНИГНИ для изучения проницаемости коллекторов при стационарной фильтрации газа. Установка позволяла создавать внешнее давление до 1200 кгс/см^2 , температуры — до 200°C .

Испытания по II схеме (рис. 9) могут проводиться как на сухих образцах, так и на насыщенных жидкостью под давлением. Отличительной особенностью этой методики является изучение деформаций образца под действием напряжения сдвига, представляемого, как уже указывалось, в виде интенсивности напряжений σ_i

$$\sigma_i = \frac{P}{F(1 + \varepsilon_2)^2}, \quad (\text{III.5})$$

где P — избыточная продольная нагрузка; F — площадь сечения деформируемого образца.

Во всех случаях при проведении испытаний по этой методике изучаются прочностные показатели пород и деформации за пределом текучести пород, т. е. остаточные (пластические) деформации, а также их влияние на коэффициенты пористости и проницаемости пород.

В опытах определяются все параметры напряженного и деформированного состояний, т. е. величины главных нормальных напряжений

$$\sigma_1 = \sigma_i + \sigma_{\text{он}} - P_{\text{п}}; \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{\text{он}} - P_{\text{п}} \quad (\text{III.6})$$

($\sigma_{\text{он}}$ — величина начального равномерного всестороннего сжатия) и главных относительных деформаций

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_0}; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \frac{\Delta d}{d_0}. \quad (\text{III.7})$$

Испытания пород по *III* схеме (см. рис. 9) проводятся в условиях растяжения при постоянном боковом давлении и уменьшающейся продольной нагрузке P_i . В этом случае интенсивность напряжений определяется из выражения: $\sigma_i = \sigma_{\text{он}} \frac{P_i}{F(1 - \varepsilon_2)^2}$, а главные нормальные напряжения — по формулам

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{\text{он}} - P_{\text{п}}; \quad \sigma_1 = \sigma_{\text{он}} - \sigma_i - P_{\text{п}}. \quad (\text{III.8})$$

По результатам измерения деформаций образца в условиях неравномерного трехосного сжатия вычисляются также изменения объема пород.

Первичная обработка результатов исследований, проведенных на установке УИМК по *II* и *III* схемам, позволяет получить графические зависимости между деформациями и интенсивностью напряжений для различных значений начального всестороннего сжатия $\sigma_{\text{он}}$ или эффективного напряжения $\sigma_{\text{эф}}$ (диаграммы деформаций).

При анализе диаграмм устанавливаются характерные точки перехода от упругой деформации к остаточной, от остаточной деформации к разрушению, определяются значения прочностных показателей: пределов прочности и текучести (σ_{ic} , σ_{is}) и деформаций объема ε_v , исследуются зависимости $\varepsilon_v = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$; $\varepsilon_v = f_1(\sigma_{\text{он}})$ при $\varepsilon_1 = \text{const}$.

Кроме того, изучаются характерные особенности микроструктурных изменений в породах в процессе деформации.

Данные испытаний в условиях неравномерного трехосного сжатия в совокупности с результатами испытаний пород на одноосное сжатие, растяжение (*III* схема) и вдавливание (*IV* схема) обобщаются также в виде кривых предельных напряженных состояний.

При изучении изменений коэффициента проницаемости $K_{\text{пр}}$ с ростом величины деформирующего продольного напряжения σ_i при

неравномерном трехосном сжатии устанавливаются следующие зависимости:

$$K_{пр} = f_1(\sigma_i); \quad K_{пр} = f_2(\varepsilon_1); \quad K_{пр} = f_3(K_{vic}).$$

При исследованиях деформационных и прочностных свойств горных пород в условиях напряженных состояний, характерных для земной коры, наименее изученным остается вопрос о зависимости этих свойств от времени или скорости деформации.

В большинстве экспериментальных установок скорости деформаций колеблются в пределах 10^{-3} — 10^{-4} 1/с, при испытаниях пород на ползучесть скорости уменьшаются до 10^{-5} — 10^{-10} 1/с [213, 214]. Скорости же реальных геологических процессов могут быть как ниже 10^{-15} 1/с, так и приближаться к скоростям лабораторных испытаний, т. е. охватывать диапазон, значительно превышающий возможности экспериментального изучения.

Исследования особенностей деформационного поведения пород в широком диапазоне скоростей деформации приобретают важное практическое значение, особенно для решения задачи о возможности экстраполяции результатов кратковременных испытаний на длительные процессы, скорости которых находятся за пределами возможностей эксперимента.

В настоящем исследовании диапазон скоростей статических деформаций был расширен путем проведения испытаний пород на ползучесть в специальной установке УИМКДН, по конструкции отличающейся от установки УИМК только передачей продольного усилия от штока, связанного с поршнем силового цилиндра, к образцу через пружинный аккумулятор деформаций, состоящий из набора тарельчатых пружин. Это позволяет проводить изучение объемных деформаций пород при постоянной нагрузке, обеспечиваемой аккумулялированной упругой энергией пружин, и разных величинах всестороннего сжатия $\sigma_{он}$, поровых давлений насыщающей жидкости $p_{п}$ и температур t (пределы изменений $\sigma_{он}$ до 2500 кгс/см²; $p_{п}$ — до 1000 кгс/см²; t — до 400°С).

Регистрация деформаций и усилия во времени при работе на установке УИМКДН производится с помощью электронного самопишущего потенциометра ЭПП-09МЗ. При этом в стадии неустановившейся ползучести запись измеряемых параметров производится непрерывно, а на стадии установившейся ползучести — периодически (для проверки постоянства скорости деформации). При обнаружении существенного изменения скорости непрерывная запись изменения во времени изучаемых параметров возобновляется. В результате испытаний пород на ползучесть устанавливаются зависимости объемных деформаций от времени при определенном уровне интенсивности напряжений $\sigma_i = \alpha \sigma_{ic}$ (α — коэффициент, указывающий, какую часть постоянное деформирующее напряжение составляет от кратковременной прочности породы σ_{ic} при тех же термодинамических параметрах $\sigma_{он}$ и t). Кроме того, при этих

испытаниях изучается изменение объема пород ϵ_v во времени (на разных стадиях ползучести) и определяются коэффициенты интенсивности разуплотнения пород K_{vis} , необходимые для сравнительной оценки особенностей деформационного поведения пород при кратковременных и длительных испытаниях.

Кроме установок и методик, разработанных специально для решения задач исследования деформационных и коллекторских свойств горных пород при термодинамических параметрах, типичных для верхних частей земной коры, определенный объем исследований был выполнен на установке УМГП-3, предназначенной для определения механических свойств пород применительно к процессам разрушения пород при бурении (см. рис. 9, схема IV).

На приборе УМГП-3 механические свойства пород определяют методом вдавливания штампа, предложенным Л. А. Шрейнером [137, 138].

Здесь не приводится описание конструкции установки УМГП-3 и методики определения механических свойств пород при вдавливании штампа, так как они достаточно детально рассмотрены в ряде опубликованных работ [138—140], в том числе и в ГОСТ на метод [54].

Следует только отметить, что метод испытаний горных пород вдавливанием штампа, кроме стандартных характеристик — твердости по штампу $p_{ш}$, предела текучести p_0 , коэффициента пластичности K и других, позволяет еще устанавливать приблизительные величины общих прочностных характеристик пород, что и использовано при построении кривых предельных напряженных состояний.

Для установления наиболее общих зависимостей деформационного поведения коллекторских и прочностных свойств горных пород от величины всестороннего сжатия в условиях равномерного и неравномерного объемно-напряженных состояний при разных температурах в качестве объектов исследования были выбраны породы четырех широко представленных в разрезах земной коры групп пород: карбонатных, терригенных, магматических и метаморфических. Из пород осадочного комплекса для изучения подбирали главным образом пористые разности (породы-коллекторы). Достаточная представительность последних по литологическим особенностям обеспечивалась подбором образцов согласно соответствующим классификационным рядам: для песчано-алевритовых коллекторов — классификации И. А. Конюхова [77], для карбонатных — Г. И. Теодоровича [124].

Исследованные литологические разности песчано-алевритовых пород были отобраны из разрезов продуктивной части терригенного девона и рифея Волго-Уральской области и мезо-кайнозойских отложений Краснодарского края, карбонатных — из верхнеюрской карбонатной толщи центральной части моноклинали Северного склона Кавказа и ниже-среднекаменноугольных отложений Камского Приуралья.

Метаморфические и магматические породы отбирались из обнажений, карьеров и скважин различных районов Восточно-Европейской платформы.

До и после проведения исследований производились детальные макро- и микроописания состава и структуры испытанных пород, что позволило выявить зависимости деформационных и прочностных свойств пород в условиях различных объемных напряженных состояний от литолого-петрографических особенностей пород.

Большое внимание при проведении исследований уделялось изучению микроструктурных изменений в породах в процессе их деформации.

При этом использовали методы количественной оценки структурных изменений в шлифах остаточной деформированных пород. В шлифах пород, деформированных в условиях равномерного всестороннего сжатия, изучали необратимые деформации пустотного пространства, возникающие при высоких предельных величинах эффективных напряжений. В шлифах пород, деформированных при неравномерном всестороннем сжатии, исследовали особенности остаточной деформации пород.

Учитывая, что остаточная деформация у большинства пород является следствием перемещения по границам зерен и перегруппировки зерен, изучению подвергались, во-первых, объемные изменения исходной пустотности, а во-вторых — вновь возникающей микропустотности (микротрещиноватости) и переориентировка зерен порообразующих минералов.

Для статистического изучения вышеперечисленных структурных изменений предъявлялись определенные требования к изготовлению шлифов. Ориентировка шлифов исходного и деформированного образца была одинаковой. Шлиф деформированной породы изготовлялся из сечения породы, в котором производились измерения продольной и радиальной деформаций.

Для оценки степени переориентировки зерен использовали методику, разработанную Б. В. Байдюком, Л. А. Шрейнером и Л. И. Лагун [14].

Согласно этой методике, статистической обработке подвергается ориентировка больших осей сечений зерен по отношению к направлению оси радиальной деформации $e_2 = e_3$ (оси действия минимального сжимающего напряжения при неравномерном всестороннем сжатии). Для изучения в параллельном оси образца шлифе выбирается 100 зерен, максимальных для данного сечения. Шлиф в процессе измерений перемещается с помощью двухкоординатного препаратоводителя. По данным измерений строятся гистограммы, на оси абсцисс которых откладываются углы наклона α максимальных осей сечений зерен к оси e_2, e_3 , а на оси ординат — количество зерен на 100, имеющих данную ориентировку (частость m).

Таким образом, с помощью выбранных зерен-индикаторов устанавливается преимущественная ориентировка зерен в процессе деформации.

Для количественного анализа состава и оценки пористости (в том числе и деформационной пустотности) по шлифу применяли точечный метод А. А. Глаголева. При этом для лучшего выделения пустотного пространства в породах пластинки пород предварительно насыщали прокрашенной эпоксидной смолой (по методу лаборатории коллекторов и пластовых жидкостей ВНИГНИ).

Точность и достоверность результатов анализа, проведенного точечным методом, однозначно определяются общим числом точек, подсчитанных в процессе анализа. Минимально необходимое число точек, обеспечивающее требуемую точность анализа, определяли по таблицам, приведенным в работе С. А. Салтыкова [112].

Передвижение шлифа и подсчет точек производили с помощью специального устройства, включающего счетчик, разработанный для подсчета лейкоцетатной формулы крови.

Поскольку в результате деформации пород при неравномерном всестороннем сжатии происходит ориентированное изменение площади их пустотного пространства, о котором можно судить по изменению расстояний между зернами, была разработана методика замеров расстояний между зернами в шлифах исходных и деформированных пород в двух направлениях (параллельно и перпендикулярно к оси действия максимального сжимающего напряжения).

Глава IV

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЭФФЕКТИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Из анализа результатов теоретических исследований упругих деформаций различных упрощенных моделей пористых сред в условиях равномерного всестороннего сжатия следует, что связь между упругими деформациями объема и напряжениями у горных пород не может быть линейной, постулируемой теорией упругости для идеальных сплошных сред.

Эту особенность деформационного поведения пористых сред подтверждают также и экспериментальные исследования коэффициентов сжимаемости пород и их порового пространства.

Следует подчеркнуть, что при качественном подобии экспериментальных и теоретических зависимостей коэффициентов сжимаемости от эффективного напряжения количественное их соответствие не достигнуто, вследствие значительно большей сложности строения реальных горных пород по сравнению с расчетными моделями.

Многообразие и сложность строения горных пород вынуждают использовать для оценки изменений деформационных и коллекторских свойств пород в условиях давлений и температур, типичных для глубин залегания, экспериментальные методы.

Экспериментальные исследования деформационного поведения и коллекторских свойств горных пород различных генетических типов при объемных напряженных состояниях получили в последние годы широкое развитие.

В Советском Союзе подобные исследования проводятся в Институте физики Земли АН СССР [46, 47, 49], МИНХиГП [61, 63, 132]; ВНИИГеофизике [1, 2, 131]; НИИГА [86, 131, 132], а также в институтах ряда нефтедобывающих районов [4, 6, 36, 57, 132]. В ИГиРГИ изучение коллекторских свойств горных пород при высоких давлениях было начато М. М. Кусаковым и Н. С. Гудок [81], в настоящее же время исследования развиваются группой сотрудников сектора экспериментальной геомеханики под руководством автора [95, 96, 101, 132].

В США и других странах изучению деформационных и коллекторских свойств пород в термодинамических условиях, характерных

для глубин их залегания, посвящено большое число работ [27, 28, 163, 166, 168, 171, 172, 184, 202, 203, 209, 222, 224, 225].

В результате проведенных исследований были получены данные об упругих изменениях коэффициентов сжимаемости пород и их порового пространства, пористости и проницаемости, главным образом в диапазоне давлений и температур, типичных для глубин до 4—5 км.

Было выявлено, что определяющее влияние на зависимости всех изучаемых характеристик от давления и температуры оказывают петрографические особенности пород. Для ряда литологических типов осадочных пород были установлены пределы изменения показателей сжимаемости, пористости и проницаемости с давлением.

Результаты исследований нашли применение в гидродинамических расчетах, связанных с разработкой месторождений нефти и газа, при оценке геологических запасов нефти и газа, позволили внести поправки на упругие изменения коллекторских свойств при извлечении пород из скважины на поверхность [2, 57, 60, 63].

В меньшей степени результаты экспериментальных исследований были использованы для прогноза предельных условий (глубин) сохранения горными породами коллекторских свойств, основанного главным образом на данных изучения постседиментационных изменений в породах.

Изучению постседиментационных изменений в песчано-алевритовых породах разного возраста посвящены работы ряда исследователей [58, 62, 70, 106, 115, 206]. Рассмотрение в комплексе влияния эпигенетических и деформационных изменений на коллекторские свойства пород начато лишь в последние годы [62, 116].

Развитие этого направления связано с необходимостью расширения диапазона применяемых давлений и температур (для получения данных об условиях нарушения упругой устойчивости пород), постановки исследований при неравномерном объемно-напряженном состоянии (для учета возможного влияния тектонических напряжений на коллекторские свойства пород), а также изучения влияния времени на деформационные характеристики горных пород.

Прогноз деформационного поведения горных пород на больших глубинах в геологических и технологических процессах очень важен для решения многих задач практики, в связи с чем необходима постановка экспериментального изучения деформационных и коллекторских свойств пород при высоких параметрах равномерного всестороннего и порового давлений, а также температур, позволяющих определять условия перехода к неупругой деформации у пород различных литологических типов.

Для установления наиболее общих зависимостей коллекторских свойств пород от суммы факторов, определяющих условия их залегания, в качестве объектов исследования, как уже указывалось, были выбраны все наиболее характерные разности песчано-алевритовых пород-коллекторов по классификации И. А. Конюхова [77],

вскрывающей связь коллекторских свойств пород с их петрографическими особенностями.

Все исследованные образцы песчано-алевритовых коллекторов нефти и газа относятся к сцементированным породам и были отобраны из продуктивной части терригенного девона Татарской и Башкирской АССР, а также из разрезов мезо-кайнозойских отложений Краснодарского края (описание особенностей состава и строения отобранных для испытаний образцов, а также некоторые их физические свойства в атмосферных условиях даны в приложении III).

Исследованные разности карбонатных пород включают как пористые коллекторы (породы каменноугольных отложений Пермской области), так и плотные разности из верхнеюрской карбонатной толщи центральной части моноклинали Северного склона Кавказа (междуречье рек Баксан—Черек), отличающейся большим разнообразием структурно-генетических типов слагающих ее пород [22] (описание образцов карбонатных пород, выбранных для испытаний, дано в приложении I).

В работе были исследованы также коэффициенты сжимаемости некоторых типичных разностей метаморфических и магматических пород.

Испытанные разности этих пород были отобраны из карьеров и скважин Балтийского щита (описание образцов дано в приложении II).

§ 1. Результаты исследования объемных деформаций, коэффициентов сжимаемости, пористости и проницаемости песчано-алевритовых пород-коллекторов

Экспериментальное изучение влияния напряженного состояния и температуры на процесс деформации и проницаемость пород проводилось в два этапа. Вначале изучалось влияние эффективного напряжения при комнатной температуре, а затем — при повышенных температурах, величины которых оставались постоянными при всех изменениях эффективного напряжения.

Известно, что при упругой деформации зернистых сред обнаруживается гистерезис, т. е. несопадение величин деформаций, а следовательно, и коэффициентов сжимаемости при увеличении и уменьшении эффективного напряжения [63]. Величина упругого гистерезиса снижается при увеличении длительности выдержки на каждой ступени давления. Поскольку уровень напряжений в проводимых исследованиях часто превышал напряжения на глубине залегания пород, использование средних арифметических значений деформаций (т. е. в процесс нагружения и разгрузки) исключалось, в связи с чем для получения более точных величин деформаций приходилось увеличивать время выдержки на каждой ступени давления. В среднем при деформации высокопроницаемых пород длительность выдержки колебалась в пределах от 20 до 40 мин, а при

Объемные деформации песчано-алевритовых пород при эффективных напряжениях, типичных для глубин до 8—14 км-
($t=20-22^{\circ}\text{C}$)

Класс пород	Степень цементации	Отсортированность	Гранулометрический тип	Средние показатели коллекторских свойств в атмосферных условиях		№ испытанных образцов	Условия испытаний		ε _{max} , %		ε _{1y} ε _{2y}	ε _{1max} ε _{2max}
				K _{п. эф} , %	K _{пр} , мД		σ _{эф} = σ _{он} - P _п , кгс/см ²	H _{экв} , км	ε ₁	ε ₂ = ε ₃		
II	Средняя—слабая	Хорошо отсортированные	Крупно-среднезернистые песчаники	≥15	1000—500	245-5-1	1600	12,0	0,49	0,45	1,3	1,1
253/69						1000	8,0	0,61	0,62	1,0	1,0	
III			Мелкозернистые песчаники			576/69	1100	8,5	0,28	0,30	1,1	0,9
462/62						1850	14,0	0,56	0,54	1,3	1,0	
IV			Алевритовые песчаники	434/62	1850	14,0	0,38	0,34	1,1	1,1		
				115/69	900	7,0	0,50	0,24	2,0	2,1		
V			Крупнозернистые алевриты	825/59	1850	14,0	0,75	0,49	0,7	1,5		
				483/62	850	6,5	0,24	0,44	0,5	0,5		
			≥15	500—300	438-5/1	1500	11,5	0,79	0,46	1,2	1,7	

VI	Сильная	Среднеотсортированные	Мелкозернистые песчаники	5—15	300—100	187K 830/59	1500 1850	11,5 14,0	0,64 1,87	0,48 0,58	1,2 1,5	1,3 3,2	
VII			Крупнозернистые алевролиты			1736K	1600	12,0	1,8	0,45	1,9	4,0	
VIII			Мелкозернистые алевролиты	5—15	100—50	731K	800	6,0	0,80	0,90	1,1	0,9	
IX		Плохо отсортированные	Глинисто-алевролитовые песчаники	≤5	50—10	463-5/1 653-5/1 775-5/2	600 1500 800	4,6 11,5 6,0	0,56 0,75 0,80	0,23 0,60 0,67	1,5 1,5 1,0	2,4 1,25 1,2	
X						Глинистые мелкозернистые алевролиты	1739K	900	7,0	0,56	0,43	1,0	1,3
XI						Глинистые тонкозернистые алевролиты	29-35/201B71	1500	11,5	0,47	0,52	0,6	0,8
XII						Очень сильная	Глинистые и сильно цементированные песчаники и алевролиты	≤5	≤10	536K 733K 1651K 32 45	1800 1200 1750 1200 1500	14,0 9,2 13,5 9,2 11,5	0,70 0,68 0,84 0,89 0,80

деформации малопористых песчано-алевритовых пород — от 1 до 3 ч.

Выбор неравных ступеней эффективных напряжений 50—100—300—600—900—1200—1800 обусловлен стремлением обеспечить одинаковую скорость деформации (при небольших величинах эффективного напряжения деформации — больше, чем при высоких его значениях).

Учитывая большое влияние насыщающих жидкостей на объемные деформации пород и особенно их проницаемость [57], исследования деформируемости проводились при насыщении пород неполярной жидкостью — керосином, а коэффициентов проницаемости — при стационарной фильтрации газа (азота), реже — керосина.

В табл. 1, содержащей краткую характеристику классов песчано-алевритовых коллекторов по И. А. Конюхову [77], приведены некоторые результаты изучения объемных деформаций пород: про-

дольной $\epsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_0}$ в % и радиальных $\epsilon_2 = \epsilon_3 = \frac{\Delta d}{d_0}$ в % в условиях

действия эффективных напряжений, типичных для глубин до 8—14 км, при комнатной температуре. В табл. 1 даны значения относительных деформаций $\epsilon_{1 \max}$ и $\epsilon_{2 \max}$ при предельных в испытаниях величинах эффективного напряжения $\sigma_{\text{эф. пр.}}$

Анализ полученных данных позволил выявить одну из характерных особенностей процесса деформации объема пород под действием всестороннего равномерного сжатия — существенную неоднородность деформации. Отношения продольных деформаций (ϵ_1)

к поперечным (ϵ_2), как в заведомо упругой области $\frac{\epsilon_{1y}}{\epsilon_{2y}}$ (при $\sigma_{\text{эф}} = 200 \text{ кгс/см}^2$), так и при предельных значениях эффективного напряжения $\frac{\epsilon_{1 \max}}{\epsilon_{2 \max}}$, колеблются в пределах соответственно 0,5—2,0

и 0,8—4,0. При этом у мономинеральных (кварцевых) хорошо отсортированных слабо сцементированных пород неравномерность деформации их объема выражена менее резко $\frac{\epsilon_{1 \max}}{\epsilon_{2 \max}} = 0,9 \div 2,1$,

чем у полиминеральных средне- и плохо отсортированных пород с сильной цементацией зерен $\frac{\epsilon_{1 \max}}{\epsilon_{2 \max}} = 0,8 \div 4,0$.

Выявление анизотропии строения песчано-алевритовых пород при исследовании объемных деформаций и количественное ее выражение очень важны для интерпретации результатов изучения геофизических полей.

Следует подчеркнуть, что в пределах отдельных групп максимальные значения отношений $\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$ характеризуют, как было уста-

новлено, породы с четкой выявляемой при микроскопическом изучении шлифов слоистой структурой (образцы № 115/69; 483/62; 1736K; 830/59).

Данные по анизотропии объемных деформаций песчаников при равномерном всестороннем сжатии подтверждают исследования В. Х. Сомертона и др. [221], проведенные в диапазоне давлений до 400 кгс/см^2 на трех типичных разностях песчаников (рис. 12).

Рис. 12 позволяет судить о степени неравномерности упругих деформаций объема песчаников.

Проведение исследований в широком диапазоне эффективных напряжений преследовало цель выявить зависимость объемных деформаций от давления в упругой области, в том числе за пределами величин $\sigma_{эф}$, типичных для глубин залегания пород. Предполагалось также определить уровень напряжений, при которых в разных песчано-алевритовых коллекторах начинаются необратимые деформации, и изучить эту область необратимого деформирования.

В результате исследований области упругих деформаций пород был выявлен немонотонный характер их изменения с ростом эффективных напряжений. В области низких значений $\sigma_{эф}$ (до 100 кгс/см^2) отмечался быстрый рост деформаций с увеличением $\sigma_{эф}$, при этом зависимость деформаций от $\sigma_{эф}$ в этой области была близка к линейной (рис. 13—16, область I).

Следующая часть кривых $\epsilon = f(\sigma_{эф})$ (рис. 13—16, область II) отличается менее резким ростом значений деформаций при увеличении эффективных напряжений. Следует отметить, что зависимость деформаций от напряжений, характерная для второй области, сохранялась и при величинах напряжений, значительно превышающих уровень, типичный для глубины залегания исследуемых пород (на рис. 13—16 этот уровень отмечен как $\sigma_{эф.н}$). Это дает основание утверждать, что данные испытаний при $\sigma_{эф} > \sigma_{эф.н}$ могут быть использованы для приближенного прогноза упругих деформаций на еще не достигнутых бурением глубинах.

При высоких значениях $\sigma_{эф}$ (различных для пород разных состава и структуры) вновь отмечается более резкое увеличение деформаций с ростом давлений, чем в промежуточной области средних значений $\sigma_{эф}$ (рис. 13—16, область III). Как было установлено, эта область, начинающаяся с определенного уровня напряжений $\sigma_{эф.пр}$, далее называемого пределом упругой устойчивости, характеризует переход к необратимой деформации пород в условиях равномерного всестороннего сжатия при быстром нагружении (см. рис. 2, область за точкой а).

Переход к необратимой (остаточной) деформации определяется составом и строением пород. У хорошо отсортированных мономинеральных кварцевых пород (II—V классы) граница упругой устойчивости сдвинута в сторону эффективных напряжений, близких к характерным для глубин свыше 10 км, при этом у мелкозернистых песчаников она не всегда достигнута даже при предельных в проведенных экспериментах величинах $\sigma_{эф} \geq 1800 \text{ кгс/см}^2$ (рис. 13).

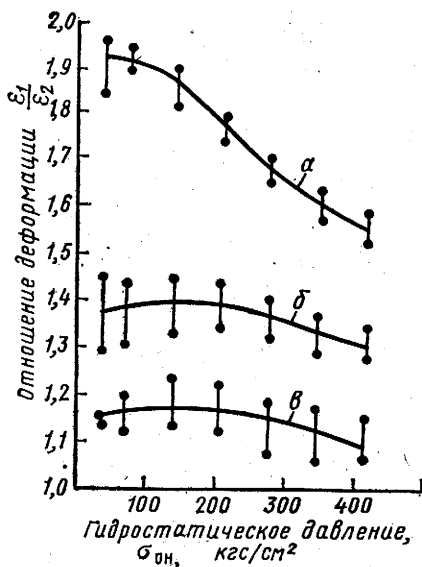


Рис. 12. Анизотропия деформаций песчанников при всестороннем равномерном сжатии [221]:

α — песчанник Бандера; β — песчанник Береа; γ — песчанник Бойзе

Рис. 13. Диаграмма деформаций мелкозернистого кварцевого песчанника (обр. 462/62; III класс):

Здесь и на рис. 14—16 ○ — ϵ_1 ; ● — $\epsilon_2 = \epsilon_3$; пунктиром показано положение границы упругой устойчивости

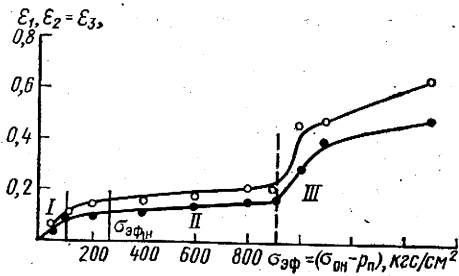
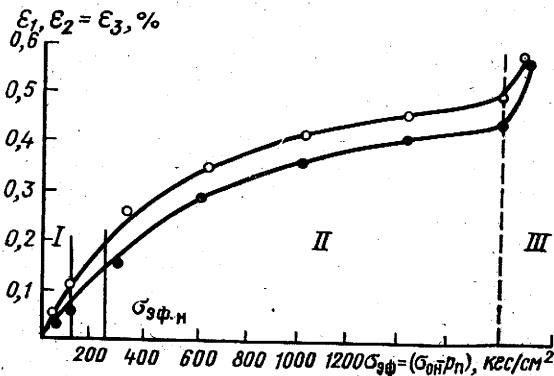


Рис. 14. Диаграмма деформаций полевошпатово-кварцевого мелкозернистого песчанника (обр. 187К, VI класс)

Рис. 15. Диаграмма деформаций полевошпатово-кварцевого алевrolита (обр. 731К; VIII класс)

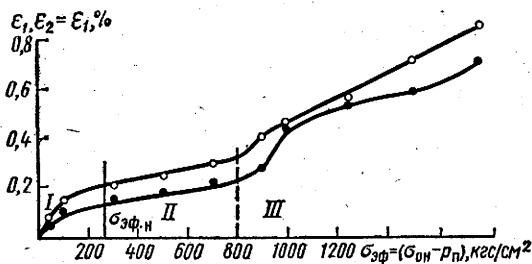
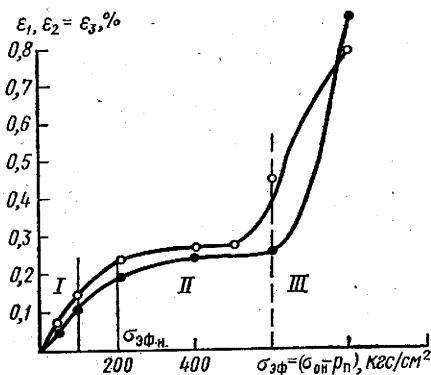
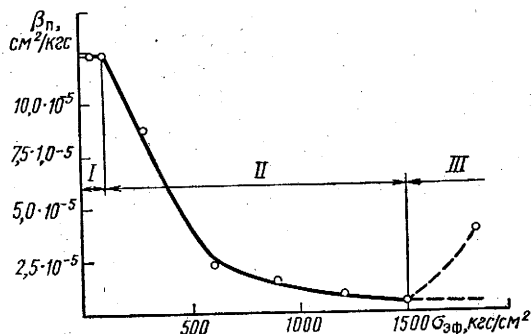


Рис. 16. Диаграмма деформаций полевошпатово-кварцевого глинистого слоистого алевrolита (обр. 1651К, XII класс)

Рис. 17. Зависимость $\beta_{п} = f(\sigma_{3ф})$ для хорошо отсортированного мелкозернистого песчаника (обр. 462/62, I Пкласс):

○ — значение $\beta_{п}$ при необратимой деформации породы



У средне- и плохо отсортированных полиминеральных и сильно сцементированных песчано-алевритовых пород (классы VI—XII) граница упругой устойчивости проходит на уровне эффективных напряжений 500—1300 кгс/см² (рис. 14—16). При этом наблюдается тенденция к снижению уровня напряжений на границе упругой устойчивости при переходе от средне отсортированных с меньшим со-

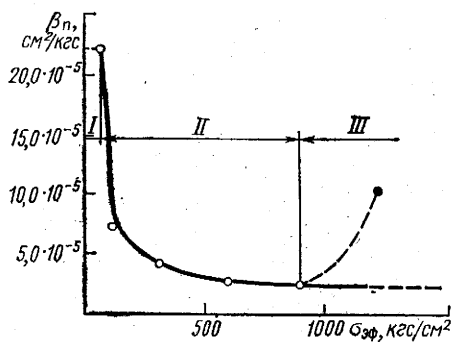


Рис. 18. Зависимость $\beta_{\text{п}} = f(\sigma_{\text{эф}})$ для кварцевого крупнозернистого алевролита с глинисто-карбонатным цементом (обр. 1736К, VII класс):

● — значение $\beta_{\text{п}}$ при необратимой деформации

держанием цемента пород к плохо отсортированным сильно сцементированным песчаникам и алевролитам.

По методике, изложенной в III главе, были проведены расчеты коэффициентов сжимаемости пород и их порового пространства. В табл. 2 приведены пределы изменений коэффициентов сжимаемости пород для песчаников и алевролитов разных классов,

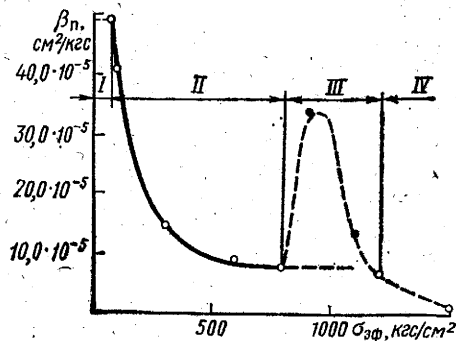


Рис. 19. Зависимость $\beta_{\text{п}} = f(\sigma_{\text{эф}})$ для полевошпатово-кварцевого алевролитового песчаника с карбонатным цементом (обр. 536К, XII класс):

● — значения $\beta_{\text{п}}$ при необратимой деформации

а в табл. 3 — коэффициентов сжимаемости порового пространства этих же пород.

Характерные зависимости коэффициентов сжимаемости порового пространства пород от эффективного напряжения представлены на рис. 17—19.

Как можно видеть на рис. 17—19, выделенные на диаграммах деформаций области упругих деформаций (области I и II) и границы упругой устойчивости прослеживаются и на графиках зависимости коэффициентов сжимаемости порового пространства $\beta_{\text{п}}$ от

Пределы изменений коэффициентов сжимаемости песчано-алевритовых пород-коллекторов (β) при эффективных напряжениях, типичных для глубин до 9—14 км, и комнатной температуре

Классы пород	$\beta \sigma_{эф} \cdot 10^5$, см ² /кгс, при $\sigma_{эф}$, кгс/см ²							
	50	100	300	600	900	1200	1500	1800
	Глубина, км							
	0,4	0,8	2,3	4,6	7,0	9,2	11,5	14
II—III	2,75—4,45	1,5—4,4	0,75—2,0	0,44—0,75	0,37—0,72	0,35—0,70	0,32—0,68	0,32—0,67 (1,0—1,25)
IV—V	3,25—5,0	1,5—2,75	0,87—2,1	0,56—0,80	0,45—0,75	0,40—0,72 (2,0)	0,37 (1,25)	
VI—VIII	3,5—6,1	1,8—3,6	1,0—1,85	0,82—1,05	0,65—0,75 (2,5—7,0)	0,55—0,70 (1,3—2,2)	0,45 (2,2)	
IX—X	3,75—6,5	2,0—2,5	1,05—1,7	0,92—1,15 (1,15—2,0)	0,70—0,82 (1,75—2,2)	0,65 (1,40)	0,55 (1,9)	
XII	3,0—4,4	2,2—3,2	1,0—1,3	0,80—1,2 (1,2—1,5)	0,65—1,0 (1,0—2,0)	0,65—0,90 (1,60—3,5)		

62 Примечание. В скобках приведены значения β при неупругой деформации пород.

Пределы изменений коэффициентов сжимаемости пор песчано-алевритовых пород-коллекторов (β_{Π}) при эффективных напряжениях, типичных для глубин до 9—14 км, и комнатной температуре

Классы пород	$\beta_{\Pi} \sigma_{эф} \cdot 10^5, \text{ см}^2/\text{кгс}, \text{ при } \sigma_{эф}, \text{ кгс/см}^2$							
	50	100	300	600	900	1200	1500	1800
	Глубина, км							
	0,4	0,8	2,3	4,6	7,0	9,2	11,5	14
II—III	12,4—22,8	6,1—12,8	3,0—8,9	1,0—2,6	0,55—2,5	0,37—2,4	0,35—1,85	0,32—1,70 (1,0—5,5)
IV—V	19,7—26,0	6,5—13,7	4,1—10,5	1,7—3,5	1,0—3,2	0,69—2,8 (1,25)	0,67 (1,4)	
VI—VIII	20,0—40,1	7,5—23,2	4,3—11,2	2,7—5,7	2,3—3,0 (14,9—42,8)	2,0—2,2 (7,8—10,3)	1,4— (15,6)	
IX—X	17,0—42,8	9,7—22,8	3,8—14,9	3,2—9,5 (8,7)	2,7—4,7 (10,0—16,6)	—4,3 (13,0)	—3,2 (—20,0)	
XII	30,9—54,6	11,6—47,9	8,7—11,7	7,7—9,0 (11,0)	4,8—8,8 (12,6—36,4)	5,8—7,0 (6,7—32,5)		

Примечание. В скобках приведены значения β_{Π} при неупругой деформации пород.

эффективного напряжения. В большинстве случаев испытания прерывались при достижении начала неупругого уплотнения (область III). В табл. 2 и 3 граница между областями II и III выделяется по повышенным значениям коэффициентов сжимаемости (см. значения β и β_{Π} при неупругой деформации, приведенные в скобках).

В одном из опытов на полевошпатово-кварцевом алевритовом песчанике с карбонатным цементом, по-видимому, удалось приблизиться и к области повторной упругой деформации (см. рис. 2, область за точкой b). На рис. 19 эта область выделена (область IV), она характеризуется понижением значений β до величин, близких к коэффициентам сжимаемости породообразующих минералов ($\beta = 0,35 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{кгс}$), а β_{Π} — к минимальным величинам в опыте. Как следует из рассмотрения объемных деформаций, меньшая сжимаемость и более высокие напряжения на границе упругой устойчивости характеризуют хорошо отсортированные кварцевые песчаники с малым содержанием цементирующего вещества, большая сжимаемость типична для существенно неоднородных по составу и строению пород.

Области упругих деформаций пород детально исследованы в работах В. М. Добрынина [61, 63], показавшего что в интервале давлений, не превышающих 100 кгс/см² (область I), у сцементированных песчано-алевритовых пород зависимость между деформациями и напряжениями линейна, а коэффициент сжимаемости пор остается постоянным и имеет максимальное (для области упругих деформаций) значение.

Для хорошо отсортированных кварцевых песчаников в области II упругих деформаций зависимости между коэффициентом сжимаемости пор и эффективным напряжением в координатах β_{Π} — $\lg \sigma_{\text{эф}}$ аппроксимируются прямой линией (рис. 20). Исходя из этого, они могут быть выражены эмпирической формулой

$$\beta_{\Pi} = \frac{\beta_{\Pi}^{\max}}{\lg \frac{(\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})_{\max}}{(\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})_{\min}}} \lg \frac{(\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})_{\max}}{(\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})}, \quad (\text{IV.1})$$

предложенной В. М. Добрыниным [63].

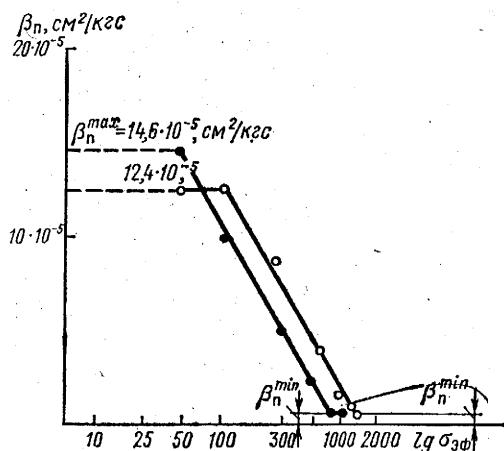


Рис. 20. Изменение β_{Π} в зависимости от логарифма $\sigma_{\text{эф}}$ для кварцевых песчаников:

точки: \circ — обр. 462/62, \bullet — обр. 434/62

В формуле (IV.1) β_{Π}^{\max} — коэффициент максимальной сжимаемости пор (при $\sigma_{\text{эф}} \leq 100$ кгс/см²), определяемый путем построения начального участка $\beta_{\Pi} = f(\lg \sigma_{\text{эф}})$, где $\beta_{\Pi}^{\max} \approx \text{const}$ (I область). Область II характеризуют напряжения $(\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})$, изменяющиеся в пределах $(\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})_{\min} \leq (\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi}) \leq (\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})_{\max}$, где $(\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})_{\max}$ — эффективное напряжение на границе области II, в пределах которой деформации песчано-алевритовых пород являются обратимыми. В. М. Добрынин предложил определять $\sigma_{\text{эф max}}$ путем экстраполяции прямых, изображенных на рис. 20, до пересечения с осью абсцисс.

Проведенные исследования показали, что определенные таким образом величины $(\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})_{\max}$ обычно превышают значения предельных упругих напряжений (напряжений на границе упругой устойчивости).

В связи с этим, предлагается заменить в формуле (IV.1) $(\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})_{\max}$ величиной напряжения на границе упругой устойчивости $(\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})_{\text{пр}}$, определяемого экспериментально.

Тогда выражение (IV.1) примет вид

$$\beta_{\Pi} = \frac{\beta_{\Pi}^{\max} - \beta_{\Pi}^{\min}}{\lg \frac{(\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})_{\text{пр}}}{(\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})_{\min}}} \lg \frac{(\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})_{\text{пр}}}{(\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})}, \quad (\text{IV.2})$$

где β_{Π}^{\min} — коэффициент сжимаемости пор породы при предельной величине эффективного напряжения $(\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})_{\text{пр}}$ (см. рис. 20).

Плохо отсортированные полимиктовые (кварцево-полевошпатовые) песчаники и алевролиты с большим содержанием глинисто-карбонатного цемента или с сильной эпигенетической цементацией, срастанием зерен отличают высокие коэффициенты сжимаемости пор и более низкие значения напряжений на границе упругой устойчивости (см. рис. 18). Зависимость коэффициентов сжимаемости порового пространства этих пород от $\sigma_{\text{эф}}$ в области упругой деформации (в диапазоне изменения $\sigma_{\text{эф}}$ от 50—100 до 500—900 кгс/см²) может быть выражена формулой В. М. Добрынина, установленной для песчано-алевритовых пород пермо-триаса из разреза Аралсорской скважины СГ-1 [63]

$$\beta_{\Pi} = \frac{0.434K}{\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi}}, \quad (\text{IV.3})$$

где K — угловой коэффициент прямых $\epsilon_{V_{\Pi}} = f[\lg(\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})]$, называемый компрессионным коэффициентом ($\epsilon_{V_{\Pi}}$ — деформация объема пор).

Значение коэффициента K определяется, если положить в формуле (IV.3)

$$\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi} = (\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})_{\min}$$

$$K = \frac{\beta_{\Pi}^{\max} (\sigma_{\text{он}} - p_{\Pi})_{\min}}{0.434}, \quad (\text{IV.4})$$

где β_{π}^{\max} — значение коэффициента сжимаемости пор при $\sigma_{\text{эф}} = (\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})_{\min}$.

Уравнение (IV.3) может быть также представлено в виде

$$\beta_{\pi} = \beta_{\pi}^{\max} \frac{(\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})_{\min}}{(\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})}, \quad (\text{IV.5})$$

если подставить в него значение K из выражения (IV.4).

Как можно судить по результатам исследования, абсолютные значения и уменьшение коэффициентов сжимаемости песчано-алевритовых пород-коллекторов и их порового пространства с ростом эффективного напряжения количественно зависят от литолого-петрографических особенностей пород.

Табл. 2 и 3 первоначально обобщали результаты испытаний пород различных типов с исходными показателями пористости и проницаемости, характерными для крайних их значений в соответствующих группах классификации И. А. Конюхова [77]. Последующие испытания песчано-алевритовых пород, в том числе из других нефтедобывающих районов, практически не изменили ранее установленные пределы изменений β и β_{π} . Это дает основание утверждать, что табл. 2 и 3 можно использовать для прогноза изменений сжимаемости пород известного состава и строения. При этом следует помнить, что в зависимости от уровня напряжений в процессе деформации песчано-алевритовых коллекторов выделяются три характерные области:

первая $0 \leq (\sigma_{\text{он}} - p_{\pi}) \leq (\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})_{\min}$, в пределах которой

$$\beta_{\pi} = \beta_{\pi}^{\max} \approx \text{const},$$

вторая $(\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})_{\min} \leq (\sigma_{\text{он}} - p_{\pi}) \leq (\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})_{\text{пр}}$, для которой β_{π} вычисляется по формуле (IV.2), или по формуле (IV.5);

третья $(\sigma_{\text{он}} - p_{\pi}) \geq (\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})_{\text{пр}}$, для которой характерно возникновение необратимых изменений в структуре деформированных пород (область III на рис. 13—20).

Первые две характерные области деформации песчано-алевритовых пород-коллекторов были достаточно детально исследованы в ряде работ [61, 63]. В этих работах было установлено, что $(\sigma_{\text{он}} - p_{\pi})_{\min}$ для большинства пород не превышает 100 кгс/см², при этом минимальные их значения (десятки кгс/см²) встречаются наиболее часто. Эти данные получили подтверждение и в настоящем исследовании. Рядом исследователей [63] было отмечено, что с уве-

личением относительной глинистости ($\eta_{\text{гл}} = \frac{C}{C + K_{\pi}}$, где C — объ-

емное содержание глинистого вещества в породе) и ухудшением отсортированности псаммитовой фракции пород коэффициент сжимаемости пор возрастает. Аналогичная тенденция была замечена и в этих исследованиях.

Было установлено, что коэффициенты максимальной сжимаемости пор коллекторов, не содержащих глинистых включений,

колеблются в пределах $(12,0-25,0) \cdot 10^{-5}$ см²/кгс, тогда как у испытанных разностей, содержащих глинистые включения, они изменяются от $17 \cdot 10^{-5}$ до $55 \cdot 10^{-5}$ (низкие значения в обоих случаях относятся к хорошо и среднесортированным разностям).

Наибольшие различия в сжимаемости у пород разных типов были отмечены в области малых величин $\sigma_{эф}$, что подтверждает вывод В. М. Добрынина [61, 63] о возможности учета литолого-петрографических особенностей пород с помощью коэффициента $\beta_{п}^{max}$.

Представляет интерес наблюдаемая в проведенном исследовании тенденция к снижению коэффициентов сжимаемости пор с ростом пористости у пород близкого состава и одного возраста. У разновозрастных пород одного класса и близкой пористости несколько большая сжимаемость отмечена при деформации молодых отложений.

Эти особенности должны быть более детально изучены в дальнейшем для установления определенных зависимостей.

В условиях залегания породы подвергаются одновременному воздействию всестороннего давления и температуры, в связи с чем необходимы данные по изменению сжимаемости пород и их порового пространства при совместном действии эффективных напряжений и температур, типичных для глубин залегания пород.

Следует отметить относительно слабую изученность влияния температуры как на деформационные, так и на прочностные свойства горных пород в условиях объемных напряженных состояний. Интересные материалы по физическим (главным образом, прочностным) свойствам горных пород обобщены в монографиях [59, 107, 140]. Выполнен ряд работ по изучению влияния температуры на скорость продольных волн [2, 49, 84, 132] и коллекторские свойства пород [1, 2, 57, 61, 63, 132].

В результате проведенных исследований выявлено, что изменения деформационных и прочностных характеристик пород при объемном сжатии зависят от структурных особенностей пород, термостойкости минералов и цементирующего вещества. Установлено, что относительное изменение модуля упругости, скоростей продольных волн, коэффициентов пористости и проницаемости, а также и прочности пород при повышении температуры увеличивается с ростом неоднородности состава и строения пород. На деформируемость песчано-алевритовых пород при повышенных температурах большое влияние оказывают глинистые включения, тепловое расширение которых, как установил В. М. Добрынин [63], не компенсируется снижением объема под действием пластового давления, в результате чего сжимаемость глинистых пород и их порового пространства с ростом температуры увеличивается.

Изучение влияния температуры на сжимаемость пород и их порового пространства в условиях объемного напряженного состояния проводилось на трех образцах хорошо отсортированных кварцевых песчаников II—IV классов (обр. 253/69; 576/69; 115/69), трех образцах средне отсортированных, сильно сцементированных кварце-

вых и полевошпатово-кварцевых песчаников и алевролитов VI—VIII классов (обр. 138/69; 830/59; 1736K) и четырех образцах неоднородных полимиктовых песчаников с высоким содержанием глинисто-карбонатного цемента (или сильным срастанием зерен) XII класса (обр. 733K, 536K, 45, 1651K).

В результате исследования влияния температуры в диапазоне ее изменения от 20 до 200°С при эффективных напряжениях до 1200 кгс/см² было установлено, что на сжимаемость пород II—V классов температура практически не оказывает влияния (табл. 4). Небольшое влияние температуры отмечалось при испытании пород VII—VIII классов (увеличение коэффициентов сжимаемости пород и их порового пространства до 20%). Наибольшие изменения коэффициентов сжимаемости с ростом температуры отмечены при испытании неоднородных по составу и строению песчаников и алевролитов XII класса (рост β и β_{II} до 40—60%, см. табл. 4).

Следует отметить, что у пород VII—XII классов температура влияет также и на положение границы упругой устойчивости, сдвигая ее в сторону меньших эффективных напряжений. Последнее объясняется тем, что вследствие различного теплового расширения разных минералов скелета, а также минеральных включений на контактах зерен и в порах, при повышении температуры стимулируются деформации пород по границам зерен, приводящие к остаточным явлениям.

В целом, исследования, проведенные в более широком, чем ранее, диапазоне температур подтвердили вывод о небольшом влиянии температуры на сжимаемость песчано-алевритовых коллекторов с высокими показателями коллекторских свойств [63]. В то же время они позволили выявить и оценить влияние температуры на сжимаемость полимиктовых разностей и условия нарушения их упругой устойчивости.

Одним из важнейших для практики показателей физических свойств пород является коэффициент пористости, широко используемый при подсчетах запасов нефти и газа.

В связи с ростом глубин добычи нефти возникает необходимость в оценке упругих изменений коэффициента пористости пород с глубиной, т. е. проведение экспериментальных определений уменьшения объема порового пространства пород при эффективных напряжениях и температурах, типичных для глубин залегания исследуемых коллекторов.

Проведенные измерения упругих деформаций пористых песчано-алевритовых пород, преобладающую часть которых составляют деформации порового пространства, позволяют оценить упругие (обратимые) изменения коэффициента пористости пород.

Представляет интерес также изучение влияния на коэффициент пористости песчано-алевритовых коллекторов необратимых деформаций, возникающих при предельных значениях эффективных напряжений ($\sigma_{эф. пр}$), всегда значительно больших величины напряжения на глубине залегания породы ($\sigma_{эф. н}$), а также при разгрузке

Относительные изменения коэффициентов сжимаемости песчано-алевритовых пород (β) и их порового пространства (β_n) при упругой деформации пород в условиях различных эффективных напряжений и температур 20—200° С

Классы пород	Отношения $\frac{\beta_{200^\circ\text{C}}}{\beta_{20^\circ\text{C}}}$ и $\frac{\beta_{\text{п}} 200^\circ\text{C}}{\beta_{\text{п}} 20^\circ\text{C}}$	$\sigma_{\text{эф}}, \text{ кгс/см}^2 (H_{\text{экв}}, \text{ км})$						Предел упругой устойчивости $\sigma_{\text{эф. пр}}, \text{ кгс/см}^2$
		50	100	300	600	900	1200	
		Глубина, км						
		0,4	0,8	2,3	4,6	7,0	9,2	
II—V	$\frac{\beta_{200}}{\beta_{20}}$	1,0	1,0	1,0	1,0—1,05	1,0—1,06	1,0—1,10	Предел упругой устойчивости сохраняется одинаковым при $t=20^\circ$ и 200°C
	$\frac{\beta_{\text{п}} 200}{\beta_{\text{п}} 20}$	1,0	1,0	1,0—1,05	1,0—1,08	1,0—1,10	1,0—1,10	
VI—VIII	$\frac{\beta_{200}}{\beta_{20}}$	1,0	1,0—1,03	1,0—1,05	1,0—1,10	1,0—1,20	—	Предел упругой устойчивости снижается с $\sigma_{\text{эф. пр}}=1000\text{—}1500 \text{ кгс/см}^2$ при $t=20^\circ\text{C}$ до $\sigma_{\text{эф. пр}}=900\text{—}1300 \text{ кгс/см}^2$ при $t=200^\circ\text{C}$
	$\frac{\beta_{\text{п}} 200}{\beta_{\text{п}} 20}$	1,0—1,1	1,0—1,03	1,0—1,07	1,0—1,15	1,0—1,20		
IX—XII	$\frac{\beta_{200}}{\beta_{20}}$	1,05—1,20	1,05—1,20	1,10—1,3	До 1,5			Предел упругой устойчивости снижается с $\sigma_{\text{эф. пр}}=600\text{—}800 \text{ кгс/см}^2$ при $t=20^\circ\text{C}$ до $\sigma_{\text{эф. пр}}=450\text{—}600 \text{ кгс/см}^2$ при $t=200^\circ\text{C}$
	$\frac{\beta_{\text{п}} 200}{\beta_{\text{п}} 20}$	1,05—1,25	1,1—1,25	1,2—1,4	До 1,6			

пород от давления (в том числе и не превышающего величины $\sigma_{эф.н}$). В табл. 5 представлены результаты изучения уменьшения коэффициентов пористости песчано-алевритовых пород разных классов при их упругой и неупругой деформации в условиях равномерного всестороннего сжатия при постоянном поровом давлении насыщающей жидкости (керосина) и комнатной температуре.

На рис. 21 приведены экспериментальные кривые средних величин упругих изменений коэффициента пористости песчано-алевритовых пород выделенных в табл. 5 пяти групп разных классов с ростом эффективных напряжений до значений, типичных для глубин до 9—14 км, при температуре 20—22° С.

Как и следовало ожидать, наименьшие изменения коэффициента пористости, к тому же упругие изменения во всем исследованном диапазоне эффективных напряжений, претерпевают мономинеральные (кварцевые) высокопористые (коэффициент пористости которых при атмосферных условиях $K_{п.атм} \geq 15\%$) хорошо отсортированные слабо- и среднесцементированные, средне-мелкозернистые песчаники II—III классов. У этих песчаников даже на глубине 14 км изменения $K_{п}$ колеблются в пределах 4,4—7,9%, на глубинах же 2,3—4,6 км они не превышают 2,2—4,7% (см. табл. 5)

У кварцевых и кварцево-полевошпатовых пород-коллекторов средней сортированности и более высокой степени минеральной цементации (IV—VIII классы) упругие изменения коэффициентов пористости выше, при этом уже при давлениях в 900—1500 кгс/см² у наиболее неоднородных разностей пород возникают остаточные деформации, приводящие к необратимым изменениям пористости. Наибольшие упругие изменения $\Delta K_{п}/K_{п.атм}$ (до 14%) при $\sigma_{эф} = 1200—1500$ кгс/см² отмечены при деформации полиминеральных плохоотсортированных сильно сцементированных (глинистым цементом или срастанием зерен) песчано-алевритовых коллекторов IX—XII классов. Для этих пород характерна также потеря

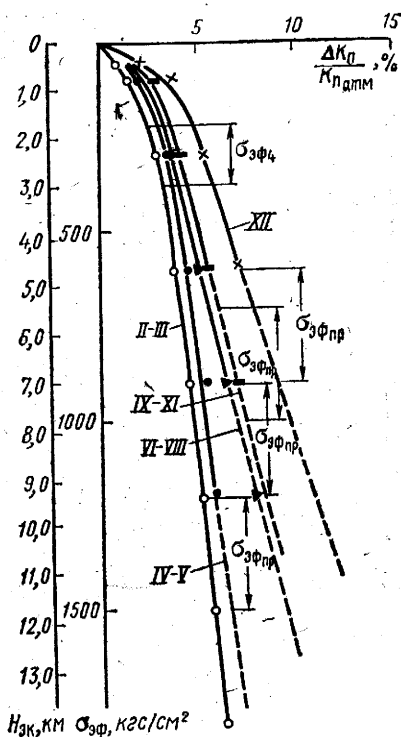


Рис. 21. Упругие изменения коэффициента пористости $\Delta K_{п}/K_{п.атм}$ песчано-алевритовых пород разных классов в зависимости от эффективного напряжения при $p_{п} = \text{const}$ и $t = 20^{\circ}\text{C}$

Изменения (уменьшения) коэффициентов пористости $\left(\frac{\Delta K_{\Pi}}{K_{\Pi \text{ атм}}} \right)$ песчано-алевритовых коллекторов при упругой и неупругой их деформации в условиях всестороннего равномерного сжатия, постоянного порового давления, при комнатной температуре

Классы пород	$\frac{\Delta K_{\Pi}}{K_{\Pi \text{ атм}}}$, %, при $\sigma_{\text{эф}}$, кгс/см ²							
	50	100	300	600	900	1200	1500	1800
	Глубина, км							
	0,4	0,8	2,3	4,6	7,0	9,2	11,5	14
II—III	0,7—1,2	1,5—2,4	2,2—4,2	3,0—4,7	4,0—5,4	4,1—6,2	4,3—6,8	4,4—7,9
IV—V	1,0—1,6	1,7—2,3	2,8—4,9	3,7—5,6	4,0—6,3	4,7—6,3 (—7,7)	5,2—7,6 (6,5—11,0)	5,7 (8,9)
VI—VIII	1,3—1,75	1,7—3,0	2,8—4,8	3,7—7,0	4,8—9,2 (5,4—15,0)	5,8—10,8 (7,6—11,5)	—12,0 —17,2)	
IX—X	1,3—2,3	1,7—3,5	2,5—5,1	3,7—7,5 (4,4—)	4,8—9,0 (7,1—11,6)	—12,2 (—14,2)	—14,6 (—19,8)	
XII	1,6—2,8	2,5—5,5	3,4—7,7	4,8—9,7 (6,4—)	6,3—11,8 (9,4—17,0)	7,6—13,8 (15,1—24,6)		

Примечание. В скобках приведены значения $\frac{\Delta K_{\Pi}}{K_{\Pi \text{ атм}}}$ при неупругой деформации.

упругой устойчивости, а следовательно, и возникновение необратимых изменений пористости, при относительно низких величинах эффективного напряжения (600—900 кгс/см²).

Температура в исследованном диапазоне ее изменения от 20 до 200° С практически не оказывала влияния на коэффициенты пористости пород II—V классов при различных эффективных напряжениях. У пород VI—VIII классов изменения пористости с ростом температуры несколько возрастали. Средняя величина отношения $\frac{\Delta K_{\Pi}}{K_{\Pi \text{ атм}}}$ при $\sigma_{\text{эф}} = 1200$ кгс/см² у пород этой группы возросла до ~10% при $t = 200^\circ \text{С}$ по сравнению с 8,4% при $t = 20^\circ \text{С}$.

Отмечалось также и незначительное (до 100 кгс/см²) смещение в сторону меньших значений $\sigma_{\text{эф}}$ границы упругой устойчивости при деформации пород этих классов в условиях максимальных температур (200° С).

У наиболее неоднородных по составу и строению пород IX—XII классов упругие изменения коэффициента пористости $\frac{\Delta K_{\Pi}}{K_{\Pi \text{ атм}}}$ при $\sigma_{\text{эф}} = 600 - 800$ кгс/см² и температурах $t = 100 - 200^\circ \text{С}$ возрастали до 20—25% против 8—12% при $t = 20^\circ \text{С}$.

Уровень напряжений на границе упругой устойчивости при максимальных температурах снижался у этих пород до значений, характерных для глубин 3—4 км.

Анализ зависимостей $\frac{\Delta K_{\Pi}}{K_{\Pi \text{ атм}}}$ от $\sigma_{\text{эф}}$, представленных на рис. 21, позволяет заметить, что необратимые изменения пористости у всех пород возникают при напряжениях $\sigma_{\text{эф. пр.}}$, существенно (в 2—3 раза) превышающих значения эффективных напряжений на глубине залегания пород $\sigma_{\text{эф. н.}}$

Поскольку установлено, что возникновение необратимых изменений определяется пределом упругости скелета породы, а характер

зависимостей $\frac{\Delta K_{\Pi}}{K_{\Pi \text{ атм}}}$ от $\sigma_{\text{эф}}$ одинаков как в области $\sigma_{\text{эф}} < \sigma_{\text{эф. н.}}$, так и при $\sigma_{\text{эф. н.}} < \sigma_{\text{эф}} < \sigma_{\text{эф. пр.}}$, можно с достаточным основанием рекомендовать использование этой части зависимости

$\frac{\Delta K_{\Pi}}{K_{\Pi \text{ атм}}} = f(\sigma_{\text{эф}})$ для приближенного прогноза упругих изменений

пористости пород на еще не освоенных бурением глубинах.

Развитие остаточной деформации в процессе равномерного всестороннего сжатия связано с неоднородностью распределения напряжений в породе, обусловленного ее неоднородным строением и составом. Концентрация напряжений вызывает микроразрушения в скелете пород. Эти микродефекты вначале, по-видимому,

настолько незначительны, что не изменяют характера зависимости объемных деформаций от давления.

Резкое же и необратимое уменьшение объема пород, происходящее главным образом вследствие деформации порового пространства при предельных значениях эффективных напряжений $\sigma_{эф. пр}$, связано уже с развитием необратимых явлений в большом объеме деформируемой породы. Естественно, что при этих значениях эффективных напряжений должны отмечаться и отмечаются существенные необратимые изменения коэффициентов пористости и проницаемости.

Следует обратить внимание на то, что коэффициент проницаемости, являющийся наиболее чувствительной по отношению к структуре пустотного пространства физической характеристикой, можно использовать для более точного определения границы области возникновения необратимых деформаций.

Из ряда работ [36, 57, 81, 86] известно, что необратимые изменения коэффициента проницаемости песчано-алевритовых пород встречаются и при величинах эффективных напряжений, значительно меньших $\sigma_{эф. пр}$. Так, например, необратимое снижение коэффициента проницаемости до 20—25% отмечено у высокопроницаемых мелкозернистых песчаников и алевролитов с глинисто-карбонатным цементом уже при напряжениях в 400—600 кгс/см² [57].

Для оценки влияния необратимых деформаций на коэффициент проницаемости и выявления механизма этого влияния ряд песчано-алевритовых пород, деформированных в различных термодинамических условиях ($\sigma_{эф} < \sigma_{эф. пр}$; $\sigma_{эф} > \sigma_{эф. пр}$; $t = 20—200^\circ \text{C}$), был подвергнут повторному измерению коэффициента проницаемости при атмосферном давлении. Результаты этих измерений представлены в табл. 6.

Из данных, приведенных в табл. 6, следует, что при высоких значениях эффективных напряжений, даже не достигающих величин $\sigma_{эф. пр}$, могут отмечаться необратимые изменения (уменьшение) коэффициента проницаемости порядка 20—40%. Подобное явление отмечалось и ранее. Так, в работе [86] было выявлено, что необратимое и существенное уменьшение коэффициента проницаемости после деформации в условиях $\sigma_{эф} = \sigma_{эф. н}$ при практическом отсутствии необратимых изменений коэффициента пористости характерно для целой группы песчаников с глинисто-карбонатным цементом.

Рассмотрение особенностей строения кварцевых песчаников III и IV классов (обр. 576/69; 483/62; 115/69), у которых были отмечены необратимые изменения коэффициента проницаемости при значениях $\sigma_{эф} < \sigma_{эф. пр}$, показывает, что они могли быть вызваны перераспределением минерального (глинисто-карбонатного) цемента в порах пород.

В табл. 6 опыт с обр. 576/69, деформированном при $\sigma_{эф} = 1200 \text{ кгс/см}^2$ ($\sigma_{эф. н} = 230 \text{ кгс/см}^2$) и $t = 20^\circ \text{C}$, в котором не

**Коэффициенты проницаемости песчано-алевритовых пород после упругой и остаточной деформации
при различных эффективных напряжениях и температурах**

Класс пород	№ образцов	$K_{\text{пратм}}$, мД (исходное)	Условия деформации			Значения остаточных деформаций		$K_{\text{пратм}}$ после деформации	$\frac{K_{\text{прдеф}} - K_{\text{присх}}}{K_{\text{присх}}}$, %
			$\sigma_{\text{эф}}$, кгс/см ²	$\sigma_{\text{эф пр}}$, кгс/см ²	t , °C	ε_1 ост, %	ε_2 ост = ε_3 ост, %		
II	245—5/1 434/62	870	1600	1600	20	0,09	0,08	556	—36
		538	1800	1800	20	0,30	0,12	180	—66
III	576/69	677	1200	Не достигнут	20	—	—	678	0
			1200		100	—	—	407	—40
IV	483/62 115/69 825/59	370	850	1500	20	—	—	263	—29
		375	1200		50	—	—	306	—18
		382	1850		20	0,09	0,12	366	—4
VI	138/69	187	900	900	20	0,16	0,04	262	+40
			1100	900	50	0,30	0,24	444	+137
IX	653—5/1 733K	29	1500	700	20	0,15	0,15	16,7	—42
		1,2	1100	650	50	0,13	0,06	1,5	+25
			1500	600	100	0,27	0,22	3,6	+200
XII	536K	3,0	900	700	50	0,72	0,55	1,9	—37

отмечено изменение $K_{\text{пр}}$ после деформации, иллюстрирует развиваемые в работе представления о правомерности изучения упругих деформаций пород при напряжениях, значительно превышающих величины напряжений на глубине залегания пород. Следует отметить, что при давлениях $\sigma_{\text{эф}} < 500-700 \text{ кгс/см}^2$ (в 2—3 раза превышающих величины $\sigma_{\text{эф}}$ на глубине залегания) у большей части песчано-алевритовых пород II и III классов, при их деформации в условиях невысоких температур, не отмечалось необратимых изменений $K_{\text{пр}}$.

Во всех случаях, когда создаваемые эффективные напряжения были равны или превышали величины $\sigma_{\text{эф. пр}}$, закономерно наблюдались необратимые изменения коэффициента проницаемости. Однако эти необратимые изменения, как следует из данных табл. 6, были существенно различными, что связано с пластическим или хрупким характером изменений в структуре пород.

Анализ шлифов деформированных пород позволил выявить тенденцию к развитию преимущественно пластической деформации по границам зерен в случае деформирования мономинеральных пород с содержанием относительно равномерно распределенного глинисто-карбонатного цемента в количестве 3—15% и с цементацией сростанием зерен средней степени (обр. 245—5/1; 434/62; 825/59; 653—5/1).

Количественные изменения коэффициентов проницаемости у этих пород были обусловлены не только уровнем эффективных напряжений, но и степенью однородности деформаций объема, в частности, развитием продольной деформации (ϵ_1), в направлении которой производились измерения проницаемости пород.

Представляет интерес отмеченное увеличение коэффициента проницаемости у деформированных полевошпатово-кварцевых пород обр. 138/69; 733К). Оно, как было установлено, связано с катакластическими нарушениями по границам зерен, в результате которых после снятия напряжения произошли разуплотнение породы и соответствующий ему рост проницаемости пород.

Здесь следует напомнить, что во II главе уже обосновывалась большая вероятность образования межзерновых трещин в случае полиминерального состава породы, вследствие различия коэффициентов Пуассона у зерен разных минералов.

В связи с преимущественным развитием межзерновых деформаций, влияние температуры, стимулирующей межзерновые эффекты, во всех случаях увеличивало отклонение коэффициента проницаемости деформированных пород $K_{\text{пр. деф}}$ от исходной величины этого коэффициента $K_{\text{пр. исх}}$ (см. опыты на обр. 576/69 и 733К при $t = 100^\circ \text{C}$ и на обр. 138/69 при $t = 50^\circ \text{C}$).

Эффект разуплотнения пород при снятии напряжений уровня $\sigma_{\text{эф}} = \sigma_{\text{эф. п}}$ наблюдался также при деформации полиминеральных плохосортированных песчаников девона Днепровско-Донецкой впадины (глубины залегания 3,5—4,0 км).

По-видимому, возможность разрыва скелета при быстрой разгрузке породы (при подъеме керна из скважины) наиболее вероятна в случае больших глубин залегания пород. Это обстоятельство необходимо учитывать при оценке коллекторских свойств пород глубоких горизонтов по данным испытаний керна в атмосферных условиях.

Изучение изменений коэффициента проницаемости пород при действии эффективных напряжений и температур в диапазоне от 20 до 100° С производилось на образцах песчано-алевритовых пород, представляющих разные классы коллекторов.

В методике уже указывалось, что, во избежание физико-химического воздействия насыщающих сред на породы, изменения проницаемости изучались главным образом при стационарной фильтрации газа (азота).

В табл. 7 представлены установленные экспериментально изменения коэффициента проницаемости песчано-алевритовых пород при эффективных напряжениях, типичных для глубин до 5,4—7 км, в диапазоне температур от 19 до 100° С.

Результаты испытаний представлены в виде отношения $\Delta K_{\text{пр } \sigma_{\text{эф}}} / K_{\text{пр } 10, t}$, т. е. величины изменений $\Delta K_{\text{пр}} = K_{\text{пр } 10, t} - K_{\text{пр } \sigma_{\text{эф}}}$ отнесены к значению коэффициента проницаемости при $\sigma_{\text{эф}} = 10 \text{ кгс/см}^2$ и соответствующей температуре. Использование значения $K_{\text{пр } 10}$ вместо $K_{\text{п атм}}$ вызвано тем, что в атмосферных условиях не представлялось возможным измерение $K_{\text{пр}}$ при разных температурах.

Как можно видеть, при напряжениях, типичных для глубин залегания пород, и температурах 19—25° С величины $\Delta K_{\text{пр } \sigma_{\text{эф}}} / K_{\text{пр } 10, t}$ у пород III—VI классов не превышают 20—40%, увеличиваясь для пород VIII—XIII классов до 35—80%. Во всем же исследованном диапазоне давлений до 700—1000 кгс/см² отмеченные предельные изменения $\Delta K_{\text{пр } \sigma_{\text{эф}}} / K_{\text{пр } 10, t}$ колеблются в пределах от 45 до 100%.

В этих испытаниях, так же как и в опытах, результаты которых представлены в табл. 6, у пород III—VI классов, деформированных при напряжениях $\sigma_{\text{эф}} = 2-3\sigma_{\text{эф. н}}$ (но меньших $\sigma_{\text{эф. пр}}$) при комнатной температуре, существенные необратимые изменения не наблюдались.

Изучение коэффициентов проницаемости пород VIII—XII классов производилось при $\sigma_{\text{эф}} \geq \sigma_{\text{эф. пр}}$, поэтому во всех случаях были достигнуты необратимые изменения.

О величине последних можно судить по значениям отношений коэффициентов проницаемости при нагружении и разгрузке в условиях действия $\sigma_{\text{эф}} = 10 \text{ кгс/см}^2$ (табл. 7).

Температура, как было установлено, в большинстве случаев снижает значения $K_{\text{пр}}$, при этом более значительные изменения отмечены при деформации неоднородных по составу и строению пород (см. табл. 7). Кривые изменения $K_{\text{пр}}$ с давлением при

Изменения (уменьшения) коэффициента проницаемости $\left(\frac{\Delta K_{\text{пр. эф. } t}}{K_{\text{пр. } 10, t}} \right)$ различных песчано-алевритовых пород под действием эффективных напряжений, типичных для глубины до 5,4—7,0 км ($t=19-100^\circ \text{C}$)

Класс пород	№ образцов	К _{п. атм.} мД (по газу)	t, °C	К _{пр 10, t} мД	$\Delta K_{\text{пр } \sigma \text{ эф } t} / K_{\text{пр. } 10, t}, \%, \text{ при } \sigma_{\text{эф}}, \text{ кгс/см}^2$											
					50	100	200	300	400	500	700	900	200	100	10	
					глубина, км											
					0,4	0,8	1,6	2,3	3,1	3,9	5,4	7,0	1,6	0,8		
III	576/69	677,4	22	645,0	8,1	14,8	19,8	21,3 ($\sigma_{\text{эф}} = 230$)					20,2		3,2	
				620,0	9,7	14,7	18,9	21,2	25,1	27,8				16,4	3,6	
	445/69	627,6	19	604,9	4,1	21,5	39,5*	48,1	55,6	59,4	67,5			3,3		
			50	438,6	7,9	24,0	42,3	45,4	51,0	55,0	65,8			3,3		
VI	145/69	132,0	100	431,2	8,2	27,7	42,0	51,1	58,7	68,1				3,5		
			21	117,0	7,4	14,0	21,4*	31,4	41,2	48,8	60,2			22,0		
	146/69	102,3	50	92,3	8,7	26,7	36,6	45,3	48,9	51,8	59,1			13,1		
			19	90,6	—	11,4	15,5*	21,0	24,6	29,2	36,2 ($\sigma_{\text{эф}} = 600$)			13,4		
			50	87,8	6,7	11,3	18,3	22,4	26,9	33,8 ($\sigma_{\text{эф}} = 600$)	43,5 ($\sigma_{\text{эф}} = 600$)			35,4		

VIII	91/69	179,5	22	132,9	5,7	12,7	19,5*	25,3	<u>45,1</u>	51,3	57,5	84,5 ($\sigma_{\text{эф}}=1000$)	54,3
			50	115,9	6,4	11,5	17,2	22,8	<u>30,6</u>	41,1	44,3		
	85/69	84,0	21	65,8	7,2	13,7	32,1*	33,4	<u>50,7</u>	51,3	59,5		
	27-17/B71	42,0	25	36,8	17,9	29,6	37,7	<u>52,4</u>	58,4*	67,1	77,0		
IX	26-210/7B71	16,2	22	11,3	23,9	36,3	46,0	<u>65,5</u>	75,8*	85,8		95,3	31,5
			70	7,3	35,9	53,7	<u>66,4</u>	<u>78,1</u>	89,9	93,8			
	12-106/7B71	4,70	23	4,05	12,3	22,0	33,3	<u>66,0</u>	76,8*	76,8	88,8		
			80	4,56	32,0	47,4	58,5	<u>72,4</u>	84,5	89,0			
XII	536K	3,0	24	0,89	55,0	89,3	<u>97,0</u>	<u>98,2</u>	(σ _{эф} = 230)				52,4
	36— 116/46B71	1,35—	20—	1,3—	22,8—	31,8—	<u>56,3</u>	68,3—	79,7—				
	17—25/B71 5—41/B71	5,10	23	4,8	46,8	<u>63,6</u>	78,0	92,7	95,5				

Примечания: 1. Значком * отмечены значения $\frac{\Delta K_{прэф} f}{K_{пр 10, f}}$ на глубине залегания породы (при $\sigma_{эф.п}$).

2. — значения $\frac{\Delta K_{прэф} f}{K_{пр 10, f}}$, которые обведены, соответствуют предельным напряжениям (при этих напряжениях отмечены существенные необратимые изменения $K_{пр}$).

нормальной и повышенных температурах качественно подобны (рис. 22).

На рис. 22 представлены кривые обратимых изменений $K_{пр}$ хорошо отсортированных кварцевых песчаников (обр. 445/69, 576/69, III класс) при $t = 19-100^\circ\text{C}$, а также плохо отсортированного полевошпатово-кварцевого сильно сцементированного песчаника (обр. 12-106/7В71, XII класс), у которого отмечены необратимые изменения $K_{пр}$. Следует обратить внимание на то, что у неодно-

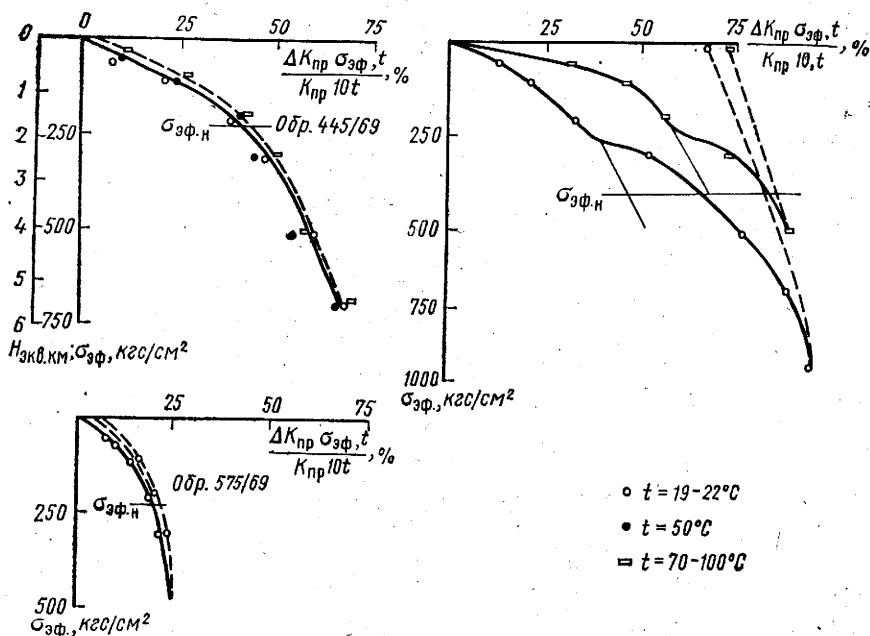


Рис. 22. Изменения коэффициента проницаемости $\Delta K_{пр}/K_{пр,атм}$ для песчано-алевритовых пород разных классов в зависимости от эффективного напряжения:

—— кривые нагружения; — — — кривые разгрузки

родных по составу и строению пород VIII—XII классов необратимые изменения $K_{пр}$ наблюдаются при напряжениях, незначительно превышающих $\sigma_{эф,н}$ либо равных и даже меньших $\sigma_{эф,н}$. Это свидетельствует о накоплении в структуре таких пород остаточных изменений даже на стадиях упругой деформации при многократном нагружении.

Известно, что в процессе разработки залежей нефти в результате падения пластового давления возможен рост $\sigma_{эф}$ на 100—200 кгс/см². Как показывают наши исследования и результаты работ других исследователей [57], даже небольшое увеличение эффективных напряжений у пород определенного типа может вы-

звать существенные и необратимые деформации пород. Возможность упруго-пластического режима наиболее вероятна при разрабатке глубоко залегающих месторождений, что необходимо учитывать при выборе технологии.

§ 2. Результаты исследования объемных деформаций, коэффициентов сжимаемости и пористости карбонатных пород

Деформационные свойства карбонатных пород в условиях равномерного всестороннего сжатия изучались как на насыщенных керосином образцах при действии порового давления, так и на сухих образцах. Испытания проводились в основном при комнатной температуре.

Исследованные плотные ($K_p < 3\%$) разности биоморфных известняков были отобраны из верхнеюрской карбонатной толщи центральной части моноклина Северного склона Кавказа (междуречье рек Баксан—Черек), пористые — из каменноугольных отложений платформенной части Пермской области.

Биоморфно-детритусовые и биодетритусовые плотные известняки ($K_p = 1—2\%$) представляли верхнеюрскую карбонатную толщу Кавказа и каменноугольные отложения Камского Приуралья, более пористые ($K_p > 3,5\%$) разности известняков этого типа были отобраны из тех же отложений.

Из хемогенных пород были испытаны микрозернистые известняки верхней юры Кавказа ($K_p < 2\%$) и каменноугольных отложений районов платформенной части Пермской области и Предуральского прогиба ($K_p = 1,0—5,1\%$).

Испытанные разности доломитов относились к вторично измененным породам (с реликтами органогенной структуры).

В ранее проведенных исследованиях была выявлена зависимость физических свойств карбонатных пород от структуры их порового пространства и степени его заполнения глинистым веществом [6].

Исходя из этого, для установления наиболее общих закономерностей испытанию подвергались породы разных структурных типов с содержанием нерастворимого остатка $\kappa = 0,35—42\%$.

Изучение объемных деформаций карбонатных пород производили при уровнях эффективных напряжений в 50—100—300—600—900—1200 кгс/см².

В табл. 8 для некоторых разностей характерных структурно-генетических типов карбонатных пород приведены результаты измерений объемных деформаций — продольной (ϵ_1) и радиальных ($\epsilon_2 = \epsilon_3$) в условиях действия эффективных напряжений, типичных для глубин до 4,6—9,2 км при комнатной температуре.

Анализ полученных данных позволил установить, что и для карбонатных пород характерна существенная неравномерность деформации объема как в упругой области ($\frac{\epsilon_{1y}}{\epsilon_{2y}} = 0,50—1,50$), так

Объемные деформации карбонатных пород при эффективных напряжениях, типичных для глубин до 4,6—9,2 км
($t=20-22^{\circ}\text{C}$)

Структурно-генетический тип	№ образцов	Порода	$K_{п\text{отк}}, \%$	$\alpha, \%$	Условия испытаний			$\epsilon_{\text{max}}, \%$		ϵ_{1y} ϵ_{2y}	$\epsilon_{1\text{max}}$ $\epsilon_{2\text{max}}$
					$\sigma_{\text{он}},$ кгс/см ²	$P_{п},$ кгс/см ²	$H_{\text{экв}},$ км	ϵ_1	$\epsilon_2 = \epsilon_3$		
I. Биоморфные известняки	2051	Известняк онколитово-микрогустковый	0,68	35	1000	100	7,0	0,80	0,60	0,90	1,30
	2297	Известняк онколитово-комковатый	1,57	0,9	1000	250	5,8	0,25	0,32	0,80	0,80
	45—10/П71	Известняк фораминиферово-водорослевый	2,2	2,1	600	—	4,6	0,14	0,17	0,75	0,85
	763—5/2	Известняк онколитово-микрогустковый	3,9	10,7	1500	450	8,2	0,50	0,67	1,10	0,75
	168—8/П71	Известняк фузулинидовый доломитовый	7,5		400	—	3,1	0,08	0,11	0,55	0,73
	343—10/П71	Известняк фораминиферово-водорослевый	17,9		700	100	4,6	0,26	0,30	0,90	0,90
II. Биоморфно-детритусовые известняки	36—124П	Известняк органогенно-детритовый	0,9	5,3	1200	—	9,2	0,16	0,26	0,83	0,62
	36—40П	Известняк фораминиферовый доломитизированный		0,35	800	—	6,2	0,16	0,25	1,13	0,63

III. Микрозерни-
стые известня-
ки

2275	Известняк микробрекче- видный слабодолами- тизированный	1,04	4,4	1000	100	7,0	0,43	0,63	0,90	0,70
2155	Известняк микробрекче- видный	2,71	7,0	1000	250	5,8	0,38	0,21	0,78	1,80
2176	Известняк онколитово- детритусовый	3,39	10,3	1450	400	8,2	0,37	0,26	1,50	1,42
1К	Известняк водорослевый доломитовый	22,7	7,6	1000		7,7	0,70	0,95	0,50	0,74
2042	Известняк микрозерни- стый	1,73	10,2	1000	100	7,0	0,16	0,15	1,10	1,10
194—13/П71	То же	1,80		600	—	4,6	0,18	0,20	1,10	0,90
177—4/П71	„	5,1		600	—	4,6	0,21	0,22	1,10	0,95

IV. Доломиты

36/58П	Доломит тонкозернистый с реликтами органоген- ной структуры	1,0	2,56	900	—	7,0	0,15	0,175	1,40	0,90
3306	Доломит микрозерни- стый с реликтами био- морфной структуры	2,45	10,6	700	—	5,4	0,26	0,26	1,10	1,0
2076	То же	3,11	41,7	1000	100	7,0	0,34	0,20	1,10	1,70

и при предельных значениях эффективных напряжений, когда возможно проявление необратимых явлений ($\frac{\varepsilon_{1 \max}}{\varepsilon_{2 \max}} = 0,62 - 1,80$).

Наиболее равномерная деформация объема отмечена у однородных плотных микрозернистых известняков, отличающихся также и минимальными абсолютными величинами деформации.

Следует отметить, что наибольшая неравномерность деформации объема наблюдалась в случае деформации пород с четко выраженной анизотропией строения (слоистостью).

Проведение исследований в широком диапазоне эффективных напряжений позволило выявить зависимость объемных деформаций карбонатных пород от эффективного напряжения в упругой области и за ее пределами, т. е. при величинах $\sigma_{эф} > \sigma_{эф. пр.}$.

На рис. 23 приведена диаграмма деформации биоморфно-детритусового известняка (обр. 2275) в упругой и неупругой области. Исходная анизотропия строения этого известняка, как можно видеть, не вызвала неравномерной деформации его объема в упругой области. Существенная неравномерность деформации ($\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = 0,7$)

отмечена лишь в области неупругих деформаций (область III при $\sigma_{эф} > \sigma_{эф. пр.}$, рис. 23).

Упругая деформация объема у карбонатных пород, так же как и у песчано-алевритовых пород, протекает по-разному при низких ($\sigma_{эф} \leq 100$ кгс/см²) и повышенных значениях эффективных напряжений.

При $\sigma_{эф} \leq 100$ кгс/см² (область I, рис. 23) зависимость деформаций от $\sigma_{эф}$ близка к линейной, далее же с ростом $\sigma_{эф}$ отмечается снижение темпа деформаций (область II, рис. 23).

Характерная для области II зависимость деформаций от $\sigma_{эф}$ сохраняется в широком диапазоне эффективных напряжений, в том числе больших напряжения, испытываемого породой на глубине ее залегания ($\sigma_{эф. н}$ на рис. 23).

При определенном значении эффективного напряжения в породе наблюдается развитие необратимой деформации, как правило, легко определяемое по графику деформаций, вследствие резкого роста одной или двух деформаций (область III, рис. 23).

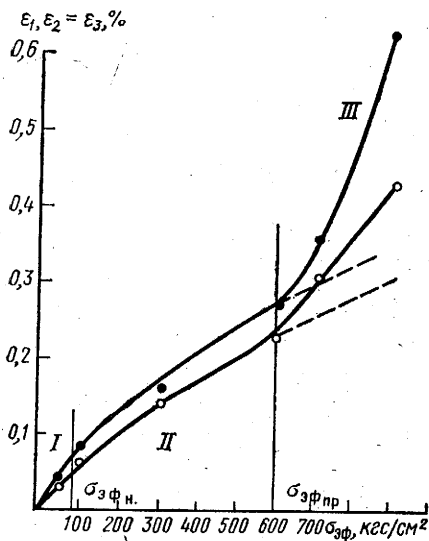


Рис. 23. Диаграмма деформаций микробрекчиевидного известняка (обр. 2275):

○ — ε_1 ; ● — $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$

У большинства испытанных органогенных известняков предел упругой устойчивости достигается при значениях эффективных напряжений, типичных для глубин 5—7 км. У хемогенных пород предельные значения эффективных напряжений были выше (900—1200 кгс/см²; $H_{\text{экв}}=7-9,2$ км), что связано с особенностями их строения (изотропией строения, однородностью состава, микроструктурностью).

Анализ изменений (с ростом $\sigma_{\text{эф}}$) коэффициентов сжимаемости карбонатных пород (β) и их порового пространства ($\beta_{\text{п}}$), рассчитанных по значениям объемных деформаций (табл. 9 и 10), подтвердил результаты ряда проведенных исследований [6, 63].

Было установлено, что в упругой области при $\sigma_{\text{эф}} > 100$ кгс/см² уменьшение коэффициента сжимаемости пор с ростом эффективного напряжения хорошо описывается уравнением гиперболы

$$\beta_{\text{п}\sigma\text{эф}} = \beta_{\text{п}}^{\text{max}} \frac{\sigma_{\text{эф. min}}}{\sigma_{\text{эф}}}, \quad (\text{IV.6})$$

где $\beta_{\text{п}}^{\text{max}}$ — максимальное значение $\beta_{\text{п}}$ (при $\sigma_{\text{эф}} > 100$ кгс/см²).

В настоящем исследовании удалось выявить, что уравнение (IV.6) описывает зависимость $\beta_{\text{п}}$ от $\sigma_{\text{эф}}$ не только в диапазоне изменения последнего от $\sigma_{\text{эф. min}}$ до $\sigma_{\text{эф. н}}$, но и вплоть до значений эффективных напряжений на границе упругой устойчивости ($\sigma_{\text{эф. пр}}$).

Заслуживают внимания установленные для пород определенных структурно-генетических типов зависимости коэффициентов сжимаемости пород и их порового пространства от коэффициентов пористости.

Значения коэффициентов сжимаемости при деформации однотипных пород во всех случаях были более высокими у высокопористых разностей. Так, в табл. 9 максимальные величины β при любых значениях $\sigma_{\text{эф}}$ характеризуют высокопористые разности пород.

Напротив, коэффициенты сжимаемости пор были выше у низкопористых разностей пород. Рис. 24, на котором представлены упругие изменения $\beta_{\text{п}}$ с ростом $\sigma_{\text{эф}}$ для ряда биоморфных известняков, иллюстрирует это положение.

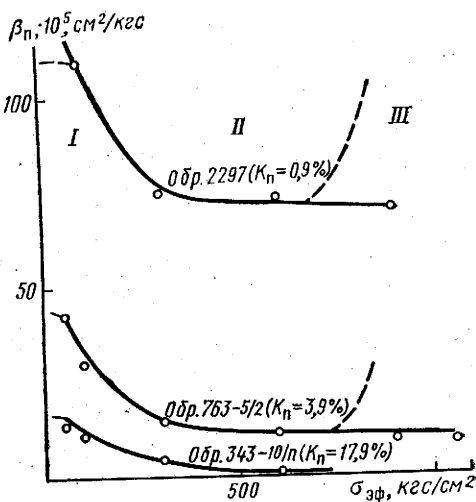


Рис. 24. Зависимости $\beta_{\text{п}} = f(\sigma_{\text{эф}})$ для биоморфных известняков различной пористости

границе упругой устойчивости

Пределы изменений коэффициентов сжимаемости (β) карбонатных пород разных структурно-генетических типов при эффективных напряжениях, типичных для глубин до 7,0—8,2 км ($t=20-22^\circ\text{C}$)

Структурно-генетический тип пород	$K_{п}$, % от—до	α , % от—до	$\beta \cdot 10^5$, см ² /кгс, при $\sigma_{эф}$, кгс/см ²					
			50	100	300	600	900	1050
			Глубина, км					
			0,4	0,8	2,3	4,6	7,0	8,2
I. Биоморфные известняки	0,68— 17,9	0,90— 35,0	1,3 —2,7	1,1 —2,3	0,4 —1,1	0,3 —0,9	0,28—0,75 (1,4—5,25)	0,27—0,55 (1,4—5,0)
II. Биоморфно-детритусовые известняки	0,90— 22,7	0,35— 15,6	1,0 —3,5	0,75—3,1	0,35—2,75	0,30—2,25 (1,25—)	0,30—2,0 (0,6—2,8)	0,30—0,80 (0,60—)
III. Микрозернистые известняки	1,16— 5,10	3,30— 10,2	1,75—3,6	1,3 —2,8	0,43—0,7	0,41—0,6	0,40 (0,6)	
IV. Доломиты	1,0— 3,11	2,60— 41,7	1,18—2,40	1,0 —1,9	0,45—1,0	0,4 —0,8	0,36—0,50 (0,80—)	

Примечание. В скобках даны значения β при неупругой деформации.

Пределы изменений коэффициентов сжимаемости порового пространства (β_p) карбонатных пород разных структурно-генетических типов при эффективных напряжениях, типичных для глубин до 7,0—8,2 км ($t=20-22^\circ\text{C}$)

Структурно-генетический тип пород	K_p , % от—до	κ - % от—до	$\beta_p \cdot 10^5$, см ² /кгс, при $\sigma_{эф}$, кгс/см ²					
			50	100	300	600	900	1050
			Глубина, км					
			0,4	0,8	2,3	4,6	7,0	8,2
I. Биоморфные известняки	0,68— 17,9	0,9— 35,0	13,8—172,1	10,8—154,5	4,35—146,6	0,73—72,2	0,60—69,2 (169,5—719,0)	9,71—15,0 (226,2) (2 образца)
II. Биоморфно-детритусовые известняки	0,90— 22,7	0,35— 15,6	14,5—201,1	12,7—189,0	2,8—163,8	1,5—136,4	1,25—100,0 (24,6—112,1)	1,05— (29,4)
III. Микрозернистые известняки	1,16— 5,10	3,30— 10,2	67,4—151,5	53,2—99,3	9,7—34,6	7,9—20,8	10,6—12,8 (28,7) (2 образца)	
IV. Доломиты	1,0— 3,11	2,60 41,7	71,7—96,9	49,5—81,2	27,3—38,7	17,7—26,2	10,5—19,0 (—110,0)	

Примечание. В скобках даны значения β_p при неупругой деформации. Значения β_p при малых величинах. K_p — завышены, в связи с использованием при их расчетах открытой, а не общей пористости.

В табл. 10 верхний предел значений β_n на каждой ступени изменения $\sigma_{эф}$ характеризует разности пород с $K_n \leq 1\%$.

При равной пористости у однотипных известняков отмечена тенденция к росту коэффициента сжимаемости пор при увеличении содержания в породе глинистого вещества и к снижению сжимаемости пород при увеличении содержания доломита.

Следует подчеркнуть, что при возникновении необратимой деформации у карбонатных пород, так же как и у песчано-алевритовых, наблюдался рост коэффициентов сжимаемости β и β_n (см. табл. 9 и 10).

В небольшом объеме были проведены исследования влияния температуры на объемные деформации и показатели сжимаемости карбонатных пород. Они позволили оценить изменения β и β_n с ростом температуры от 20 до 200° С для микрозернистых известняков. Было установлено, что повышение температуры до 200° С вызывает у пород этого типа рост коэффициентов сжимаемости β при $\sigma_{эф} = 50$ кгс/см² приблизительно на 18%, а коэффициентов сжимаемости пор β_n на 23%.

Представляет большой интерес оценка изменений коэффициента пористости карбонатных пород с ростом эффективных напряжений, позволяющая вводить поправки на значения пористости пород, извлеченных с различных глубин на поверхность.

В табл. 11 приведены результаты расчета снижения величин коэффициентов пористости карбонатных пород различных типов при их упругой и неупругой деформации в условиях равномерного всестороннего сжатия. Расчеты производили по измеренным величинам уменьшения объема пород, относя их условно к объему порового пространства ($K_{п. отк}, \%$).

По-видимому, методически правильнее было бы отнесение разности ΔK_n к коэффициенту общей пористости, поскольку в ряде случаев отмечено уменьшение объема пор, большее значение $K_{п. отк}$, что свидетельствует о деформации пустот внутри минеральных зерен.

Как следует из табл. 11, коэффициент пористости уменьшается с ростом эффективного напряжения. Наиболее резкое снижение пористости отмечено при деформации низкопористых разностей известняков ($K_{п. отк} < 1\%$) (рис. 25).

Наименьшие и преимущественно упругие изменения коэффициента пористости во всем исследованном диапазоне эффективных напряжений претерпевают пористые и высокопористые разности карбонатных пород (рис. 25). Для низкопористых разностей карбонатных пород, отличающихся существенной неравномерностью структуры и состава (биоморфных и биоморфно-детритусовых известняков), характерна потеря упругой устойчивости при минимальных значениях эффективных напряжений, типичных для глубин порядка 5 км. Эта особенность деформационного поведения карбонатных пород отчасти объясняет преимущественное развитие трещиноватости в карбонатных породах с низкими показателями пористости.

Уменьшение коэффициентов пористости $\left(\frac{\Delta K_{\text{п}}}{K_{\text{п} \cdot \text{атм}}}\right)$ карбонатных пород при их упругой и неупругой деформации под действием эффективных напряжений, типичных для глубин 7—8,2 км ($t=20-22^\circ \text{C}$)

Структурно-генетический тип пород	$K_{\text{п} \cdot \text{атм}}, \%$ от— до	$\chi, \%$ от— до	$\frac{\Delta K_{\text{п}}}{K_{\text{п} \cdot \text{атм}}}, \%$, при $\sigma_{\text{эф}}, \text{кгс/см}^2$					
			50	100	300	600	900	1050
			Глубина, км					
			0,4	0,8	2,3	4,6	7,0	8,2
I. Биоморфные известняки	0,68—17,9	0,90 35,0	1,1—10,3	1,6—19,1	3,6—53,0	4,8—63,2	6,0—76,6 (25,4—>100)	—72,1 (46,7—>100)
II. Биоморфно-детритусовые известняки	0,90—22,7	0,35— 15,6	1,1—11,5	1,6—21,1	4,4—53,8	7,3—79,9	10,3—85,6 (22,1—>100)	
III. Микрозернистые известняки	1,16—5,10	3,30 10,2	2,5—8,3	6,1—16,1	9,4—27,8	12,7—33,3	14,1—35,2	
IV. Доломиты	1,0—3,11	2,60— 41,7	3,5—4,9	7,1—9,8	14,1—26,0	20,2—39,0	23,8—42,0 (—50)	

Примечание. В скобках приведены значения $\frac{\Delta K_{\text{п}}}{K_{\text{п} \cdot \text{атм}}}$ при неупругой деформации.

В проведенных исследованиях обращает на себя внимание широкий диапазон изменения коэффициентов сжимаемости пор, пористости и высокие абсолютные значения β_p и $\Delta K_p/K_{п. атм}$ у низкопористых разностей биоморфных и биоморфно-детритусовых известняков. Ранее В. М. Добрыниным [63] высказывалось предположение о возможном влиянии на сжимаемость низкопористых карбонатных пород развитой в них микротрещиноватости. В дальнейшем необходима постановка специальных исследований влияния структуры пустотного пространства карбонатных пород, в том числе и микротрещиноватости, на показатели сжимаемости и пористости пород.

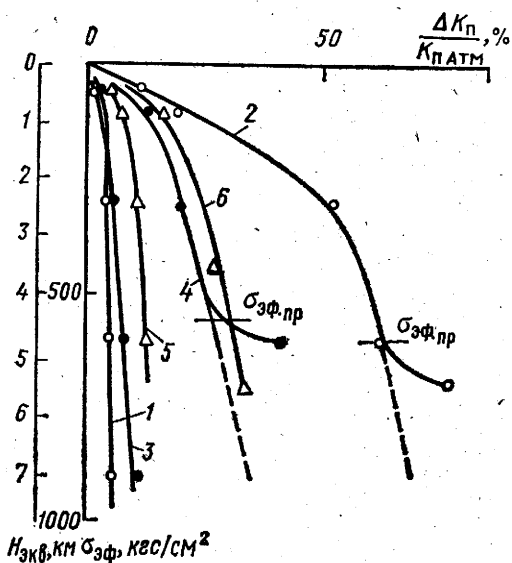


Рис. 25. Изменение коэффициента пористости $\Delta K_p/K_{п. атм}$ известняков в зависимости от эффективного напряжения при $t=20^\circ \text{C}$:

1 — обр. 343—10/П71, $K_p=17,9\%$; 2 — обр. 2051, $K_p=0,68\%$; 3 — обр. 1К, $K_p=22,7\%$; 4 — обр. 36—124П, $K_p=0,9\%$; 5 — обр. 177—4/П71, $K_p=5,1\%$; 6 — обр. 194—13/П71, $K_p=1,8\%$; ○ — известняки биоморфные; ● — известняки биоморфно-детритусовые; △ — известняки мелкозернистые

В целом исследования карбонатных пород позволили установить пределы упругого изменения ряда деформационных характеристик пород с давлением, связать эти изменения с литолого-петрографическими особенностями карбонатных пород, такими, как объем и структура пустотного пространства, содержание доломита и глинистого вещества. Получены новые данные об упругой устойчивости карбонатных пород в условиях равномерного всестороннего сжатия.

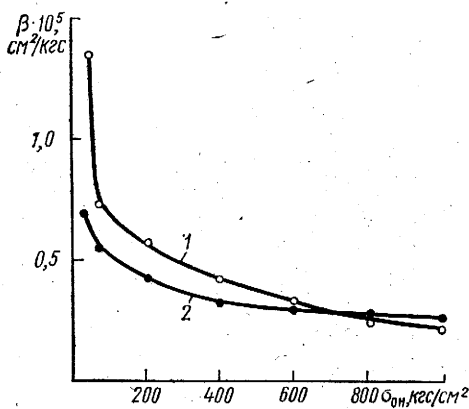
§ 3. Результаты исследования объемных деформаций, коэффициентов сжимаемости и пористости магматических и метаморфических пород

Экспериментальные исследования деформаций и сжимаемости метаморфических и магматических пород при высоких давлениях до последнего времени проводились в очень ограниченном объеме.

Объемные деформации (ε_1 , $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$), коэффициенты сжимаемости скелета (β), порового пространства (β_p) и общей пористости ($K_{п.общ}$) метаморфических и магматических пород при всестороннем равномерном сжатии ($\sigma_{общ}$) ($t = 19-22^\circ \text{C}$)

Тип пород	№ образцов	$K_{п.}, \% (K_{п.отк.}, \%)$	$\sigma_{общ}, \text{кгс/см}^2$	$\varepsilon, \%$		$\frac{\varepsilon_1 \text{ max}}{\varepsilon_2 \text{ max}}$	$K_{п.общ}, \%$	$\beta \cdot 10^5 \text{ кгс}$	$\beta_p \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{кгс}$
				ε_1	$\varepsilon_2 = \varepsilon_3$				
Гнейсы, гранито-гнейсы, граниты	63/70	1,10 ($K_{п.отк.} = 0,55$)	50	0,011	0,019	0,90	1,05	1,12	88,47
			100	0,030	0,033		0,99	0,85	66,27
			200	0,058	0,064		0,92	0,52	35,44
			400	0,080	0,093		0,84	0,40	24,54
			600	0,094	0,108		0,78	0,32	16,17
			800	0,102	0,124		0,71	0,30	14,95
			1000	0,108	0,122		0,64	0,29	15,01
	119/70	2,51 ($K_{п.отк.} = 0,83$)	50	0,005	0,014	0,80	2,47	0,76	23,42
			100	0,017	0,021		2,44	0,70	21,32
			200	0,047	0,048		2,37	0,52	14,32
			400	0,049	0,081		2,30	0,38	8,68
			600	0,063	0,107		2,23	0,36	7,75
			800	0,102	0,145		2,15	0,32	6,49
			1000	0,120	0,150		2,09	0,30	5,94
	46/70	1,82 ($K_{п.отк.} = 1,06$)	50	0,011	0,012	0,90	1,78	0,80	31,87
			100	0,019	0,021		1,75	0,75	29,56
			200	0,044	0,048		1,67	0,65	24,99
			400	0,080	0,096		1,54	0,55	20,47
			600	0,099	0,132		1,46	0,32	5,98
			800	0,111	0,142		1,42	0,28	3,34
			1000	0,135	0,150		1,39	0,26	1,66
	115/70	1,86 ($K_{п.отк.} = 1,20$)	50	0,0105	0,012	0,86	1,32	1,35	64,83
			100	0,021	0,021		1,27	0,70	50,56
			200	0,052	0,070		1,19	0,57	31,53
			400	0,089	0,105		1,06	0,50	28,65
			600	0,110	0,136		0,97	0,32	12,90
			800	0,129	0,156		0,93	0,22	2,71
			1000	0,140	0,162		0,89	0,20	0,58
	64/70	2,20 ($K_{п.отк.} = 2,20$)	50	0,005	0,014	0,82	2,16	0,92	33,14
			100	0,024	0,031		2,11	0,88	32,03
			200	0,055	0,062		2,02	0,85	31,97
			400	0,091	0,091		1,93	0,55	18,07
			600	0,114	0,129		1,82	0,325	6,64
			800	0,130	0,150		1,77	0,30	5,45
			1000	0,140	0,170		1,72	0,28	4,42

Тип пород	№ образцов	$K_{п.} \% (K_{п.отк.} \%)$	$\sigma_{отн.} \text{ кгс/см}^2$	$\epsilon, \%$		$\frac{\epsilon_{1max}}{\epsilon_{2max}}$	$K_{п.} \%$	$\beta \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{кгс}$	$\beta_{п.} \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{кгс}$
				ϵ_1	$\epsilon_2 = \epsilon_3$				
Амфиболит	65/70	2.11 ($K_{п.отк.} = 2.03$)	50	0.008	0.014	0.78	2.07	0.70	27.75
			100	0.018	0.023		2.04	0.55	20.81
			200	0.042	0.037		1.99	0.42	14.85
			400	0.050	0.061		1.93	0.32	10.08
			600	0.065	0.087		1.87	0.30	9.39
			800	0.084	0.110		1.80	0.28	8.66
			1000	0.098	0.126		1.76	0.22	5.45
Оливиновый пироксенит	12/70	1.57 ($K_{п.отк.} = 0.99$)	50	0.008	0.0096	0.86	1.54	0.975	57.46
			100	0.018	0.024		1.50	0.65	37.18
			200	0.026	0.033		1.47	0.36	18.36
			400	0.037	0.058		1.41	0.31	15.52
			600	0.056	0.077		1.36	0.28	13.97
			800	0.076	0.096		1.30	0.25	12.28
			1000	0.090	0.104		1.27	0.22	10.22



В Советском Союзе известны работы М. П. Воляровича с сотрудниками по изучению изотермической сжимаемости гранита, диорит-порфирита и базальта [46]. Работы зарубежных исследователей обобщены Ф. Берчем в справочнике физических констант горных пород [28].

Рис. 26. Зависимость $\beta = f(\sigma_{отн.})$ для гнейса (обр. 115/70, кривая 1) и амфиболита (обр. 65/70, кривая 2)

В Институте геологии и разработки горючих ископаемых изотермическая сжимаемость собственно пород и их порового пространства при всестороннем равномерном сжатии до 1000 кгс/см² изучена на семи образцах метаморфических и магматических пород, типичных для гранитного и базальтового слоев разреза сверхглубокой скважины на Балтийском щите: гнейсах (биотитовом, обр. 46/70; биотитовом с гранатом, обр. 63/70, амфиболово-биотитовом, обр. 119/70); гранито-гнейсе (обр. 115/70), амфиболите (обр. 65/70); плагииграните (обр. 64/70) и оливиновом пироксените (обр. 12/70).

Испытанные породы были изменены катаклизмом и отчасти вторичными процессами, что обусловило их несколько большую сжимаемость по сравнению с определениями, выполненными для однотипных пород другими исследователями [28, 46, 155].

Величины объемных деформаций пород и их отношения при предельных в испытаниях значениях всестороннего сжатия приведены в табл. 12.

Исследования показали, что объемные деформации метаморфических и магматических пород при равных давлениях значительно меньше, чем у осадочных пород. Кроме того, в исследованном диапазоне давлений деформации пород были обратимыми (упругими).

Испытанные разности отличала также относительно большая равномерность деформации объема.

В табл. 12 приведены расчетные величины коэффициентов сжимаемости пород (β) и их порового пространства ($\beta_{\text{п}}$), а также коэффициентов общей пористости ($K_{\text{п}}$) при различных величинах всестороннего сжатия.

Как можно видеть, коэффициенты сжимаемости испытанных гнейсов, гранито-гнейса и гранита колебались при $\sigma_{\text{эф}} = 50$ кгс/см² в пределах $(0,70—1,35) \cdot 10^{-5}$ см²/кгс, а при $\sigma_{\text{эф}} = 600$ кгс/см² от $0,32 \cdot 10^{-5}$ до $0,36 \cdot 10^{-5}$ см²/кгс.

По литературным данным [28], в тех же условиях коэффициенты сжимаемости пород гранитного состава изменяются соответственно в пределах $(0,4—1,56) \cdot 10^{-5}$ и $(0,10—0,35) \cdot 10^{-5}$ см²/кгс.

Испытанные породы характеризуются высокими показателями сжимаемости порового пространства, что связано с низкими величинами коэффициентов их общей пористости. Следует подчеркнуть, что при $\sigma_{\text{он}} = 1000$ кгс/см² значения коэффициентов сжимаемости пород приближаются к средним величинам объемной сжимаемости пороодообразующих минералов, отличаясь от последних всего на 10—20%.

На рис. 26 представлены зависимости коэффициентов сжимаемости от давления для одного из гнейсов и амфиболита. Качественно, как можно видеть, влияние давления на объемную сжимаемость метаморфическим и магматических пород подобно влиянию на осадочные породы. Это влияние сказывается в резком снижении величин β до значений, близких к $\beta_{\text{тв}}$ пороодообразующих минералов, что обусловлено уменьшением объема порового пространства.

Глава V

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА РАЗЛИЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНЫХ ОБЪЕМНЫХ НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЙ И ТЕМПЕРАТУР

Исследования деформационных и прочностных свойств горных пород в условиях неравномерного трехосного сжатия и растяжения были начаты еще в первом десятилетии настоящего столетия Адамсом и Кокером, Бокером, Карманом и др. [30, 147, 153]. Широкое развитие эти исследования получили в последние годы, в связи с постановкой проблемы изучения строения глубинных зон Земли, решением задач поисков и разведки полезных ископаемых на больших глубинах, а также достигнутым прогрессом в технике эксперимента при высоких давлениях.

Исследования деформационных и прочностных свойств горных пород проводились в условиях объемных напряженных состояний при разных схемах нагружения (на продольное сжатие и растяжение, сдвиг, изгиб и кручение). Они позволили установить, что влияние наложенного всестороннего сжатия во всех случаях вызывает изменение (повышение) упругих, пластических и прочностных свойств горных пород.

Анализ результатов испытаний упругих свойств минералов и горных пород, исследованных в диапазоне давлений от атмосферного до 40 000 кгс/см² [20, 23, 24, 28, 30, 44, 45, 47, 49, 52, 107, 131, 151, 152, 160, 171], показывает что изменения упругих свойств с давлением относительно невелики. Так, скорости упругих волн при всестороннем равномерном сжатии различных пород до 25—40 тыс. кгс/см² возрастают всего на 20—30%. Зависимости скоростей упругих волн от величины одноосного сжатия при всестороннем давлении более сложны [48, 50, 51]. В этом случае с ростом величины напряжения одностороннего сжатия вначале наблюдается рост, а при значениях напряжения, близких к разрушающим, — некоторое падение скоростей упругих волн, связанное, по-видимому, с микроразрушением структуры пород в процессе остаточной деформации. При высоких величинах всестороннего давления снижение скоростей упругих волн при продольном сжатии не наблюдается вплоть до значений напряжений, близких к разрушающим.

Значительно большее влияние по сравнению с упругими свойствами всестороннее сжатие оказывает на остаточные (пластические) и прочностные свойства горных пород.

Изучению закономерностей развития пластической деформации и разрушения горных пород в условиях напряженных состояний и температур, характерных для глубин их залегания до 10—15 км, посвящены работы многих исследователей в Советском Союзе [7—9, 14, 15, 31, 49—51, 94, 95, 96, 101, 107, 108, 118—121, 127, 130, 132, 140, 219] и за рубежом: в США, Франции, Японии и других странах [147, 148, 153, 161, 176—182, 185—190, 194, 195, 198, 199, 205, 212—214, 216].

Результаты изучения деформационных и прочностных свойств горных пород рассмотрены в ряде обзорных работ [7, 140, 182, 189], в связи с чем ниже кратко излагаются лишь основные выводы из проведенных исследований.

Установлено существенное различие в деформационном поведении и сопротивлении разрушению горных пород осадочного комплекса, с одной стороны, и магматических, а также большинства разностей метаморфических пород — с другой.

Сопоставление деформационных и прочностных свойств горных пород этих групп показало, что для достижения одного и того же изменения в деформационных характеристиках параметры давления и температур при деформации магматических и большей части метаморфических пород должны быть выше. Абсолютные величины и интенсивность изменения с давлением прочностных показателей у осадочных пород ниже, чем у метаморфических и магматических пород.

При давлениях и температурах, характерных для нескольких километров, большинство осадочных пород проявляет способность к значительной пластической деформации.

У метаморфических и магматических пород даже при давлениях и температурах, близких к характерным на глубинах в 15—20 км, остаточные деформации получают небольшое развитие, при этом они обычно локализованы в зоне сдвига.

Среди осадочных пород способность к пластической деформации еще в условиях атмосферного давления проявляют некоторые сульфатно-галогенные (каменная соль, гипс) и глинистые породы.

Большая часть глинистых, карбонатных и несчано-алевритовых пород проявляет способность к пластической деформации в условиях неравномерного объемно-напряженного состояния сжатия при значениях $\sigma_{\text{он}}$ (или $\sigma_{\text{эф}}$), характерных для глубин от 1,5—2 до 8—10 км.

Влияние температуры на деформационные и прочностные свойства горных пород в условиях объемных напряженных состояний исследовано в ряде работ [8, 15, 59, 74, 131, 132, 140, 180—182, 187, 189, 190]. Эти исследования позволили выявить различный характер изменения прочностных и деформационных свойств пород, отличающихся по составу и строению, в зависимости от температуры. Так,

было установлено, что у пород с высоким содержанием кварца с повышением температуры отмечается рост прочностных показателей в широком диапазоне изменения температур (до 400—600°С). У большинства же осадочных, метаморфических и магматических пород с ростом температуры наблюдается уменьшение прочности и рост способности к пластической деформации.

К числу основных факторов, определяющих влияние температуры на прочность и деформацию горных пород, относят [7, 59, 74, 140, 189]: неоднородность пород; термостойкость и прочность минералов; строение и состав границ между зернами породообразующих минералов; физико-химические свойства сред, насыщающих деформируемые породы, и др.

Особенно большое влияние насыщающие породы жидкости оказывают на деформационные и прочностные свойства осадочных пород вследствие адсорбционного эффекта (эффекта Ребиндера). Влияние активных жидкостей по сравнению с неактивными на процесс деформаций пород в условиях совместного действия всестороннего сжатия и температур в основном выражается в уменьшении прочности и напряжений в пластической области, особенно в случае деформации межзернового скольжения.

Большинство метаморфических и магматических пород, как и слагающие их минералы, в диапазоне напряжений и температур, типичном для глубин до 15 км, проявляет значительно меньшую способность к пластической деформации, чем осадочные породы. Зависимость же прочностных свойств этих пород от величины всестороннего сжатия выражены более резко (вплоть до значений $\sigma_{\text{он}}$ порядка 7—10 тыс. кгс/см² она выражается равенством $\tau_{\text{max}} \approx \sigma_{\text{он}}$).

Несмотря на относительно большой объем проведенных исследований пород разных типов, систематизация опытных данных, равно как и достаточно обоснованное объяснение изученных явлений, находится еще в начальной стадии.

Следует отметить, что результаты ранних исследований не позволяли устанавливать общие количественные зависимости между тензорами напряжений и деформаций, поскольку в них не полностью определялось деформационное состояние пород (измерялась только деформация в направлении деформирующего напряжения).

Исследования последних лет [9, 14, 15, 94, 95, 120, 121, 140, 195, 204, 205, 216] отличаются постановкой измерений полных тензоров напряжений и деформаций, при этом большое внимание уделяется микромеханизму пластической деформации пород и уточнению условий достижения разными породами предельных напряженных состояний при различных уровнях напряжений и температур.

В ряде исследований сделаны также попытки увязать результаты проведенных исследований с конкретными задачами геологии и разработки полезных ископаемых. Ю. А. Розанов [108] рассмотрел влияние особенностей деформации пород в связи с формированием рудных месторождений; А. Н. Ставрогин [120, 121] связывал изучение природы и механизма разрушения пород с проблемой гор-

ных ударов и внезапных выбросов; Л. Н. Розанов [109, 110] использовал результаты исследований деформационного поведения пород при анализе условий формирования локальных структур; Б. В. Байдук [10, 132, 140] — при оценке устойчивости пород на стенках глубоких скважин.

В самые последние годы И. С. Томашевской и Я. Н. Хамидуллин [127, 132] сделана попытка на основании результатов исследований временных зависимостей горных пород в условиях сложных объемных напряженных состояний прогнозировать начало землетрясений. В ряде работ данные по прочности и деформационным свойствам пород при неравномерном трехосном сжатии использованы для прогноза буримости пород на больших глубинах [93, 145].

При проведении исследований, результаты которых изложены в настоящей монографии, ставилась цель изучения прочностных и деформационных характеристик горных пород в условиях напряженных состояний и температур, типичных для глубин до 10—15 км (применительно к решению различных задач нефтяной геологии и горного дела). Так, одной из задач исследования было установление влияния неравномерного объемно-напряженного состояния на коллекторские свойства пород. Изучались также связи деформационных и прочностных характеристик с литолого-петрографическими свойствами пород, оцениваемыми с помощью показателей K_s , K_u , K_c и K_v , обоснованных во II главе монографии.

Деформационные и прочностные свойства горных пород были исследованы при продольном сжатии и растяжении в условиях всестороннего давления, а также при вдавливании, что позволило охарактеризовать предельные напряженные состояния различных горных пород в широком диапазоне напряжений.

Как указывалось в методике, при испытании в условиях трехосного сжатия была использована схема так называемого сложного нагружения, при которой соотношение между главными напряжениями меняются от точки к точке в процессе нагружения.

Выбор схемы сложного нагружения в рассматриваемом случае предопределен сложившимися представлениями о последовательности действия напряжений на горный массив в геологических процессах (наложение вторичных тектонических напряжений, в простейшем случае действующих в одном направлении, на породы, находящиеся в условиях равномерного всестороннего сжатия), а также при проводке глубоких скважин.

Поскольку определения деформационных и прочностных характеристик горных пород при сложных объемных напряженных состояниях не унифицированы, ниже приведено краткое пояснение к используемым в этой главе терминам, в большинстве случаев близким к принятым в ряде сводных работ последних лет [140, 189].

Под пределом прочности σ_{ic} (в случае одноосного сжатия σ_c) понимается величина максимального напряжения, которое горная порода может выдержать при продольном сжатии (растяжении)

в заданных условиях всестороннего давления, температуры и скорости деформации.

На рис. 27 изображены типичные диаграммы деформаций различных горных пород в условиях неравномерного трехосного сжатия, на которых приведены принятые обозначения их основных деформационных и прочностных характеристик. Как можно видеть, в некоторых случаях (рис. 27, В, Д) сопротивление разрушению может не соответствовать величине предела прочности.

Следует отметить, что если начало развития разрушения характеризуется образованием микротрещин, одной или нескольких изолированных трещин, то процесс общего разрушения представляет собой разделение твердого тела на части, т. е. полную потерю им сплошности.

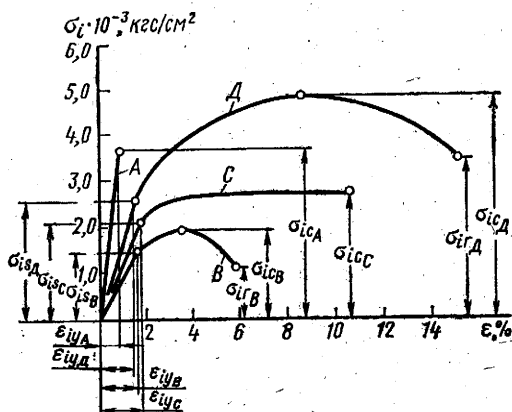


Рис. 27. Типичные диаграммы деформаций горных пород при неравномерном всестороннем сжатии:

А — упруго-хрупкие породы; В — ограниченно-пластичные породы; С и D — пластичные и высокопластичные породы. Условные обозначения: σ_t — деформирующее напряжение, ϵ_t — продольная деформация (ϵ_{tu} — упругая; ϵ_{tp} — пластическая); σ_{is} , σ_{ic} и σ_{ir} — соответственно предел текучести, прочности и сопротивление разрушению

В работе Т. Экобори [199] процесс разрушения твердых тел рассмотрен с точки зрения микроструктурных различий. При этом характерные для трехосного неравномерного сжатия виды разрушения пород сколом и срезом, когда трещины общего разрушения пересекают зерна поликристаллического тела, названы транскристаллитным разрушением, в отличие от интеркристаллитного разрушения, происходящего лишь по границам зерен.

Последний вид разрушения характерен для стадии остаточной деформации большинства горных пород, предшествующей процессу общего их разрушения.

Пределом текучести σ_{is} (при одноосном сжатии σ_s) обычно называют величину напряжения, соответствующего максимальному значению упругой деформации. Эта в достаточной степени условно выделяемая величина имеет большое значение при решении практических задач, поскольку ею определяется переход к необратимым деформациям пород.

Пластичность, как качественная способность материала испытывать значительную необратимую деформацию без разрушения

или без потери сплошности, обычно оценивается величиной остаточной деформации до разрушения.

Необратимые (остаточные) деформации горных пород имеют специфические особенности, связанные с зернистым, неоднородным их строением. В большинстве случаев остаточная деформация пород сочетает деформации двух механизмов — межзернового скольжения, сопровождающегося развитием микротрещиноватости, и внутрикристаллического, получающего преимущественное развитие лишь при высоких давлениях.

Таким образом, при использовании термина «пластическое течение» применительно к горным породам следует помнить о существенном отличии пластичности горных пород от идеализированных пластичных сред.

По особенностям деформационного поведения, характеризующего с помощью величин относительных деформаций до разруше-

ния: общей $\epsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_0}$ (l_0 — начальная длина образца, Δl — ее уменьшение) и остаточной (пластической) $\epsilon_{1п} = \epsilon_1 - \epsilon_{1у}$ ($\epsilon_{1у}$ — упругая составляющая деформации), все породы могут быть разделены на две большие группы: первая — упруго-хрупкие породы, не испытывающие пластической деформации ($\epsilon_1 \leq 1-2\%$; $\epsilon_{1п} \approx 0$, рис. 27, А), и вторая — пластичные породы, среди которых выделяются подгруппы ограниченно-пластичных пород, проявляющих до разрушения способность к небольшой остаточной деформации ($\epsilon_1 \leq 2-10$; $\epsilon_{1п} = 1-8\%$, рис. 27, В); пластичных и высокопластичных ($\epsilon_1 > 10-15\%$; $\epsilon_{1п} > 8-10\%$, рис. С. Д).

§ 1. Деформационные и прочностные свойства магматических и метаморфических пород

В последние годы геологи-нефтяники уделяют большое внимание изучению особенностей строения, состава и физических свойств складчатого фундамента древних платформ в нефтегазоносных районах, в связи с его влиянием на структуру осадочного чехла и формирование в нем месторождений нефти и газа.

Большое развитие получили исследования фундамента Восточно-Европейской платформы, сложенного кристаллическими породами докембрийского возраста. Восточно-Европейская платформа включает в себя как области погруженного фундамента, покрытого толщей осадков, — Русскую плиту, так и выходы фундамента на поверхность — Балтийский и Украинский кристаллические щиты.

В осадочной толще восточной части Русской плиты (в Волго-Уральской области) расположены крупнейшие месторождения нефти и газа, на формирование которых большое влияние оказывали движения блоков фундамента [82, 88].

Хорошая изученность состава и строения фундамента Восточно-Европейской платформы, возможность исследования пород,

Характеристика представительности, состава и строения испытанных образцов пород фундамента
Восточно-Европейской платформы

Основные типы пород	Волго-Уральская область			Балтийский щит			Украинский щит		
	встречаемость, % [82]	число испытанных образцов	группы	число образцов	группы		число образцов	группы	
			по составу		по измененности	по составу		по измененности	по составу

Метаморфические породы

Гнейсы биотитовые, биотит-гранатовые, биотит-плагиоклазовые, биотит-роговообманковые, биотит-пироксеновые, пироксен-плагиоклазовые, гранито-гнейсы (архей, протерозой)	>45	145	I, II, III	I, II, III, IV, V	20	I, II, III	I, II, III, IV, V	8	I, II	I, III, IV
Амфиболиты (архей, протерозой)	6	17	II, III	I, II, III, IV	3	II, III	I, III	2	III	I, III

Сланцы слюдястые, кварцито-сланцы, филлиты (протерозой)	1	4	I, II	I, III, V	10	III	I, III, V	11	I, II, III	I, III, IV
Кварциты, железистые кварциты (протерозой)	0,1	—			1	I	I	1		

Магматические породы

Граниты плагиоклазовые, микроклиновые, гранодиориты, кварцевые диориты (архей, протерозой)	26	55	I, II	I, II, III, IV, V	15	I, II	I, II, III, V	5	I, II	I, IV
Габбро-нориты, габбро, габбро-диабазы, диабазы (архей, протерозой)	> 11	26	II, III	I, II, IV	33	II, III	II, IV, V	1	II	V
Анартозиты, чарнокиты (архей)	> 9	3	II	I, III	1	I	I	1	I	IV
Перидотиты, пироксениты, оливиниты, базальты (протерозой)	< 1				32	II, III	I, III, V	1	II	I

слагающих зоны поверхностного и глубокого (до 3 км и более) залегания, а также высокая представительность пород (практически в фундаменте встречаются в наиболее типичные разности метаморфических и магматических пород [82]) способствовали выбору этого района для постановки изучения деформационных и прочностных свойств метаморфических и магматических пород.

Исследования деформационных и прочностных свойств метаморфических и магматических пород фундамента Восточно-Европейской платформы проводятся в секторе экспериментальной геомеханики ИГиРГИ автором совместно с Г. Е. Кузьменковой более 10 лет. Многие результаты этих исследований уже были ранее опубликованы [96, 140], в связи с чем они представлены в этой работе в обобщенном виде.

Более детально ниже рассмотрены лишь некоторые новые данные о деформационных и прочностных свойствах пород — аналогов разностям, слагающим разрез сверхглубокой скважины на Балтийском щите (приложение II).

Характеристика деформационных и прочностных свойств пород фундамента Восточно-Европейской платформы основана на результатах изучения около 400 образцов из скважин, карьеров и обнажений. Описание этих пород здесь не приводится, так как оно было дано ранее в работе [140]. О представительности, особенностях состава и строения исследованных пород можно судить по данным, приведенным в табл. 13.

В табл. 13 все породы по составу основных породообразующих минералов разбиты на три группы, а по степени измененности (катаклазом, вторичными процессами) — на пять групп [140].

По минеральному составу в I группу вошли породы с преимущественным ($> 70\%$) содержанием прочных и малопластичных минералов: кварца и полевых шпатов, во II — с содержанием тех же минералов от 35 до 70%, в III — менее 35%. По степени измененности в I группу включены разности, не измененные катаклазом и вторичными процессами, во II—IV группы — породы с признаками слабого, среднего и сильного катаклаза [82], в V — сильно измененные вторичными процессами.

Сводные данные испытаний 50 образцов метаморфических и магматических пород в условиях неравномерного трехосного сжатия при комнатной и повышенных температурах приведены в табл. 14, 15. В табл. 16—18 обобщены результаты испытаний механических свойств 390 образцов пород разных типов при вдавливании.

В табл. 19 представлены результаты испытаний ряда типичных пород Балтийского щита.

Следует подчеркнуть, что неизменные однотипные разности пород, отобранные в разных районах и с различных глубин, практически не отличаются по свойствам.

Общими для всех испытанных пород закономерностями являются интенсивный рост прочности и величин объемных деформаций

**Деформационные и прочностные свойства пород фундамента
Восточно-Европейской платформы в условиях неравномерного трехосного сжатия
при комнатной температуре**

Петрографические типы пород	K_p , %	σ_{OH} , кгс/см ²	σ_{IC} , кгс/см ²	σ_{IS} , кгс/см ²	ϵ_1 , %
Гнейсы биотит-гранатовые с силлиманитом, кордиеритом, биотит-плагиоклазовые, пироксен-плагиоклазовые, биотит-пироксеновые, биотит-роговообманковые, (архей, протерозой)	0,24— 2,56	1 1000 2500 4500	500—2990 1090—5720 1680—6900 2080—16000	— — 1200—6500 1620—15000	<0,5 0,6—1,3 1,2—3,2 3,7—7,4
Амфиболиты (архей)	0,66— 2,20	1 1000 2500 4500	1360—2000 2990—5650 6325—9340 16800—21800	— 2850—5100 5600—8000 13900—18000	0,3 0,3—0,6 2,0—2,3 3—10,5
Сланцы слюдитые, филлиты, кварцито-сланцы (протерозой)	0,30— 3,68	1 1000 3000 4700	1000—1720 2840—4070 6900—10900 8500—20800	— 2000—3800 5000—8900 6400—20000	0,7—2,7 2,0—>10 3,4—>15
Кварциты железистые, кварциты (протерозой)	0,36— 0,40	1 1000 2500 4500	2840 4650—8800 11160—12200 15100—21300	— 4650—8400 10000—12200 14000—21300	0,4—1,0 0,9—3,8 2,5—>5
Гранито-гнейсы (архей)	0,37— 1,20	1 1000 2500 4500	1620—2000 1985—4190 3300—10200 11500—18600	— 1900—4000 3200— 9800—18000	<0,3 0,3—0,9 1,5 2,0—5,8
Магматические породы					
Граниты плагиоклазовые, микроклиновые, гранодиориты, кварцевые диориты (архей, протерозой)	0,27— 2,20	1 1000 2500 4500	960—1600 3290—5600 5210—12900 8900—	— — 4600—11500 7800—	0,4—1,0 1,2—3,5 >3,0—4,6
Габбро-нориты, габбро, габбро-диабазы, диабазы (архей, протерозой)	0,31— 2,41	1 1000 2500 4500	1500—4230 3800—6350 4490—8050 16300—	— 3600—5800 4000—7300 15000—	<0,5 0,5—1,5 1,0—2,9 —8,5
Перидотиты, пироксениты, оливиниты, базальты (протерозой)	0,31— 2,28	1 1000 2500 4500	1150—2500 2700—8050 5050—15000 8600—21000	— 2300—8000 3500—14500 6500—19200	<0,4 0,5—1,2 1,3—8,4 3,7—>10

Изменения деформационных и прочностных свойств метаморфических и магматических пород с ростом температур
в диапазоне 20—300° С при неравномерном трехосном сжатии

Петрографические типы пород	$\sigma_{\text{он}}, \text{ кгс/см}^2$	$t = 100^\circ \text{ C}$			$t = 300^\circ \text{ C}$		
		$\frac{\sigma_{ic} 100}{\sigma_{ic} 20}$	$\frac{\sigma_{is} 100}{\sigma_{is} 20}$	$\frac{\epsilon_1 100}{\epsilon_1 20}$	$\frac{\sigma_{ic} 300}{\sigma_{ic} 20}$	$\frac{\sigma_{is} 300}{\sigma_{is} 20}$	$\frac{\epsilon_1 300}{\epsilon_1 20}$
Гнейсы	1 2500	0,71 0,85—0,88	— 0,68—0,81	— 1,13—1,93	— 0,57	— 0,50	— —
Амфиболиты	1 2500	0,95 0,80	— 0,72	— 1,20	0,93 0,63	— 0,44	— 1,25
Кварциты	1 2500	1,1 1,1	— —	— 2,0	— —	— —	— —
Граниты, гранито-гнейсы, диориты	1 2500	0,81 0,74	— 0,72	— 1,29	0,74 0,95	— 0,90	— 1,4
Пироксениты, перидотиты, оливиниты	1 2500	0,92 0,70	— 0,65	— 1,47	0,83 0,46	— 0,54	— Образцы не разрушены
Базальты	4500	0,83	0,78	—	$t = 200^\circ \text{ C}$ 0,67	$t = 200^\circ \text{ C}$ 0,61	То же

Деформационные и прочностные свойства гнейсов, кварцитов, гранито-гнейсов, гранитов, гранодиоритов и диоритов при вдавлении

Породы	Группы по составу								
	I								
	Группы по измененности								
	I—II			III—IV			V		
	$P_{ш}$	P_0	K	$P_{ш}$	P_0	K	$P_{ш}$	P_0	K
	кгс/мм ²			кгс/мм ²			кгс/мм ²		
Гнейсы биотит-гранатовые	340 (300—400)	200 (150—226)	1,5 (1,3—1,9)	236 (159—320)	160 (91—220)	1,7 (1,5—1,9)			
Гнейсы биотит-гранатовые сил-лиманитовые	204 (112—258)	141 (90—195)	1,8 (1,4—2,5)				201 (160—257)	134 (115—168)	1,9 (1,2—2,3)
Гнейсы биотит-плагноклазовые, пироксен-плагноклазовые	307 (233—386)	213 (156—337)	1,6 (1,3—1,8)	248 (172—360)	171 (123—270)	1,8 (1,3—2,4)	196 (196)	170 (170)	1,3 (1,3)
Гнейсы биотит-пироксеновые	324 (275—396)	225 (168—271)	1,4 (1,3—1,5)	209 (148—270)	146 (87—205)	1,7 (1,6—1,8)	105	85	1,5

Породы	Группы по составу								
	I								
	Группы по изменчивости								
	I—II			III—IV			V		
	P_{III}	P_0	K	P_{III}	P_0	K	P_{III}	P_0	K
	кгс/мм ²			кгс/мм ²			кгс/мм ²		
Гнейсы биотит-роговообманковые	316 (292—340)	252 (249—285)	1,5 (1,3—1,7)	269	197	2,0			
Кварциты, кварциты железистые	270—580	139—580	1—2,4	405	204	1,4			
Гранито-гнейсы	314 (258—441)	224 (154—335)	1,5 (1,2—2,0)	315 (182—421)	220 (114—269)	1,5 (1,2—2,0)	265 (260—270)	181 (167—195)	1,7 (1,7)
Граниты	300 (208—375)	208 (144—277)	1,5 (1,1—1,8)	268 (183—320)	181 (111—270)	1,6 (1,2—2,0)	228 (79—305)	152 (65—205)	1,8 (1,5—2,5)
Гранодиориты, диориты	297 (271—336)	223 (186—250)	1,4 (1,3—1,7)	264 (247—281)	196 (172—221)	2,0 (1,7—2,3)	223 (180—255)	145 (105—168)	1,9 (1,3—2,3)

Породы	Группы по составу								
	II								
	Группы по измененности								
	I—II			III—IV			V		
	P_{III}	P_0	K	P_{III}	P_0	K	P_{III}	P_0	K
	кгс/мм ²			кгс/мм ²			кгс/мм ²		
Гнейсы биотит-гранатовые	252 (167—325)	162 (150—198)	2,0 (1,6—2,8)	160 (160)	115 (115)	2,3 (2,3)	235 (180—290)	153 (130—177)	2,4 (2,2—2,6)
Гнейсы биотит-гранатовые сил-лиманитовые	188 (134—226)	118 (83—146)	2,1 (1,8—2,5)	182 (182)	106 (106)	2,5 (2,5)			
Гнейсы биотит-плагноклазовые, пироксен-плагноклазовые	230 (144—351)	146 (110—215)	1,9 (1,1—2,8)	186 (102—254)	125 (71—178)	1,9 (1,8—2,2)	214 (214)	116 (116)	2,8 (2,8)
Гнейсы биотит-пироксеновые	297 (163—410)	216 (114—260)	1,6 (1,4—1,9)	283 (235—331)	162 (128—196)	2,0 (1,6—2,3)	243 (243)	167 (167)	1,6 (1,6)

Породы	Группы по составу								
	II								
	Группы по измененности								
	I—II			III—IV			V		
	P_{III}	P_0	K	P_{III}	P_0	K	P_{III}	P_0	K
	кгс/мм ²			кгс/мм ²			кгс/мм ²		
Гнейсы биотит-роговообманковые	272 (184—373)	198 (119—271)	1,9 (1,8—2,0)	213 (136—329)	152 (87—215)	1,8 (1,5—2,7)	156 (154—158)	113 (85—142)	2,8 (2,6—3,0)
Кварциты железистые									
Гранито-гнейсы	216 (216)	127 (127)	2,0 (2,0)						
Граниты				259 (183—365)	168 (134—199)	2,1 (1,3—2,6)			
Гранодиориты, диориты									

Примечание. В скобках даны пределы изменений характеристик.

Деформационные и прочностные свойства сланцев, анатозитов и чарнокитов

Породы	Группы по составу														
	I						II						III		
	Группы по измененности														
	I—II			III—IV			I—II			III—V			I—II		
	$P_{\text{ш}}$	P_0	K	$P_{\text{ш}}$	P_0	K	$P_{\text{ш}}$	P_0	K	$P_{\text{ш}}$	P_0	K	$P_{\text{ш}}$	P_0	K
кгс/мм ²			кгс/мм ²			кгс/мм ²			кгс/мм ²			кгс/мм ²			
Сланцы слюди- стые, кварцито- сланцы	286 (153— 405)	178 (155— 238)	1,5 (1,4— 1,7)	222 (210— 235)	166 (150— 182)	1,5 (1,5— 1,6)	257 (168— 340)	174 (128— 240)	1,7 (1,5— 1,8)	186 (145— 267)	122 (100— 155)	1,9 (1,8— 2,1)	120 (70— 165)	79 (48— 114)	2,6 (1,7— 4,3)
Анатозиты	210 (177— 265)	157 (101— 205)	1,7 (1,4— 2,1)				197 (197)	111 (111)	2,1 (2,1)						
Чарнокиты	344 (284— 365)	247 (183— 301)	1,5 (1,3— 1,7)				261 (200— 300)	158 (125— 185)	1,8 (1,6— 1,9)				255 (245— 266)	141 (137— 143)	2,1 (1,6— 2,6)

Примечание. В скобках даны пределы изменений характеристик.

Деформационные и прочностные свойства ряда основных и ультраосновных пород при вдавливании

Породы	Группы по составу								
	II								
	Группы по измененности								
	I—II			III—IV			V		
	$P_{ш}$	P_0	K	$P_{ш}$	P_0	K	$P_{ш}$	P_0	K
	кгс/мм²			кгс/мм²			кгс/мм²		
Пироксениты	348 (264—396)	212 (143—255)	1,9 (1,5—2,3)						
Перидотиты									
Оливиниты, дуниты									
Габбро, габбро- нориты	350 (312—425)	220 (141—285)	1,6 (1,3—1,8)	295 (230—360)	166 (152—180)	1,6 (1,6)			
Габбро-диабазы, диабазы, доле- риты, базальты,	303 (223—480)	187 (123—310)	2,1 (1,7—2,7)	144 (134—150)	108 (85—120)	2,1 (1,9— 2,5)	240 (108— 355)	160 (80— 232)	2,1 (1,7— 2,5)
Амфиболиты	325 (183—503)	212 (122—291)	1,8 (1,6—2,0)	248 (148—352)	163 (127—232)	1,8 (1,5— 2,0)	253 (183— 340)	158 (125— 205)	2,2 (2,0— 2,5)

Породы	Группы по составу								
	III								
	Группы по измененности								
	I—II			III—IV			V		
	$\rho_{ш}$	ρ_0	K	$\rho_{ш}$	ρ_0	K	$\rho_{ш}$	ρ_0	K
кгс/мм ²		кгс/мм ²		кгс/мм ²					
Пироксениты	299 (239—335)	196 (146—230)	2,0 (1,8—2,4)	202 (202)	123 (123)	2,4 (2,4)	255 (255)	156 (156)	1,6 (1,6)
Перидотиты	293 (214—355)	178 (127—220)	2,3 (2,0—2,6)				166 (140—235)	124 (82—187)	1,9 (1,6—2,0)
Оливиниты, дуниты	185 (180—190)	151 (142—160)	1,6 (1,5—1,7)				155 (155)	117 (117)	1,7 (1,7)
Габбро, габбро- нориты	220 (220)	180 (180)	2,0 (2,0)						
Габбро-диабазы, диабазы, доле- риты, базальты	233 (183—277)	133 (119—154)	2,3 (2,0—2,7)						
Амфиболиты	320 (220—391)	208 (169—260)	2,2 (2,0—2,5)	268 (180—370)	157 (100—190)	2,6 (2,3—2,7)			

Примечание. В скобках даны пределы изменений характеристик.

Деформационные и прочностные свойства пород, типичных для одного из разрезов Балтийского щита

Слой земной коры	Породы	№ образцов	Показатели при вдавливании			Предел прочности σ_{ic} , кгс/см ² , в условиях неравномерного трехосного сжатия при $\sigma_{он}$, кгс/см ²					
			Р _ц , кгс/мм ²	Р ₀ , кгс/мм	K	1	1000	2000—2500		4000—4500	
						Температура, °C					
						20	20	20	100	20	200—300
Печенгская осадочно-эффузивная толща	Диабазы, габбро-диабазы	1/70 9/70, 10/70, 25/70, 27/70	202— 420	139— 270	1,6— 2,2	1670— 2860	4100— 5500	5800— 7650	4290— 5510	—	—
	Туфы	20/70, 33/70	—	40— 116	2,4— ∞	—	—	—	—	—	—
	Песчаники кварцевые	3/70, 5/70 18/70	153— 279	106— 194	1,8— 2,3	—	—	—	—	—	—
	Сланцы, филлиты, квар- цито-сланцы	81/70, 88/70 16/70, 6/70 105/70	101— 300	57— 167	1,7— 2,3	850— 1720	2840 3630	3200— 5500	—	—	—
	Породы пластовых инт- рузий: пироксениты, перидотиты, серпенти- ниты, порфириты	30/70, 77/70 37/70, 6441/70, 1594/70	122— 255	82— 163	1,6— 2,25	1100— 2080	3350— 6100	6050— 9000	3800— 6200	8600 12600	6020— 8500
Кольская серия	Гнейсы биотитовые, биотит-гранатовые, биотит-амфиболовые, слюдистые и др.	46/70, 63/70 71/70, 116/70, 117/70, 118/70, 120/70	183— 351	87— 215	1,1— 1,9	1580— 2540	3300— 4100	4870— 6750	3650— 5100	7300— 11200	—

Слой земной коры	Породы	№ образцов	Показатели при вдавливании			Предел прочности σ_{ic} , кгс/см ² , в условиях неравномерного трехосного сжатия при σ_{on} , кгс/см ²					
			$P_{ш}$, кгс/мм ²	P_0 , кгс/мм ²	K	1	100	2000—2500		4000—4500	
						Температура, °C					
						20	20	20	100	20	200—300
Кольская серия	Амфиболиты	40/70, 65/70	148— 236	127— 151	1,5— 1,8	2100 1090—	3200 3290—	6325 5210—			
	Гранито-гнейсы лейко- кратовые биотитовые, граниты, мигматиты	50/70, 53/70, 55/70, 64/70, 75/70, 115/70	186— 382	111— 233	1,2— 1,9	2360	4300	6090	4690— 5100	8900— 11500	—
Гранулито-базитовый (базальтовый) слой	Магматические и мета- морфические породы среднего и основного состава										
	Диориты, анартозиты, габбро-нориты	1193/94, 1181/1700, 1192/1706, 67/70 1179/1448	265— 420	180— 240	1,4 1,6	1560— 2840	3040— 5550	6320— 12900	4200— 9600	11800— 16300	
	Пироксениты плагиокла- зовые, оливиновые пе- ридоциты, оливиниты	12/70, 78/70, 93/70, 94/70, 95/70, 1123, 1121, 97/70 98/70, 1123 89/70, 90/70 92/70, 1133	195— 396	123— 237	1,5— 2,6	1150— 2880	4100— 8050	6030— 10800	4200— 8500	8600— 21100	6200— 16800

с увеличением всестороннего сжатия. На рис. 28—30 представлены диаграммы деформаций пород, различных по составу, иллюстрирующие рост их прочности и деформаций с давлением при неравномерном трехосном сжатии, здесь же приведены графики деформаций при вдавливании.

Температура у всех пород, кроме мономинерального шокшинского кварцита, вызывала снижение прочностных показателей и рост величин остаточных деформаций до разрушения.

В большинстве случаев она способствовала также снижению уровня напряжений, при которых начинаются остаточные деформации (σ_{is}).

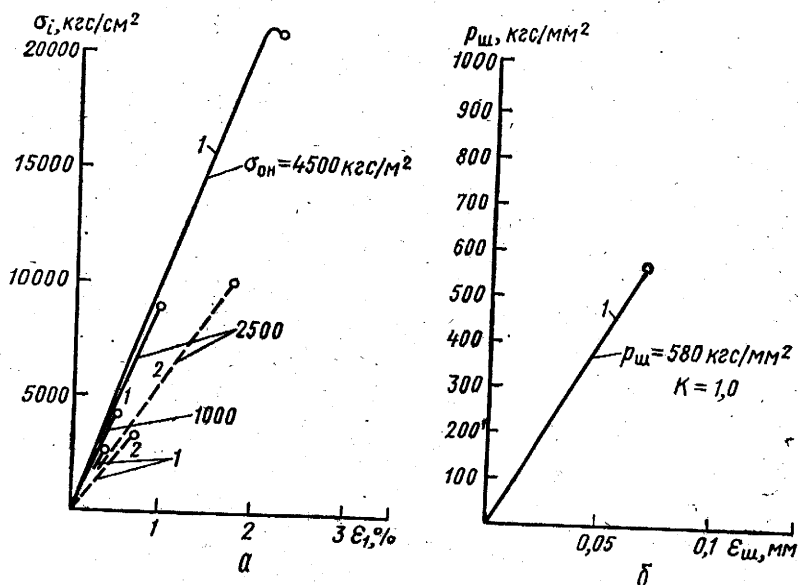


Рис. 28. Диаграммы деформаций шокшинского кварцита (I группа по составу, I — по измененности):

а — при продольном сжатии в условиях различной величины; б — при вдавливании; 1 — $t=20^\circ\text{C}$; 2 — $t=100^\circ\text{C}$

О количественном влиянии температуры на деформационные и прочностные свойства пород разных типов представляется возможным судить по данным, приведенным в табл. 15 и на рис. 28—30.

Представляет интерес связать свойства испытанных пород с особенностями их состава и строения, хотя при этом возникают большие трудности, обусловленные сложностью строения и полиминеральным составом пород.

Ранее, в работе [140], уже отмечались тенденции к снижению прочностных показателей и росту величин остаточных деформаций при изменении состава пород от преимущественного содержания кварца и полевых шпатов (I группа по составу) до преобладания

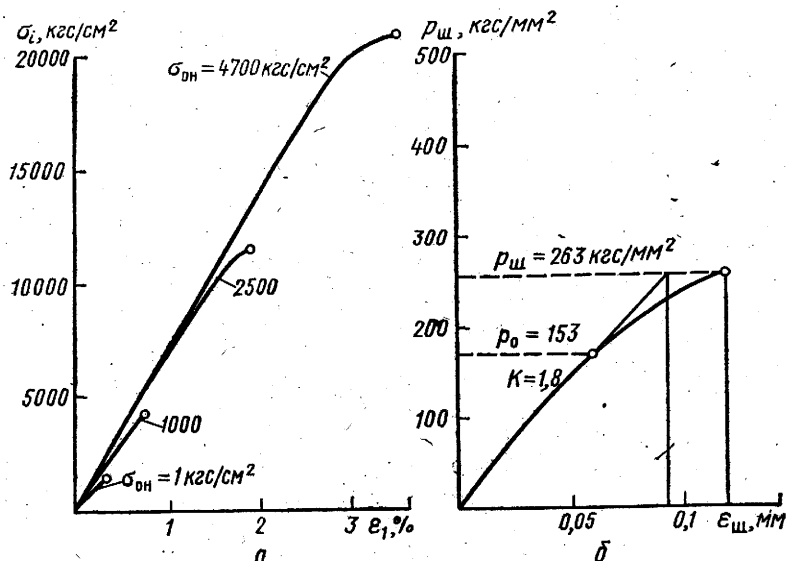


Рис. 29. Диаграммы деформаций кварцито-сланца (обр. 34—39, II группа по составу, I — по измененности):

а — при продольном сжатии в условиях σ_{0H} различной величины ($t=20^\circ\text{C}$); б — при вдавливании

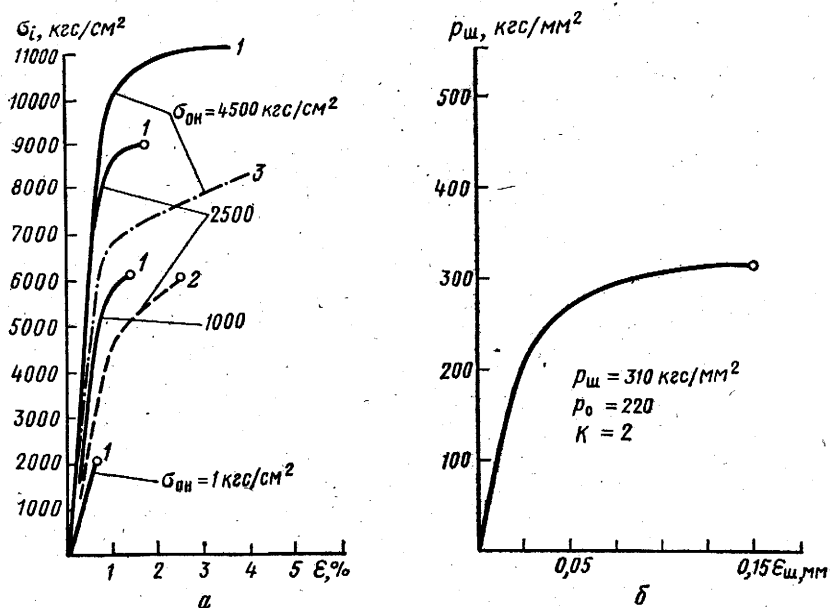


Рис. 30. Диаграммы деформаций перидотита (обр. 1126, III группа по составу, I — по измененности):

а — при продольном сжатии в условиях σ_{0H} различной величины; б — при вдавливании: 1 — $t=20^\circ\text{C}$; 2 — $t=100^\circ\text{C}$; 3 — $t=200^\circ\text{C}$

темноцветных минералов (III группа по составу). Аналогичная тенденция выявлена и при увеличении степени измененности пород вторичными процессами серпентинизации, каолинизации, серицитизации, эпидотизации и хлоритизации (V группа по измененности), а также при существенной нарушенности структуры пород катаклазом (III и IV группы пород по измененности) и увеличении пористости.

Для проверки существенности зависимости прочности метаморфических и магматических пород от их состава и степени измененности вторичными процессами был применен один из простейших методов статистической обработки — ассоциативный анализ.

Влияние состава (содержание наиболее прочных минералов — кварца и полевых шпатов) исследовалось для группы плотных ($K_{\text{п}} \leq 5\%$) кристаллических пород. При этом вся совокупность данных (50 экспериментов) была разделена на два класса по составу (с содержанием кварца и полевых шпатов $\geq 70\%$ и $\leq 35\%$) и выбранному показателю прочности — твердости пород при вдавливании (первый > 300 кгс/мм², второй < 300 кгс/мм²).

Далее классы были разбиты на группы, охватывающие определенные диапазоны изменения состава и твердости (табл. 20).

Таблица 20

Содержание кварца и полевых шпатов, %	Твердость $\rho_{\text{ц}}$, кгс/мм ²		
	> 300	< 300	Всего
> 70	$a = 26$	$b = 6$	$a + b = 32$
< 35	$c = 2$	$d = 16$	$c + d = 18$
Всего	$a + c = 28$	$b + d = 22$	$N = 50$

Значения a, b, c и d в табл. 20 соответствуют числу пород с тем или иным составом, имеющих твердость более и менее 300 кгс/мм². Коэффициент ассоциации, подсчитанный по формуле

$$K = \frac{ad - bc}{\sqrt{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)}}, \quad (\text{V.1})$$

в рассматриваемом случае оказался равным $K = 0,69$.

Поскольку по абсолютной величине коэффициент $K > \frac{3}{\sqrt{N-1}}$ ($0,69 > 0,43$), можно считать, что связь между прочностью пород и содержанием выделенных прочных минералов не случайна, хотя на нее, по-видимому, большое внимание оказывают другие факторы, например степень измененности вторичными процессами.

Влияние последней на прочность и твердость пород рассмотрено на примере плотных гнейсов с содержанием кварца и полевых шпатов более 70%. При этом совокупность из 44 опытов была разбита на три группы пород по измененности: I, включающую породы, не измененные вторичными процессами и катаклизмом, II, с признаками среднего и сильного катаклаза и III, объединяющую породы, сильно измененные вторичными процессами серпентинизации, серицитизации, хлоритизации, эпидотизации и др. (кроме окварцевания и микроклинизации, повышающих прочность пород).

По твердости породы были разделены на две группы с твердостью >305 и <305 кгс/мм² (табл. 21).

Таблица 21

Группа по измененности	Твердость $p_{ш}$, кгс/мм ²		
	>305	<305	Всего
I	$n_{11} = 20$	$n_{12} = 3$	$n_{10} = 23$
II	$n_{21} = 1$	$n_{22} = 11$	$n_{20} = 12$
III	$n_{31} = 0$	$n_{32} = 9$	$n_{30} = 9$
Всего	$n_{01} = 21$	$n_{02} = 23$	$N = 44$

Для признаков, содержащих более чем две группы, оценка тесноты связи проводится с помощью коэффициента сопряженности K_c по формуле

$$K_c = \frac{\varphi^2}{V(S-1)(t-1)}, \quad (V.2)$$

где φ — показатель взаимной сопряженности; S — число групп по вертикальным строкам таблицы, $S=3$; t — число групп по горизонтальным столбцам таблицы, $t=2$.

Величина φ^2 — определяется по формуле

$$\varphi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i,j=1} (n_{ji} - v_{ji})^2, \quad (V.3)$$

где v_{ji} определяются как

$$v_{11} = \frac{n_{10}n_{01}}{N}; \quad v_{12} = \frac{n_{10}n_{02}}{N}; \quad \dots; \quad v_{ji} = \frac{n_{ji}n_{i0}}{N}, \quad (V.4)$$

$$v_{11} = \frac{23 \cdot 21}{44} = 10,977; \quad v_{22} = \frac{12 \cdot 23}{44} = 6,272;$$

$$v_{12} = \frac{23 \cdot 23}{44} = 12,022; \quad v_{31} = \frac{9 \cdot 21}{44} = 4,295;$$

$$v_{21} = \frac{12 \cdot 21}{44} = 5,727; \quad v_{32} = \frac{9 \cdot 23}{44} = 4,704.$$

Полученные значения v_{ji} заносят в табл. (табл. 22).

Таблица 22

Группа по измененности	Твердость, $\rho_{ш}$, кгс/мм ²	
	>300	<300
I	$v_{11} = 10,98$	$v_{12} = 12,02$
II	$v_{21} = 5,73$	$v_{22} = 6,27$
III	$v_{31} = 4,29$	$v_{32} = 4,70$

Далее производится вычисление показателя φ^2 по формуле (V.3):

$$\varphi^2 = \frac{1}{44} (7,4168 + 6,770 + 2,4254 + 2,215 + 4,215 + 2,309) = 0,58.$$
 φ^2 значимо, если соблюдается неравенство

$$\varphi^2 > \frac{C-1}{N}, \quad (V.5)$$

где C — число классов в таблице сопряженности ($C=6$).

Так как $\varphi^2=0,58$ больше, чем $\frac{C-1}{N}=0,11$, его значение является не случайным, хотя, как можно судить по среднеквадратичной ошибке вычисленного значения

$$\sigma_{\varphi^2} = \frac{2}{\sqrt{N}} \sqrt{\varphi^2(1+\varphi^2)}; \quad \sigma_{\varphi^2} = \frac{2}{\sqrt{44}} \sqrt{0,58(1+0,58)} = 0,44,$$

точность его невелика.

Значение коэффициента взаимной сопряженности K_c определяется по формуле (V.2). В рассматриваемом случае $K_c=0,41$.

Поскольку зависимость прочности кристаллических пород от их состава и степени измененности в определенной степени получила подтверждение, представляло интерес выявление взаимного влияния состава и исследуемых в работе факторов: всестороннего равномерного сжатия $\sigma_{он}$, кгс/см², и температуры t , °C, на прочность пород при неравномерном трехосном сжатии (σ_{ic} , кгс/см²).

Изучение влияния указанных трех факторов на прочность горных пород для установления качественных соотношений производилось с помощью дисперсионного анализа [136].

В качестве показателя влияния факторов в дисперсионном анализе используется дисперсия фактора, равная

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k (a_i - \bar{a})^2, \quad (V.6)$$

где \bar{a} — среднее арифметическое чисел a_i ,

$$\bar{a} = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_k}{K}.$$

В результате анализа влияние выбранного фактора представляется возможным сравнивать с эффектом случайности.

Следует подчеркнуть, что при этом анализе предполагается нормальное распределение случайных ошибок наблюдений.

Исследовали влияние: температуры в диапазоне от 15 до 300°С, который был разбит на три интервала: $X_{21}=15-25^\circ\text{C}$, $X_{22}=50-100^\circ\text{C}$ и $X_{23}=200-300^\circ\text{C}$; давления — на четыре интервала: $X_{11}=1\text{ кгс/см}^2$, $X_{12}=750-1000\text{ кгс/см}^2$; $X_{13}=2000-2500\text{ кгс/см}^2$ и $X_{14}=4500-5000\text{ кгс/см}^2$. По процентному содержанию прочных и малопластичных минералов (кварца и полевых шпатов) исследованные породы были разделены на три группы:

$$X_{31} > 70\%; \quad X_{32} = 35-70\%; \quad X_{33} < 35\%.$$

Значения результативного признака — прочности σ_{ic} записаны в клетках табл. 23.

Проверка закона распределения показала, что логарифм исходных данных подчиняется нормальному закону распределения (рис. 31).

Исходные данные после преобразований сведены в табл. 24. В табл. 24 имеются незаполненные клетки, в связи с чем используется соответствующий вариант дисперсионного анализа.

По табл. 24 рассчитываются основные показатели для каждой клетки

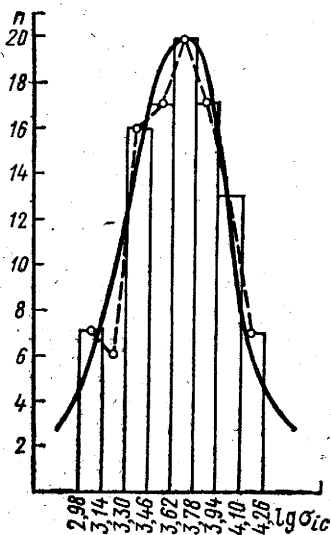


Рис. 31. Гистограмма эмпирических частот распределения значений прочности ($\lg \sigma_{ic}$)

$$\bar{Y} = \frac{1}{m} \sum_1^m Y_i \quad (\text{V.7})$$

среднее значение результативного признака;

$$Z_j = \frac{1}{m} \left(\sum_1^m Y_i \right)^2 \quad (\text{V.8})$$

параметр, где m — число результатов в клетке; $\sum_1^m Y_i$ — сумма результатов Y_i в данной клетке.

		$X_2 (t, ^\circ\text{C})$											
		X_{21}				X_{22}				X_{23}			
		15—25°C				50—100 °C				200—300 °C			
		$X_1 (\sigma_{\text{OH}}, \text{кгс/см}^2)$				$X_1 (\sigma_{\text{OH}}, \text{кгс/см}^2)$				$X_1 (\sigma_{\text{OH}}, \text{кгс/см}^2)$			
		$X_{11}, \text{кгс/см}^2$	$X_{12}, 750-1000$	$X_{13}, 2000-2500$	$X_{14}, 4500-5000$	$X_{11}, \text{кгс/см}^2$	$X_{12}, 750-1000$	$X_{13}, 2000-2500$	$X_{14}, 4500-5000$	$X_{11}, \text{кгс/см}^2$	$X_{12}, 750-1000$	$X_{13}, 2000-2500$	$X_{14}, 4500-5000$
X_3 (содержание кварца и полевых шпатов, %)	$X_{31} > 70$	2800	4700	9 600	18 000	3200	5100	10 100	—	3100	6400	9300	15 000
		1600	3400	5 800	16 000	1140	2800	5 100	12 800	—	2300	4500	7 500
		2000	4200	10 500	18 600	—	4000	9 500	17 200	1600	3500	8500	16 500
		2930	4100	6 900	11 200	2600	3800	6 500					
	$X_{32} = 35-70$	1600	5600	10 000	12 900	1450	4700	7900	9600		3900	6950	8300
		2500	3500	4 200	6 200	2400	3200	3650	5500		2700		
		1500	3050	5 800	9 100	1300		5300	8400		2600	4200	7500
	$X_{33} < 35$	1000	3600	5500	7 500	1000	2600	4100	5300	950	2100	2800	4000
		1150	3200	6050	8 600	1000	2800	4600	6300		2000	2800	4000
		2000	5100	9000	12 200	1900	4200	7200	9000		3000	4200	8150

		X_2											
		X_{21}				X_{22}				X_{23}			
		X_1											
		X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}
X_3	X_{31}	3,4472	3,6721	3,9823	4,2553	3,5051	3,7076	4,0043	4,1072	3,4914	3,8062	3,9685	4,1761
		3,2041	3,5315	3,7634	4,2041	3,0569	3,4472	3,7076	4,4335	3,2041	3,3617	3,6532	3,8751
		3,3010	3,6232	4,0212	4,2695	3,4150	3,6021	3,9777			3,5441	3,9294	4,2175
		3,4757	3,6128	3,8388	4,0492		3,5798	3,8129					
		13,4280	14,4396	15,6057	16,7781	9,9770	14,3367	15,5025	8,3427	6,6955	10,7120	11,5511	12,2687
	X_{32}	3,2041	3,7482	4,0000	4,1106	3,1614	3,6721	3,8976	3,9823		3,5911	3,8420	3,9191
		3,3979	3,5441	3,6232	3,7924	3,3802	3,5051	3,5627	3,7404		3,4314	3,6232	3,8751
		3,1761	3,4843	3,7634	3,9590	3,1139		3,7243	3,9243		3,4150		
		9,7781	10,7766	11,3866	11,8620	9,6555	7,1772	11,1846	11,6470		10,4375	7,4652	7,7942
	X_{33}	3,0000	3,5563	3,7404	3,8751	3,0000	3,4150	3,6128	3,7243	2,9777	3,3222	3,4472	3,6532
		3,0607	3,5051	3,7818	3,9345	3,0000	3,4472	3,6628	3,7993		3,3010	3,4472	3,6021
		3,3010	3,7076	3,9542	4,0864	3,2788	3,6232	3,8573	3,9542		3,4771	3,6232	3,9112
		9,3617	10,7690	11,4764	11,8960	9,2788	10,4854	11,1329	11,4778	2,9777	10,1003	10,5176	11,1665

$$(\Sigma Y)^2 = 1439,7638$$

$$\Sigma Y = 379,4422$$

$$N = 104$$

$$1394, 6645$$

В каждую клетку табл. 25 вносятся следующие величины

$$\begin{array}{|c|c|} \hline m & \bar{Y} \\ \hline \sum_1^m Y_i & Z_i \\ \hline \end{array} \quad (V.9)$$

Затем один из факторов исключается, например фактор X_1 . Для этого клетки уровней фактора X_1 объединяются при одних и тех же уровнях факторов X_2 и X_3 , количества данных m и $\sum_1^m Y_i$ суммируются. Остальные два элемента получаются так же, как в клетке (V.9). Результаты этих вычислений сведены в табл. 26—31.

По данным табл. 26—31 вычисляются факториальная и остаточная дисперсии по формулам

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{g-1} \left[\sum_1^g Z_j - \frac{1}{N} (\sum Y_i)^2 \right]; \quad (V.10)$$

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{N-g} \left[\sum_1^N Y_i^2 - \sum_1^g Z_i \right], \quad (V.11)$$

где g — число заполненных клеток таблицы; N — число данных результативного признака в данном опыте.

При вычислении σ_1^2 и σ_0^2 для каждой таблицы величины $\frac{1}{N} (\sum Y_i)^2$ и $\sum_1^g Y_i$ остаются постоянными.

Следующими вычисляются отношения

$$\theta = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_0^2} \quad (V.12)$$

и числа степеней свободы $f_1 = g - 1$ и $f_2 = N - g$.

Полученное отношение θ при соответствующих f_1 и f_2 сравнивается с табличным θ_1 при заданном уровне значимости. Если $\theta > \theta_1$, то тем самым доказывается влияние данного фактора или взаимодействия факторов на результативный признак. Если $\theta < \theta_1$, то влияние не доказывается.

В табл. 32 приведены результаты промежуточных расчетов величин σ_1^2 и σ_0^2 ; а в табл. 33 даны вычисления θ .

Как видно из табл. 33, на прочность метаморфических и магматических пород с вероятностью 0,95 оказывают влияние факторы: X_1 , X_3 ; взаимодействия X_1X_2 , X_1X_3 и $X_1X_2X_3$. Влияние температуры X_2 и совместное взаимодействие температуры и состава пород оказались менее существенным, что связано, по-видимому, с знаменитым влиянием температуры на породы кварцевого состава

		X_2											
		X_{21}				X_{22}				X_{23}			
		X_1											
		X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}
X_{31}		4	4	4	4	3	4	4	2	2	3	3	3
		3,3570	3,6099	3,9014	4,1945	3,3257	3,5842	3,8756	4,1713	3,3477	3,5707	3,8504	4,0896
		45,0778	52,1255	60,8841	70,3757	33,1805	51,3856	60,0815	34,8000	22,4145	38,2493	44,4763	50,1741
		13,4280	14,4396	15,6057	16,7781	9,9770	14,3367	15,5025	8,3427	6,6955	10,7120	11,5511	12,2887
X_{32}		3	3	3	3	3	2	3	3		3	2	2
		3,2594	3,5922	3,7955	3,9540	3,2185	3,5886	3,7282	3,8823		3,4792	3,7326	3,8971
		31,8707	38,7117	43,2178	46,9023	31,0762	25,7561	41,6984	45,2171		36,3141	27,8646	30,3748
		9,7781	10,7766	11,3866	11,8620	9,6555	7,1772	11,1846	11,6470		10,4375	7,4652	7,7942
X_{33}		3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3
		3,1206	3,5897	3,8255	3,9653	3,0929	3,4951	3,7110	3,8259	2,9777	3,3668	3,5059	3,7222
		29,2114	38,6575	43,9030	28,6984	47,1712	36,6475	41,3142	43,9129	8,8667	34,0057	36,8736	41,5639
		9,3617	10,7690	11,4764	11,8960	9,2788	10,4854	11,1329	11,4778	2,9777	10,1003	10,5176	11,1665
		$\Sigma 1392,0574$											

Таблица 20							
		X_2					
		X_{21}		X_{22}		X_{23}	
X_3	X_{31}	16	3,7657	13	3,7045	11	3,7479
		60,2514	226,8887	48,1589	178,4046	41,2273	154,5158
	X_{32}	12	3,6503	11	3,6058	7	3,6710
		43,8033	159,8952	39,6643	143,0215	25,6969	94,3333
	X_{33}	12	3,6252	12	3,5312	10	3,4762
		43,5031	157,7074	42,3749	149,6342	34,7621	120,8400
		Σ 1385,2407					

Таблица 27

		X_1							
		X_{11}		X_{12}		X_{13}		X_{14}	
X_3	X_{31}	9 30,1005	3,3445 100,6711	11 39,4883	3,5898 141,7551	11 42,6593	3,8781 165,4370	9 37,3895	4,1544 155,3309
	X_{32}	6 19,4336	3,2389 62,9435	8 28,3913	3,5489 100,7579	8 30,0364	3,7545 112,7717	8 31,3032	3,9129 122,4863
	X_{33}	7 21,6182	3,0883 66,7635	9 31,3547	3,4838 109,2335	9 33,1269	3,6808 121,9335	9 33,5403	3,8378 132,5588

Таблица 28

X ₂											
X ₂₁				X ₂₂				X ₂₃			
X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄
10	10	10	10	9	9	10	8	3	9	8	8
3,2568	3,5985	3,8469	4,0536	3,2124	3,5555	3,7820	3,9334	3,2244	3,4622	3,6917	3,9037
106,0662	129,4927	147,9852	164,3175	92,8747	113,7735	143,0352	123,7743	31,1903	107,8814	109,0303	121,9102
32,5678	35,9852	38,4687	40,5361	28,9113	31,9993	37,820	31,4675	9,6732	31,1598	29,5339	31,2294

Σ 1391, 3315

Таблица 29

X ₁			
X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄
22	28	28	26
3,2342	3,5441	3,7794	3,9705
230,1208	351,6963	399,9459	409,8866
71,1523	99,2343	105,8226	103,2330

Σ 1391,6495

Таблица 30

X ₂		
X ₂₁	X ₂₂	Y ₂₃
40	36	28
3,6889	3,6166	3,6316
544,3260	470,8744	369,2840
147,5578	130,1981	101,6863

Σ 1384,4844

Таблица 31

X ₃	X ₃₁	40	3,7409
		149,6376	559,7793
	X ₃₂	30	3,6388
		109,1645	397,2278
	X ₃₃	34	3,5482
		120,6401	128,0552

Таблица 32

	ΣZ_i	ΣY_i^2	$\frac{1}{N}(\Sigma Y_i)^2$	$\Sigma Z_i - \frac{1}{N}(\Sigma Y_i)^2$	$\Sigma Y_i^2 - \Sigma Z_i$	g	$N - g$	σ_1^2	σ_0^2
$X_1 X_2 X_3$	1392, 0574	1394, 6646	1384, 3882	7,6694	2,6072	35	69	0,2256	0,0378
$X_2 X_3$	1385, 2407			0,8527	9,4239	9	95	0,1065	0,0992
$X_1 X_3$	1392, 6428			8,2548	2,0218	12	92	0,7504	0,0219
$X_1 X_2$	1391, 3315			6,9485	3,3331	12	92	0,6312	0,03623
X_1	1391, 6495			7,2615	3,0151	4	100	2,4230	0,0301
X_2	1384, 4844			0,0964	10,1802	3	101	0,0482	0,0369
X_3	1385, 0623			0,6743	9,6020	3	101	0,3372	0,0951

Таблица 33

	ΣZ_i	ΣY_i^2	$\frac{(\Sigma Y_i)^2}{N}$	$\Sigma Z_i - \frac{(\Sigma Y_i)^2}{N}$	$\Sigma Y_i^2 - \Sigma Z_i$	$g-1$	$N - g$	σ_1^2	σ_0^2	$\theta = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_0^2}$	θ_1
$X_1 X_2 X_3$	1392,0574	1394,6646	1384,3882	7,6694	2,6072	34	69	0,2191	0,0378	5,79	1,40
$X_2 X_3$	1385,2407			0,8527	9,4239	8	95	0,1066	0,0992	1,07	1,80
$X_1 X_3$	1392,6428			8,2548	2,0218	11	92	0,7504	0,0220	34,11	1,80
$X_1 X_2$	1391,3315			6,9435	3,3331	11	92	0,6312	0,0362	17,43	1,80
X_1	1391,6495			7,2615	3,0151	3	100	2,4205	0,0301	80,41	2,70
X_2	1384,4844			0,0962	10,1802	2	101	0,0481	0,1008	0,48	3,20
X_3	1385,0623			0,6741	9,6020	2	101	0,3370	0,0951	3,54	3,20

(кварциты) и полиминеральные разности (у первых температура в исследованном диапазоне ее изменения повышает прочность, у вторых — понижает).

Следует выделить характерные особенности деформации метаморфических и магматических пород разного минерального состава при неравномерном трехосном сжатии. Прежде всего, необходимо отметить, что метаморфические и магматические породы с высоким содержанием кварца и полевых шпатов ($>70-95\%$, I группа пород по составу: кварциты, плагиоклазовые и гранатовые гнейсы, чарнокиты, граниты, гранито-гнейсы, гранодиориты и габбро-нориты) отличается упруго-хрупкое деформационное поведение во всем исследованном диапазоне изменений давлений и температур (см. рис. 28).

При этом, однако, наряду с линейной зависимостью между напряжениями σ_i и величинами продольных деформаций ϵ_1 у упруго-хрупких пород, как правило, отмечается существенно нелинейная связь напряжений с величинами радиальных деформаций $\epsilon_2 = \epsilon_3$. Линейность последней зависимости нарушается при значениях деформирующих напряжений, равных приблизительно $0,6-0,7$ от прочности пород σ_{ic} (рис. 32). Изучение шлифов деформированных пород показало, что эта особенность связана с возникновением в структуре пород при деформации микроразрушений (развитых главным образом по границам зерен), локализованных в некоторой зоне, составляющей угол $15-30^\circ$ с направлением σ_1 , и ориентированных в этом направлении.

Таким образом, в процессе деформации упруго-хрупких метаморфических и магматических пород в условиях неравномерного трехосного сжатия при величинах $\sigma_{он} = 1000-4000$ кгс/см², характерных для глубин до $15-25$ км, отмечено развитие необратимой составляющей радиальной деформации, вызывающее увеличение коэффициента боковой деформации до значений, больших $0,5$, прирост объема у пород $\left(\epsilon_v = +\frac{\Delta V}{V_{\sigma_{эф}}}\right)$, вследствие развития межзерновой трещиноватости (табл. 34).

Обращают на себя внимание высокие значения коэффициентов интенсивности разуплотнения $K_{vic} = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta \epsilon_{1п}}$, характерные для упруго-хрупких пород.

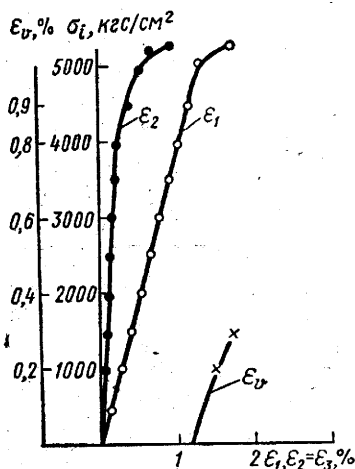


Рис. 32. Диаграммы деформаций плагиогранита (обр. 64/70) и изменения объема ϵ_v при неравномерном трехосном сжатии $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$

Объемные деформации ($\varepsilon_1, \varepsilon_2 = \varepsilon_3, \varepsilon_v, \%$), коэффициенты боковой деформации ($\nu = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$) и интенсивности разуплотнения (K_{vic}) метаморфических и магматических пород в условиях неравномерного трехосного сжатия

№ образца	Порода	Группы		$K_{\text{потк.}}$ %	Условия испытаний		$\sigma_{1s},$ кгс/см ²	$\sigma_{2s},$ кгс/см ²	$\varepsilon_{\text{max}}, \%$		$\nu_{\Pi} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$	$\varepsilon_{v\text{max}},$ %	$K_{vic} = \frac{1}{\nu} \frac{\Delta V}{\varepsilon_{1\Pi}}$
		по со- ставу	по из- менен- ности		$\sigma_{\text{он}},$ кгс/см ²	$t, ^\circ\text{C}$			ε_1	$\varepsilon_2 = \varepsilon_3$			
64/70	Плагиногранит	I	III	2,2	1 2000 4000	20 20 20	1090 5210 8900	4600	0,86 1,60 4,80	0,53 0,95	0,62 0,59	0,20 0,30	4,0 0,75
115/70	Гранито-гнейс		II	1,2	1 2000 4000	20 20 20	1 670 6 090 11 500	4700	0,78 1,95 5,10	0,55 1,56 —	0,70 0,80 —	0,32 1,17	3,2 1,6
65/70	Амфиболит	II	I	2,4	1 2000	20 20	1810 6325	5600	0,20 2,34	0,21 3,29	1,0 1,4	0,22 4,24	5,5 3,2
119/70	Гнейс		III	0,83	1 2000 2000	20 20 100	2 540 4 170 3 650	2120 3600 2910	0,72 1,24 1,40	0,45 1,01 1,25	0,62 0,81 0,89	0,18 0,78 1,10	1,8 1,2 1,4
573	Филлит	III	I	0,49	2500 4300	20 20	3200 4200	2850 3500	6,10 12,8	6,5 10,1	1,1 0,79	6,9 7,4	1,2 0,7
1133	Оливинит		I	1,16	2500 4500	20 20	6050 8600	3500 4500 6500	1,35 7,5	1,3 6,0	0,96 0,80	1,25 4,5	1,0 0,65

Прочность упруго-хрупких пород при различных значениях всестороннего давления максимальна по сравнению с породами других групп. Рост температуры оказывает относительно небольшое влияние на деформационные и прочностные свойства пород I группы по составу.

Разрушение большинства упруго-хрупких пород при одноосном сжатии происходит в результате отрыва (по плоскостям, параллельным или слабо наклоненным к направлению деформирующего усилия), а при неравномерном трехосном сжатии — путем скола по одной наклонной плоскости (угол скола $15-30^\circ$).

При вдавливании упруго-хрупкие породы характеризуют низкие значения коэффициентов пластичности ($1 \leq K \leq 1,3$) и высокие показатели твердости.

Большинство исследованных метаморфических и магматических пород с содержанием кварца и полевых шпатов менее 70% (II и III группы по составу) сохраняет способность к упруго-хрупкому поведению только при напряжениях и температурах, характерных для глубин до 4—5 км. При более же высоких параметрах давлений и температур у пород этих групп наблюдается развитие остаточной деформации, протекающей при непрерывном падении или постоянстве значений деформирующих напряжений (см. рис. 29, 30).

Развитие остаточной деформации во всем исследованном диапазоне изменений давлений и температур сопровождается у метаморфических и магматических пород разуплотнением их структуры (см. табл. 34). Разуплотнение начинается при напряжениях, близких к пределу текучести пород, и развивается по-разному, в зависимости от уровня напряжений всестороннего сжатия $\sigma_{\text{он}}$, состава и структуры пород.

Так, у пород второй группы по составу (гнейсов биотитовых, биотит-пироксеновых, биотит-роговообманковых, некоторых чарнокитов, амфиболитов, сланцев, габбро, габбро-диабазов, диабазов, базальтов, пироксенитов, перидотитов и других) при исследованных величинах давлений $\sigma_{\text{он}}$ и температур остаточные деформации не достигают больших значений ($\epsilon_{\text{пл}}$ даже при $\sigma_{\text{он}} = 4000-4500$ кгс/см² не превышали 3—5%), они распределяются в объеме пород неравномерно (преимущественно в зоне сдвига), разуплотнение же структуры (прирост объема ϵ_v , %) редко превосходит первые единицы процентов.

У пород с высоким содержанием (65—100%) более пластичных темноцветных минералов (породы III группы: некоторые гнейсы и амфиболиты, филлиты, оливиниты, оливиновые диабазы, пироксениты, серпентиниты, дуниты и др.) остаточные деформации получают большее развитие ($\epsilon_{\text{пл}} > 5$ до 10%), при этом их распределение в объеме, особенно при больших давлениях и температурах, является более равномерным, а разуплотнение может достигать величин порядка 5—10% (табл. 34, рис. 33). Коэффициенты интенсив-

ности разуплотнения (K_{vic}) резко снижаются с ростом величин напряжений, что свидетельствует об уменьшении роли межзерновых разрывов в механизме остаточной деформации.

Разрушение пород, проявляющих способность к остаточной деформации (условно называемых пластично-хрупкими), происходит при неравномерном трехосном сжатии в результате скола (сдвига) по одной (реже нескольким) наклонной плоскости, угол которой с направлением деформирующего усилия колеблется в пределах от 20 до 40°, в зависимости от величины напряжения $\sigma_{0н}$, состава и структуры пород.

С ростом температуры (до 300° С) у пластично-хрупких метаморфических и магматических пород отмечаются понижение прочностных показателей, рост величин остаточных деформаций до

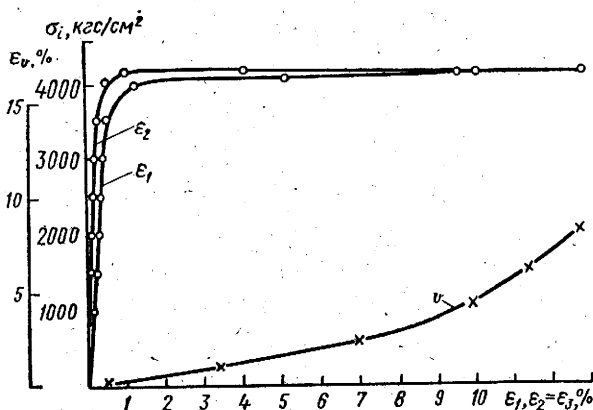


Рис. 33. Диаграммы деформаций филлита (обр. 573) и изменения его объема при неравномерном трехосном сжатии

разрушения (см. табл. 15) и снижение уровня напряжений, при которых начинается их развитие (см. рис. 30).

При вдавливании у пород этой группы также отмечается проявление необратимых деформаций (коэффициент пластичности по штампу K изменяется от 1,3 до 3,0).

Как уже было показано, катаклаз и измененность некоторыми вторичными процессами (серпентинизацией, серицитизацией, хлоритизацией и др.) способствуют снижению прочностных показателей метаморфических и магматических пород. Эти процессы вызывают также изменение деформационных характеристик — рост величин деформаций до разрушения ($\epsilon_1, \epsilon_2 = \epsilon_3$), коэффициентов пластичности при вдавливании (K).

Незначительная измененность пород такими вторичными процессами, как окварцевание или микроклинизация (в пределах 5—15%), вызывает рост их прочности (до 1,5—2 раз).

§ 2. Деформационные и прочностные свойства осадочных пород

При решении многих задач нефтяной геологии и горного дела необходимо знание деформационных и прочностных свойств осадочных горных пород, слагающих разрезы нефтяных и газовых месторождений.

Поскольку залежи нефти и газа концентрируются на глубинах порядка нескольких километров, физико-механические свойства пород должны изучаться при объемных напряженных состояниях и температурах, типичных для этих глубин.

Повсеместно развитая микро- и макротрещиноватость, наличие разрывных нарушений большой протяженности свидетельствуют о том, что в процессе формирования геологических структур слагающие их осадочные породы подвергались действию тектонических напряжений, создающих в толще пород существенно неравномерное напряженное состояние.

Неравномерность напряжений и связанная с ней трещиноватость пород, как установлено [34, 35, 85, 113, 114, 128], в той или иной степени присущи как геосинклинальным, так и платформенным областям. Исходя из этого, изучение деформационного поведения осадочных пород, развития в них трещин и разрушения в условиях действия неравномерных объемных напряженных состояний, и прежде всего трехосного сжатия, представляют большой интерес для геологии нефтяных и газовых месторождений.

При горных работах на поле естественных напряжений в земной коре накладываются напряжения, создаваемые разрушающим инструментом и проходкой скважин или выработок. В этом случае картина распределения напряжений еще более усложняется.

Изучение деформационных характеристик важно для оценки относительной деформируемости различных осадочных горных пород в условиях их залегания, знание которой необходимо для прогноза развития трещин, обоснованного суждения о сохранении породами экранирующей способности, определения устойчивости пород на стенках глубоких скважин.

Мало изучен вопрос о влиянии неравномерного трехосного сжатия на коллекторские свойства (пористость и проницаемость) пород.

Исследование деформационных и прочностных свойств, механизма остаточной деформации, влияния деформации на коллекторские свойства пород в условиях неравномерного трехосного сжатия производились, как уже указывалось, на образцах песчано-алевритовых и карбонатных пород из разрезов нефтяных месторождений а также некоторых сульфатно-галогенных и глинистых породах (литолого-петрографическая характеристика исследованных пород дана в приложениях I, III, IV).

Деформационные и прочностные свойства свыше 60 образцов пористых песчано-алевритовых пород девонских отложений нефтяных месторождений Волго-Урала и некоторых разностей мезо-кайнозойских отложений Краснодарского края изучались в условиях неравномерного трехосного сжатия, растяжения при боковом давлении и вдавливания.

Практически были исследованы почти все типичные разности сцементированных песчано-алевритовых коллекторов нефти и газа, поскольку подбор образцов для испытаний осуществлялся в соответствии с классификацией коллекторов этого типа [77].

Малые размеры зерна не позволили провести на всех породах полный комплекс намеченных исследований (вдавливание, одноосное сжатие и растяжение, продольное сжатие при $\sigma_{\text{эф}}=500; 1000; 1500$ кгс/см² и $t=20; 100$ и 200°C ; растяжение при боковом давлении).

Однако в большинстве случаев были получены данные, необходимые для построения кривых предельных напряженных состояний, которое являлось завершающим этапом исследований.

Результаты испытаний 17 типичных разностей песчано-алевритовых пород в условиях неравномерного трехосного сжатия при комнатной и высоких ($100\text{--}200^{\circ}\text{C}$) температурах представлены в табл. 35, на растяжение при боковом давлении — в табл. 36.

Пределы изменений механических свойств песчано-алевритовых пород разных классов при вдавливании приведены в табл. 37.

Испытания на одноосное сжатие (при $\sigma_{\text{эф}}=1$ кгс/см²), результаты которых приведены в табл. 35, проводились на сухих образцах, на продольное сжатие при разных значениях $\sigma_{\text{эф}}$ — в большинстве случаев на образцах, насыщенных керосином при поровом давлении $p_{\text{п}}=100\text{--}200$ кгс/см².

Для каждого образца породы в табл. 35 приведен комплекс деформационных ($\epsilon_1, \epsilon_2=\epsilon_3, \epsilon_{\text{vэф}}, \epsilon_{\text{vси}}, K_{\text{vic}}, K_{\text{псэф+си}}$) и прочностных ($\sigma_{\text{ic}}, \sigma_{\text{is}}$) характеристик при различных значениях $\sigma_{\text{эф}}$. Анализ приведенных данных показывает, что качественно закономерности изменения характеристик песчано-алевритовых пород с ростом всестороннего сжатия подобны тем, которые были установлены при испытаниях метаморфических и магматических пород.

Так, во всех случаях с ростом $\sigma_{\text{эф}}$ (при одной и той температуре) отмечено увеличение прочностных показателей и деформаций до разрушения, а с ростом температуры при $\sigma_{\text{эф}}=\text{const}$ — снижение прочности и рост деформаций.

На рис. 34, 35 представлены диаграммы деформаций двух песчаников, иллюстрирующие характер изменения деформационных и прочностных свойств песчаных пород с ростом эффективных напряжений и температур.

Следует отметить значительно более раннее (чем у метаморфических и магматических пород) развитие остаточных деформаций

у песчаников и алевролитов (при $\sigma_{зф} = 750-1000 \text{ кгс/см}^2$) и несколько большие величины остаточных деформаций при равных давлениях.

Как уже отмечалось ранее, для более полного моделирования условий деформации пород в земной коре изучение деформацион-

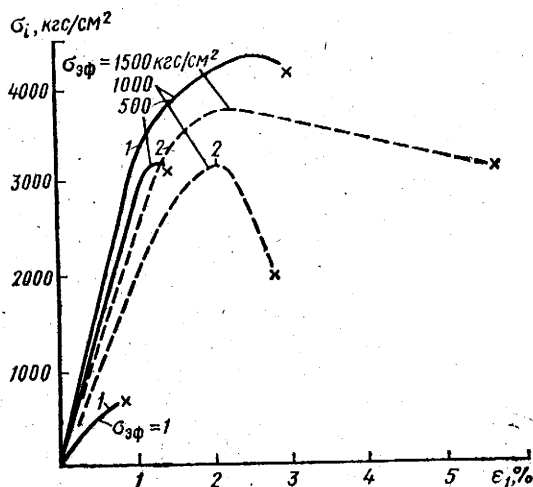


Рис. 34. Диаграммы деформаций (обр. 128—5/1) песчаника кварцевого алевролитового при неравномерном трехосном сжатии:

1 — при $t = 20^\circ \text{C}$; 2 — при $t = 100^\circ \text{C}$

ных и прочностных свойств песчано-алевритовых пород при неравномерном трехосном сжатии проводилось главным образом на образцах, насыщенных жидкостью (керосином) под давлением p_p .

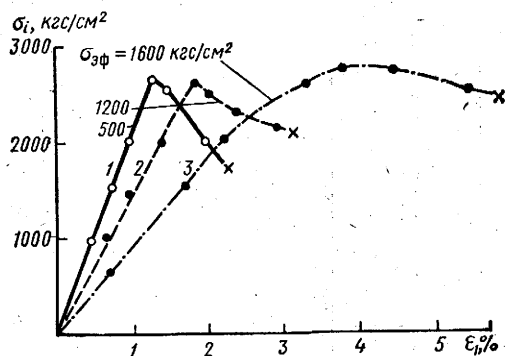


Рис. 35. Диаграммы деформаций (обр. 576/69) песчаника кварцевого мелкозернистого при неравномерном трехосном сжатии:

1 — при $t = 20^\circ \text{C}$; 2 — при $t = 100^\circ \text{C}$; 3 — при $t = 200^\circ \text{C}$

Использование в качестве насыщающей жидкости неполярного керосина преследовало цель снизить физико-химическое влияние жидкости.

Проведенные в небольшом объеме сравнительные испытания деформационных и прочностных свойств песчано-алевритовых пород, воздушно-сухих ($\sigma_{исв}$, $\epsilon_{1в}$) и насыщенных керосином ($\sigma_{ис}$, ϵ_1),

Деформационные и прочностные свойства песчано-алевритовых пород в условиях неравномерного трехосного сжатия при эффективных напряжениях, типичных для глубин до 6,2—13,9 км ($t=20-200^{\circ}\text{C}$)

Класс пород	Порода	№ образцов	$K_{\text{плот}}, \%$	$\sigma_{\text{эф}}(\sigma_{\text{он}}), \text{кгс/см}^2$	$H_{\text{экв}}, \text{км}$	$t, ^{\circ}\text{C}$	$\epsilon_{\text{max}}, \%$		$\sigma_l, \text{кгс/см}^2$		$\mu, \%$	$\epsilon_{\text{vol}}, \%$	$K_{\text{плт}}$	$K_{\text{плт}}^{\text{эф}} + \sigma_l, \%$
							ϵ_1	ϵ_2	σ_{lc}	σ_{ls}				
II	Песчаник кварцевый крупнозернистый хорошо отсортированный	253/69	17,1	1		20	0,5	0,3	1100	1000	—	+0,10	1,20	17,2
				400		20	3,1	2,3	1800	1500	0,9	+1,50	0,68	17,7
				1000		20	8,6	6,4	3740	2750	<u>1,85</u>	+4,2	0,54	19,45
				1000		100	13,0	10,0	2470	2000	<u>2,0</u>	+7,0	0,58	22,15
III	Песчаник кварцевый мелкозернистый хорошо отсортированный	484/62	19,8	1		20	0,6	0,4	640			+0,20	2,0	20,0
				850		20	5,2	5,3	3150	2500	1,4	+5,4	1,3	23,8
				850		150	8,3	—	2260	2000	1,4			
	То же	576/69	17,0	1		20	0,2		920		—			
				500		20	1,3	1,2	2650	2350	0,50	+1,1	1,3	17,5
IV	Песчаник кварцевый алевритовый хорошо отсортированный	825/59	19,7	350		20	1,1	0,8	2430*	2100	0,60	+0,5	1,30	19,6
				650		20	1,7	1,2	2600	2400	0,70	+0,7	1,0	19,7
	То же	115/69	14,5	1000		20	2,6	1,7	3190	2500	1,0	+0,9	0,75	14,4
				1500		200	4,8	1,6	3000	2480	<u>1,8</u>	—1,6		11,1

VI

VI	Песчаник кварцевый мелкозернистый среднеотсортированный	128—5/1	19,3	1		20	0,9	0,76	695	600	—	+0,6	3,05	19,9
				500	3,9	20	1,3	1,0	3240	2800	0,5	+1,2	2,46	20,0
				1000	7,7	20	2,9		4400	3500	1,3			
				1000	7,7	100	2,6	1,3	3200	2600	1,4	0		15,4
				1500	11,6	100	5,6	2,0	3900	3000	<u>2,2</u>	—1,6		
	То же	138/69	16,2	1		20	0,8	0,9	765	500	—	+1,0	2,0	17,2
				500	3,9	20	2,1	1,6	2960	2400	0,5	+1,1	1,22	16,8
				1000	7,7	20	2,5	2,3	4160	3000	<u>0,9</u>	+1,8	1,20	17,1
				1000	7,7	200	3,7	1,6	3100	2300	<u>1,5</u>	—0,5		14,2
	"	830/59	14,8	1		20	0,25	0,20	350	300	—	+0,15	3,0	14,9
				350	2,7	20	0,30	0,40	650	580	0,7	+0,50	2,5	15,0
				850	6,5	20	2,0		1440	1340	1,3			
				850	6,5	200	5,0		870	720				
VIII	Алеврит полевошпатово-кварцевый среднеотсортированный	731K	17,3	1		20	0,6	0,5	618	520		+0,5	2,60	17,8
				400	3,1	20	1,8	1,3	2400	1800	0,8	+0,8	1,14	17,3
				800	6,2	100	3,2	2,2	3030	2900	<u>2,6</u>	+1,2	1,0	15,8
				1500	11,6	200	3,5	1,6	3220	2700		—0,3		
	Алеврит кварцевый крупнозернистый глинистый	2— 12/59B— 71**	16,9	1500	11,6	20	5,8	2,8	3430	2640	—	—0,2		

Класс пород	Порода	№ образцов	K _{п.отк} , %	$\sigma_{\Phi}(\sigma_{0H})$, кгс/см ²	H _{экв} , км	t, °C	ϵ_{max} , %		σ_I , кгс/см ²		$\epsilon_{\sigma\sigma\Phi}$, %	$\epsilon_{\sigma\sigma t}$, %	K _{vlc}	K _{пσΦ} + σ_I , %
							ϵ_1	ϵ_2	σ_{Ic}	σ_{Is}				
IX	Песчаник кварцевый алевроитовый сильно сцементированный	775—5/2 **	8,7	1		20	1,2	1,4	665	600	—	+1,6	4,0	10,2
				500	3,9	20	2,5	2,8	1700	1500	1,5	+3,1	3,25	10,3
				800	6,2	20	3,0	2,0	2520 *	2000	<u>[2,1]</u>	+1,0	0,66	7,6
				1200	9,2	20	6,6	5,6	2850	2200		+4,6	1,0	
X	Алевролит полевошпатово-кварцевый глинистый	1739K	20,4	1		20	1,0	0,8	410			+0,6	4,0	21,0
				800	6,2	20	7,0	6,0	1200	800	<u>[1,3]</u>	+5,0	0,86	23,7
XI	Алевролит кварцевый глинистый тонкослоистый	29—35/2aB—71	8,96	1500	11,6	20	5,5	2,5	5150	3100		—0,5		
	Алевролит полевошпатово-кварцевый с карбонатно-глинистым цементом	1053K **	24,0	1		20	0,8	0,7	690	600		+0,6	3,30	
				400	3,1	20	2,7	2,3	1580	1400		+1,9	1,36	
				1000	7,7	20	4,0	3,1	2700	1900		+2,1	0,84	
				1000	7,7	200	26,0	19,0	1750	1380		+12,0	0,50	

XII	Песчаник полево-шпатово-кварцевый мелкозернистый сильно сцементированный	45	8,9	1 800 1400	6,2 10,8	20 20 20	2,4 3,6	1,9 2,4	2590 5200	2000 3000	<u>0,9</u> <u>1,75</u>	+1,4 +1,2	0,80 0,50	9,3 8,35
	Песчаник полимиктовый алевритовый сильно сцементированный	Ш **	63	1 500 1200 1200	3,9 9,2 9,2	20 20 20 100	1,7 1,5 2,9 3,5	2,0 1,4 2,6	1260 3630 * 5000 4500	1100 3000 3500 2700		+2,3 +1,3 +2,2	3,30 1,85 1,1	
	Песчаник полево-шпатово-кварцевый мелкозернистый с карбонатным цементом	536К	5,6	1 600 1000 1800	4,6 7,7 13,9	20 20 20 20	0,5 4,5 2,8 9,5	0,4 3,6 1,6 7,1	1500 3650 4000 * 6000	1350 2800 3000 4500	— 0,45 <u>1,15</u> <u>1,30</u>	+0,35 +2,7 +0,4 +4,7	3,90 1,06 0,60 0,54	5,95 7,85 9,0

Примечания. 1. Значком * отмечены опыты, в которых процесс деформации не доведен до разрушения.

2. Значком ** отмечены опыты, в которых испытывались сухие образцы (при $p_{II}=1$ кгс/см²).

3. Рамкой обведены значения $\varepsilon_{\text{эф}}$ при необратимой деформации.

Пределы прочности песчано-алевритовых пород при растяжении (σ_p) в условиях бокового сжатия ($\sigma_{он}$)

Порода	№ образца	$K_{п}$, %	$\sigma_{он}$, кгс/см ²	σ_p , кгс/см ²	$\frac{\sigma_{пс}(\sigma_c)}{\sigma_p}$
Песчаник кварцевый мелкозернистый	775—5/2	8,7	1	180	3,7
			400	190	4,2
Песчаник полевошпатово-кварцевый	III	6,3	1	256	4,9
			400	230	15,6

Таблица 37

Деформационные и прочностные свойства песчано-алевритовых пород разных классов при вдавливании

Класс пород [77]	Число испытанных образцов	$K_{потк}$, % от — до	Свойства при вдавливании		
			$P_{ш}$, кгс/мм ² , от — до	P_0 , кгс/мм ² , от — до	K от — до
II—III	11	16,4—23,6	37—67	29—52	1,5—4,2
IV	4	14,5—19,7	41—85	31—68	2,4—3,2
V	1	15,0	45	35	3,1
VI	10	14,8—16,7	54—117	44—77	1,4—4,4
VIII	4	15,3—18,6	59—95	41—71	2,6—4,9
IX	11	7,2—18,4	43—195	37—148	1,8—10,5
X—XI	4	9,0—17,6	87—210	34—128	2,4—3,4
XII	15	5,6—14,8	69—237	52—138	2,0—3,9

показали, что при равных величинах эффективных напряжений прочность и деформационные свойства как у тех, так и у других пород приблизительно одинаковы (отклонения в большинстве случаев находятся в пределах точности опытов) (табл. 38).

Заслуживает внимания анализ приведенных в табл. 35 изменений объема пород под действием избыточного продольного напряжения σ_i ($\epsilon_{v\sigma i}$, %). Как можно видеть, при деформации пород в условиях неравномерного трехосного сжатия в диапазоне величин $\sigma_{эф} = 1—1200$ кгс/см² наблюдается увеличение объема пород ($+\epsilon_{v\sigma i}$), свидетельствующее о разуплотнении их структуры в процессе остаточной деформации. При определенных критических значениях $\sigma_{эф.кр}$ ($\geq 1000—1400$ кгс/см²), зависящих от температуры, состава и структуры пород, рост объема пород прекращается. Ука-

Отношение прочностных показателей и продольных деформаций пород, насыщенных керосином, к тем же показателям сухих пород

Порода	№ образца	σ_{0H} , кгс/см ²	ρ_{II} , кгс/см ²	t , °C	$\frac{\sigma_{1C}}{\sigma_{1C_B}}$	$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1B}}$
Песчаник кварцевый крупнозернистый	253/59	500		20	1,0	2,0
		600	100	20		
Алевритит полевошпатово-кварцевый с глинисто-карбонатным цементом	731K	400 600	200	20 20	1,0	0,90
		800 1000	200	20 20	1,3	0,73
Песчаник полевошпатово-кварцевый с карбонатным цементом	536K	600		20	1,2	1,10
		800	200	20		

званная особенность деформации песчано-алевритовых пород связана, как было установлено в этом и ряде других исследований [14, 95, 120, 121], с различным механизмом остаточной деформации пород. При значениях $\sigma_{0ф}$ и температур, типичных для глубин до 7,5—10 км, в механизме остаточной деформации песчано-алевритовых пород преобладает межзерновое скольжение, сопровождающееся разрывом связей между зернами при их повороте в процессе деформации, вызывающем рост объема. Микротрещины разрыва, как показывает изучение структурных изменений в шлифах деформированных пород, обычно ориентированы в направлении избыточного продольного напряжения, в связи с чем измеренные радиальные деформации пород ($\varepsilon_2 = \varepsilon_3$) достигают значений, значительно больших 0,5 ε_1 .

При термодинамических параметрах, характерных для глубин свыше 7,5—10 км, в механизме остаточной деформации начинает преобладать внутрикристаллическое скольжение, т. е. пластическое течение в классическом понимании этого процесса.

Остаточные деформации межзернового механизма распределяются в объеме образцов песчано-алевритовых пород неравномерно, концентрируясь главным образом в зоне сдвига. С этим связаны относительно небольшие их величины (<10%) даже при критических значениях $\sigma_{0ф}$.

Анализ коэффициентов интенсивности разуплотнения пород (K_{vic}) позволил установить, что наибольшая интенсивность разуплотнения (максимальная величина отношения прироста объема

$+\epsilon_{v\sigma i}$ к остаточной деформации до разрушения $\Delta\epsilon_{1п}$) характерна для процесса одноосного сжатия.

При неравномерном трехосном сжатии величин K_{vic} снижаются с ростом $\sigma_{эф}$, что свидетельствует о непрерывном изменении механизма деформации даже при значениях $\sigma_{эф} < \sigma_{эф.кр.}$

Гипотетически снижение интенсивности разуплотнения с ростом $\sigma_{эф}$ можно объяснить уменьшением доли межзерновой составляющей в общей величине остаточной деформации (растущей пропорционально $\sigma_{эф}$).

Из результатов испытаний следует, что этот процесс может протекать при увеличении абсолютных значений прироста объема ($+\epsilon_{v\sigma i}$).

Приведенное объяснение хорошо увязывается с характерными признаками разрушения песчано-алевритовых пород. Так, если при малых величинах $\sigma_{эф}$ разрушение этих пород происходит в результате скола по одной плоскости, угол наклона которой с направлением продольного усилия составляет $15-25^\circ$, то с ростом $\sigma_{эф}$ угол наклона увеличивается, приближаясь к значениям, типичным для пластичного сдвига ($>35-40^\circ$).

Малое число испытанных образцов не позволило выявить функциональные зависимости между деформационными и прочностными свойствами песчано-алевритовых пород, с одной стороны, их составом и признаками строения — с другой. Удалось выявить лишь некоторые интересные тенденции. Например, было установлено, что у мономинеральных кварцевых мелкозернистых хорошо отсортированных песчаников (III, IV классы) уровень критических напряжений, при которых начинается преимущественное развитие внутрикристаллической деформации, обычно ниже, чем у неоднородных по составу и строению песчаников и алевролитов (IX—XII классов). Породы IX—XII классов отличают также повышенные значения коэффициентов интенсивности разуплотнения (K_{vic}).

В последней графе табл. 35 приведены значения коэффициентов пористости пород при неравномерном трехосном сжатии. Как можно видеть, влияние разуплотнения на этот коэффициент в большинстве случаев не компенсируется снижением пористости под действием эффективных напряжений, в результате чего значения пористости при изменении $\sigma_{эф}$ до 1000 кгс/см^2 и выше в большинстве случаев больше или равны $K_{п. атм.}$

Этот экспериментально установленный факт имеет большое практическое значение, поскольку он вскрывает механизм формирования вторичной пустотности в породах в условиях неравномерного объемного напряженного состояния, характерного для тектонически активных участков земной коры.

Прочность двух испытанных песчано-алевритовых пород при растяжении в условиях бокового давления 400 кгс/см^2 (см. табл. 36) была значительно ниже прочности тех же пород при трехосном сжатии в условиях $\sigma_{эф} = 400 \text{ кгс/см}^2$ (в $4,2-15,6$ раза). Проч-

ность тех же пород при одноосном растяжении отличалась от прочности при одноосном сжатии от 3,7 до 4,9 раза.

По свойствам при вдавливании песчано-алевритовые породы относятся к пластично-хрупким породам (см. табл. 37). Их прочность при вдавливании (твёрдость $p_{ш}$, предел текучести p_0) возрастает от II—IV классов к IX—XII, в соответствии со снижением пористости пород в этом направлении. Какой-либо закономерности в изменении условного коэффициента пластичности (K) песчано-алевритовых пород от II—IV к IX—XII классам не отмечено, что связано, по-видимому, с противоположным влиянием на K таких факторов, как пористость и содержание пластичного глинисто-карбонатного цементирующего вещества (при деформации песчано-алевритовых пород II—IV классов величина K определяется главным образом пористостью пород, при деформации же пород IX—XII классов — высоким содержанием глинисто-карбонатного цемента).

Карбонатные породы

Деформационные и прочностные свойства свыше 80 карбонатных пород, включающих характерные структурно-генетические разности верхнеюрских отложений Кавказа и каменноугольных отложений из разрезов Предуральяского прогиба и платформенной части Пермской области, были изучены при неравномерном трехосном сжатии, растяжении при боковом давлении и вдавливании.

Результаты испытаний 29 разностей карбонатных пород в условиях неравномерного трехосного сжатия и температур от 20 до 200°С представлены в табл. 39, 5 образцов на растяжение в условиях бокового давления — в табл. 40 и 81 образца на вдавливание — в табл. 41.

При проведении испытаний однотипные разности карбонатных пород подбирались таким образом, чтобы можно было выявить влияние некоторых особенностей их состава и строения. Так, в частности, в каждой выделенной группе представлены известняки с различным содержанием кальцита и доломита $MgCO_3/CaCO_3$ и нерастворимого остатка κ , а также с различными коэффициентами пористости $K_{п}$.

Данные по свойствам пород при одноосном сжатии (табл. 39, $\sigma_{эф} = \text{кгс/см}^2$) получены при испытании сухих образцов пород, при трехосном сжатии в большинстве случаев — на образцах, насыщенных керосином, давление которого в разных опытах колебалось от 100 до 200 кгс/см^2 .

При неравномерном трехосном сжатии испытания проводились в условиях эффективных напряжений $\sigma_{эф} = 400—500; 600—800; 1000—1200; 1400—2000 \text{ кгс/см}^2$ и $t = 20—200^\circ\text{C}$.

Анализ результатов исследований карбонатных пород показывает, что при сохранении общей качественной направленности в изменении свойств этих пород с давлением их деформационное

Деформационные и прочностные свойства карбонатных пород в условиях неравномерного трехосного сжатия при эффективных напряжениях, типичных для глубин 3,1—15,6 км ($t=20-200^{\circ}\text{C}$)

Структурно-генетический тип	№ образца	$K_{п'} (K_{п_{орг}}), \%$	$\alpha, \%$	$\frac{\text{MgCO}_3}{\text{CaCO}_3}$	$\sigma_{эф'}, \text{кгс/см}^2$	$t, ^{\circ}\text{C}$	$H_{экр}, \text{км}$	$\varepsilon_{\max}, \%$		$\sigma_I, \text{кгс/см}^2$		$\varepsilon_{\sigma_{эф}}$	$\varepsilon_{\sigma_{el}}$	$K_{\sigma_{el}}$	$\sigma + \sigma_{эф}$
								ε_1	$\varepsilon_2 = \varepsilon_3$	σ_{Ic}	σ_{Is}				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
I. Биоморфные известняки	2051	0,68	35,0		1	20		1,1	1,2	1245	1100	0,59	+1,3	3,25	2,0
					500	20	3,9	2,7	2,4	3150	2000		+2,0	0,91	2,1
					500	75	3,9	3,0		2990	1800				
					500	150	3,9	5,2		2840	1640				
					500	300	3,9			2500					
					1000	20	7,7	8,9	6,8	3080*	2500		1,4	0,56	4,1
					1000	200	7,7	12,1		2700	1800		1,4	+0,1	
					2000	20	15,6	15,3	9,2	4200	2800		2,8	+2,9	0,78
	2297	1,57	0,9	0,6 98,0	1	20	—	1,0		950		0,9			
					750	20	5,8	2,3	1,8	1850*	1400		+1,3	1,0	2,0
					1400	20	10,8	1,9	1,1	4400*	3300		0,3	0,25	
	763—5/2	3,9	10,7		1050**	20	8,1	9,0	14,3	1610	1050	1,84	+19,6	2,61	21,7
					1050	20	8,1	4,8	5,2	1340*	900		+5,6	1,55	7,7
					1100**	20	8,5	15,1	13,4	3900	3000		0,94	+9,2	8,6
	3/82П	0,3	8,1	2,0 96,7	1100**	20	8,5	15,7	12,3	3210	2700	1,14	+6,4	0,43	14,0
	5—24/П71	8,7	0,3		1100**	20	8,5	15,7	12,3	3210	2700	1,14	+6,4	0,43	14,0

II. Биоморф-
но-детриту-
совые изве-
стняки

168—8/П71	7,5			400*	20	3,1	2,5	1,55	2060	910	0,3	+0,6	0,26	7,8
343—10/П71	17,9	3,5	—	600**	20	4,6	17,5	10,6	1510	526	0,86	+3,7	0,24	20,3
			96,5	1	20		0,23	0,175	1730	1600	—	+0,12	2,4	1,16
2275	1,04	4,4		750**	20	5,8	1,35	1,80	4250	3500	1,0	+2,25	2,1	2,3
				750	100	5,8	1,35	0,70	3850	3500	1,0	+0,05	0,1	0,1
				1	20		0,80	1,0	880	830	—	+1,20	3,5	3,3
2167	2,10	15,6	71,0	500**	20	3,9	3,0	2,8	3350	2400	0,95	+2,6	1,2	3,75
				1500**	20	11,5	3,6	2,7	5250	4000	1,8	+1,9	0,8	2,2
2155	2,71	7,0	29,6	1	20	—	0,19	0,14	1750	1540		+0,09	2,0	2,8
			57,0	750**	20	5,8	1,7	1,3	4700	4000	0,8	+0,9	1,1	2,8
				750	20	5,8	6,3	5,6	2410	2000	0,8	+4,9	0,9	6,7
				1500**	20	11,5	17,3	11,9	6120	5100		+6,5	0,4	
				2000	20	15,6	13,6	7,1	4585	3700		+0,6	0,05	
2176	3,39	10,3		1	20	—	1,1		900					
				600	20	4,6	3,7	3,4	2800	2000	0,50	+2,7	0,84	5,6
				1050	20	8,1	5,7	4,5	3140	2850	0,90	+3,3	0,66	5,8
2014	4,5	4,0	22,0	1	20		0,70	0,85	810	750	—	+1,0	3,3	5,0
			66,0	500**	20	3,9	1,55	1,43	2780	2000	0,9	+1,3	1,5	4,9
				900**	20	7,0	1,4		4300	3100				
				1200**	20	9,2	2,9	3,0	5000	3850		+3,1	1,1	
1K	22,7	7,6	20,0	1	20		1,10	1,25	550	320		+1,4	1,55	24,1
			80,0	400**	20	3,1	16,6	18,5	1110*	520	1,2	+20,4	1,4	41,9

Структурно-генетический тип	№ образца	$K_{П} K_{Потк}, \%$	$z, \%$	$\frac{MgCO_3}{CaCO_3}$	$\sigma_{эф}, \text{кгс/см}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	$H_{ЭКВ}$	$\epsilon_{max}, \%$		$\sigma_l, \text{кгс/см}^3$		$-\epsilon_{\sigma_{эф}}, \%$	$\epsilon_{\sigma_l}, \%$	$K_{\sigma_{лс}}$	$K_{П\sigma_{эф}} t$
								ϵ_1	$\epsilon_2 = \epsilon_3$	$\sigma_{лс}$	$\sigma_{лс}$				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
III. Хемогенные породы (микрозернистые известняки)	1—88П 19—44/П71 1—13П	1,6 11,3 0,4	0,2 0,6 8,5	0,2 86,2	400	20	3,1	18,1	20,8	1200*	500	1,2	+23,5	1,34	45,0
					500**	20	3,9	17,8	21,2	1350*	650	1,4	+24,6	1,46	45,9
					700**	20	5,4	27,0	26,0	1465*	750	1,8	+25,0	1,0	45,9
					900**	20	7,0	22,4	18,7	1710*	950	2,3	+15,0	0,77	35,4
					1100**	20	8,5	20,7	21,8	3500	2900		+22,9	1,2	
	53—11/П71	11,1	0,42		1100**	20	8,5	23,7	17,9	3125	2300		+12,1	0,55	
					1	20				500					
					750**	20	5,8	5,6	5,1	4390	4100		+4,6	1,1	
					1	20		0,56	1,2	480	320		+1,8	4,5	
					750	20	5,8	12,3	9,9	1690	1400		+7,5	0,65	
	36/124П	0,9	2,5	1,02 91,66	1000	20	7,8	2,4	1,6	3630	1575	0,5	+0,8	2,0	1,2
					800	20	6,1	1,6	2,7	4120	1785	0,7	+3,8	2,7	
	36—40П 9—10/П71 2041	1,1 3,8 1,16	0,9 2,3 3,7	16,8 79,9	800	20	6,1	1,6	2,7	4120	1785				
					800	20	6,1	3,2	2,3	3495	1516	0,4	+1,4	0,56	4,8
					1	20		0,45	0,25	1900	1650	—	+0,1	1,7	1,26
					500**	20	3,9	2,0	1,2	4350	3800		+0,4	0,26	
					1200**	20	9,2	3,2		6100	4300				

Пределы прочности карбонатных пород при растяжении (σ_p) в условиях бокового сжатия ($\sigma_{он}$)

Породы	№ образца	$K_{п'}$ %	$\sigma_{он}$, кгс/см ²	σ_p , кгс/см ²	$\frac{\sigma_c (\sigma_c)}{\sigma_p}$
Известняк онколитово-детритусовый	2167	2,10	1	242	3,6
			400	220	13,2
	2014	4,48	1	250—263	3,2
			400	252—264	9,7
	2176	3,39	1	312	2,9
			400	220	10,2
Известняк микрозернистый	2228	1,78	1	225	7,5
			400	250	12,8
	2005	1,86	1	261	4,6
			400	220	13,2

поведение при неравномерном трехосном сжатии отличают многие характерные особенности.

Так, у большинства органогенных пород способность к остаточной деформации заметно проявляется уже при эффективных напряжениях 400—500 кгс/см².

При $\sigma_{эф} \cong 1000$ кгс/см² величины деформации органогенных пород часто превышают 10%. Распределение остаточных деформаций в объеме этих пород при $\epsilon_1 > 10—15\%$ становится равномерным.

Хемогенные породы отличаются меньшими величинами деформаций, прироста объема и неравномерным распределением в объеме пород остаточных деформаций, получающих развитие лишь при $\sigma_{эф} > 750—1000$ кгс/см². В механизме остаточной деформации карбонатных пород при $\sigma_{эф} \leq 1200—1500$ кгс/см² ($t = 20^\circ \text{C}$) преобладает межзерновое скольжение, сопровождающееся существенным разуплотнением структуры пород (прирост объема + ϵ_{vol} достигает величин 5—25%). Температура оказывает на деформационно-прочностные свойства карбонатных пород значительно большее влияние, чем на свойства песчано-алевритовых пород. При равных величинах $\sigma_{эф}$ снижение прочности с ростом температуры составляет при изменении t от 20 до 100° C $\left(\frac{\sigma_{ic20} - \sigma_{ic100}}{\sigma_{ic20}}, \% \right)$ — 9,5—11%, а от 20 до

**Деформационные и прочностные свойства карбонатных пород
различных структурно-генетических типов при вдавливании**

Структурно-генетический тип пород		Число испы- танных об- разцов	$K_{\text{потк}}$, % от — до	Свойства при вдавливании		
				$P_{\text{ш}}$, кгс/мм ² от — до	P_0 , кгс/мм ² от — до	K от — до
Органоге- нные по- роды	I. Биоморфные известняки	18	0,3—17,9	100—179	24—117	1,6—3,6 ∞
	II. Биоморфно- детритусовые известняки	46	0,5—22,7	86—220	24—185	1,3—3,5 ∞
Хемогенные породы	III. Микрозерни- стые извест- няки	25	0,4—9,9	123—248	61—145	1,4—3,1
Вторично из- мененные породы	IV. Доломиты с реликтами органогенной структуры	2	2,48—3,11	135—228	87—138	1,5—1,6

200° С $\left(\frac{\sigma_{ic20} - \sigma_{ic200}}{\sigma_{ic20}}, \% \right) - 13-35\%$. Изменение температуры

в тех же пределах вызывает рост величин продольных деформаций соответственно на 11—120 и 36—140%. Типичные диаграммы деформаций карбонатных пород при неравномерном трехосном сжатии и разных температурах представлены на рис. 36, 37.

Следует обратить внимание на то, что максимальные изменения прочности карбонатных пород с ростом температуры получены при малых величинах $\sigma_{\text{эф}}$, когда в механизме остаточной деформации преобладают межзерновые перемещения. Максимальные же изменения величин деформаций отмечены при высоких значениях $\sigma_{\text{эф}}$, что свидетельствует о существенном влиянии температуры на развитие внутрикристаллической деформации.

Повышая способность пород к пластической деформации, температура стимулирует также ее развитие при меньших значениях эффективных напряжений.

В проведенных экспериментах отмечено несколько большее, чем в опытах с песчано-алевритовыми породами, влияние насыщения карбонатных пород неполярным керосином. Во всех случаях при равных величинах $\sigma_{\text{эф}}$ прочностные показатели пород, насыщенных керосином (σ_{ic} , σ_{is}), были ниже прочности сухих пород на 5—50%.

Поскольку сравнительные испытания проводились при напряжениях $\sigma_{эф} < 1000$ кгс/см², полученные результаты можно объяснить стимулированием процесса деформации и разрушения карбонатных пород по границам зерен под действием керосина.

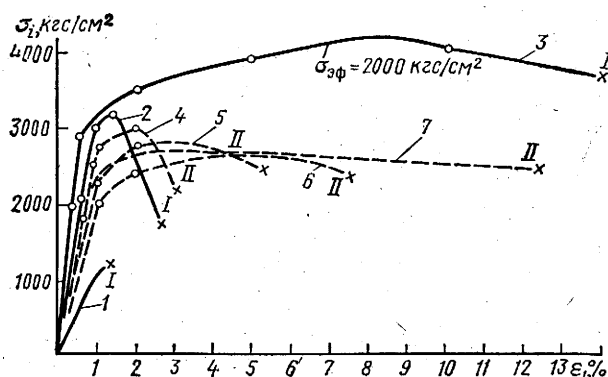


Рис. 36. Диаграммы деформаций известняка онколитово-микрогустого (обр. 2051) при неравномерном трехосном сжатии:

I — при $t = 20^\circ \text{C}$; II — при $t = 75-300^\circ \text{C}$; I — $\sigma_{эф} = 1$ кгс/см², $t = 20^\circ \text{C}$; 2 — $\sigma_{эф} = 500$ кгс/см², $t = 20^\circ \text{C}$; 3 — $\sigma_{эф} = 2000$ кгс/см², $t = 20^\circ \text{C}$; 4 — $\sigma_{эф} = 500$ кгс/см², $t = 75^\circ \text{C}$; 5 — $\sigma_{эф} = 500$ кгс/см², $t = 150^\circ \text{C}$; 6 — $\sigma_{эф} = 500$ кгс/см², $t = 300^\circ \text{C}$; 7 — $\sigma_{эф} = 100$ кгс/см², $t = 200^\circ \text{C}$

Анализ изменений объема с ростом эффективных напряжений позволил подтвердить ранее выявленные на других породах закономерности — рост абсолютных величин $+\varepsilon_{v\sigma i}$ до определенных

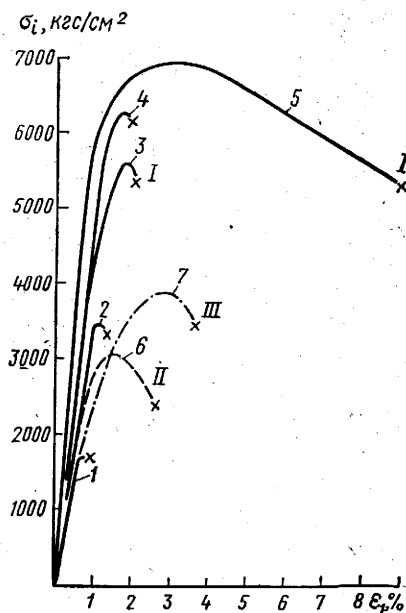


Рис. 37. Диаграммы деформаций известняка микрозернистого (обр. 2228) при неравномерном трехосном сжатии:

I — при $t = 20^\circ \text{C}$; II — при $t = 100^\circ \text{C}$; III — при $t = 200^\circ \text{C}$; I — $\sigma_{эф} = 1$ кгс/см²; 2 — $\sigma_{эф} = 500$ кгс/см²; 3 — $\sigma_{эф} = 900$ кгс/см²; 4 — $\sigma_{эф} = 1200$ кгс/см²; 5 — $\sigma_{эф} = 2000$ кгс/см²; 6 — $\sigma_{эф} = 500$ кгс/см²; 7 — $\sigma_{эф} = 1000$ кгс/см²

критических значений $\sigma_{эф}$, а затем их уменьшение, вплоть до полного исчезновения прироста объема, а также снижение коэффициентов интенсивности разуплотнения в диапазоне эффективных напряжений до $\sigma_{эф.кр}$.

Процесс разрушения карбонатных пород в исследованном диапазоне $\sigma_{эф}$ происходил путем сдвига (скола) по одной или нескольким поверхностям, угол которых с направлением σ_i изменялся с ростом $\sigma_{эф}$ от 18—20 до 35—45°.

Сравнение деформационно-прочностных свойств пород отдельных структурно-генетических типов указывает на большее развитие деформационного процесса, в том числе и разуплотнения структуры, у более неоднородных по составу и строению органогенных известняков по сравнению с хемогенными и доломитами.

У однотипных разностей отмечена тенденция к снижению прочностных показателей с ростом пористости и увеличением содержания глинистого вещества. У известняков рост прочности наблюдался в случае увеличения содержания доломита.

В последней графе табл. 39 приведены значения коэффициентов пористости пород при неравномерном трехосном сжатии.

Как можно видеть, разуплотнение оказывает очень большое влияние на объем пустотного пространства карбонатных пород. При эффективных напряжениях, типичных для глубин в 3,1—5,8 км, пористость известняков, деформированных в условиях неравномерного трехосного сжатия, увеличилась по сравнению с $K_{п. атм}$ в 1,1—3,1 раза. Максимальные относительные изменения пористости $\left(\frac{K_{п.эф+\sigma_i}}{K_{п. атм}}, \% \right)$, как было установлено, характеризуют процесс деформации малопористых пород ($K_{п. атм} < 1,8\%$).

Исходя из предположения, что процессы микротрещинообразования и разрушения пород взаимосвязаны и взаимообусловлены, полученные данные об изменении пористости можно привлечь для объяснения преимущественного развития трещинных коллекторов нефти и газа в разностях карбонатных пород с низкими показателями так называемой первичной пористости.

Заслуживает внимания выявленная тенденция к росту прочностных показателей у пород, приуроченных к тектонически более дислоцированным участкам земной коры и залегающих на больших глубинах. Так, однотипные разности пород оказались прочнее в разрезах верхнеюрской толщи Кавказа, чем в каменноугольных отложениях Русской платформы. Прочностные же показатели разновозрастных и однотипных пород в Предуральском прогибе были выше, чем в платформенной части Пермской области, где глубина залегания пород была меньше на 400—1300 м.

Следует отметить, что у испытанных карбонатных пород из разрезов платформенной части Пермской области, отличающихся, как правило, более высокой пористостью (породы с индексом П71 в табл. 39), обнаружена значительно меньшая способность к разуплотнению, чем у более плотных разностей пород из зоны Предуральского прогиба (породы с индексом П в табл. 39).

Породы прогиба в равных условиях отличали как большие абсолютные величины прироста пустотности ($+e_{voi}$), так и особенно значения коэффициентов интенсивности разуплотнения (K_{vic}).

Эти результаты объясняют развитие коллекторов трещинного типа в Предуральском прогибе и обосновывают возможность прогнозной оценки трещиноватости пород прогиба по комплексу их деформационных и прочностных свойств.

Результаты испытаний ряда образцов карбонатных пород на растяжение при $\sigma_{\text{он}} = 1$ и 400 кгс/см² (см. табл. 40) дают представление об абсолютных величинах прочностных показателей карбонатных пород при растяжении и различиях в прочности этих пород при испытаниях на растяжение и сжатие.

По свойствам при вдавливании карбонатные породы относятся к пластично-хрупким породам (см. табл. 41). Максимальные значения коэффициента пластичности при вдавливании отмечены у органических пород, максимальные же значения твердости (при близких значениях коэффициентов пористости) — у мелкозернистых известняков и доломитов.

У однотипных разностей при вдавливании, как и при испытаниях в условиях неравномерного трехосного сжатия, наблюдаются тенденции к росту твердости известняков при увеличении содержания доломита и снижении коэффициентов пористости и к уменьшению твердости с ростом содержания нерастворимого остатка.

Сульфатно-галогенные и глинистые породы

Наиболее распространенными породами, перекрывающими коллекторы нефти и газа в разрезах месторождений, являются сульфатно-галогенные и глинистые породы.

Экранирующие свойства этих пород обусловлены рядом особенностей их состава и строения, а также степенью насыщения и свойствами насыщающих породы жидкостей. К числу факторов, определяющих экранирующую способность пород в конкретных условиях залежи нефти и газа, относится также и их деформационное поведение при типичном для массива напряженном состоянии и температурах. Заслуживают внимания исследования объемных деформаций и прочности этих пород в условиях неравномерного трехосного сжатия, вызывающего у большинства горных пород разуплотнение их структуры и, как следствие, увеличение проницаемости.

К настоящему времени деформационные и прочностные свойства сульфатно-галогенных и глинистых пород изучены на ограниченном числе типичных разностей. Всего в условиях неравномерного трехосного сжатия при одном—трех значениях $\sigma_{\text{он}}$ исследованы свойства четырех образцов каменной соли, одного образца гипса, одного ангидрита и четырех образцов глинистых пород, на вдавливание испытаны два образца каменной соли, 10 образцов глин и пять аргиллитов. При неравномерном трехосном сжатии исследования проводились на сухих образцах, их результаты представлены в табл. 42.

Анализ результатов изучения деформаций и прочностных показателей пород покрывающих горизонтов в условиях неравномерного

трехосного сжатия показывает, что в зависимости от состава и строения эти породы проявляют при разных уровнях напряжений $\sigma_{\text{он}}$ различные свойства.

Так, глины с малым содержанием примесей деформируются, как правило, пластически, т. е. без разуплотнения структуры, даже при малых величинах эффективных напряжений. При этом глины, перенесшие в условиях залегания большие тектонические деформации, имеют более высокие показатели прочности и меньшие величины деформаций объема.

У каменной соли, как и у глин, способность к остаточной деформации проявляется уже при одноосном сжатии. Всестороннее сжатие оказывает сравнительно малое влияние на величину предела текучести каменной соли, вызывая лишь рост деформаций и замет-

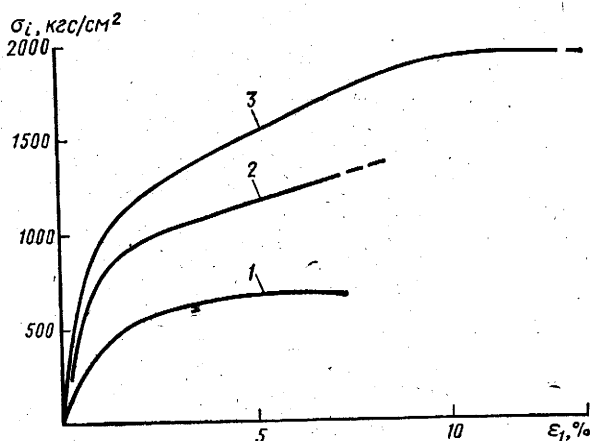


Рис. 38. Диаграммы деформаций каменной соли (обр. 2) при неравномерном трехосном сжатии:

1 — $\sigma_{\text{он}}=250$ кгс/см², $t=20^\circ\text{C}$;
 2 — $\sigma_{\text{он}}=500$ кгс/см², $t=20^\circ\text{C}$;
 3 — $\sigma_{\text{он}}=1000$ кгс/см², $t=100^\circ\text{C}$

ное увеличение коэффициента деформационного упрочнения (сопротивления пластической деформации) (рис. 38).

Следует отметить, что у испытанных плотных образцов поликристаллической каменной соли при значениях $\sigma_{\text{он}}$ до 1000 кгс/см² остаточная деформация сопровождалась значительным разуплотнением структуры, что свидетельствует о развитии межзернового скольжения наряду с внутрикристаллической деформацией.

При величинах $\sigma_{\text{он}}=1000$ кгс/см² и повышенных температурах (100°C) разуплотнение структуры уменьшается или почти прекращается.

Каменную соль отличает относительно равномерное распределение остаточной деформации даже при малых величинах $\sigma_{\text{он}}$.

Количественные различия в прочностных показателях (σ_{is}) и деформационных свойствах (ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_{vqi}) у испытанных образцов каменной соли связаны с различной пористостью и содержанием примесей.

Деформация ангидрита во всем исследованном диапазоне $\sigma_{\text{он}}$ сопровождалась ростом разуплотнения, у гипса при $\sigma_{\text{он}}=$

Деформационные и прочностные свойства сульфатно-галогенных и глинистых пород в условиях неравномерного трехосного сжатия ($t=20-100^{\circ}\text{C}$)

Порода	№ образца	$K_p, \%$	$\sigma_{\text{ОН}}, \text{кгс/см}^2$	t°, C	$\epsilon, \%$		$\sigma_t, \text{кгс/см}^2$		$\epsilon_{v\sigma t}^*, \%$	K_{vt}^*	Стадия деформации
					ϵ_1	$\epsilon_2 = \epsilon_3$	$\sigma_{t\text{max}}^*$	σ_{ts}			
Каменная соль	3	3,76	500	20	14,5	12,6	620	180	+10,7	0,75	Пластическая деформация
			1000	20	18,2	13,7	700	200	+9,2	0,51	
Каменная соль	245	3,32	1	20	8,7	7,5	285	140	+6,4	0,77	То же
			1000	100	11,4	8,5	415	155	+5,6	0,50	
Каменная соль	2	2,45	250	20	6,9	7,6	675	200	+8,3	1,26	„
			500	20	10,0	7,85	1330	250	+5,7	0,58	
			1000	100	13,8	7,6	1840	360	+1,4	0,10	
Каменная соль	967	1,05	250	20	6,5	11,4	440	180	+16,3	2,55	„
			500	20	13,4	10,9	980	200	+8,4	0,64	

Ангидрит	728	1,13	250	20	1,4	2,6	$\sigma_{ic} = 1580$	1380	+3,8	3,45	Разрушение < 18°
			500	20	3,1	3,0	$\sigma_{ic} = 2940$	1880	+2,9	1,0	Разрушение < 34°
			1000	100	10,4	8,2	2650	1500	+6,0	0,59	Пластическая деформация
Гипс	1	28,9	250	20	8,2	7,3	$\sigma_{ic} = 825$	500	+6,4	0,80	Разрушение < 30°
			500	20	9,3	8,3	945	620	+7,3	0,80	Пластическая деформация
			1000	100	12,2	6,45	1320	650	+0,7	0,06	То же
Каолинит просяновский	2Г		750	20	46,2	17,9		105	-10,4	—	„
Бентонит огланлинский	1Г	29,9	750	20	15,1	5,1		740	-4,9	—	„
Глина алевроитовая	3Г	24,7	750	100	17,1	4,0		180	-9,1	—	„
Глинистый сланец	4Г	18,9	1	20			$\sigma_{ic} = 210$	190			Разрушение
			1000	20	20,0	9,0	1430	1150	-2,0	—	Пластическая деформация
			2000	20	20,0	7,5		1400	-5,0	—	

Примечание. Значения $\sigma_{i \max}$, $\varepsilon_{\sigma i}$, $K_{\sigma i}$ даны для стадии пластической деформации, а не разрушения.

$= 1000 \text{ кгс/см}^2$ и $t = 100^\circ \text{C}$ было отмечено резкое снижение величины ε_{vci} и коэффициента интенсивности разуплотнения K_{vi} , свидетельствующее об уменьшении влияния межзерновых эффектов.

Сопоставляя полученные результаты с данными других исследователей по свойствам сульфатно-галогенных пород [15, 189], следует отметить высокую прочность испытанных пород, что, по-видимому, связано с воздействием на них в условиях залегания значительных тектонических напряжений.

Результаты испытаний сухих и смоченных водой глин, а также аргиллитов и каменной соли на вдавливание представлены в табл. 43.

Таблица 43

Деформационные и прочностные свойства сульфатно-галогенных и глинистых пород при вдавливании

Породы	Число образцов	Среда	Свойства при вдавливании		
			$P_{ш}$, кгс/мм ² от—до	P_0 , кгс/мм ² от—до	K от—до
Глины разного состава	10	Воздух	—33,5	3,0—19,5	2,6— ∞
		Вода	—11,5	<1,5—8,5	4,1— ∞
Аргиллиты	5	Воздух	18,3—47,9	10,7—20,2	3,0—6,4
Каменная соль	2	"		5,5—9,9	∞

Как можно видеть, каменная соль и некоторые глины при вдавливании не дают хрупкого разрушения ($K = \infty$), предел текучести таких пород редко превышает 10 кгс/мм². Прочность аргиллитов зависит от пористости и состава, по деформационным свойствам эти породы относятся к классу пластично-хрупких пород.

Небольшой объем проведенных испытаний не позволяет сделать какие-либо общие выводы о деформационном поведении пород покрывающих горизонтов.

В дальнейшем необходима постановка более детальных исследований с оценкой давления прорыва и проницаемости пород, учетом влияния временного фактора на деформационные свойства, что позволит в первом приближении дать классификацию пород покрывающих горизонтов по их экранирующей способности при объемных напряженных состояниях.

Исходя из полученных данных, можно лишь предположить, что в зонах тектонической активности сохранение экранирующих свойств более вероятно у глин, чем у каменных солей и ангидритов.

*
*
*

Проведенное изучение деформационных и прочностных свойств метаморфических, магматических и осадочных горных пород позволяет сделать вывод о том, что для большинства горных пород при неравномерном трехосном сжатии и уровне эффективных напряжений, типичных для первых десяти километров земной коры, характерна общность механизма остаточных деформаций. Эта общность обусловлена особенностями состава и строения реальных горных пород и выражается в неразрывной связи контролируемого изменения объема горных пород с процессами их деформации и разрушения.

§ 3. Экспериментальное обоснование единой схемы деформационного процесса горных пород при неравномерном всестороннем сжатии

Из анализа особенностей процесса деформации и разрушения следует, что деформацию изменения формы у горных пород нельзя рассматривать в отрыве от деформации изменения объема, которая является определяющей характеристикой деформационного поведения пород при любом объемном напряженном состоянии. Такое рассмотрение процесса, основанное на учете большой роли границ зерен, приводит к обоснованию единой схемы деформационного процесса. В соответствии с этой схемой текущее состояние тела (породы) определяется суммой эффектов повышения (под действием равномерного всестороннего сжатия) и понижения (в результате деформации, разуплотняющей структуры породы) несущей способности породы.

Согласно предлагаемой схеме деформационного процесса критерием начала существенного развития нарушений несущей способности породы является предел упругости или близкая к нему величина — предел текучести σ_{is} . Предел прочности σ_{ic} является критерием, характеризующим напряженное состояние породы в завершающей стадии процесса нарушения несущей способности пород; после достижения которой начинается процесс общего разрушения породы или катастрофическая потеря несущей способности породы.

В качестве основных характеристик деформационного поведения пород предлагается принять коэффициент их сжимаемости β и коэффициент предельного разуплотнения K_{vic} . Каждый из этих коэффициентов, как было показано во II главе, должен быть функцией напряжения $\sigma_3 = \sigma_{он} (\sigma_{эф})$.

Зависимость $\beta = \varphi(\sigma_3)$ для разных пород детально изучена в главе IV.

В настоящей главе на основании данных табл. 35, 39 и 42 сделан анализ зависимости коэффициента предельной интенсивности разуплотнения K_{vic} от σ_3 , типичные кривые этой зависимости для разных пород даны на рис. 39—41. Анализ показал, что во всех случаях кривые $K_{vic} = \xi(\sigma_3)$ приближенно описываются экспоненциальной зависимостью вида

$$K_{vic} = K_{vc} e^{-A\sigma_3}, \quad (V.13)$$

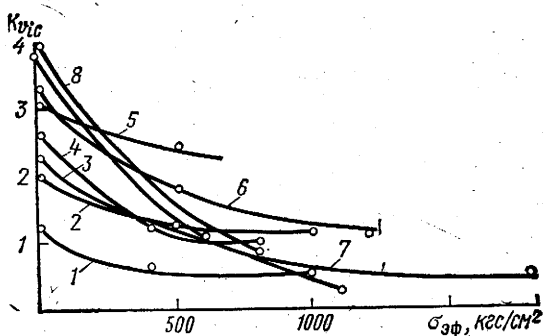


Рис. 39. Типичные зависимости K_{vic} от σ_3 для песчано-алевритовых пород:

1 — обр. 253/59; 2 — обр. 138/69;
3 — обр. 576/69; 4 — обр. 731К;
5 — обр. 128-5/1; 6 — обр. III;
7 — обр. 536К; 8 — обр. 1739К

Рис. 40. Типичные зависимости K_{vic} от σ_3 для карбонатных пород:

1 — обр. 2051; 2 — обр. 2167; 3 — обр. 2155; 4 — обр. 1К; 5 — обр. 2005; 6 — обр. 2076

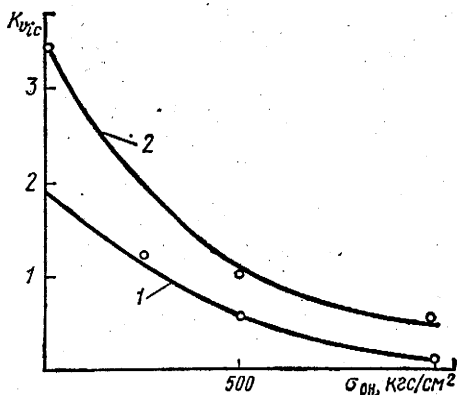
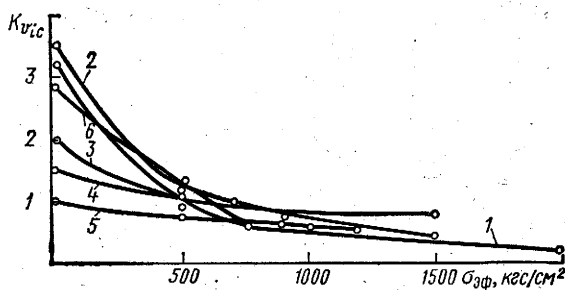


Рис. 41. Зависимости K_{vic} от σ_3 для каменной соли (кривая 1 — обр. 2) и ангидрита (кривая 2 — обр. 728)

где $K_{вс}$ — показатель интенсивности разуплотнения при одноосном сжатии, т. е. при $\sigma_3 = 1 \text{ кгс/см}^2$; A — постоянная, зависящая от состава и структурных особенностей пород.

В табл. 44 и 45 приведены значения $K_{вс}$ и A для ряда испытанных разностей карбонатных и песчано-алевритовых пород.

В главе IV уже обсуждалась зависимость значений коэффициента сжимаемости пород β и их порового пространства β_n от литолого-петрографических особенностей деформируемых пород.

В табл. 44 и 45 рассмотрена связь коэффициента предельной интенсивности разуплотнения разных пород K_{vic} с предложенными в главе II показателями их состава и структуры, ответственными за деформационное поведение пород.

Таблица 44

Интенсивность разуплотнения (K_{vic}) песчано-алевритовых пород в зависимости от показателей, характеризующих их состав и строение

Класс пород	№ образца	Значения постоянных в уравнении (V.13)		Показатели состава и структуры пород			
		$K_{вс}$	A	K_v	K_s	K_n	K_c
II	253/59	1,20	0,0014	0	1,0	17,1	0
III	576/69	2,30	0,0011	0,21	6,7	17,0	0,10
IV	138/69	2,0	0,00051	0,36	5,0	16,2	0,14
VII	128—5/1	3,05	0,00043	0	10,0	19,3	0,50
VIII	731K	2,60	0,0013	1,0	12,5	17,3	0,05
IX	775—5/2	4,0	0,0022	0	6,7	8,7	0
X	1739K	4,0	0,0019	0,75	16,6	20,4	0,15
XI	III	3,3	0,001	0,80	12,5	5,6	0,03
XII	536K	3,9	0,0011	0,75	12,5	6,3	0,30

Таблица 45

Интенсивность разуплотнения (K_{vic}) карбонатных пород в зависимости от показателей, характеризующих их состав и строение

Класс пород	№ образца	Значения постоянных в уравнении (V.13)		Показатели состава и структуры пород			
		$K_{вс}$	A	K_v	K_s	K_n	K_c
I	2051	3,25	0,0025	0	20,0	0,68	0
II	2167	3,5	0,0020	1,0	500	2,10	0,25
	2155	2,0	0,0010	0	100,0	2,71	0
	1K	1,55	0,0008	0,37	130,0	22,7	0,25
III	2005	1,0	0,0005	0	125,0	1,86	0
IV	2076	2,8	0,0020	1,25	4,0	2,45	0,20

Примечание. У карбонатных пород показатели состава вычисляются для основной массы породы.

Как следует из табл. 44 и 45, все введенные показатели изменяются в достаточно широких пределах, в связи с чем при обобщении большого числа определений возможно установление надежных количественных зависимостей.

В настоящее время имеющийся материал позволяет лишь отметить некоторые тенденции. Например, при прочих равных условиях, по-видимому, следует ожидать увеличения интенсивности разуплотнения с уменьшением диаметра породообразующих минералов (с увеличением коэффициента K_s), увеличением содержания малопрочного цементирующего вещества (коэффициента K_c), с ростом неоднородности состава скелета (с увеличением коэффициента K_v) и уменьшением пористости.

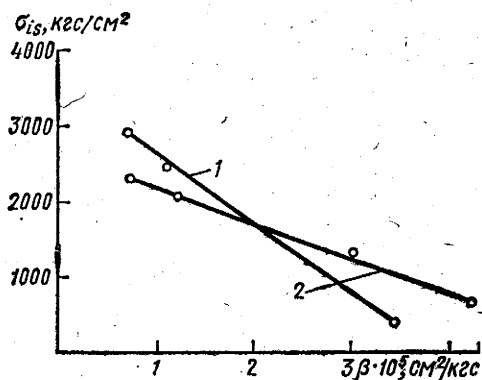


Рис. 42. Типичные зависимости σ_{is} от β для песчано-алевритовых пород: 1 — обр. 138/69; 2 — обр. 825/59

Представляло интерес подтверждение важнейших положений предлагаемой схемы деформационного процесса — о зависимости сопротивления породы развитию в ее структуре неупругих нарушений (т. е. предела текучести породы σ_{is}) от коэффициента сжимаемости породы и сопротивления породы разрушению (т. е. предела прочности σ_{ic}) от коэффициента интенсивности разуплотнения K_{vic} .

Для обоснования первого из приведенных положений соответствующие данные табл. 3, 9 и 35, 39 были представлены в системе координат $\sigma_{is} - \beta$. На рис. 42, 43 приведены некоторые графики $\sigma_{is} = f(\beta)$ для песчано-алевритовых и карбонатных пород. Как можно видеть, зависимость σ_{is} от β близка к линейной и в промежутке между точками (σ_s, β_{\max}) и $(\sigma_{is\text{ пр}}, \beta_{\text{пр}})$ может быть выражена уравнением:

$$\sigma_{is} = b - a\beta, \quad (\text{V.14})$$

где a и b — постоянные, которые легко выразить с помощью показателей, имеющих конкретный физический смысл,

$$a = \frac{\sigma_{is\text{ пр}} - \sigma_s}{\beta_{\max} - \beta_{\text{пр}}}; \quad (\text{V.15})$$

$$b = \sigma_s + (\sigma_{is\text{ пр}} - \sigma_s) \left(1 + \frac{\beta_{\text{пр}}}{\beta_{\max} - \beta_{\text{пр}}} \right). \quad (\text{V.16})$$

В приведенных выражениях (V.15) и (V.16) для a и b : σ_s — предел текучести при одноосном сжатии; β_{\max} — коэффициент максимальной сжимаемости породы при $\sigma_3(\sigma_{\text{эф}})_{\min}$; $\sigma_{is \text{ пр}}$ — значение предела текучести породы, достигаемое при высоких значениях σ_3 , когда предел текучести перестает зависеть от σ_3 и порода начинает вести себя подобно пластическому металлу; $\beta_{\text{пр}}$ — значение коэффициента сжимаемости, при котором предел текучести σ_{is} перестает зависеть от σ_3 .

В табл. 46 приведены значения коэффициентов a и b в уравнении (V.14) для разных пород, подсчитанные по экспериментальным данным (рис. 42, 43).

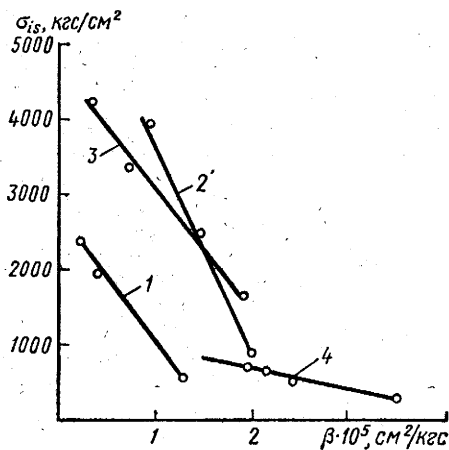


Рис. 43. Типичные зависимости σ_{is} от β для карбонатных пород:

1 — обр. 2051; 2 — обр. 2167; 3 — обр. 2228;
4 — обр. 1К

Таблица 46

Породы	№ образца	$a \cdot 10^{-5}$	b
Песчано-алевритовые	138/69	890	3625
	825/59	500	2760
Карбонатные	2051	1545	3120
	2167	1175	4950
	2228	1800	3430
	1К	420	1140

Выражение (V.14) имеет большое практическое значение, поскольку с его помощью впервые представляется возможным описать явление упрочнения горных пород под действием всестороннего сжатия. Оно позволяет также прогнозировать поведение горных пород при высоком уровне напряжений на основании результатов их испытаний при низких величинах всестороннего сжатия.

Для того чтобы завершить экспериментальное обоснование комплекса зависимостей, составляющих единую схему деформацион-

ного процесса, необходимо выявить связь с K_{vic} величины $\Delta\tau_{ic} = \frac{\sigma_{ic} - \sigma_{is}}{2}$, являющейся мерой сопротивления породы в процессе неупругого изменения ее формы.

На рис. 44 и 45 приведены зависимости $\Delta\tau_{ic} = F(K_{vic})$ для некоторых песчано-алевритовых и карбонатных пород, постороенные по

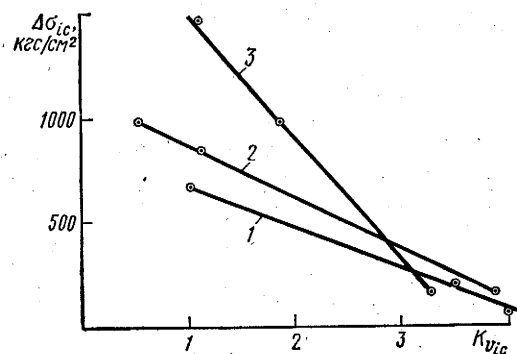


Рис. 44. Зависимости $\Delta\tau_{ic} = F(K_{vic})$ для песчано-алевритовых пород:

1 — обр. 775—5/2; 2 — обр. 536К; 3 — обр. Ш1

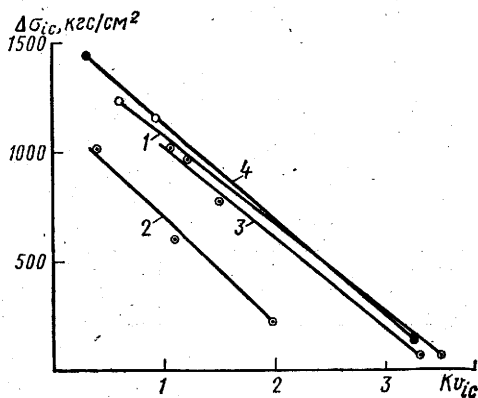


Рис. 45. Зависимости $\Delta\tau_{ic} = F(K_{vic})$ для карбонатных пород:

1 — обр. 2167; 2 — обр. 2155; 3 — обр. 2014; 4 — обр. 2051

данным табл. 35 и 39. Анализ показывает, что эти зависимости также близки к линейным и могут быть выражены с помощью уравнения

$$\Delta\tau_{ic} = \Delta\tau_{ic\text{пр}} - \frac{\Delta\tau_{ic\text{пр}}}{K_{vic\text{пр}}} K_{vic}, \quad (\text{V.17})$$

где $\Delta\tau_{ic\text{пр}}$ — мера сопротивления породы при неупругом изменении формы, не сопровождающемся разуплотнением структуры; $K_{vic\text{пр}}$ — коэффициент предельного разуплотнения породы при упруго-хрупком ее разрушении, когда предел текучести равен пределу прочности.

Подсчитанные для пород, представленных на графиках 44 и 45, значения $\tau_{ic\text{пр}}$ и $K_{vic\text{пр}}$ приведены в табл. 47.

Породы	№ образца	τ_{lc} пр, кгс/см ²	K_{vic} пр
Песчано-алевритовые	775—5/2	880	4,4
	536K	1120	4,6
	Ш1	2100	3,55
Карбонатные	2167	1500	3,65
	2155	1200	2,2
	2014	1440	3,45
	2051	1580	3,55

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования в общих чертах подтвердили правильность предложенного подхода к оценке прочностных показателей пород на основе учета особенностей их деформационного поведения в условиях объемных напряженных состояний.

§ 4. О влиянии деформации на коллекторские свойства горных пород при неравномерном всестороннем сжатии

Поскольку для большинства горных пород характерна способность к разуплотнению в процессе пластической деформации (при преимущественном развитии деформации межзернового механизма) в условиях неравномерного всестороннего сжатия, представляет интерес анализ изменений их коллекторских свойств в связи с разуплотнением.

Как следует из проведенных исследований, в результате деформации при неравномерном напряженном состоянии в породах происходит образование дополнительной (к исходной) деформационной пустотности. Соизмеримость объема деформационной пустотности с исходным объемом порового пространства свидетельствует о ее влиянии на емкостные характеристики пород.

Анализ данных, приведенных в табл. 35 и 39, показывает, что эффект разуплотнения пород ($+\varepsilon_{v\sigma i}$) под действием напряжений σ_i , подобных тектоническим, может быть настолько значительным, что он полностью снимает уплотнение пород, вызванное действием эффективных напряжений $\sigma_{\text{эф}} (-\varepsilon_{v\sigma \text{эф}})$, а в ряде случаев может даже увеличить пустотность в 1,5—2 раза и более.

Влияние тектонических напряжений на формирование пустотного пространства пород в условиях их естественного залегания, по-видимому, много сложнее, чем в условиях эксперимента.

На процесс формирования пустотности в природных условиях большое влияние оказывают процессы растворения и выщелачивания. Однако эти процессы, как можно предположить, должны более активно протекать в предварительно деформированных породах.

Таким образом, значение изученных закономерностей заключа-

ется главным образом в определении тенденции к развитию большей или меньшей разуплотненности (а следовательно, и емкости) в породах различных литологических типов под действием тектонических напряжений.

Явление разуплотнения, как было показано, характерно для весьма разнообразных по составу и структуре пород, но развитие его протекает по-разному.

Так, например, у органогенных известняков отмечены максимальные величины деформационного прироста пустотности, к тому же получающего равномерное развитие в объеме породы. У кварцевых песчаников, метаморфических и магматических пород остаточные изменения в изученном диапазоне эффективных напряжений часто носят локализованный характер. По-видимому, с этой особенностью деформационного поведения связано большее развитие трещинных коллекторов среди разностей карбонатных пород и обычно небольшие по размерам залежи в коллекторах трещинного типа среди песчано-алевритовых, метаморфических и магматических пород.

Изученные закономерности находят подтверждение при анализе особенностей строения и коллекторских свойств трещинных коллекторов [113, 114].

Так, если у органогенных известняков вторичная пустотность, как правило, больше, чем у микрозернистых и соизмерима по объему с первичной, то и по данным эксперимента наибольшее развитие остаточной деформации и максимальная разуплотненность структур отмечены тоже у пород этого типа.

У других плотных карбонатных пород как в природных, так и в моделируемых при эксперименте условиях вторичная пустотность получает меньшее развитие.

В эксперименте выявлено большое разуплотнение высокопористого доломитового известняка (до двух раз), хотя известно, что развитие коллекторов трещинного типа в высокопористых породах — исключительно редкое явление. Сравнение этой породы с другими с помощью обобщенного показателя K_{vic} показывает, что разуплотнение, приходящееся на единицу деформации у коробчеевского известняка несколько меньше, чем у плотных карбонатных пород. Следовательно, в условиях совместной деформации пород в разрезе в высокопористой породе прирост пустотности и развитие трещиноватости должны быть меньше, хотя и не исключаются. Ранее отмечалось развитие трещиноватости в породах, характеризующихся повышенной пористостью, в частности из рифогенных зон [22].

Разуплотнение структуры пород в процессе остаточной деформации должно способствовать и росту проницаемости пород. Если у коллекторов трещинного типа основное влияние на фильтрационные свойства пород оказывают развивающиеся при определенном уровне напряжений трещины, размеры которых, как показали исследования ВНИГРИ [113, 114], должны быть больше размера зе-

рен, то в коллекторах порового типа под действием небольших по величине тектонических напряжений возможно развитие деформационного разуплотнения без образования трещин.

Связь $K_{пр}$ с абсолютной величиной прироста объема пород не является однозначной.

На рис. 46, построенном как по нашим данным для песчаника, так и по данным А. Н. Ставрогина [117] для мрамора, показаны разные зависимости ϵ_v и $K_{пр}$ от $\sigma_{он}$. Если ϵ_v сначала увеличивается весьма сложным образом до некоторого максимального значения, а затем уменьшается, то $K_{пр}$ с самого начала непрерывно уменьшается. Следовательно, по величине ϵ_v не представляется возможным судить о значении $K_{пр}$.

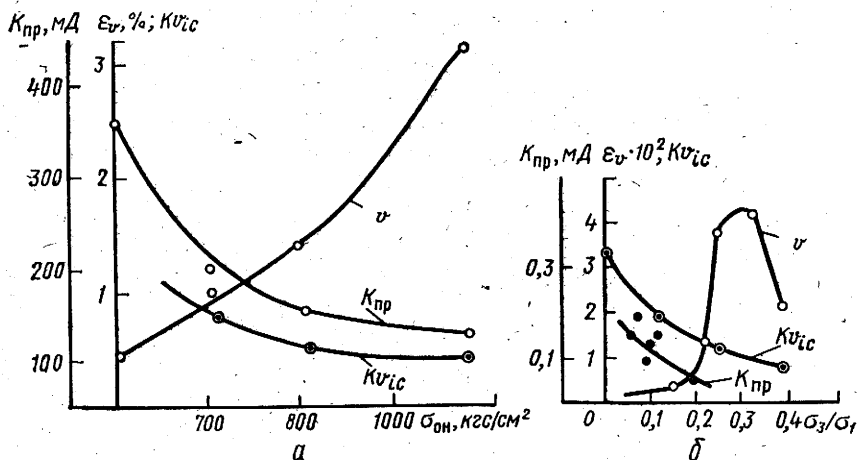


Рис. 46. Зависимости прироста объема (ϵ_v), коэффициента интенсивности разуплотнения (K_{vic}) и коэффициента проницаемости ($K_{пр}$) от всестороннего сжатия при неравномерном трехосном напряженном состоянии:

а — песчаник обр. 731К; б — мрамор

При объяснении этого явления следует учесть, что увеличение ϵ_v с ростом σ_3 связано с увеличением деформации ϵ_1 до разрушения, т. е. с ростом пластичности породы. Это усложняющее явление можно исключить из рассмотрения, если взять за основу не величину прироста объема ϵ_v , а параметр предельного разуплотнения K_{vic} .

На рис. 46 приведены зависимости K_{vic} и $K_{пр}$ от $\sigma_{он}$ (в работе [117] от $\frac{\sigma_3}{\sigma_1}$). Как можно видеть, закономерность изменения K_{vic} от всестороннего сжатия очень близка к закономерности изменения $K_{пр}$. В связи с этим, можно записать, что

$$K_{пр} = \eta K_{vic}, \quad (V.18)$$

где η — коэффициент пропорциональности.

Как это следует из рис. 46, с ростом пластичности породы (вызванным увеличением σ_3) $K_{пр}$ уменьшается, а ϵ_v при этом вначале растет, поэтому можно считать, что рост ϵ_v связан с числом N развивающихся микроразрывов, длина которых (меньшая размера зерен) уменьшается с ростом σ_3 .

Поскольку при приближенном рассмотрении прирост объема при деформации пропорционален произведению числа образовавшихся микротрещин на их длину, то можно считать, что $K_{vic} = \frac{\epsilon_v}{\epsilon_{1п}}$

характеризует главным образом длину (а, следовательно, и раскрытость) деформационных микроразрывов (микротрещин). В этом, по-видимому, и заключается физический смысл связи K_{vic} с $K_{пр}$.

Анализ и обобщение проведенных экспериментальных исследований деформационных и прочностных свойств большого числа осадочных, метаморфических и магматических горных пород в условиях различных неравномерных напряженных состояний позволили выявить некоторые общие и новые особенности процесса деформации пород в условиях, характерных для исследуемых глубин.

К числу наиболее важных особенностей относятся: общность механизма остаточной деформации — увеличение объема пород, контролируемое их литолого-петрографическими особенностями и определяющее характер процессов деформации и разрушения пород; связь увеличения объема, количественно выраженного с помощью коэффициента интенсивности разуплотнения, с коллекторскими свойствами пород и, прежде всего, с их проницаемостью.

Глава VI

НЕКОТОРЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ОБЪЕМНЫХ НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГЕОЛОГИИ, БУРЕНИЯ И РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В нефтяной промышленности освоение глубин более 5—6 км стало уже практической задачей, связи с чем возникла необходимость в оценке изменений физико-механических свойств горных пород под действием термодинамических параметров, типичных для этих глубин.

В последние годы развивается ряд направлений применения данных по физико-механическим свойствам пород в объемно-напряженном состоянии при решении разных задач геологии и горного дела [2, 10, 13, 27, 60, 63, 64, 92, 100, 108—111, 121, 125, 127, 139].

Результаты, полученные в настоящем исследовании, пополняют представления о физической природе деформаций горных пород в термодинамических условиях, характерных для диапазона глубин залегания пород от 1 до 10—15 км.

Для механики горных пород важное значение имеет выявленная особенность механизма остаточной деформации большинства характерных разностей осадочных, изверженных и метаморфических пород, слагающих разрезы верхней части земной коры, — преимущественное развитие межзернового скольжения, сопровождающегося разуплотнением структуры пород.

Для оценки упругих и неупругих изменений коллекторских свойств горных пород при их извлечении из глубоких скважин на поверхность необходимы данные по деформационным свойствам и проницаемости пород-коллекторов нефти и газа при равномерном всестороннем сжатии.

Установленные предельные величины эффективных напряжений уточняют условия перехода к упруго-пластическому режиму при разработке глубокозалегающих залежей нефти и газа.

Результаты исследований деформационного поведения пород при неравномерном всестороннем сжатии позволяют развить новые представления о влиянии тектонической деформации на коллекторские свойства пород и экранирующую способность покрышек.

В комплексе с результатами изучения эпигенетических изменений данные по деформационным свойствам пород могут быть использованы для прогноза коллекторских свойств горных пород на глубинах, еще не достигнутых бурением.

Представляется перспективным привлечение массовых определений деформационных и прочностных свойств горных пород для оценки влияния тектонической деформации на формирование коллекторских свойств пород.

Обобщение результатов изучения прочностных свойств горных пород в условиях неравномерного трехосного сжатия, растяжения при боковом давлении и вдавливания в виде кривых предельных напряженных состояний представляет интерес для решения многих задач разрушения горных пород, управления горным давлением, оценки устойчивости пород на стенках глубоких скважин.

Не менее важны результаты изучения изменений прочности пород с ростом напряжений всестороннего сжатия для оценки и прогноза сопротивления горных пород разрушению при сверхглубоком бурении.

§ 1. Изменения физических свойств пород-коллекторов нефти и газа в процессе их упругой и неупругой деформации при объемных напряженных состояниях

Результаты исследований коллекторских свойств горных пород в условиях эффективных напряжений и температур, типичных для глубин залегания пород, в последние годы находят все более широкое применение при подсчетах геологических запасов нефти и газа, в гидродинамических расчетах, связанных с добычей нефти и газа, а также при решении других задач разработки нефтяных и газовых месторождений [57, 60, 62, 66, 142].

При решении подобных задач, но для более глубоко залегающих месторождений нефти и газа, должны найти применение и результаты проведенного изучения объемных деформаций, пористости и проницаемости пористых песчано-алевритовых и карбонатных пород в условиях эффективных напряжений и температур, близких к пластовым на глубинах до 10 и более километров.

Об определении изменений коллекторских свойств пород, извлеченных из глубоких скважин на поверхность

В работах В. М. Добрынина дана методика оценки упругих (обратимых) изменений с глубиной коэффициентов пористости и проницаемости песчано-алевритовых пород-коллекторов, в том числе и содержащих глинистые включения в порах, а также приведены графики зависимости $\Delta K_{п}/K_{п}$ и $\Delta K_{пр}/K_{пр}$ от глубины для пород с различными литолого-петрографическими особенностями, оцениваемыми с помощью коэффициентов максимальной сжимаемости порового пространства.

С помощью этих графиков представляется возможным вносить поправки на изменение коллекторских свойств пород при их извлечении на поверхность, связанные с восстановлением упругих деформаций при снятии напряжений, действующих на глубине залегания пород. При этом рассматривается случай действия равномерного всестороннего сжатия (эффективного напряжения $\sigma_{эф} = \sigma_{он} - p_n$), снятие которого при одновременном снижении температуры вызывает увеличение коэффициентов пористости и проницаемости пород.

Для оценки обратимых изменений коэффициентов пористости и проницаемости характерных литологических типов песчано-алевритовых и карбонатных пород при их извлечении на поверхность с больших глубин результаты настоящего исследования были сведены в табл. 5, 7, 11, а также изображены графически на рис. 21, 22 и 25.

Как в таблицах, так и на графиках отмечены напряжения (глубины залегания), при которых в породах возможно развитие неупругих (необратимых) изменений пористости и проницаемости. Используя эти данные, в ряде случаев возможно судить о необратимых преобразованиях в породах при извлечении керна на поверхность.

Так, когда коллекторские свойства извлеченной породы оказываются значительно ниже характерных для исследованной разности пород, а в процессе вскрытия пласта или добычи нефти имело место снижение пластового давления, можно предполагать, что порода претерпела необратимые пластические деформации, связанные с ростом эффективных напряжений выше уровня $\sigma_{эф. пр.}$ Напротив, когда значения коэффициентов пористости и проницаемости выше ожидаемых, исходя из состава и эпигенетических преобразований, можно предполагать, что при снятии напряжений в процессе подъема породы с забоя в ней произошли необратимые нарушения, связанные с разрывом связей по границам зерен.

Сопоставление эффективных напряжений на глубинах залегания с напряжениями на границе упругой устойчивости пород соответствующего класса дает представление об истинном деформационном состоянии пород, извлеченных на поверхность.

Выявленная у большинства испытанных пород при определенных величинах $\sigma_{эф}$ и $t^\circ C$ область необратимых изменений, как уже указывалось, характеризуется повышением значений коэффициентов сжимаемости пород и их порового пространства. В зависимости от состава и структурных особенностей пород эта область проявляется при значениях $\sigma_{эф}$ и $t^\circ C$, характерных для разных глубин залегания пород. Установлено, что глубины $H_{пр}$ закономерно снижаются при переходе от II—III к X—XII классам принятой классификации песчано-алевритовых пород, что связано с увеличением в этом направлении неравномерности строения пород, усложнением их состава и увеличением содержания малопрочного цементирующего вещества.

О порядке соответствующих напряжениям $\sigma_{эф. пр}$ и температурам предельных глубин, при достижении которых у пород разных литологических типов начинаются необратимые деформации, представляется возможным судить по данным табл. 47а.

Таблица 47а

Глубины проявления необратимых изменений в песчано-алевритовых породах разных типов

Класс пород	Типы пород	Предельные значения глубин $H_{экр. пр}$ (от — до), на которых начинаются необратимые деформации
II—V	Крупно- и среднезернистые песчаники Мелкозернистые песчаники Алевритовые песчаники Крупнозернистые алевриты	$6,5 \leq H_{экр. пр} \leq 9,0$ $8,0 \leq H_{экр. пр} \leq 11,0$
VI—VIII	Мелкозернистые песчаники Крупнозернистые алевриты Мелкозернистые алевриты	$3,0 \leq H_{экр. пр} \leq 9,0$
IX—XII	Глинисто-алевритовые песчаники Глинистые мелкозернистые и тонкозернистые алевриты Глинистые сильно сцементированные песчаники и алевриты Песчаники с сильной вторичной цементацией срастанием зерен	$2,3 \leq H_{экр. пр} \leq 5,0$

Для тех пород, которые под действием эффективных напряжений, больших $\sigma_{эф. пр}$, испытывают необратимые изменения, вызванные микроразрывными нарушениями в структуре, использование данных по коллекторским свойствам пород после их извлечения с глубин залегания для последующего расчета их упругого изменения под действием $\sigma_{эф}$ и температуры недопустимо. Расчет в этом случае может привести к получению показателей K_n и $K_{пр}$ на глубине, превышенных в несколько раз.

Еще сложнее вопрос об оценке изменений коллекторских свойств пород, находящихся в условиях залегания под действием неравномерного объемного напряженного состояния (в тектонически активных участках земной коры).

Здесь следует отметить одну интересную особенность, выявленную при экспериментальном изучении влияния напряжений σ_i , подобных тектоническим, на деформационное поведение пород. При сопоставлении необратимых объемных деформаций пород, измеренных в процессе наложения $\sigma_{эф}$ и σ_i и после их снятия, было установлено, что часть необратимых деформаций восстанавливается,

что, по-видимому, связано с процессом смыкания наиболее мелких микротрещин при смене неравномерного объемно-напряженного состояния равномерным ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 =$ атмосферному давлению).

Этот эффект может иметь место и при извлечении тектонически деформированных пород из скважины на поверхность. Он, в частности, объясняет часто наблюдаемое несоответствие данных по коллекторским свойствам пород (особенно трещинного типа), оцененным с помощью промыслово-геофизических методов в условиях их залегания и по керну пород, извлеченных на поверхность.

Возможность оценки влияния тектонических напряжений на коллекторские свойства пород связана с постановкой измерений составляющих горного давления в условиях залегания пород.

О необратимых изменениях коллекторских свойств пород в процессе разработки нефтяных и газовых месторождений

Значения предельных эффективных напряжений и температур, при которых отмечены необратимые изменения пористости и проницаемости, в ряде случаев близки к характерным значениям $\sigma_{эф}$ и $t^\circ C$ на глубинах разрабатываемых месторождений нефти и газа.

Это позволяет предположить, что на уже освоенных глубинах при разработке залежей с коллекторами определенных типов возможно проявления упруго-пластического режима.

Как известно, впервые представления об упруго-пластическом режиме были развиты в работах А. П. Крылова и Г. И. Баренблатта [79].

В последние годы, в связи с вводом в разработку новых, особенно глубоко залегающих месторождений, эти представления, так же как выводы настоящего и других экспериментальных исследований [57], получили ряд подтверждений.

Явления необратимой деформации песчано-алевритовых коллекторов при разработке глубоко залегающих месторождений на территории наблюдались в ряде нефтяных районов (в Грозном, в Краснодарском крае).

Интересные данные об изменении в процессе эксплуатации проницаемости пород продуктивного горизонта БВ₈ Мегионского нефтяного месторождения были приведены в работе [58]. Продуктивный горизонт БВ₈ залегает на глубине 2160 м и представлен сильно измененными полимиктовыми песчаниками. При снижении пластового давления на 10—15% против начального уровня, т. е. при увеличении $\sigma_{эф}$ до значений в 315—350 кгс/см², были отмечены резкие необратимые изменения коэффициента проницаемости пород, глубины, на которых было отмечено возникновение необратимых изменений проницаемости пород, находятся в хорошем соответствии с экспериментально установленными предельными значениями глубин (см. табл. 47 а).

Учитывая характерную особенность остаточной деформации горных пород — разрывные нарушения по границам зерен, можно ожидать и более сложных изменений коллекторских свойств пород при напряжениях больших $\sigma_{эф. пр.}$.

Так, в частности, рассмотрение данных табл. 6 показывает, что в случае необратимой деформации пород катакластического механизма последующее снижение эффективного напряжения может вызвать повышение коэффициента проницаемости до значений, больших чем первоначальные.

В связи с этим, представляет интерес анализ результатов эксплуатации продуктивного кумского горизонта эоценовых отложений на Левкинском нефтяном месторождении Краснодарского края. Кумский горизонт (глубина залегания 4350—4500 м) представлен алевролитами глауконит-кварцевого состава с глинистым цементом (10—15%) и эпигенетической цементацией растворения зерен сильной степени, коллекторские свойства которых характеризуются следующими показателями: $4\% \leq K_{п} \leq 20\%$; $0 \leq K_{пр} \leq 6$ мД. Резкое снижение дебита (с 100—500 до 1—14 т/сут) было отмечено при величинах депрессий в сотни атмосфер ($\approx 10\%$).

Сопоставление величин напряжений, действующих на породы-коллекторы кумского горизонта, с предельными для аналогичных пород величинами $\sigma_{эф. пр}$ указывает на возможность развития необратимых деформаций в породах призабойной зоны.

Поскольку при эксплуатации кумского горизонта периодически отмечалось повторное увеличение дебита, можно предположить, что в механизме необратимой деформации исследуемых коллекторов преобладали микроразрывные нарушения по границам зерен, а не пластическое течение, в результате чего при частичном восстановлении давления происходило раскрытие микротрещин, сопровождающееся увеличением дебита.

Известно, что глубины осваиваемых месторождений нефти и газа ежегодно возрастают, в связи с чем явления, подобные вышерассмотренным, должны все чаще встречаться в разных нефтедобывающих районах страны. Исходя из этого, экспериментальным определением величин предельных эффективных напряжений для пород-коллекторов разных литологических типов следует уделять большее внимание, учет же величин $\sigma_{эф. пр}$ при проектировании режимов разработки глубоко залегающих месторождений, по-видимому, будет получать все более широкое применение.

Как показали проведенные исследования, большое влияние на коллекторские свойства пород в условиях залегания, а следовательно, и на процесс разработки месторождений нефти и газа, могут оказать тектонические напряжения.

Для изучения влияния тектонических напряжений на процесс разработки месторождений необходима постановка работ по оценке компонент напряжений, действующих на породы в конкретных условиях их залегания.

Прогноз коллекторских свойств пород на больших глубинах, как правило, основывается на результатах оценки постседиментационных (эпигенетических) изменений в породах с глубиной.

Изучению постседиментационных изменений в породах-коллекторах разных районов в зависимости от глубины их залегания посвящены работы ряда исследователей [73, 75, 106, 116]. Результаты этих исследований позволяют устанавливать эмпирические зависимости коллекторских свойств пород определенных литологических типов от глубины, суммирующие влияние эпигенетических преобразований в поровом пространстве, а также необратимых деформационных изменений под действием эффективных и тектонических напряжений в определенных геологических условиях.

В последние годы В. М. Добрынин [62, 63] обобщил результаты изучения эпигенетического преобразования пород с глубиной, предложив для однородных хорошоотсортированных кварцевых песчаников методику прогнозной оценки пористости K_{Π}^H на заданной глубине H по известной пористости K_{Π} на меньшей глубине

$$K_{\Pi}^H = \frac{K_{\Pi}^h e^{-0,14\beta_{\Pi}(\tau, t^{\circ})(H-h)}}{1 - K_{\Pi}^h (1 - e^{-0,14\beta_{\Pi}(\tau, t^{\circ})(H-h)})}. \quad (VI.1)$$

В предложенном уравнении значение пористости на большей глубине зависит от геотермической характеристики района, учитываемой с помощью величины относительной объемной деформации порового пространства в течение геологического времени τ при влиянии температуры t , т. е. коэффициента сжимаемости $\beta_{\Pi}(\tau, t)$.

Расчеты по формуле (VI.1) показывают, что уменьшение пористости с глубиной меньше в разрезах, характеризующихся низкими геотермическими градиентами $\Gamma = ^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$, чем в разрезах с высокими градиентами (при $\Gamma = 1,43^{\circ} \text{C}/100 \text{ м}$, $\beta_{\Pi} = 13 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{кгс}$, а при $\Gamma = 3^{\circ} \text{C}/100 \text{ м}$, $\beta_{\Pi} = 28 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{кгс}$).

Анализ результатов изучения влияния эпигенетических изменений песчано-алевритовых пород с глубиной показывает, что уменьшение пористости с глубиной происходит более интенсивно в древних отложениях, а у однотипных одновозрастных пород — в районах с более высоким геотермическим градиентом. Исходя из этого, молодые отложения в районах с низкими геотермическими градиентами рассматриваются как более перспективные на больших глубинах, чем древние.

Использование при прогнозе кроме данных об эпигенетической измененности пород также результатов изучения упругого и неупругого изменения их порового объема и проницаемости под действием эффективных напряжений, как оказалось, позволяет производить более тонкую дифференциацию пород при оценке их

перспективности на больших глубинах. В качестве примера могут быть приведены первые результаты применения комплексной методики прогноза коллекторских свойств пород девона и рифея Волго-Уральской области и неогеновых отложений Краснодарского края на больших глубинах.

По данным исследования степени эпигенетической цементации, проведенного Н. В. Смирновой, было установлено, что на коллекторские свойства разновозрастных песчаников Волго-Уральской области разница в глубинах залегания в 1000—1500 м не оказывает заметного влияния. Снижение же коллекторских показателей у пород более древнего возраста в этом районе выражено отчетливо. Так, если у мелкозернистых девонских песчаников коэффициент проницаемости на глубинах в 1600—2200 м колеблется в пределах 200—1700 мД (исключая случаи полной минеральной цементации), то верхнебавлинские мелкозернистые песчаники утрачивают межзерновую проницаемость, вследствие вторичных преобразований в поровом пространстве, на глубинах до 3 км, а нижнебавлинские — на еще меньших глубинах (до 2—2,5 км).

В Предкавказье у песчаников чокракского горизонта увеличение глубины залегания даже на 1000 м вызывает увеличение степени вторичной цементации и уменьшение пористости и проницаемости, что обусловлено высоким геотермическим градиентом (Γ 3° С/100 м). Так, если на глубинах в 1750—2500 м пористость чокракских песчаников $K_{\text{п}}$ равна 10—22%, а проницаемость $K_{\text{пр}} = 300—1370$ мД, то на глубине около 4000 м $K_{\text{п}} = 3—5\%$, а $K_{\text{пр}} = 50—200$ мД.

Сравнение песчаников разного геологического возраста, залегающих ниже 1500 м, в этом районе подтвердило, что снижение коллекторских свойств пород, вследствие увеличения степени эпигенетической цементации, при переходе от молодых к более древним образованиям происходит скачкообразно. Так, например, чокракские отложения Предкавказья сохраняют на глубине в 4000 м $K_{\text{пр}} = 150—200$ мД, породы же мелового возраста в этом районе на тех же глубинах характеризуются значениями $K_{\text{пр}} = 1—20$ мД. Анализ результатов экспериментальных исследований сжимаемости, пористости и проницаемости песчаных пород-коллекторов разного возраста, проведенных рядом исследователей, показал, что максимальное снижение величин пористости и проницаемости у пород, литологически однотипных, характерно для более молодых отложений, особенно на глубинах до 4 км (при больших глубинах различия уменьшаются). Полимиктовые песчаники, плохоотсортированные с карбонатно-глинистым цементом обнаруживают способность к максимальной деформации и снижению проницаемости с давлением, минимальная же деформированность характерна для чистых кварцевых пород. У разновозрастных пород близкого состава относительные изменения объема порового пространства и проницаемости возрастают с уменьшением исходной пористости, что связано, по-видимому, с сужением у исходно низкопористых пород межпоровых каналов до таких малых размеров, что структура порового

пространства становится качественно другой и, в частности, исключает фильтрацию жидкостей или газов.

Результаты комплексных исследований можно использовать для прогноза коллекторских свойств пород исследуемых отложений на больших глубинах следующим образом.

Поскольку в платформенных условиях Волго-Уральской области наблюдается четкая зависимость интенсивности вторичных изменений от возраста пород, нижебавлинские (рифейские) песчаники, отличающиеся к тому же большими упругими деформациями (вследствие их неоднородности и низкой пористости), едва ли могут рассматриваться как перспективные отложения на глубинах свыше 3—4 км.

У этих пород улучшение коллекторских свойств на больших глубинах может быть связано лишь с воздействием тектонических напряжений, способных вызвать разуплотнение структуры пород.

Девонские кварцевые хорошоотсортированные песчаники той же области, как показывает анализ результатов комплексных исследований, могут сохранить коллекторские свойства на глубинах до 8—10 км, в случае эпигенетической цементации слабой и средней степени [115, 116]. Так, например, если в одновозрастной литологически однородной толще пород одного и того же геоструктурного участка на глубинах в 3—4 км встречены породы с $K_{\text{п}} = 18\text{—}20\%$ и $K_{\text{пр}} = 300\text{—}500$ мД, то эпигенетические изменения и упругие деформации этих пород на глубинах в 6—8 км в сумме не должны дать большего снижения коллекторских показателей $K_{\text{п}}$, чем до 16—18%, а $K_{\text{пр}}$ до 180—300 мД. Следует напомнить, что при давлениях, характерных для глубин 10 км, даже у наиболее прочных кварцевых песчаников девона наблюдается возникновение необратимых деформаций, способствующих резкому снижению коллекторских свойств пород. Если учесть, что в условиях длительного нагружения этот эффект, по-видимому, может проявляться и при меньших напряжениях, то глубины порядка 8—10 км для девонских песчаников являются предельными глубинами сохранения их коллекторских свойств.

Как уже указывалось, в одинаковых геологических условиях более молодые отложения, отличающиеся меньшими эпигенетическими изменениями, считаются более перспективными, чем древние. Однако, как показали исследования деформационного поведения, для этих пород характерно большее изменение пористости и проницаемости с давлением, особенно в случае полиминерального состава и плохой отсортированности пород. Следовательно, большую перспективность молодых отложений можно предполагать не во всех случаях, а при определенном минеральном составе и цементе пород этих отложений.

При прогнозе и в этом случае следует исходить из конкретных данных об исходных показателях пористости и проницаемости пород (на глубинах, освоенных бурением), градиентах упругих изменений пористости и проницаемости, изученных в экспериментальных

условиях, учитывая также предел упругой устойчивости пород.

Известны случаи, когда тенденция к закономерному уменьшению пористости и проницаемости пород-коллекторов с глубиной, обусловленная эпигенетическими изменениями, нарушается. Так, например, в Волгоградском Поволжье непроницаемые терригенные породы-коллекторы с низкой пористостью встречаются на разных глубинах, вследствие большого развития вторичных изменений. В то же время в девонских отложениях этого района обнаружены песчаники с коэффициентами проницаемости от 800 до 1000 м на глубинах свыше 3 км, где обычно $K_{пр}$ песчаных пород не превышает 20—30 мД.

Неплотные (или разуплотненные) проницаемые разности песчаников встречены на больших глубинах даже в древних рифейских отложениях Волго-Урала. Так, например, песчаники с проницаемостью до 250 м обнаружены Н. В. Смирновой на некоторых площадях Серноводско-Абдулинского прогиба на глубинах до 4750 м.

Коллекторские свойства песчано-алевритовых пород часто изменяются по площади, не всегда объяснимые литологической изменчивостью пород.

Известно, что песчаники одного из наиболее литологически однородных и выдержанных продуктивных пластов девона — пашийского горизонта — в пределах Татарии характеризуются изменением пористости от 10 до 32%, а проницаемости от нескольких миллиардов до 2000 мД.

Одной из возможных причин как отмеченного разуплотнения пород на больших глубинах, так и изменчивости коллекторских свойств разновозрастных пород по площади на одной и той же глубине, может быть влияние тектонических напряжений, в процессе развития которых в той или иной степени нарушается равномерность напряженного состояния.

Разным стадиям развития тектонических напряжений могут соответствовать различные стадии деформационного процесса пород, о чем можно судить на основании результатов испытаний пород в условиях неравномерного трехосного сжатия.

Так стадии упругой деформации пород при неравномерном трехосном сжатии, как показали проведенные исследования, обычно соответствует дополнительное уплотнение пород. Суммарное изменение объема пород — ϵ_v упр. общ при этом может быть оценено по результатам испытаний с помощью формулы

$$-\epsilon_v \text{ упр. общ.} = -(\epsilon_{\sigma_{\text{сж}}} + \epsilon_{\sigma_{\text{сжупр}}}). \quad (\text{VI.2})$$

Стадия остаточных деформаций возникает при достижении деформирующими (тектоническими) напряжениями предела упругой устойчивости пород. При определенном уровне геостатических напряжений эта стадия характеризуется увеличением объема пород, вследствие разуплотнения их структуры по границам зерен, ориентированного в направлении действия деформирующего усилия. Сум-

марное изменение объема породы, вызванное ее уплотнением под действием $\sigma_{эф}$ и деформационным разуплотнением под действием $\sigma_i > \sigma_i \text{ упр}$, составляет

$$\epsilon_v = -\epsilon_{v\sigma\text{эф}} + \epsilon_{v\sigma i}, \quad (\text{VI.3})$$

где $\epsilon_{v\sigma\text{эф}}$ обычно меньше $\epsilon_{v\sigma i}$, а $\epsilon_v > 0$. Как показали исследования, величина вторичной деформационной пустотности ϵ_v при деформации песчано-алевритовых пород в условиях, характерных для глубин в 5—10 км, составляет единицы процентов. Однако, по-видимому, деформационное разуплотнение пород в естественных условиях их залегания создает благоприятную обстановку для развития вторичных процессов выщелачивания и растворения.

Положительное влияние последних процессов на коллекторские свойства различных пород, в том числе и залегающих на больших глубинах, отмечалось в ряде исследований, однако без объяснения причин их развития на одном участке и отсутствия на другом, в одном и том же районе [106, 113].

Ввиду отсутствия данных об истинных значениях напряжений, испытываемых породами в условиях их естественного залегания, степень неравномерности напряженного состояния в большинстве случаев не может быть оценена. В связи с этим, обоснованный прогноз влияния тектонической деформации на коллекторские свойства горных пород, залегающих на больших глубинах (не достигнутых бурением), по-видимому, может быть сделан только в том случае, когда известно влияние этой деформации на породы того же состава, залегающие на освоенных бурением глубинах.

Количественно влияние тектонических деформаций на пористость и проницаемость пород, залегающих на глубине H (не достигнутой бурением), приближенно может быть оценено по известным величинам K_p , $K_{пр}$ тех же пород на меньшей глубине h , с учетом зависимостей, установленных при экспериментальном деформировании этих пород и при изучении их постседиментационных изменений.

§ 2. Об оценке влияния тектонической деформации на коллекторские свойства горных пород по результатам изучения их деформационных и прочностных свойств

Известно, что формирование геологических структур в земной коре связано с действием тектонических напряжений. В результате измерений тектонических деформаций установлены периодичность и неравномерность тектонических движений, вызываемых изменением напряжений во времени и в пространстве.

Распределение и уровень действующих тектонических напряжений определяют стадию и интенсивность развития деформации в отдельных слоях земной коры. Стадию пластической деформации на глубинах залегания до 10—15 км у большинства пород, как показано в настоящем исследовании, характеризует разуплотнение

структуры, существенно изменяющее исходные деформационные и прочностные свойства пород. Установлено, что породы, претерпевшие в процессе экспериментальной деформации, подобной тектонической, остаточные изменения, отличаются при последующих испытаниях пониженными прочностными показателями и повышенной деформируемостью.

На изученных особенностях деформации и разрушения предварительно деформированных пород основан предлагаемый метод сравнительной оценки степени деформированности пород, слагающих определенный участок земной коры или ее разрез, под действием тектонических напряжений разной интенсивности. Установление сравнительной деформированности пород различных типов в условиях их залегания имеет практическое значение, поскольку с развитием деформации связана интенсивность разуплотнения, влияющая на коллекторские свойства горных пород, а также определяющая сохранение экранирующей способности у пород покрывающих горизонтов.

Общая методика оценки сравнительной деформированности горных пород отдельных участков земной коры включает в себя выбор экспресс-метода массовых испытаний пород, обработку и обобщение данных и способ их интерпретации для практического использования при решении задач нефтяной геологии.

В геологии принято характеризовать строение и свойства горных пород с помощью карт, разрезов и профилей. Таким же способом можно характеризовать особенности деформационного поведения и прочность пород определенных участков земной коры.

Известны работы ряда организаций по обобщению физических (плотностных, магнитных и коллекторских) свойств горных пород в виде петрофизических карт.

Обобщение деформационных и прочностных свойств пород в виде карт, профилей и разрезов для решения задач нефтяной геологии до последнего времени ни в СССР, ни за рубежом не проводилось, в связи с чем возникла необходимость в обосновании и разработке методики подобного обобщения.

Наибольшую трудность при постановке изучения деформационных и прочностных свойств пород с целью установления приуроченности пород к зонам разной тектонической активности, представляла методически необходимая для обоснования надежности предложенного косвенного метода независимая оценка интенсивности тектонической деформации на отдельных участках выбранного района.

В настоящее время представления о генезисе тектонических напряжений в определенной степени гипотетичны, данные же о современном их распределении, как правило, весьма ограничены. Практически доступны изучению только современные тектонические деформации, скорость которых в геосинклинальных областях достигает величин порядка 10^{-3} год⁻¹, а в платформенных — снижается до 10^{-10} год⁻¹.

Колебательный характер изменения вертикальной составляющей тектонической деформации осадочного чехла по современным представлениям связан с периодическими волнообразно колебательными движениями фундамента. Полагают, что в процессе образования структур изменяются не только вертикальные, но и горизонтальные составляющие тектонических деформаций фундамента и осадочной толщи [88].

В результате инструментальных наблюдений доказана периодичность и неравномерность тектонических движений, связанных с ростом и падением напряжений во времени и в пространстве, т. е. с изменением тензора напряжений, даже в процессе развития локальных платформенных структур в районах Волго-Уральской области [88].

С этой особенностью платформенного тектогенеза связаны как периодические изменения амплитудных и плановых соотношений в разрезе любой тектонической структуры, на которые оказывают влияние гидродинамические, физико-химические, биологические и другие процессы, так и различная интенсивность локальной расчлененности рельефа земной поверхности [37].

Поскольку последняя может быть достаточно точно оценена, она была выбрана в качестве критерия стадий тектонической деформации, со значением которого на разных участках при проведении исследований сопоставлялись данные по деформационным и прочностным свойствам горных пород.

Разработка методики построения петродеформационных карт имеет целью, как уже указывалось, оценку сравнительной деформированности пород отдельных участков земной коры, различающихся по интенсивности действующих тектонических напряжений.

Для построения карт требуется массовая информация о деформационных и прочностных свойствах пород, для получения которой необходимы менее сложные и трудоемкие способы определений, чем вышеописанные точные способы изучения свойств в установках высокого давления. Выбранный метод должен отвечать двум основным требованиям: давать возможность проведения экспресс-определений свойств на кернах горных пород и позволять оценивать деформационные и прочностные свойства пород в условиях неравномерного объемного напряженного состояния, характерного для земной коры.

В практике лабораторных исследований этим условиям отвечает метод испытаний свойств вдавливанием цилиндрического штампа с плоским основанием, позволяющий определять деформационные свойства пород в условиях неравномерного трехосного сжатия [54, 137, 138].

Выбор в качестве основного метода вдавливания штампа позволил получить массовую информацию о деформационных и прочностных свойствах пород, слагающих вскрытую поверхность кристаллического фундамента и продуктивную толщу терригенного девона в районе Южного купола Татарского свода. Постановка

исследования в этом районе обусловлена рядом причин: детальной его характеристикой по интенсивности тектонической деформации с помощью обобщенно оцененных показателей локальной расчлененности рельефа земной поверхности, проведенной в лаборатории математических методов в геологии ИГиРГИ под руководством В. П. Бухарцева [37], хорошей изученностью состава и структурных особенностей пород исследуемых стратиграфических подразделений, а также распределения характерных петрографических типов пород по площади и разрезу.

Из деформационно-прочностных свойств пород при вдавливании для построения карт предлагается использовать предел текучести p_0 , характеризующий условия нарушения упругой устойчивости пород при неравномерном объемном напряженном состоянии, и коэффициент пластичности K , оценивающий степень развития остаточных изменений в структуре пород в этих условиях.

Построение карт петродеформационных свойств пород производится следующим образом.

В качестве основы используется карта распространения по площади исследуемого участка земной коры петрографических типов пород выбранного стратиграфического подразделения. Степень тектонической деформированности на этой карте оценивается с помощью отклонений физической земной поверхности от ее среднего горизонтального уровня [37]. Практически по степени локальной расчлененности рельефа земной поверхности на карте распространения типов пород с помощью изолиний выделяется несколько зон деформаций разной интенсивности. Так, например, на территории Южного купола Татарского свода выделено пять зон, две из которых (I и II) отвечают областям максимальных значений локальной расчлененности рельефа, а II, IV и V — характеризуются последовательным уменьшением показателей расчлененности.

Данные по деформационно-прочностным или коллекторским свойствам пород наносятся на карту в соответствии с местоположением скважин, из которых произведен отбор. При этом вводятся условные (обычно цветовые) обозначения для различных обобщенных в несколько групп, значений прочности (предела текучести p_0) и коэффициента пластичности пород K при вдавливании.

Схематические карты петродеформационных свойств пород в масштабе 1:500 000 были построены автором совместно с Г. Е. Кузьменковой и В. И. Пашинцевой для кристаллического фундамента на основании результатов испытаний свыше 260 образцов и терригенной части девона Южного купола Татарского свода (≈ 200 образцов). Их анализ подтвердил влияние тектонической деформации на свойства пород, а следовательно, и возможность оценки по свойствам степени тектонической деформации конкретных участков земной коры.

Результаты анализа деформационных и прочностных свойств различающихся степенью деформированности однотипных разновидностей пород кристаллического фундамента приведены в табл. 48.

Деформационные и прочностные свойства типичных разностей пород кристаллического фундамента в зонах тектонической деформации разной интенсивности

Типы пород	Зоны деформации разной интенсивности									
	I (max)		II		III		IV		V (min)	
	Показатели деформационно-прочностных свойств									
	P_0 , кгс/мм ²	K	P_0 , кгс/мм ²	K	P_0 , кгс/мм ²	K	P_0 , кгс/мм ²	K	P_0 , кгс/мм ²	K
Биотит-гранатовые и биотит-силлиманито- вые гнейсы			130	2,0	195	1,8	175	1,8	215	1,5
Биотит-плагноклазовые гнейсы	135	2,1	165	1,9	180	1,7	180	1,55	260	1,5
Биотит-роговообманко- вые гнейсы	100	2,6	140	2,1	260	2,0	285	1,7		
Амфиболиты	125	2,2	180	2,3			255	1,8	255	2,0
Гранодиориты и квар- цевые диориты	135	3,9	165	1,7	210	1,5	235	1,7	250	1,4
Граниты и гранито-гней- сы	140	1,9	200	1,5	230	1,6	240	1,5	255	1,4
Чарнокиты	145	2,6	165	2,1	185	1,8				
Габбро-нориты	180	2,0	205	1,6					240	1,5
Диабазы и габбро-диа- базы			130	2,0	130	2,5			310	1,7

Из данных, приведенных в табл. 48, следует, что к зонам наиболее интенсивной тектонической деформации (максимальной локальной расчлененности I, II) в большинстве случаев приурочены метаморфические и магматические породы, обладающие среди других пород того же петрографического типа минимальными прочностными показателями (p_0) и максимальными деформационными (K), а к зонам минимальной расчлененности IV и V — породы с максимальными значениями p_0 и минимальными K .

Таким образом, воздействие тектонической деформации на свойства пород фундамента оказалось аналогичным влиянию сдвиговой деформации, изученному в экспериментальных условиях.

Полученные данные подтвердили также связь интенсивности локальной расчлененности рельефа с деформациями пород фундамента и ее обусловленность величиной последних.

Из комплекса пород, слагающих терригенную толщу девона, были изучены деформационно-прочностные свойства, коэффициенты пористости и проницаемости только песчано-алевритовых разностей, главным образом, пород-коллекторов нефти и газа.

Для сопоставления свойств песчано-алевритовых пород, приуроченных к выделенным зонам тектонической деформированности, они были разбиты на классы по принципу единства гранулометрической характеристики: I класс — мелкозернистые песчаники, II — алевритовые песчаники, III — алевриты и IV — глинистые песчаники и алевриты.

В табл. 49 приведены деформационно-прочностные свойства выделенных типов пород в зонах тектонической деформации разной интенсивности.

Таблица 49

Показатели деформационно-прочностных свойств песчано-алевритовых пород терригенного девона Южного купола Татарского свода

Типы пород	Зоны деформации разной интенсивности					
	I—II		III		IV	
	Показатели деформационно-прочностных свойств					
	p_0 , кгс/мм ²	K	p_0 , кгс/мм ²	K	p_0 , кгс/мм ²	K
Мелкозернистые песчаники . .	60	2,45	65	1,9	105	1,7
Алевритовые песчаники . . .	55	2,55	70	1,9	80	1,5
Алевриты . .	55	2,6	60	2,4	60	1,8
Глинистые песча- ники и алевро- литы	50	2,2 (∞)	90	1,55	—	—

Анализ данных табл. 49 показывает, что в терригенной толще девона к зонам максимальной локальной расчлененности также приурочены породы с минимальными значениями прочностных показателей (p_0) и максимальными показателями деформированности (K). В дополнение к ограниченному числу результатов испытаний деформационно-прочностных свойств песчано-алевритовых пород девона ($\infty 200$ образцов) был проведен анализ коллекторских свойств песчаников и алевролитов в зонах тектонической деформации разной интенсивности, для чего были использованы данные ТатНИПИнефть по коэффициентам пористости свыше 1380 и проницаемости 1400 образцов пород, а также коэффициентам продуктивности 300 скважин. Это позволило более обоснованно судить о связи выявленных особенностей в изменении деформационных характеристик под действием тектонической деформации с коллекторскими свойствами пород.

В табл. 50 данные по коллекторским свойствам песчано-алевритовых пород-коллекторов девона (пласт D_1) сопоставлены с обобщенными результатами исследований деформационно-прочностных свойств пород (p_0 , K) в зонах тектонической деформации разной интенсивности.

Таблица 50

Влияние тектонической деформации на коллекторские, деформационные и прочностные свойства песчано-алевритовых пород девона (пласт D_1)

Показатели коллекторских свойств	Зоны тектонических деформаций					
	Число замеров	I—II	Число замеров	III	Число замеров	IV—V
K_n , %	1116	19,9	162	18,3	107	18,6
$K_{пр}$, мД	1153	413	178	331	68	255
Коэффициент продуктивности скважин	251	8,6	27	5,2	21	3,1
p_0 , кгс/мм ²	72	55	16	60	3	85
K	72	2,8	16	1,9	3	1,6

Эти данные подтверждают существенное влияние тектонической деформации на коллекторские свойства пород и вывод о связи изменений этих свойств с деформационно-прочностными свойствами пород.

Так, в зонах наиболее интенсивной тектонической деформации (I—II), где прочность пород меньше, а деформированность — больше по сравнению с зонами минимальной деформации (IV—V), отмечаются повышенные значения коэффициентов пористости пород и проницаемости, а также коэффициентов продуктивности скважин.

Выявленные с помощью петродеформационных карт особенности деформационного поведения пород в зонах интенсивной тектонической деформации позволяют дать физическое обоснование установленной ранее для исследуемой территории [37] тесной корреляционной зависимости между количественными признаками локальной расчлененности рельефа поверхности, общими и удельными суммарными геологическими запасами нефтяных и газовых месторождений.

Они подтвердили связь локальной расчлененности рельефа поверхности с деформациями фундамента и терригенного девона, т. е. позволили выявить влияние тектонической деформации на всю толщу пород. Приуроченность к участкам максимальной локальной расчлененности рельефа поверхности зон повышенной нефтегазоносности, как было показано, связана с влиянием интенсивной тектонической деформации фундамента на формирование коллекторских свойств пород. При этом, влияние тектонической деформации выражается не только в интенсификации процесса трещинообразования и улучшении фильтрационных свойств пород, но и в разуплотнении структуры пород, т. е. увеличении их емкости.

Последний вывод представляет интерес для оценки перспектив нефтегазоносности пород на больших глубинах, особенно в тектонически активных зонах.

§ 3. Кривые предельных напряженных состояний в области неравномерного трехосного сжатия

Как уже указывалось во II главе, особенности деформации и сопротивления разрушению таких неоднородных по составу и строению материалов, как горные породы, определяют необходимость применения для оценки наступления в них предельных напряженных состояний специальных теорий прочности, среди которых наибольшее распространение получила теория Мора.

Согласно этой теории сопротивление сдвигу должно зависеть не только от касательных, но и от нормальных напряжений в данной точке тела, исходя из чего сопротивление разрушению должно быть выше в случае действия сжимающих напряжений и ниже при преобладании растягивающих. Именно эта особенность, как было показано во многих исследованиях, наиболее характерна для горных пород, в связи с чем результаты экспериментальных исследований горных пород находятся в хорошем соответствии с этой теорией [80, 104, 110].

В последние годы широко обсуждается вопрос о необходимости учета влияния среднего нормального напряжения, не учитываемого теорией Мора [9, 144, 190]. Для оценки прочности горных пород с учетом влияния среднего нормального напряжения применяют теорию касательного октаэдрического напряжения

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

где

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

а

$$\sigma_{\text{окт}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}.$$

В настоящем исследовании обработка результатов экспериментов проводилась в соответствии с теорией касательного октаэдрического напряжения, что позволило выявить характерные зависимости между октаэдрическими напряжениями для пород разных генетических типов в широком диапазоне напряженных состояний сжатия.

Так, при обобщении результатов испытаний метаморфических и магматических пород I группы по составу — с преимущественным содержанием кварца и полевых шпатов (>70%) было установлено, что кривые предельных напряженных состояний этих упруго-хрупких пород хорошо описываются уравнением прямой вида

$$\tau_{\text{окт}} = \tau_{\text{окт}_1} + a\sigma_{\text{окт}}, \quad (\text{VI.4})$$

где $\tau_{\text{окт}_1}$ и a — коэффициенты, зависящие от особенностей состава и строения пород.

Кривые строились по данным испытаний пород на одноосное сжатие, продольное сжатие в условиях всестороннего давления и вдавливание.

Величины предельных октаэдрических напряжений по результатам испытаний пород на одноосное сжатие ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$; $\sigma_1 = \sigma_c$) определялись по формулам

$$\tau_{\text{окт}} = 0,47\sigma_c; \quad \sigma_{\text{окт}} = \frac{1}{3}\sigma_c, \quad (\text{VI.5})$$

а по результатам испытаний в условиях неравномерного трехосного сжатия ($\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{\text{он}}$; $\sigma_1 = \sigma_{\text{ic}} + \sigma_{\text{он}}$) по формулам

$$\tau_{\text{окт}} = 0,47\sigma_{\text{ic}}; \quad \sigma_{\text{окт}} = \frac{1}{3}(\sigma_{\text{ic}} + 3\sigma_{\text{он}}). \quad (\text{VI.6})$$

По данным вдавливания, величины предельных октаэдрических напряжений вычислялись по формулам, выведенным в работе [10] при решении упругой задачи о вдавливании штампа

$$\tau_{\text{окт}} = \frac{\sqrt{2}}{3} p_{\text{ш}} \left[\frac{2\nu - 1}{2} - \frac{2(1 + \nu)}{9} \frac{\sqrt{2(1 + \nu)}}{9} \right]; \quad (\text{VI.7})$$

$$\sigma_{\text{окт}} = \frac{2}{9} p_{\text{ш}} (1 + \nu) [\sqrt{2(1 + \nu)} - 3]. \quad (\text{VI.8})$$

Значения $\tau_{\text{окт}}$ и $\sigma_{\text{окт}}$ для различных значений коэффициента Пуассона ν приведены в таблице 51 [10].

ν 0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
$\tau_{\text{окт}} 0,333 p_{\text{ш}}$	$0,324 p_{\text{ш}}$	$0,314 p_{\text{ш}}$	$0,303 p_{\text{ш}}$	$0,292 p_{\text{ш}}$	$0,282 p_{\text{ш}}$
$\sigma_{\text{окт}} 0,387 p_{\text{ш}}$	$0,393 p_{\text{ш}}$	$0,400 p_{\text{ш}}$	$0,407 p_{\text{ш}}$	$0,412 p_{\text{ш}}$	$0,417 p_{\text{ш}}$

На рис. 47 для примера показана предельная прямая для кварцита, построенная по данным испытаний при разных температурах. Для ряда других пород этой группы в табл. 52 приведены значения коэффициентов $\tau_{\text{окт}}$ и a , необходимые для построения предельных прямых.

В результате проведенных исследований была выявлена возможность приближенного построения кривых предельных напря-

Рис. 47. Прямая предельных напряженных состояний для кварцита:

○ — данные испытаний на продольное сжатие при разных величинах $\sigma_{\text{он}}$ и $t=20^\circ \text{C}$; ● — при разных величинах $t=100-300^\circ \text{C}$; □ — данные испытаний на вдавливание

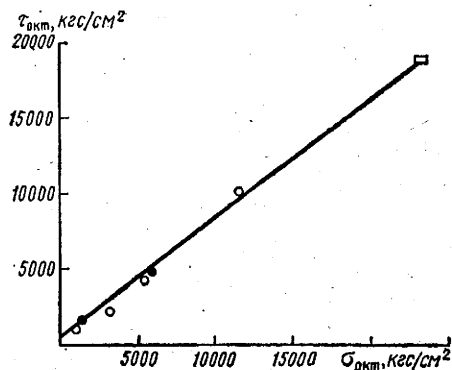


Таблица 52

Значения коэффициентов $\tau_{\text{окт}}$ и a в уравнении предельных напряженных состояний для упруго-хрупких метаморфических и магматических пород

Порода *	№ образца	Группа по изменности	$\tau_{\text{окт}}$, кгс/см²	a
Кварцит шокшинский	—	I	600	0,80
Гнейс плагиоклазовый	182	V	360	0,71
Гнейс биотит-гранатовый	130	II	290	0,83
Гнейс биотит-плагиоклазовый	852	I	150	0,70
Гнейс биотит-роговообманковый	286	III	570	0,58
Гранито-гнейс биотит-плагиоклазовый	108	I	175	0,75
Гранито-гнейс	122	V	450	0,30
Гранодиорит	359	I	350	0,65
То же	321	V	125	0,62
„	143	II	420	0,71
Гранит микроклиновый	43	V	500	0,61

* Характеристику состава и строения пород см. в работе [140].

женных состояний для упруго-хрупких пород в широком диапазоне сжимающих напряжений по данным испытаний пород на одноосное сжатие и вдавливание.

Большая часть исследованных метаморфических и магматических пород (с содержанием кварца и полевых шпатов менее 70%) в диапазоне исследованных напряжений и температур проявляла способность к остаточной деформации. Предельные зависимости этих пород лучше описывались кривыми второго порядка, в частности, уравнением параболы

$$\tau_{\text{окт}} = \sqrt{\frac{B - \sigma_{\text{окт}}}{A}}, \tag{VI.9}$$

где A и B — коэффициенты, зависящие от минерального состава и структуры пород.

На рис. 48 представлены кривые предельных напряженных состояний для двух пород этой группы при разных температурах, а в табл. 53 — значения коэффициентов A и B для ряда характерных разностей метаморфических и магматических пород.

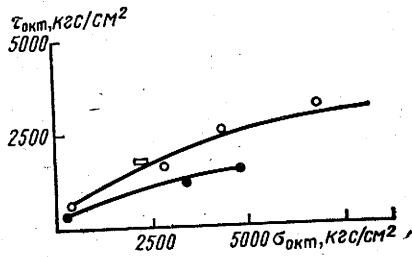


Рис. 48. Кривая предельных напряженных состояний для филлита (обр. 567). Обозначение точек см. на рис. 47

Обобщение результатов испытаний прочностных свойств осадочных (карбонатных и песчано-алевритовых) пород показало, что предель-

Таблица 53

Значения коэффициентов A и B в уравнении кривых предельных напряженных состояний для метаморфических и магматических пород II и III групп по составу

Порода *	№ образца	Группа по измененности	A	B
Габбро-диабаз	173	I	0,00037	280
Диабаз	795	I	0,000143	850
Гнейс биотит-пироксеновый	764	I	0,00065	40
Габбро-норит	91	I	0,00034	350
Гиперстеновый диорит	1181/1700	I	0,00012	3210
Филлит	567	III	0,00062	180
Перидотит	1126		0,00032	400
Оливинит	1133	I	0,00027	265
Пироксенит	1121	I	0,00019	495

* Характеристику состава и строения пород см. в работе [140].

ные напряженные состояния этих пластично-хрупких пород в условиях действия неравномерного всестороннего сжатия также хорошо описываются уравнением параболы (VI.9).

При этом было установлено, что предельные зависимости для пластично-хрупких пород с достаточной для решения практических задач точностью могут быть построены по данным испытаний на одноосное сжатие и вдавливание. В этом случае при расчете предельных напряжений $\sigma_{\text{окт}}$ и $\tau_{\text{окт}}$ по данным вдавливания вводится предположение о том, что нарушение упругой устойчивости происходит вследствие развития по сечению породы под штампом зоны пластического сдвига [13].

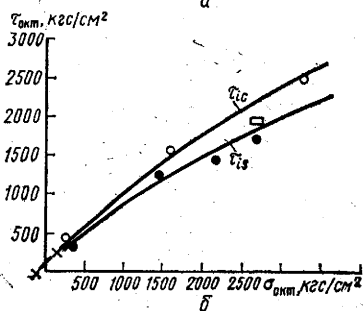
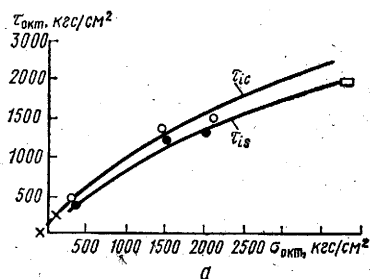


Рис. 49. Кривые предельных напряженных состояний (τ_{ic} и τ_{is}):

a — известняк онколитово-детритусовый (обр. 2167);
 b — известняк онколитово-детритусовый (обр. 2176);
 \times — данные испытаний на растяжение при разных величинах $\sigma_{\text{он}}$; \circ — данные по прочности (τ_{ic}) пород при продольном сжатии в условиях σ он различной величины; \bullet — данные по пределу текучести (τ_{is}) пород при продольном сжатии в условиях $\sigma_{\text{он}}$ различной величины; \square — данные испытаний на вдавливание

Тогда значения $\sigma_{\text{окт}}$ и $\tau_{\text{окт}}$ определяются по формулам [9]

$$\sigma_{\text{окт}} = \frac{0,5\sigma_c - 0,33\sigma_c \operatorname{tg} \delta - 0,705p_0}{0,705 + \operatorname{tg} \delta}; \quad (\text{VI.10})$$

$$\tau_{\text{окт}} = 0,708(p_0 - \sigma_{\text{окт}}), \quad (\text{VI.11})$$

где p_0 — предел текучести при вдавливании; σ_c — предел прочности при одноосном сжатии; δ — угол внутреннего трения, определяемый из выражения

$$\frac{p_0}{\sigma_c} \frac{\sin \delta}{(1 + \sin \delta) e^{\pi \operatorname{tg} \delta} - (1 - \sin \delta)} = 1. \quad (\text{VI.12})$$

Типичные кривые предельных напряженных состояний для известняков и песчано-алевритовых пород даны на рис. 49 и 50, а в табл. 54 приведены значения коэффициентов A и B , необходи-

мые для построения предельных кривых, характеризующих свойства ряда осадочных пород.

В результате проведенных исследований деформационных и прочностных свойств горных пород при неравномерном трехосном сжатии, разных температурах и постоянной скорости деформации порядка 10^{-3} 1/с был выявлен типичный вид кривых предельных напряженных состояний для случаев деформации разного механизма: упругой, упруго-пластической с преобладанием в механизме остаточной деформации межзернового или внутрикристаллического течения.

Следует, однако отметить, что применение этих результатов на практике ограничено сравнительно узким диапазоном скоростей деформации.

В настоящее время результаты исследований различных материалов указывают на существенное влияние времени нагружения или скорости деформации на процессы, происходящие в твердых телах при их пластическом деформировании и разрушении, т. е. на пластические и прочностные свойства.

При решении задач, связанных с определением напряженного и деформированного состояний горных пород в геологических и технологических процессах, знание временных зависимостей прочностных и деформационных свойств и их учет важны, поскольку диапазон скоростей в этих реальных процессах деформации и разрушения горных пород очень широк.

В технологических процессах разрушения горных пород нагружение обычно имеет динамический характер, а его продолжительность составляет десятые, сотые доли секунды (механические способы бурения), а иногда и тысячные (взрывное воздействие).

При отборе керна изменение напряженного состояния происходит в течение минут или часов, а в процессе разработки нефтяных месторождений — в течение многих лет.

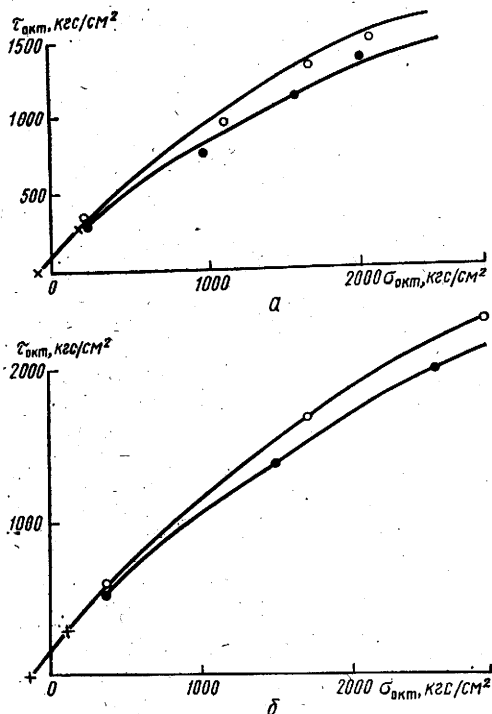


Рис. 50. Кривые предельных напряженных состояний:

а — песчаник кварцевый мелкозернистый (обр. 775-5/2); б — песчаник полевошпатово-кварцевый, алевроитовый (обр. Ш-1). Обозначения точек см. на рис. 49

Значения коэффициентов A и B в уравнениях кривых предельных напряженных состояний (τ_{ic} , τ_{is}) для некоторых осадочных горных пород

Порода	№ образца	$\tau_{ic} = \sqrt{\frac{B - \sigma_{окт}}{A}}$		$\tau_{ic} = \sqrt{\frac{B - \sigma_{окт}}{A_1}}$	
		B	A	B	A_1
Песчаник кварцевый алевритовый	825/59	80	0,00140	80	0,00156
Алевролит полевошпатово-кварцевый	731K	50	0,00100	50	0,00142
Песчаник кварцевый мелкозернистый	775—5/2	80	0,00118	80	0,00172
Песчаник полевошпатово-кварцевый алевритовый	III—I	120	0,00057	120	0,00069
Песчаник полевошпатово-кварцевый алевритовый	536K	100	0,00070	100	0,00105
Известняк онколитово-детритусовый	2167	100	0,00095	100	0,00140
То же	2176	80	0,00070	80	0,00108
Известняк микробрекчиевидный	2014	80	0,00060	80	0,00100
Известняк микрозернистый	2229	75	0,00050	75	0,00075
Известняк микрозернистый	2005	70	0,00038	70	0,00050

Существенной немонотонностью и еще большим диапазоном времени характеризуются геологические процессы, протекающие в земной коре. Здесь общие медленные движения, скорость которых по результатам измерений современных деформаций составляет 10^{-12} — 10^{-14} 1/с [181] сочетаются с относительно быстрыми смещениями, например, при землетрясениях.

Изучению в экспериментальных условиях доступен относительно узкий диапазон скоростей деформации, в связи с чем возникает вопрос о возможности экстраполяции данных кратковременных и средней продолжительности испытаний свойств пород на процессы длительного нагружения, для решения которого необходима постановка специальных исследований.

Временные зависимости прочности и деформаций горных пород при напряженных состояниях и температурах, типичных для залегания пород, еще мало изучены.

Анализ проведенных исследований [14, 19, 92, 97—99, 127] показывает, что деформационные и прочностные свойства горных пород, как и других твердых материалов [67, 68] зависят от скорости (времени) деформаций. Из анализа следует, что на конкретный вид зависимостей прочностных и деформационных свойств от скорости в условиях объемно-напряженного состояния влияет процесс развития остаточной деформации и ее механизм.

Влияние скорости на механические свойства пород для выявления изменений кривых предельных напряженных состояний, изучалось на породах разных типов в диапазоне скоростей от 10^{-7} до 10^4 1/с.

К числу основных, наиболее общих, установленных закономерностей изменения прочностных и деформационных свойств горных пород в исследуемом диапазоне скоростей деформации относятся: увеличение прочности и изменение деформационных характеристик (величин остаточных деформаций и коэффициентов пластичности), свидетельствующие об уменьшении пластичности с ростом скорости.

В пределах скоростей, ограниченных высокими скоростями динамической деформации ($\frac{d\epsilon}{dt} \leq 10^2 - 10^3$ 1/с) экспериментальные значения показателей прочности пород при продольном сжатии в условиях бокового давления и вдавливания в координатах $\sigma_{ic} - \lg \frac{d\epsilon}{dt}$ ложатся на единую прямую (участок *ab* на рис. 51 и 52), что позволяет аппроксимировать эту зависимость уравнением

$$\sigma_{ic} = A e^{B \frac{d\epsilon}{dt}}, \quad (VI.13)$$

где *A* и *B* — коэффициенты, зависящие как от свойств пород, так и от вида напряженного состояния.

У всех испытанных пород при определенных критических значениях скорости деформации ($\frac{d\epsilon}{dt} > 10^2 - 10^3$ 1/с) отмечено изменение характера зависимости прочности от скорости, выражающееся в более резком росте прочности с увеличением $\frac{d\epsilon}{dt}$ (рис. 51, 52).

Для изучения изменений в механизме деформации пород при разных скоростях деформации был применен комплекс методов (микроскопического изучения шлифов деформированных пород со статистической оценкой признаков деформации: ориентировки зерен, раскрытости микротрещин; облучения аншлифов деформированных пород гамма-радиацией и других), что позволило выявить связь характерных участков зависимости $\sigma_{ic} = f\left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)$ с особенностями механизма деформации пород. Было установлено, что у большинства пород, типичных для разрезов нефтяных месторождений,

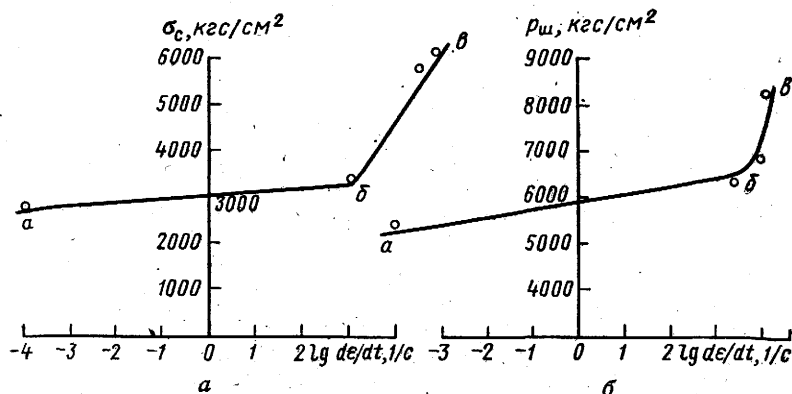


Рис. 51. Зависимости прочностных показателей кварцита от скорости деформации:

а — одноосное сжатие; б — вдавливание

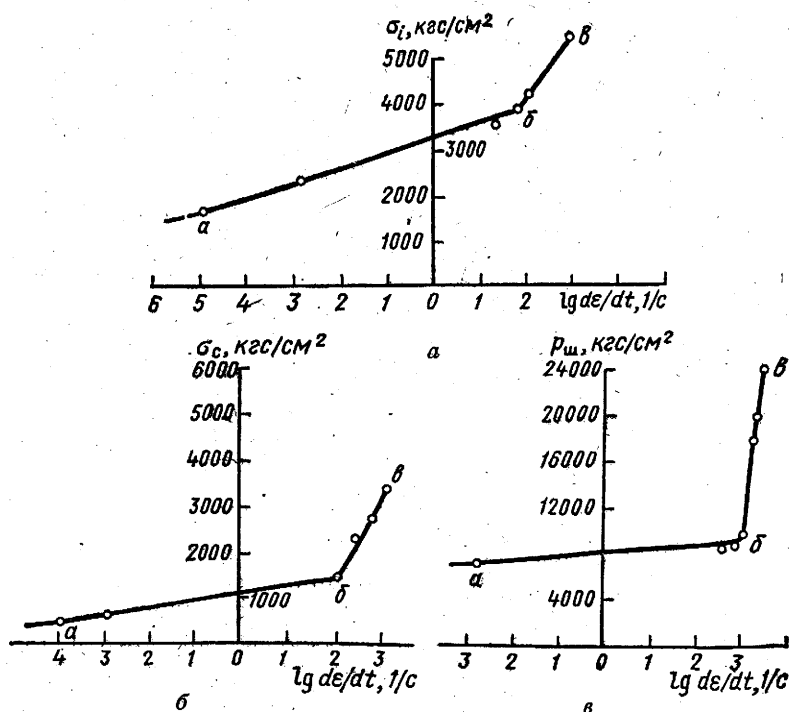


Рис. 52. Зависимости прочностных показателей мрамора от скорости деформации:

а — неравномерное трехосное сжатие при $\sigma_{он} = 750 \text{ kg/cm}^2$; б — одноосное сжатие; в — вдавливание

в условиях объемно-напряженных состояний, характерных для исследуемых глубин, в широком диапазоне скоростей деформации сохраняется выявленная при кратковременных испытаниях особенность деформационного поведения — преимущественное развитие межзерновой деформации, с образованием микроразрывов по границам зерен, вызывающим разуплотнение структуры пород.

Следует подчеркнуть, что преимущественное развитие межзернового скольжения, с присущим ему влиянием на структуру и плотность пород, обнаружено и при проведении длительных испытаний пород в условиях трехосного сжатия. При этом было установлено, что интенсивность разуплотнения пород при длительных испытаниях не снижается (значения коэффициентов интенсивности разуплотнения сохраняются приблизительно такими же, как и при кратковременной деформации) (табл. 55).

Таблица 55

Порода	$\frac{d\epsilon}{dt} 1/c$	$\sigma_{0H}, \text{ кгс/см}^2$	$\epsilon_1, \%$	$\epsilon_2 = \epsilon_3, \%$	$\epsilon_v, \%$	K_{vic}
Мрамор	10^{-3}	750	23,2	22,5	15,0	0,65
	10^{-5}	750	12,7	12,3	8,2	0,65
	10^{-6}	750	1,6	1,2	0,73	0,45
Доломит	10^{-3}	700	1,5	1,8	2,0	1,3
2076	10^{-7}	700	23,2	22,7	15,6	0,67
Известняк	10^{-3}	750	20,2	19,4	13,8	0,68
1К	10^{-7}					

Резкий и качественно одинаковый у разных горных пород рост их прочности при увеличении скорости деформации выше определенного предела ($\frac{d\epsilon}{dt} > 10^2 - 10^3 1/c$) обусловлен, как оказалось, ростом влияния сил инерции, о чем представляется возможным судить по выявленной при больших скоростях локализации характерных признаков остаточной деформации вблизи поверхности приложения деформирующего усилия.

При построении по результатам испытаний кривых предельных напряженных состояний ранее [98] было установлено, что скорости деформации в ряде случаев оказывают заметное влияние на предельные зависимости. Так, кривые предельных напряженных состояний пластичных пород: мрамора и поликристаллической каменной соли при больших скоростях располагаются более высоко, а крутизна их увеличивается, что свидетельствует об увеличении прочности и снижении пластичности пород (рис. 53).

Температура оказывает на прочность и пластичность влияние, противоположное влиянию скорости, а количественно в ряде случаев значительно большее, особенно при деформации пластичных пород.

Изучение влияния скорости на прочностные и деформационные свойства пород необходимо продолжать и расширять, что позволит

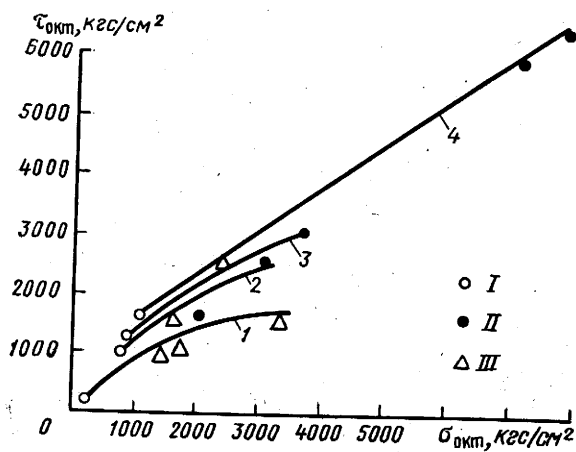


Рис. 53. Кривые предельных напряженных состояний для мрамора при разных скоростях деформации [98]:

1 — $v=10^{-8}$ м/с; 2 — $v=21$ м/с;
3 — $v=34$ м/с; 4 — $v=40$ м/с;
I — одноосное сжатие; II —
вдавливание; III — продольное
сжатие при всестороннем давлении

более обоснованно подойти к вопросу о приближенной оценке прочности пород и их деформационного поведения в процессах, скорости которых находятся за пределами возможностей экспериментального исследования. В последние годы работы такого направления начаты рядом исследователей [122, 127].

§ 4. О прогнозе сопротивления горных пород разрушению при проходке сверхглубоких скважин

В Советском Союзе и за рубежом поставлена задача освоения бурением глубин до 10—15 км для изучения вещественного состава пород, строения глубинных недр и оценки перспектив поисков полезных ископаемых на больших глубинах [25, 42, 43, 141]. Опыт проходки таких скважин в отечественной и зарубежной практике бурения отсутствует, и поэтому прогноз свойств пород, определяющих режимы бурения, конструкцию и материал породоразрушающего и бурового инструмента, мощность и другие параметры привода к долоту, может в настоящее время основываться, главным образом, на данных лабораторных исследований свойств пород в условиях давлений и температур, характерных для намечаемых глубин бурения. При прогнозе прочности и деформационного поведения горных пород на больших глубинах необходимо учитывать также опыт бурения скважин глубиной свыше 4—5 км.

Предложение об использовании результатов испытаний механических свойств для оценки сопротивления горных пород разрушению в процессах бурения впервые было выдвинуто М. М. Протодьяконовым, рекомендовавшим для определения показателя прочности — коэффициент крепости

$$f = \frac{\sigma_c}{100}, \quad (\text{VI.14})$$

где σ_c — предел прочности на одноосное сжатие в кгс/см².

На практике использовали эмпирические зависимости между данными по прочности пород на одноосное сжатие и показателями их буримости, установленными путем осреднения большого числа результатов [20]. Этот метод широко применяется в угольной промышленности.

Соппротивление горных пород одноосному сжатию не моделирует сопротивление пород разрушению в механических способах бурения, в которых характерным видом напряженного состояния является неравномерное объемно-напряженное состояние вдавливания.

Для оценки сопротивления пород разрушению при бурении на основании результатов их испытаний методом вдавливания Е. Ф. Эпштейном был предложен метод вдавливания усеченного клина [146], а Л. А. Шрейнером — метод вдавливания цилиндрического штампа с плоским основанием [137, 138]. Последний метод нашел широкое применение в нефтяной промышленности для оценки механических свойств горных пород, слагающих разрезы нефтяных месторождений. Этот метод позволяет связать показатели буримости не только с прочностными, но и с пластическими свойствами пород, получающимися в условиях характерного для вдавливания высокого неравномерного всестороннего сжатия развитие у большинства горных пород.

Совершенствование метода и его внедрение позволили создать первое в мировой практике методическое пособие по использованию результатов испытаний механических свойств горных пород вдавливанием штампа при проектировании режимов бурения, разработке рациональных конструкций долот и в других практических целях [139].

В последующие годы данные по механическим свойствам пород при вдавливании применялись почти во всех нефтедобывающих районах страны как для анализа и совершенствования режимов бурения, в частности, выбора наиболее эффективных осевых нагрузок на долото, так и приближенной предварительной оценки буримости пород.

В угольной промышленности применяется модифицированный вариант стандартного метода вдавливания — метод вдавливания штампа в шероховатую поверхность породы, предложенный Л. И. Бароном [21].

В связи с разработкой аналитических методов описания процессов разрушения горных пород при бурении, большое внимание уделяется изучению механизма деформации и разрушения пород при вдавливании штампа.

Первые представления о механизме были даны в работах Л. А. Шрейнера [137, 138]. Впоследствии они были уточнены и получили дальнейшее развитие в работах ряда исследователей.

Анализ механизма деформации и разрушения горных пород в процессе вдавливания, основанный на использовании точного решения упругой задачи о вдавливании цилиндрического штампа

с плоским основанием для случаев равномерного распределения контактного давления под штампом и истинного, приведен в работах [140, 220].

Большой вклад в развитие представлений о механизме деформации и разрушения пород при вдавливании, особенно для хрупких, твердых пород, внесен Р. М. Эйгелесом и сотрудниками руководимого им коллектива лаборатории ВНИИБТ [56, 145].

Применительно к процессам разрушения горных пород при бурении, наряду с изучением элементарного акта статического вдавливания, большое значение имеют исследования акта динамического вдавливания, а также влияние горного и гидростатического (моделирующего воздействия столба промывочной жидкости) давлений на процесс деформации пород при вдавливании.

Исследования влияния так называемых забойных или глубинных условий на механические характеристики вдавливания, как элементарного акта процесса бурения, представляет особенный интерес для решения проблемы прогнозирования деформационного поведения и сопротивления пород разрушению в сверхглубоком бурении.

Ниже рассмотрены результаты исследований деформационных и прочностных свойств пород применительно к условиям, характерным для сверхглубокого бурения, при этом наряду с собственными исследованиями автора здесь использованы также данные по изучению влияния на процесс вдавливания давлений, полученные другими исследователями [32, 33, 123, 125, 130, 145].

Некоторые общие положения методического подхода к прогнозу свойств пород, определяющих их сопротивление разрушению при сверхглубоком бурении

При проектировании техники и технологии сверхглубокого бурения необходимо знать какие изменения претерпевают прочность и деформационные свойства горных пород в условиях давлений и температур, ожидаемых на осваиваемых глубинах. Приведенные выше результаты свидетельствуют о том, что в условиях неравномерного объемно-напряженного состояния сжатия с ростом давлений прочность и способность к пластической деформации у большинства горных пород возрастают, а при увеличении температуры прочность снижается с одновременным увеличением остаточной деформации.

При изучении влияния всестороннего сжатия и температур на деформационные и прочностные свойства пород при вдавливании индентора, качественно характеризующего элементарный акт воздействия на породу вооружения долот при бурении, обнаруживаются аналогичные зависимости [33, 140] при условии изоляции поверхности вдавливания от жидкости, создающей всестороннее сжатие. При наличии же непосредственного контакта жидкости с поверхностью, в которую производится вдавливание, характеристики разрушения дополнительно зависят от структурных свойств жидкости и породы [140]. Поэтому при проведении экспериментальных исследований, предшествующих составлению прогнозных оце-

нок, необходимо обеспечивать соблюдение конкретных характеристик забойных условий проектируемой сверхглубокой скважины.

Постановке бурения сверхглубоких скважин в конкретном районе предшествует составление предполагаемого геологического разреза с выделением характерных типов пород. Оно производится на основании результатов комплексных геолого-геофизических исследований, которые позволяют не только установить прогнозные значения забойных давлений и температур, но и выбрать для испытаний необходимые породы — аналоги разностям пород, слагающих разрез сверхглубокой скважины.

Выбор пород-аналогов

При выборе пород-аналогов важное значение имеет установление признаков аналогии.

В качестве такого признака должен быть выбран показатель, которым можно охарактеризовать как механические свойства образцов, выбранных для испытаний, так и свойства пород в нетронутом массиве района предполагаемого сверхглубокого бурения.

Наиболее перспективным признаком аналогии по механическим свойствам следует считать величины скоростей продольных v_p и поперечных v_s упругих волн, средние значения которых для отдельных слоев глубинного разреза устанавливаются методом глубокого сейсмического зондирования.

Измерения v_p и v_s на выбранных образцах в лабораторных условиях можно производить стандартным методом на приборе УЗИС-7.

Вышеописанный методический прием был применен при выборе пород — аналогов разностям, слагающим глубинную часть разреза сверхглубокой скважины на Балтийском шите.

Приведенные во взаимное соответствие показатели пород разреза и их аналогов приведены в табл. 56, из которой видно, что роль аналогов могут выполнять изверженные и метаморфические породы, отобранные из разновозрастных толщ при мелком бурении.

Отбор пород из толщ того же возраста, выходящих на достигаемые бурением глубины, обеспечивает в известной степени подобие пород по минералогическому составу и структуре. Это особенно важно, в связи с различным характером влияния давлений и температур на механические свойства пород разного состава, а также вследствие необходимости при оценке буримости пород учитывать физико-химическое воздействие промывочной жидкости, которое также во многом зависит от состава и строения пород.

Механические испытания пород-аналогов

Механические испытания пород-аналогов предусматриваются для классификации пород в соответствии с предполагаемой эффективностью элементарного акта воздействия бурового долота на породу в условиях данных давлений и температур.

Подбор пород — аналогов разностям, ожидаемым в глубинной части разреза сверхглубокой скважины на Балтийском щите

Слой земной коры	v_p , км/с	Предполагаемые породы	Породы-аналоги, отобранные для испытаний	№ образцов	K_n , %	Скорость упругих волн (на УЗИС-7)	
						v_p , км/с	v_s , км/с
Кольская серия (гранитный слой)	$6,1 \pm 0,1$	Гнейсы биотитовые, гранат-биотитовые	Гнейс биотитовый с гранатом	63/70	0,55	6,1	
		Амфиболиты, биотит-амфиболитовые и меланократовые биотитовые гнейсы, мелкозернистые лейкократовые биотитовые гранито-гнейсы, граниты Мигматиты тех же пород	Гнейс амфиболит-биотитовый	119/70	0,83	5,9	
			Гнейс хлорит-амфибол-биотитовый	117/70	1,52	5,3	
			Гнейс биотитовый	46/70	1,06	5,1	
			То же	71/70	0,73	6,0	
			„	116/70	0,51	6,2	
			Амфиболит полевошпатовый	40/70	1,95	6,0	2,3
			Амфиболит	65/70	2,43	4,5	2,2
			Гранит плагиоклазмикроклиновый	50/70	0,78	4,3	2,1

Гранулито-базитовый (базальтовый) слой

$6,1 \pm 0,1$

Магматические и метаморфические породы среднего и основного состава

Плагногранит	64/70	2,2	5,0	
„	75/70	0,45	6,1	
Мигматит	53/70	0,96	5,9	
Диорит	1193/94	1,07	5,78	3,1
Анартозит	1192/1706	1,68	5,7	—
Габбро-норит	67/70	2,41	6,1	2,3
Пироксенит	93/70	1,60	6,1	2,4
„	94/70	1,29	6,4	2,6
„	95/70	1,22	7,65	4,0
Пироксенит оливинный	12/70	0,99	6,6	2,3
Пироксенит плагиоклазовый	73/70	2,54	6,1	3,6
Оливинит	89/70	1,10	6,1	2,7
„	92/70	1,83	6,1	2,35
Перидотит	97/70	1,24	6,1	2,7
„	98/70	1,27	6,3	2,86

Ранее [140] было показано, что для приближенной оценки элементарного акта процесса разрушения пород при бурении достаточно обоснованным является использование метода испытаний пород вдавливанием плоского цилиндрического штампа, предложенного проф. Л. А. Шрейнером. Этот метод, утвержденный в качестве Государственного стандарта СССР [54], нашел применение в нефтяной промышленности для оценки механических свойств горных пород, слагающих разрезы нефтяных месторождений [139].

В соответствии с поставленной выше задачей целесообразно при вдавливании, одновременно с характеристиками пород по ГОСТу, ввести в рассмотрение показатели, учитывающие влияние жидкой среды — некоторого эталонного бурового раствора, поскольку именно эти показатели, а не стандартные могут быть приняты в качестве исходных при оценке влияния гидростатического давления той же жидкости. При отсутствии влияния гидростатического давления эффект жидкой среды остается одним из наиболее важных.

В табл. 57 приведены средние данные по механическим свойствам пород, типичных для разреза сверхглубокой скважины на Балтийском щите, при испытаниях по ГОСТу и с глинистым раствором. При испытаниях был использован глинистый (бентонитовый) раствор удельного веса $1,06 \text{ гс/см}^3$ с условной вязкостью 23 с.

Из сравнения результатов испытаний пород в условиях влияния жидкостной среды (раствора) со стандартными видно, что жидкостная среда уменьшает в той или иной степени твердость пород, т. е. играет роль понизителя твердости. Раствор оказывает также заметное воздействие и на процесс разрушения пород, уменьшая размеры зон разрушения (диаметры зон в пределах 6—40%, а глубины до 50%).

В связи с тем, что снижение твердости и уменьшение размеров зон разрушения происходят одновременно, можно было предположить, что в условиях бурения оба эти эффекта должны компенсировать друг друга (в случае равенства осевых нагрузок на долото процесс разрушения при действии глинистого раствора должен быть более эффективным, вследствие понижения прочности пород).

Сравнение механических скоростей проходки метадиабазов в разрезе сверхглубокой скважины на Балтийском щите при одинаковых показателях режима бурения и промывке забоя водой и глинистым раствором подтвердило, что существенного изменения скорости при бурении на глинистом растворе не происходит.

Следует подчеркнуть, что малое влияние глинистого раствора характерно лишь для плотных кристаллических пород малой проницаемости.

Для пористых пород осадочного комплекса это влияние является настолько значительным, что в ряде случаев превосходит влияние горного и гидростатического давлений.

Деформационные и прочностные свойства пород, типичных для разреза сверхглубокой скважины при испытаниях методом вдавливания сухих и смоченных глинистым раствором образцов

Слой земной коры	Типичные разности пород	$K_{п}$, %	Свойства при вдавливании			
			сухие образцы		с глинистым раствором	
			$P_{ш}$, кгс/мм ²	K	$P_{ш}$, кгс/см ²	K
Печенгская осадочно-эффузивная толща	Габбро, габбро-диабазы, диабазы	1,81— 2,02	202— 230	1,6— 1,7	123— 230	1,8— 1,9
	Породы пластовых интрузий (пироксениты, перидотиты, серпентиниты)	0,69— 1,66	122— 420	1,6— 2,2	100— 257	1,4— 2,2
Кольская серия	Гнейсы, гранито-гнейсы	0,55— 1,71	48— 382	1,1— 2,2	46— 380	1,4— 2,1
	Граниты, мигматиты	0,73— 2,2	254— 380	1,2— 1,6	225— 330	1,3— 1,7
	Амфиболиты	0,95— 2,43	148— 236	1,5— 1,8	132— 218	1,4— 2,1
Гранулитно-базальтовый слой	Диориты, анартозиты	1,07— 1,68	265— 325	1,4— 1,6	—	—
	Пироксениты, оливиниты	0,99— 3,23	92— 285	1,5— 2,4	52— 190	1,5— 2,0
	Перидотиты	1,34— 1,27	214— 355	2,2— 2,6	243— 280	1,5— 1,7

О прогнозной оценке прочности горных пород при сверхглубоком бурении

Прогнозную оценку прочности пород в условиях забоя сверхглубокой скважины предлагается производить как по результатам испытаний пород методом вдавливания, так и с использованием кривых предельных напряженных состояний в области напряжений трехосного сжатия.

В первом случае, как это уже отмечалось и ранее [93], необходимо определять значения твердости горных пород в условиях действия на породу горного и гидростатического (создаваемого промышленной жидкостью) давлений и температур, близких к ожидаемым на глубине залегания пород.

Влияние вышеуказанных, а также и других основных факторов (скорости нагружения, формы и размеров зубцов, скольжения шарошек, состояния поверхности забоя) изучалось рядом исследователей [21, 32, 33, 54, 93, 123], что позволяет считать количественную оценку влияния методически возможной, хотя накопленный экспериментальный материал еще недостаточен для определения всех необходимых для расчетов коэффициентов. При обобщении результатов этих исследований для некоторых типов пород и параметров напряженного состояния и температур, определяющих конкретные глубины залегания пород, были установлены величины поправочных коэффициентов на стандартные значения твердости $R_{ш}$ [54], которые можно использовать при оценке прочности пород в условиях забоя глубокой скважины (табл. 58).

Таблица 58

Приближенные величины некоторых поправочных коэффициентов на стандартные значения твердости $R_{ш}$ пород разных типов

Типы пород	$R_{ш}$, кгс/мм ² , от — до	α_1 глубины, км			α_2	
		4	6	8	клиновидный зуб	сфера
Известняки	80—240	1,2—1,6	до 1,8	—	0,60—0,85	0,7—1,1
Песчаники	35—230	1,1—3,1	—	—		
Глинистые породы	28—70	1,4—1,8	—	—		
Диабазы	110—480	1,1—1,5	—	—		
Гнейсы, граниты .	105—500	до 1,3	1,3—1,5	—		
Пироксениты, перидотиты, оли- виниты	140—400	до 1,1	до 1,2	до 1,3		

В табл. 58 коэффициенты α_1 учитывают влияние горного и гидростатического давлений [33, 123], α_2 — форму зубцов шарошечных долот.

Значения прочности пород при сверхглубоком бурении можно также приближенно оценивать с помощью кривых предельных напряженных состояний, используя для этого вышеприведенные выражения (VI.7, VI.8) и (VI.10, VI.11), предложенные для расчета октаэдрических напряжений по данным испытаний упруго-хрупких и пластичных пород методом вдавливания [9, 10, 13].

Здесь не приводится методика использования результатов испытаний механических свойств горных пород при выборе технологии проходки сверхглубоких скважин и для приближенной оценки бу-

римости горных пород, основы которой ранее излагались в работе [93].

Следует только отметить, что в последние годы результаты прогнозной оценки прочности и показателей буримости были успешно опробованы при проходке сверхглубокой скважины в метаморфических и магматических породах Балтийского щита.

Наметился также ряд направлений совершенствования методики разработки технологии бурения скважин шарошечными долотами скалывающего типа в осадочных породах с учетом их механических свойств. Так, результаты проведенного во ВНИИБТ исследования влияния сложного вдавливания (вдавливания с боковым смещением) на механические характеристики горных пород [32] могут быть использованы для уточнения расчетной формулы механической скорости проходки осадочных пород долотами скалывающего типа и более точной оценки сопротивления пород разрушению.

Получены интересные результаты по влиянию скорости на процесс деформации и разрушения горных пород при вдавливании.

Учитывая, что для прогнозной оценки прочности и эффективности разрушения пород при сверхглубоком бурении необходимы данные лабораторного изучения механических свойств различных пород, следует в ближайшие годы объединить усилия многих исследователей для дальнейшего совершенствования методик и накопления результатов лабораторных исследований влияния основных забойных факторов на процесс разрушения пород при сверхглубоком бурении и использования их для оценки параметров режима и буримости пород.

Характеристика и физические свойства испытанных карбонатных пород различных структурно-генетических типов

Структурно-генетический тип пород [22, 124]		№ образцов	$K_{\text{потк}} \%$ ($K_{\text{общ}} \%$)	α	$\frac{\text{MgCO}_3}{\text{CaCO}_3} \%$	Район отбора, площадь, возраст, глубина, м	Литолого-петрографическая характеристика породы
1	2	3	4	5	6	7	8
Органогенные породы	1. Биоморфные известняки	2051	0,68 (1,26)	35,0		Кавказ. Баксанская площадь, скв. 12, 471—477,7 Y ₃	Известняк онколито-микрогустковый. Сгустки пелитоморфного кальцита размером 0,01—0,1 мм составляют 20%. Цемент микротонкозернистый, кальцит (80%), базального типа. Текстура — тонкослоистая
		2297	1,57	0,9	0,6 98,0	Кавказ. Церик-Гельская площадь, скв. 1(3), 1132—1152 Y ₃	Известняк онколито-комковатый. Комки пелитоморфного кальцита размером 0,05—0,2 мм и онколиты 0,5—3 мм составляют 40%. Цемент мелко-среднезернистый кальцит (60%), базального типа
		43—10/П71	2,20	2,1		Пермская обл. Тукачевская площадь, скв. 2, 1393—1396 C ₂ KS	Известняк фораминиферо-водорослевый. Цемент — тонкозернистый кальцит (10—15%), порового типа
		763—5/2	3,90	10,7		Башкирия, площадь Кузбаево, 1394—1409 C _{1t}	Известняк онколито-микрогустковый. Сгустки сложены пелитоморфным кальцитом. Цемент — микро-тонкозернистый кальцит, базально-порового типа
		168—8/П71	7,50	0,8		Пермская обл. Площадь Гондырь, скв. 4, 925,5—928,8 C _{2mk}	Известняк фузулинидовый. Цемент — (40%) тонкозернистый, доломитовый, базального типа. Текстура — слоистая

Органогенные породы

II. Биоморфно-детритусовые и биодетритусовые известняки

343—10/П71	17,9	3,5	— 96,5	Пермская обл. Площадь Медянка, Ключи, скв. 61П, 1378,5—1381 С ₂ б	Известняк фораминиферово-водорослевый. Органогенный материал составляет 75—80%. Цемент — тонкозернистый кальцит, кристификационного типа
36—124П	0,90	5,3	1,02 91,66	Пермская обл. Всеволодо-Вильвенская площадь, скв. 36, 2732—2736,5	Известняк органогенно-детритовый. Детрит криноидный. Цемент (40—50%) — микрозернистый кальцит
36—40П	1,1	0,9	16,8 79,9	Пермская обл. Всеволодо-Вильвенская площадь, скв. 36, 2084,7—2090,2 С ₂ ks	Известняк фораминиферовый доломитизированный. Доломит (50%) представлен ромбоэдрами размером 0,01—0,1 мм
2275	1,04 (1,72)	4,4		Кавказ. Церик-Гельская скв. 1(3), 1103—1106	Известняк микробрекчиевидный, слабодоломитизированный. Фрагменты микрогусткового и губкового строения размером 1—5 мм составляют 60%. Цемент — микрозернистый кальцит (40%). Текстура — слоистая
2165—2167 2169	2,10	15,6	71	Кавказ. Баксанская площадь, 2021—2024, 2026—2029, 2036—2038 Y ₃	Известняк онколитово-детритусовый окремненный, цемент (45—50%) — шламовый, доломитовый, базального типа
2155	2,71	7,0	29,6 57,0	Кавказ. Баксанская площадь, скв. 4, 604—606 Y ₃	Известняк микробрекчиевидный. Детрит — криноидный (2—4 мм) и мшанки составляют 50%. Цемент (50%) — микрозернистый кальцит. Текстура — слоистая
2176	3,39	10,3		Кавказ. Баксанская площадь, скв. 22, 2054—2059 Y ₃	Известняк онколитово-детритусовый. Цемент (50%) — шламовый

Структурно-генетический тип пород [22, 124]		№ образцов	$K_{\text{п.отк}} \%$ ($K_{\text{п.общ}} \%$)	α	$\frac{\text{MgCO}_3}{\text{CaCO}_3} \%$	Район отбора, площадь, возраст, глубина, м	Литолого-петрографическая характеристика породы
1	2	3	4	5	6	7	8
Хемогенные породы	III. Микрозер- нистые известняки	9—10/П71	3,80	2,3		Пермская обл. Тука- чевская площадь, скв. 11, 1442—1444,6 С ₂ ks	Известняк водорослево-форамини- феровый с обломками брахиопод, кри- ноидей. Цемент (15—20%) — тонко- мелкозернистый кальцит, порового типа
		2014	4,48	4,0	$\frac{66}{22}$	Кавказ. Баксанская площадь, скв. 12, 274, Y ₃	Известняк микробрекчиевидный, до- ломитовый. Комки пелитоморфного кальцита размером 0,1—0,4 мм соста- вляют 10%. Цемент (90%) — пелито- морфный кальцит с ромбоэдрами до- ломита (70%)
		1K	22,7	7,6	$\frac{20,0}{80,0}$	Карьер Коробчеево	Известняк водорослевый, доломито- вый. Остатки водорослей (до 1 мм) составляют 20%. Цемент — пелито- морфный кальцит (50%), доломит (до 0,02 мм) — 20%
		2041	1,16	3,7	84,5	Кавказ. Баксанская площадь, скв. 12, 400— 402,2 Y ₃	Известняк микрозернистый, одно- родный, размер зерен кальцита 0,005— 0,01 мм. Текстура массивная шламм (0,02 мм) — до 30%
		2042	1,73 (2,24)	10,2	20,0	402,2—403,8 Y ₃	Известняк микрозернистый, доломит- овый, размер зерен кальцита — 0,005—0,01 мм (65%). Доломит со- ставляет ~20%

IV. Доломиты	2228	1,78	3,9— —5,04	33,6 64,6	Кавказ. Баксанская площадь, скв. 22, 2484— 2488, Y ₃	Известняк микрозернистый. Размер зерен — 0,005—0,01 мм. Текстура — слоистая
	2005	1,86	3,3	3,5 95,2	Кавказ. Баксанская площадь, скв. 12, 248— 251, Y ₃	Известняк микрозернистый. Размер зерен кальцита — 0,005—0,1 мм (50%). Участками порода близка к форами- нифериокомковатому известняку
	<u>194—13</u> <u>П71</u>	1,80	0,5		Пермская обл. Сень- кинская площадь, скв. 1121, 1360—1365, C ₂ b	Известняк микрозернистый, одно- родный. Текстура — массивная
	177—4/П71	5,1	0,4		Пермская обл., пло- щадь Тюндюк, скв. 58, 1218—1224, C ₂ b	Известняк микрозернистый с детри- том, алевроитовый
	36/58П	1,0	2,56	27,56 62,03	Пермская обл. Всево- лодо-Вильвенская пло- щадь скв. 36, 2123—2128, C ₂ ks	Доломит тонкозернистый с релик- тами органогенной структуры. Ромбо- эдри доломита имеют размер 0,01— 0,03 мм
	3306	2,45 (3,27)	10,6	37,5 56,3	Кавказ. Площадь Ар- гудан-Урух, скв. 36, 2404—2407 Y ₃	Доломит микрозернистый с релик- тами комковатого известняка. Ромбо- эдри доломита имеют размеры 0,016— 0,1 мм. Микрозернистая часть с комоч- ками размером 0,05—0,08 мм состав- ляет 50%
	2076	3,11	41,7		Кавказ. Баксанская площадь, скв. 14, 415— 421,5 Y ₃	Доломит с реликтами биоморфной структуры. Онколиты (0,3 мм) и ком- ки пелитоморфного кальцита (0,02— 0,2 мм) составляют 30—40%, доломит (до 0,3 мм) 50%. Цемент — пелито- морфный кальцит (10—20%)

Характеристика и физические свойства испытанных метаморфических и магматических пород, типичных для одного из разрезов Балтийского щита

Петрографический тип породы	№ образцов	K _{потк} %	V _p км/с	Группы		Район отбора, площадь, скважина, глубина, м	Петрографическое описание пород
				по составу	по измененности		
1	2	3	4	5	6	7	8

Породы печенгской осадочно-эффузионной серии

Диабаз	1/70	1,81	6,0	II	V	Балтийский щит, участок Райсойви, скв. 1380, глубина 36,0—43,15	Диабаз. Плагноклаз — 49, пироксен — 35, титано-магнетит — 10, хлорит — 5, аксессуарные — 1
Габбро-диабазы	27/70	2,02	6,1	II	V	Балтийский щит, участок Кириеджипори, скв. 1645, глубина 210,5—217,9	Габбро-диабаз. Лабрадор — 50, авгит — 39,5, титано-магнетит — 8,5, хлорит — 2, мелко-среднезернистый
	9/70	0,75	6,3	II	V	Балтийский щит, участок Райсойви, скв. 1380, глубина 292,4—299,6	Габбро-диабаз. Пироксен — 52,6, лабрадор — 40,3, хлорит — 4,2, сфен — 2,9, мелкозернистый
	10/70	0,69	6,35	I	V	Балтийский щит, участок Райсойви, скв. 1380, глубина 334,6—339,4	Габбро-диабаз. Плагноклаз — 60,3, пироксен — 31,6, эпидот — 7,1, рудный — 1, мелко-среднезернистый
Габбро	25/70	2,78	6,4	II	IV	Балтийский щит, участок Кириеджипори, скв. 1645, глубина 72—81	Габбро меланократовое. Пироксен — 34,3, титанит — 15,8, пирротин — 25,5, лабрадор — 25,1, аксессуарные — 1,3
Туффит	20/70	0,80	3,1	—	—	Балтийский щит, участок Кириеджипори, скв. 1655, глубина 176,7—181,7	Туффит. Пирротин — 30%, обломочная часть — 20% (осколки полевых шпатов, карбонат) глинистые частицы — 50%

Туффит	33/70	0,33	—	—	—	Балтийский щит, участок Нижне-Ждановский, скв. 1753, глубина 50,0	Туффит. Пирротин — 30%, обломочная часть — 40% (осколки полевых шпатов, обломки гранитных пород), глинистые частицы с примесью пеплового материала 30%, мелкозернистый
Сланцы, филлиты	6/70	0,88	5,7	III	I	Балтийский щит, участок Райсоайви, скв. 1380, глубина 109,7—118	Филлит. Кварц — 14,5, слюды — 25, пирротин — 60, акцессорные — 0,5
	28/70	0,58	6,1	III	I	Балтийский щит, участок Кириеджипори, скв. 1645, глубина 269—271,5	Филлит. Кварц — 9,5, мусковит — 52, рудный минерал — 38,5, мелкозернистый
	81/70	0,65	5,5	III	II	Балтийский щит, участок Луостари, скв. 3, глубина 131,3—138,3	Сланец биотит—кварцевый. Биотит — 70,0, кварц — 15, пирит — 0,70, эпидотцоизитовые включения — 14,3, мелкозернистый
	88/70	2,5	5,3	III	I	Балтийский щит, участок Лайпишнюн, скв. 742, глубина 574,2	Биотит—амфиболовый сланец. Роговая обманка — 53,5, кварц — 25, биотит — 10,2, рудный — 11,3, мелкозернистый
	16/70	1,05	5,5	III	I	Балтийский щит, участок Кириеджипори, скв. 1655, глубина 59,5—62,0	Филлит. Кварц — 11, пиррит — 21, мусковит — 67,5, титанит — 0,5
	105/70	1,8	—	II	V	Балтийский щит, участок Рижгуба, скв. 51, глубина 8,18—9,18	Кварцито-сланец. Биотит — 30, мусковит — 10, плагиоклаз — 50, кварц — 10, среднезернистый
Песчаники	3/70	0,88	5,9	—	—	Балтийский щит, участок Райсоайви, скв. 1380, глубина 36—43,15	Песчаник. Кварц — 65, цемент: карбонатно-базальный — 5, глинистый — 30, мелко-среднезернистый
	5/70	0,56	6,0	—	—	Балтийский щит, участок Райсоайви, скв. 1380, глубина 109,7—118	Песчаник. Обломочная часть — 50, кварц, глинистые частицы; цемент: глинистый — 30, карбонатный, базальный — 10—20, разнозернистый

Петрографический тип породы	№ образцов	$K_{\text{потк'}}$ %	V_p' км/с	Группы		Район отбора, площадь, скважина, глубина, м	Петрографическое описание пород
				по соста- ву	по изме- ненности		
1	2	3	4	5	6	7	8
Породы пласто- вых интрузий ос- новного и ультра- основного состава	18/70	0,81	6,2	—	—	Балтийский щит, уча- сток Кириеджипори, скв. 1655, глубина 98,1— 101,9 м	Песчаник. Мелкозернистый, массивный.
	6441/70	0,95	—	III	V	Балтийский щит, сверхглубокая скв., глу- бина 1788,4	Серпентинит. Серпентин — 73, карбонат — 2: рудный — 25, тонкозернистый
	30/70	1,66	6,6	III	II	Балтийский щит, уча- сток Кириеджипори, скв. 1619, глубина 27,2— 31,9	Пироксенит. Пироксен — 80, серпентин — 11, пирротин — 9, крупнозернистый
	77/70	1,56	5,1	III	V	Балтийский щит, уча- сток Печенга, скв. 51, глубина 255,1—262	Пироксенит. Плагиоклаз — 18,1 пироксен — 69,3, биотит — 11,3, рудный — 1, аксессуар- ные — 0,3, крупнозернистый
	37/70	0,88	5,7	III	V	Балтийский щит, уча- сток Соукер, скв. 1831, глубина 296,1—302,2	Перидотит. Оливин — 70, пи- роксен — 11,5, магнетит — 15, хлорит — 3,5, среднезернистый

Породы Кольской серии

Гнейсы	46/70	1,06	5,1	II	III	Балтийский щит, уча- сток Аллареченское, скв. 258, глубина 38,25—41,0	Гнейс биотитовый. Биотит — 12,3, кварц — 53,5, микроклин — 25, плагиоклаз — 8,0, аксессуар- ные — 1,2, среднезернистый
	71/70	0,73	6,0	II	III	Балтийский щит, уча- сток Луостари, скв. 3, глубина 304,6—309,6	Гнейс биотитовый. Биотит — 32,3, мусковит — 13,7, плагио- клаз — 17,7, кварц — 35,5, ак- сессуары и рудный минерал — 0,8

116/70	0.51	—	II	III	Балтийский шит, уча- сток Партер, скв. 1100, глубина 252—253
118/70	0.44	—	II	III	Балтийский шит, уча- сток Партер, скв. 1100, глубина 354—357
63/70	0.55	6.1	I	I	Балтийский шит, уча- сток горы Широкая, скв. 934, глубина 67,8— 68,7
119/70	0.83	—	II	III	Балтийский шит, уча- сток Партер, скв. 1100, глубина 350,4—354
117/70	0.65	—	II	V	Балтийский шит, уча- сток Партер, скв. 1100, глубина 450,85—456,7
120/70	1.52	—	II	V	Балтийский шит, уча- сток Партер, скв. 1100, глубина 1025,6—1025,9
40/70	0.95	6.0	II	III	Балтийский шит, уча- сток Аллареченское, скв. 258, глубина 324—331
65/70	2.43	4.5	II	I	Балтийский шит, уча- сток горы Широкая, скв. 936, глубина 167—172

Амфиболиты

Гнейс биотитовый. Биотит — 40, мусковит — 15, хлорит — 10, кварц — 24, полевой шпат — 10, рудный — 1
Гнейс биотитовый. Биотит — 39,5, мусковит — 21,0, кварц — 16,0, полевой шпат — 10, титанит — 10,5, рудный — 3, среднезернистый
Гнейс биотитовый с гранатом. Биотит — 35, роговая обманка — 15, кварц — 25, глаукоклаз — 10, гранат — 14, акцессорные — 1, среднезернистый
Гнейс амфибол-биотитовый. Роговая обманка — 42,5, биотит — 31,3, плагиоклаз — 4,8, кварц — 21, акцессорные минералы — 0,4, среднезернистый
Гнейс амфибол-биотитовый. Роговая обманка — 30, биотит — 25, плагиоклаз — 20, кварц — 15, хлорит — 10
Гнейс двуслюдистый. Биотит — 35, мусковит — 10, пироксен — 20, кварц — 32, рудный — 3, среднезернистый
Амфиболит. Роговая обманка — 47,2, кварц — 18,7, плагиоклаз — 25,7, биотит — 7,3, акцессорные — 1,1 Порода рассланцована, среднезернистая
Амфиболит. Роговая обманка — 81,33, кварц — 11,67, плагиоклаз — 6,2, акцессорные — 0,8. Порода слабо разгнейсована, крупно-среднезернистая

Петрографический тип породы	№ образцов	$K_{\text{Потк}}'$ %	V_p' км/с	Группы		Район отбора, площадь, скважина, глубина, м	Петрографическое описание пород
				по составу	по измененности		
1	2	3	4	5	6	7	8
Гранито-гнейсы	41/70	1,71	—	I	I	Балтийский щит, участок Аллареченское, скв. 258, глубина 224—226	Гранито-гнейс плагиоклазо-микроклиновый. Микроклин — 41,3, кварц — 20,4, плагиоклаз — 38, хлорит — 0,3. Порода среднезернистая, сланцеватость под углом 60—80° к оси кернa
	115/70	1,2	—	I	II	Балтийский щит, участок Партер, скв. 1100, глубина 252—253	Гранито-гнейс биотито-плагиоклазовый. Биотит — 15, мусковит — 8, кварц — 17, плагиоклаз — 57, акцессорные и рудный — 3. Порода средне-мелкозернистая
Граниты	70/70	0,73	—	I	II	Балтийский щит, участок Луостари, скв. 3, глубина 300,7—308,6	Гранит лейкократовый. Кварц — 43,7, плагиоклаз — 42,0, микроклин — 3, биотит — 7,3, мусковит — 3,5, рудный — 0,5
	72/70	1,15	—	I	I	Балтийский щит, участок Луостари, скв. 3, глубина 302,1	Гранит полевошпатовый. Плагиоклаз — 62, микроклин — 15, кварц — 14, мусковит — 5, вторичные минералы — 4. Порода крупнозернистая
	50/70	0,78	4,3	I	III	Балтийский щит, участок Аллареченское, скв. 258, глубина 114,4	Гранит плагиоклазо-микроклиновый. Кварц — 26,9, биотит — 21,1, микроклин — 5,6, плагиоклаз — 45,4, акцессорные — 1. Среднезернистый

56/70	1,31	—	I	I	Балтийский щит, участок Аллареченское, скв. 258, глубина 160,72—162,5	Гранит плагиоклаз-микроклиновый. Плагиоклаз — 52, микроклин — 16, кварц — 30, мусковит — 5, акцессорные — 3, крупнозернистый
55/70	7,42	4,8	I	I	Балтийский щит, участок Аллареченское, скв. 258, глубина 140,9—142,5	Гранит микроклиновый. Кварц — 25, микроклин — 65, плагиоклаз — 8, биотит — 2, крупнозернистый
64/70	2,2	—	I	III	Балтийский щит, участок Широкая, скв. 933, глубина 29,50	Плагиогранит. Плагиоклаз — 58,5, кварц — 40, акцессорные — 1,5, разнозернистый
75/70	0,45	—	II	III	Балтийский щит, участок Луостари, скв. 4, глубина 447,7	Гранит биотитовый. Биотит — 31, мусковит — 8,5, кварц — 40,5, плагиоклаз — 18, рудный — 2,0, мелкозернистый
53/70	0,96	—	I	V	Балтийский щит, участок Аллареченское, скв. 258, глубина 214,65	Мигматит плагиомикроклинового гранита. Микроклин — 45, плагиоклаз — 35, кварц — 15, роговая обманка — 5

Породы гранулит-базитового (базальтового) слоя

Предположительно магматические и метаморфические породы среднего и основного состава

1193/94	1,07	—	I	I	Балтийский щит, участок Печенга, район Ура-Губа	Диорит. Кварц — 10, плагиоклаз — 60, гиперстен — 20, роговая обманка — 8,5, крупнозернистый
1181/1700	1,44	—	II	I	Балтийский щит, река Яуры—Юоки	Диорит гиперстеновый. Кварц — 2, плагиоклаз — 45, гиперстен — 25, диопсид — 13,5, роговая обманка — 10, биотит — 3
1192/1706	1,68	—	I	I	Балтийский щит, участок Печенга, район горы Пятспакша	Анортозит. Плагиоклаз — 80, гранат — 4, роговая обманка — 5, скаполит — 9, среднезернистый

Петрографический тип породы	№ образцов	$K_{\text{Потк}}'$ %	V_p км/с	Группы		Район отбора, площадь, скважина, глубина, м	Петрографическое описание пород
				по составу	по изменности		
1	2	3	4	5	6	7	8
	67/70	2,41	6,1	II	V	Балтийский щит, участок Печенга, скв. 51, глубина 255,5—262	Габбро-норит. Пироксен — 50, роговая обманка — 9, плагиоклаз — 40, рудный — 1
	1179/1416	1,16	—	III	V	Балтийский щит, участок Печенга	Габбро-норит оливиновый. Плагиоклаз — 20, гиперстен — 35, диопсид — 25, оливин — 10, актинолит — 3, среднезернистый
	12/70	0,99	6,6	III	I	Балтийский щит, участок Райсойви, скв. 1380, глубина 334—339,4	Пироксенит оливиновый. Оливин — 31,7, гиперстен — 65,3, плагиоклаз — 1,0, серпентин — 2, среднезернистый
	78/70	2,54	6,1	II	II	Балтийский щит, участок Печенга, скв. 51, глубина 159—167	Пироксенит. Пироксен — 48,2, плагиоклаз — 21,3, биотит — 8,7, хлорит — 11,0, рудный — 10,8, среднезернистый
	93/70	1,60	6,1	II	II	Балтийский щит, участок Юг горы Ниттис, скв. 904а, глубина 251,4—254,7	Пироксенит. Пироксен — 55, плагиоклаз — 30, биотит — 9, рудный — 6
	94/70	1,29	6,4	III	III	Балтийский щит, участок Юг горы Ниттис, скв. 904а, глубина 415,4—418	Пироксенит. Пироксен — 70, плагиоклаз — 20, мусковит — 10, среднезернистый

95/70	1,22	7,65	III	V	Балтийский щит, участок Юг горы Нитти, скв. 904а, глубина 521,4—527	Пироксенит. Пироксен — 65, плагиоклаз — 30, мусковит — 4, акцессорные — 1, мелкозернистый
89/70	1,10	6,1	III	V	Балтийский щит, участок Юг горы Ниттис, скв. 904а, глубина 80,08—83,6	Оливинит. Оливин — 92, рудный — 8, неравномернозернистый, выветренный
90/70	3,23	—	III	I	Балтийский щит, участок Юг горы Ниттис, скв. 904а, глубина 134,3—137,1	Оливинит. Оливин — 99, рудный — 1, среднезернистый, трещиноватый
92/70	1,83	6,1	III	I	Балтийский щит, участок Юг горы Ниттис, скв. 904а, глубина 180,4—184,3	Оливинит. Оливин — 94, рудный — 4,3, серпентин — 1,7, равномернозернистый
97/70	1,24	6,1	III	I	Балтийский щит, участок Юг горы Ниттис, скв. 904а, глубина 916—920,4	Перидотит. Пироксен — 60, оливин — 35, слюда — 5, среднезернистый
98/70	1,27	6,3	III	I	Балтийский щит, участок Юг горы Ниттис, скв. 904а, глубина 985,5—989,5	Перидотит. Пироксен — 66, оливин — 33,5, акцессорные — 0,5, порфировидный
1126	0,78	—	III	I	Балтийский щит, гора Кумужья	Перидотит. Плагиоклаз — 10, пироксен — 13,9, оливин — 75, разномзернистый
1121	0,31	—	III	I	Балтийский щит, гора Сопча, скв. 165, глубина 400	Пироксенит. Гиперстен — 90, диопсид — 9,5, крупнозернистый
1133	1,16	—	III	I	Балтийский щит, участок горы Ю. Ниттис, глубина 87	Оливинит. Оливин — 90, рудный — 8, акцессорные — 2

Характеристика и физические свойства испытанных образцов песчано-алевритовых пород-коллекторов нефти и газа

Класс пород	№ образцов	Коллекторские свойства		Район отбора, площадь, скважина, глубина, м, возраст	Литолого-петрографическое описание пород
		$K_{п, \%}$	$K_{пр, мД}$		
1	2	3	4	5	6
II	253/69	17,1	—	Башкирия, Стахановская площадь, скв. 1, 1857—1863, D	Песчаник кварцевый (99%), крупнозернистый. Цемент — глинисто-карбонатный (<2%) срастание зерен — слабое $\eta_{гп} < 0,1$
	245—5/1	18,4	870	Татария, Усть-Икская площадь, скв. 321, 1511—1516 $D_3fr_{1sch}(D_I)$	Песчаник кварцевый (98%), среднезернистый. Цемент глинистый — неравномернопоровый (1—2%), срастание зерен — слабой и средней степени $\eta_{гп} < 0,1$
	445/69	20,7	627	Башкирия, Чишминская площадь, скв. 6921, 1655—1657 $D_3fr_{1sch}(D_I)$	Песчаник кварцевый (98%), мелкозернистый, хорошо отсортированный без минерального цемента. Срастание зерен — слабое $\eta_{гп} = 0$
III	24	23,6	485	Бородулинская скв. 1 $R_{пв}$	Песчаник кварцевый (80—90%), мелкозернистый, хорошо отсортированный. Минерального цемента — нет. Срастание зерен — средней степени $\eta_{гп} = 0$
	434/62	20,5	433	Татария. Мензелино-Актанышская площадь, скв. 9, 1742—1746 $D_2gvml + str(D_{II} + D_{III})$	Песчаник кварцевый (90—95%), мелкозернистый, хорошо отсортированный. Минеральная цементация — слабая (<1—1,5%). Срастание зерен среднее $\eta_{гп} < 0,1$

Класс пород	№ образцов	Коллекторские свойства		Район отбора, площадь, скважина, глубина, м, возраст	Литолого-петрографическое описание пород
		$K_p, \%$	$K_{пр. мД}$		
1	2	3	4	5	6
III	484/62	19,8	702	Татария. Муслимовская площадь, скв. 34, 1722—1727 D_3frml	Песчаник кварцевый (>70%), мелкозернистый, хорошо отсортированный. Цемент — глинисто-сидеритовый (2—3%). Срастание зерен слабое, среднее $\eta_{гп} = 0,13$
	462/62	20,2	490	Татария. Ю. Бондюжская площадь, скв. 155, 1632—1644 $D_3fr_1psch(D_I)$	Песчаник кварцевый (80%) мелкозернистый, хорошо отсортированный. Цемент — карбонатный (<2%). Срастание зерен — среднее $\eta_{гп} = 0$
	576/69	17,0	680	Татария. Ю. Ромашкинская площадь, скв. 6582, 1647—1647,6 $D_3fr_1psch(D_I)$	Песчаник кварцевый (>70%) мелкозернистый хорошо отсортированный. Цемент — глинистый (8—10%) неравномерно-поровый. Срастание зерен — среднее, $\eta_{гп} = 0,34$
	115/69	14,5	375	Татария. Бакалинская площадь, скв. 5, 1606,5—1609,9 $D_3frpsch(D_I)$	Песчаник кварцевый (80%) алевритовый среднеотсортированный. Цемент — глинистый (5%) порового типа. Срастание зерен — слабое. Текстура породы микрослоистая $\eta_{гп} = 0,26$
IV	825/59	19,7	380	Татария. Сулеевская площадь, скв. 2131, 1707—1712 $D_2jv(D_{III})$	Песчаник кварцевый (80—85%) алевритовый, хорошо отсортированный. Цемент — глинисто (15—16%) карбонатный (2—4%). Срастание зерен — среднее $\eta_{гп} = 0,43$

Класс пород	№ образцов	Коллекторские свойства		Район отбора, площадь, скважина, глубина, м, возраст	Литолого-петрографическое описание пород
		$K_n, \%$	$K_{np}, \text{мД}$		
1	2	3	4	5	6
IV	483/62	18,5	370	Татария. Муслюмовская площадь, скв. 34, 1722—1727 D _I D ₃ fr,psh (D _I)	Песчаник кварцевый (97%) алевроитовый, хорошо отсортированный. Цемент — глинисто-карбонатный (3—5%). Срастание зерен — среднее. Текстура — слоистая $\eta_{гл}=0,17$
V	438—5/1	15,0		Татария. Ромашкинская площадь, скв. 5081, 1757—1770 D ₂ juvstr (D _{III})	Алевролит кварцевый (75—80%), крупнозернистый, хорошо отсортированный. Цемент — карбонатный (<2%). Срастание зерен — слабое, среднее $\eta_{гл}=0$
VI	138/69	16,2	190	Башкирия. Субханкуловская площадь, скв. 3, 1741—1746 D ₂ j (D _{IV})	Песчаник кварцевый (80%), мелко-среднезернистый, среднеотсортированный. Цемент—карбонатно- (2%) глинистый (10—12%). Срастание зерен — сильное $\eta_{гл}=0,43$
	830/59	14,8	90	Татария. Миннибаевская площадь, скв. 2 D ₂ e — D ₂ juv (D _{IV} — D _V)	Песчаник кварцевый (80%), мелко-среднезернистый, среднесортированный. Минерального цемента — нет. Срастание зерен — среднее. Текстура — слабослоистая $\eta_{гл}=0$
	187K	15,8		Краснодар. Ахтырская площадь, скв. 75, 1944—1954 N ₁ m (II _T)	Песчаник полевошпатово (20%) -кварцевый (60%) с глауконитом (20%), мелкозернистый. Цемент — глинистый, текстура слабослоистая

Класс пород	№ образцов	Коллекторские свойства		Район отбора, площадь, скважина, глубина, м, возраст	Литолого-петрографическое описание пород
		$K_n, \%$	$K_{пр}, мД$		
1	2	3	4	5	6
VI	91/69	16,7	180	Татария. Абдурахмановская площадь, скв. 9176, 1790—1791 $D_3frpsch(D_1)$	Песчаник кварцевый, мелкозернистый, среднеотсортированный. Цемент глинистый (5%). Срастание зерен — среднее
	145/69	15,8	165	Татария. Серафимовская площадь, скв. 5, 1678—1685 $D_3frpsch(D_1)$	Песчаник кварцевый алевритовый. Цемент глинистый (5%), карбонатный (2%). Срастание зерен — среднее
	146/69	17,1	135	„	„
VII	1736K	20,3	170	Краснодар. Ахтырско-Бугундырская площадь, скв. 375, 1769—1770 p_1^3gk	Алевролит кварцевый (60%), крупнозернистый среднеотсортированный. Цемент карбонатный (12%), глинистый (5%), глауконитовый (3—5%). Срастание зерен — среднее. Текстура — микро-слоистая $\eta_{гп}=0,19$
	128—5/1	19,3		Татария. Кучуковская площадь, скв. 62, 1741—1746 D_3f_2	Алевролит кварцевый, мелкозернистый, среднеотсортированный, сильноглинистый. Цемент глинистый (50%), $\eta_{гп}=0,7$
	2—12/59 B71	16,9	68,5	Волгоградская обл. Коробковская площадь. 59 3429—3432 $D_3frpsch$	Алевролит кварцевый среднесортированный, кварц — 65—70%, полевые шпаты — 2—3%. Цемент: гидрослюдистый (10—15%), каолинитовый (8—10%), сидеритовый — 8%, кальцитовый (5—7%) порового типа. Срастание зерен — среднее

Класс пород	№ образцов	Коллекторские свойства		Район отбора, площадь, скважина, глубина, м, возраст	Литолого-петрографическое описание пород
		K_p , %	$K_{пр}$, мД		
1	2	3	4	5	6
VII	85/69	18,4	85	Татария. Абдурахмановская площадь, скв. 9176, 1784—1784,5 $D_3frpsch$	Алевролит кварцевый, цемент — глинистый (10—15%). Срастание зерен — сильное $\eta_{гп}=0,5$
	731K	17,8	55	Краснодар. Ахтырско-Бугундырская площадь, скв. 735, 1484—1486 $P_{1cc}(IV_1)$	Алевролит полевोшпатово (20%) — кварцевый (60%), среднеотсортированный. Цемент — глинистый (5%), карбонатный (5%). Срастание зерен — среднее, сильное $\eta_{гп}=0,2$
VIII	463—5/1	19,7	25	Татария. Сулинская площадь, скв. 87, 1952—1953 D_1	Песчаник кварцевый разномзернистый, средне-плохоотсортированный. Цемент — карбонатный базального типа. Срастание зерен — среднее
	653—5/1	10,1	30	Татария. Тавтимановская площадь, скв. 8, 2405—2414 $D_3fr kin(D_0)$	Песчаник кварцевый разномзернистый, средне-плохоотсортированный. Цемент — карбонатный базального типа. Срастание зерен — среднее
IX	775—5/2	8,7	38	Башкирия. Н.-Хазинская площадь, скв. 21, 1850—1885	Песчаник кварцевый (75—80%), мелкозернистый, среднеотсортированный. Цемент — кварцевый регенерационный. Срастание зерен — сильное
	27—17/B71	18,4	42	Волгоградская обл. Сиротинская площадь, скв. 17, 2695—2700 D_3I_2psch	Песчаник кварцевый разномпористый, плохо отсортированный. Цемент: каолиновый (8—10%), гидрослюдистый (3—4%) порового типа. Срастание зерен среднее — сильное

Класс пород	№ образцов	Коллекторские свойства		Район отбора, площадь, скважина, глубина, м, возраст	Литолого-петрографическое описание пород
		$K_n, \%$	$K_{np}, \text{мД}$		
1	2	3	4	5	6
IX	37—22/206 B71	18,6	44,2	Волгоградская обл. Ку-диновская площадь, скв. 206, 2822—2828	Песчаник полевошпатово-кварцевый (%) разнозернистый. Цемент — глинистый (10%). Срастание зерен — среднее — сильное
	26—210/7 B71	7,2	16,2	Волгоградская обл. Петрушинская площадь, скв. 7, 2977 D	Песчаник аркозовый мелко-среднезернистый слюдистый. Цемент — глинистый (<3%)
X	1739K	20,4	35	Краснодар. Ахтырско-Бугундырская площадь, скв. 125, 1580—1590 p_1^{3gk}	Алевролит кварцевый (60—65%), глинистый мелкозернистый. Цемент — глинистый (15%) карбонатный (5%) $\eta_{гп}=0,42$
XI	1053K	24,0	20	Краснодар. Бугундырская площадь, скв. 245, 1840—2035 P_1^{3il} (VI, а, б—VII, а)	Алевролит полевошпатово-кварцевый (50%) с глауконитом (15%). Цемент — глинистый (25—30%)
	29—35 201B71	9,0		Волгоградская обл., Тарасовская площадь, скв. 201, 3942—3594 Д ₂ (?)	Алевролит кварцевый неравномерноглинистый (до 20%), тонкослоистый. Цемент — глинистый (10%)
	1651K	6,5	2,0	Краснодар, Староминская площадь, скв. 8, 2088—2091 Cr_1	Алевролит полевошпатово-кварцевый (40%), глинистый. Цемент — глинистый (50%) базального типа. Текстура — микротонкослоистая $\eta_{гп}=0,88$

Класс пород	№ образцов	Коллекторские свойства		Район отбора, площадь, скважина, глубина, м, возраст	Литолого-петрографическое описание пород
		$K_p, \%$	$K_{пр}, мД$		
1	2	3	4	5	6
XI	733K	11,6	1,2	Краснодар. Ахтырско-Бугундская площадь, скв. 735, 1533—1536 $P_1^{acc}(IV_T)$	Алевролит полевошпатово (10%)-кварцевый (50%) с глауконитом. Цемент — карбонатный (30—35%) неравномерно-базальный. Срастание зерен — среднее
	536K	5,6	3,0	Краснодар. Ахтырско-Бугундская площадь, скв. 530, 1862—1865 $P_1^{sil}(VIa)$	Песчаник полевошпатово (3—5%)-кварцевый (35—40%) с глауконитом (7%) мелко-среднезернистый, цемент карбонатный (50%) порово-базального типа
	28—37	11—14,6	1,5—8,0	Бородулинская скв. 1, 2970—3003 Rnbv	Песчаники полевошпатово-кварцевые, мелкозернистые и алевритовые. Цемент — глинистый (10—12%) или карбонатный (10%). Срастание зерен — сильное $\eta_{гд} = 0,4—0,5$
XII	44	8,2	< 5	Бородулинская 3036—3039,7 Rnbv	Песчаник полевошпатово-кварцевый, алевритовый. Цемент — глинистый (4%), карбонатный (6%), поровый. Срастание зерен — сильное $\eta_{гд} = 0,32$
	45	8,9	< 5	„	Песчаник полевошпатово-кварцевый, мелкозернистый. Цемент — карбонатный (12%), глинистый (4%) порового типа. Срастание зерен — сильное $\eta_{гд} = 0,31$
	III—I/62	6,3	1,8	„	Песчаник полевошпатово-кварцевый, алевритовый. Цемент — глинистый (3%). Срастание зерен сильное $\eta_{гд} = 0,34$

Состав и строение испытанных глинистых и сульфатно-галогенных пород

Порода	№ образца	K _п , %	Район отбора, глубина, м	Состав и строение
Бентонит оглан-линский	1Г	29,9	Туркмения	Монтмориллонит 98—99%
Каолинит просяновский	2Г		Украина	Гидрослюда
Глина алевроит-стая	3Г	24,7	Закарпатье, площадь Залуш, 202	Гидрослюда, монтмориллонит, хлорит. Примеси — алевроит, кальцит (>30%), текстура — слоистая
Глинистый сланец	4Г	18,9	Стрийская опорная скв. 1, 2600	Гидрослюда, монтмориллонит, хлорит. Примеси — алевроит, кальцит (25%). Текстура — слоистая
Глина	6040	16,1	Амударьинская обл., площадь Ачак, скв. 3, 1785—1790	—
"	6728	12,8	Амударьинская обл., площадь Гугуртли, скв. 3, 1654—1662	—
Глина листовая	9658		Западная Сибирь, Пурпейская площадь, скв. 14, 769—772	Монтмориллонит, гидрослюда
"	9661		Западная Сибирь, Мартымынская площадь, скв. 15, 1565—1570	Гидрослюда
Глина алевроит-стая	9667		Западная Сибирь, Мыхлайская площадь, скв. 1, 1689—1694	Гидрослюда, хлорит, примесь алевроита
Глина алевроит-стая	9654		Западная Сибирь, Аганская площадь, скв. 6, 1740—1744	Хлорит, смешанно-слоистые образования
Аргиллит	9533		Западная Сибирь, Мамонтовская площадь, скв. 241, 2617—2621	Хлорит, гидрослюда
Аргиллит алевроит-истый	9535		Западная Сибирь, Ватинская площадь, скв. 133, 1779—1780	Хлорит, гидрослюда, примесь — алевроит

Порода	№ образца	K_p , %	Район отбора, глубина, м	Состав и строение
Аргиллит алевритистый	9536		Западная Сибирь, Ватинская площадь, скв. 133, 1699—1703	Хлорит, гидрослюда, примесь — алеврит
	9540			
Аргиллит	9543		Западная Сибирь, Очимкинская площадь, скв. 14, 2319—2322	Гидрослюда
Каменная соль	5934		Западная Сибирь, Вахская площадь, скв. 16, 1804—1808	Галит крупнозернистый
„	5A	—	Средняя Азия, площадь Урта-Булак, скв. 12, 1998—2009	Галит — 90%, глина и ангидрит — 10% крупнозернистый
„	2	2,45	Карьер Армения	Галит, примесь алеврита
„	245	3,32	ДДВ. Площадь Озеряне, 1944—1945	Галит, примесь алеврита
„	967	1,05	ДДВ. Площадь Староверовка, 2647—2654	То же
„	3	3,76	ДДВ	„
Гипс	1	28,9	Карпаты	„
Ангидрит	728	1,13	ДДВ. Площадь Озеряне, 2036—2039	„

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авчян Г. М., Матвеев А. А., Стефанкевич З. Б. О методике комплексного определения физических параметров пород при высоких давлениях. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 49. М., «Недра», 1967, с. 164—173.
2. Авчян Г. М. Физические свойства осадочных пород при высоких давлениях и температурах. М., «Недра», 1972, 144 с.
3. Акулинин А. И., Торяник М. Е. Давление при гидравлическом разрыве пласта на месторождении Ключевое. Новости нефтяной техники. — «Нефтепромысловое дело», 1958, № 4, с. 27.
4. Антонов Д. А. Экспериментальное определение коэффициента сжимаемости песчанников. М., Гостоптехиздат, 1957 («Труды УФНИИ», вып. 1).
5. Афанасьев И. И. Статистическая теория усталости прочности металлов. Изд. АН УССР, 1953.
6. Багов М. С., Цой В. И. Экспериментальное определение коэффициента сжимаемости известняков. М., Гостоптехиздат, 1962 («Труды ГрозНИИ. Бурение скважин и добыча нефти», вып. XIII), с. 18—20.
7. Байдюк Б. В. Механические свойства горных пород при высоких давлениях и температурах. М., Гостоптехиздат, 1963, 102 с.
8. Байдюк Б. В. Деформационные свойства осадочных горных пород нефтегазоносных районов Европейской части СССР. Глава V монографии Л. А. Шрейнера и др. — «Деформационные свойства горных пород при высоких давлениях и температурах». М., «Недра», 1968, с. 84—137.
9. Байдюк Б. В. Методика определения и описания деформационных свойств осадочных горных пород в условиях трехосных напряженных состояниях и различных температур. Глава IV монографии Шрейнера Л. А. и др. — «Деформационные свойства горных пород при высоких давлениях и температурах». М., «Недра», 1968, с. 68—83.
10. Байдюк Б. В., Шрейнер Л. А. Влияние напряженного состояния и влажности на устойчивость глинистых пород в скважинах. М., Изд-во АН СССР, 1958 («Труды Института нефти», вып. II), с. 240—263.
11. Байдюк Б. В., Якушев В. П., Константинов А. А. Установка для определения механических свойств горных пород в условиях всестороннего сжатия до 2,5 тыс. кг/см². — В кн.: Приборы для исследования физико-механических свойств и структуры материалов, вып. I. М., ЦИТЭИН, 1962, с. 3—8.
12. Байдюк Б. В., Павлова Н. Н., Бабушкин А. В. Установка для определения механических свойств горных пород в условиях всестороннего сжатия до 5 тыс. кг/см² и при температурах до 350° С. — В кн.: Приборы для исследования физико-механических свойств и структуры материалов, вып. I. М., ЦИТЭИН, 1962, с. 9—20.
13. Байдюк Б. В., Павлова Н. Н. Оценка сравнительной деформируемости горных пород в земной коре. Глава XII монографии Л. А. Шрейнера и др. — «Деформационные свойства горных пород при высоких давлениях и температурах». М., «Недра», 1968, с. 257—261.
14. Байдюк Б. В., Шрейнер Л. А., Лагун Л. И. Исследования деформационных свойств горных пород Волго-Уральской нефтегазоносной области. В кн.: Экспериментальные исследования в области разработки глубоких нефтяных и газовых месторождений. М., «Наука», 1964, с. 6—26.

15. Байдюк Б. В., Шрейнер Л. А. Исследование деформационных свойств различных осадочных пород в условиях совместного влияния всестороннего сжатия и температуры.— В кн.: Физико-механические свойства горных пород верхней части земной коры. М., Изд-во АН СССР, 1968, с. 36—45.
16. Баренблатт Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении.— «Прикладная математика и техническая физика», 1961 (а), № 4, с. 3—56.
17. Баренблатт Г. И. Об основных представлениях теории равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении.— В кн.: Проблемы механики сплошной среды. М., Изд-во АН СССР, 1961 (6), с. 41—58.
18. Баренблатт Г. И. О некоторых общих представлениях математической теории хрупкого разрушения.— «Прикладная математика и механика», т. 28, 1964, № 4, с. 630—643.
19. Барон Л. И., Веселов Г. М., Коняшин Ю. Г. Экспериментальные исследования процессов разрушения горных пород ударом. М., Изд-во АН СССР, 1962, 219 с.
20. Барон Л. И., Логунцов Б. М., Козин Е. З. Определение свойств горных пород. М., Госгортехиздат, 1962, 332 с.
21. Барон Л. И., Глатман Л. Б. Контактная прочность пород. М., «Недра», 1966, 228 с.
22. Безбородова И. В. Верхнеюрские карбонатные отложения центральной части Северного склона Кавказа (междуречье рек Баксан-Черек). Тем. научн.-техн. обзор «Новые методы исследования трещинных коллекторов нефти и газа». М., ВНИИОЭНГ, 1970, с. 38—51.
23. Беликов Б. П. Упругие и прочностные свойства горных пород. 1961 («Труды ИГЕМ АН СССР», вып. 43), с. 47—110.
24. Беликов Б. П., Александров И. С., Рыкова Т. Б. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М., «Наука», 1970, 276 с.
25. Беляевский Н. А., Федынский В. В. Изучение глубинных недр Земли и задачи сверхглубокого бурения.— «Советская геология», 1961, № 12, с. 55.
26. Берг О. Я. Физические основы прочности бетона и железобетона. М., Госстройиздат, 1961.
27. Берч Ф. Некоторые геофизические приложения исследований при высоких давлениях.— В кн.: Твердые тела под высоким давлением. Редакторы В. Пол, Д. Варшауэр. М., «Мир», 1966, с. 157—186.
28. Берч Ф. Сжимаемость, упругие константы. Глава VII «Справочника физических констант горных пород». М., «Мир», 1969, с. 99—164.
29. Брегг У., Кларингбулл Г. Кристаллическая структура минералов. М., «Мир», 1967, 390 с.
30. Бриджмен П. В. Физика высоких давлений. М., ОНТИ, 1935.
31. Бриджмен П. В. Общий обзор исследований при высоких давлениях.— В кн.: Твердые тела под высоким давлением. Редакторы В. Пол, Д. Варшауэр. М., «Мир», 1966, с. 11—25.
32. Бугаев В. Н., Байдюк Б. В. О влиянии бокового смещения на механические характеристики горных пород при вдавливании штампа.— «Бурение», вып. 16, 1969.
33. Булатов В. В. Разрушение горных пород при бурении сверхглубоких скважин. Грозный, 1964, 128 с.
34. Булин Н. К. Современное поле напряжений верхних горизонтов земной коры.— «Геотектоника», 1971, № 3, с. 3—10.
35. Булин Н. К. Современные напряжения в земной коре и их связь с некоторыми механическими свойствами горных пород. Сборник тезисов докладов к Всесоюзному совещанию «Внутренняя геодинамика». Вып. 1. Общие вопросы внутренней геодинамики. Центр. и Ленинград. Областные Правления науч.-техн. горного общества. Л., ВСЕГЕИ, 1972, с. 57—59.
36. Бурлаков И. А., Гудок Н. С. Влияние температуры и общего давления на газопроницаемость горных пород. ЦНИИТЭИнефтегаз.— «Газовое дело», 1965, № 4, с. 13—16.

37. Бухарцев В. П. Об использовании статистических признаков раздробленности фундамента при прогнозе нефтегазоносности. «Нефтегазовая геология и геофизика», 1966, № 2, с. 30—34.
38. Ван-Бюрен. Дефекты в кристаллах. М., ИЛ, 1962, 584 с.
39. Везирова А. Д. Трещиноватость верхнемеловых отложений восточного Предкавказья в связи с их литологическими и физико-механическими свойствами. М., «Недра», 1965 (Труды II Всес. совещ. по трещинным коллекторам нефти и газа), с. 493—500.
40. Волков С. Д. Единая статистическая теория прочности твердых тел. ЖТФ, 23, вып. 11, 1953; вып. 12, 24, 1954, с. 22—50.
41. Волков С. Д. Основы статистической теории прочности. — В кн.: Некоторые проблемы прочности твердого тела, М.—Л., Изд-во АН СССР, 1959, с. 325—333.
42. Воздвиженский Б. И. О бурении сверхглубоких скважин. — «Разведка и охрана недр», 1961, № 12, с. 24—30.
43. Воздвиженский Б. И. О глубоком бурении с поверхности (по проекту Мохол). — «Геология и разведка», 1965, № 8.
44. Волярович М. П., Балашов Д. Б. Исследования скоростей упругих волн в образцах горных пород при давлении до 5 тыс. атм. Изд-во АН СССР, сер. геол. и геофиз., 1957, № 3.
45. Волярович М. П., Стаховская З. И. Исследование модуля Юнга образцов горных пород при всесторонних давлениях до 5000 кг/см² методом изгиба. Изд-во АН СССР, сер. «Геофизика», 1958, № 6.
46. Волярович М. П., Балашов Д. Б., Павлоградский В. А. О сжимаемости изверженных горных пород. Изд-во АН СССР, сер. «Геофизика», 1959, № 5, с. 693—702.
47. Волярович М. П. (ред.) Исследование физико-механических свойств горных пород при высоких давлениях. — В кн.: Экспериментальные исследования в области глубинных процессов. М., Изд-во АН СССР, 1962, с. 22—33.
48. Волярович М. П., Балашов Д. Б., Томашевская И. С. Изучение влияния одноосного сжатия на скорости упругих волн в образцах горных пород в условиях высокого гидростатического давления. Изд-во АН СССР, сер. «Геофизика», 1968, № 8, с. 319—330.
49. Волярович М. П. (ред.) Исследование физических свойств горных пород при высоких давлениях и температурах. — Труды Ин-та физики Земли им. О. Ю. Шмидта. Изд-во АН СССР, № 37/204, 1966.
50. Волярович М. П., Томашевская И. С., Стаховская З. И. Исследование разрушения образцов горных пород, а также скоростей упругих волн в них при трехосном напряженном состоянии. — Труды 8-го Совещ. Международного бюро по механике горных пород. Изд-во АН ГДР, Берлин, стр. 115, 1967 (на немецком языке), с. 115—120.
51. Волярович М. П., Томашевская И. С. О скоростях упругих волн при деформировании и разрушении образцов горных пород путем одноосного сжатия при всесторонних давлениях до 10 000 кг/см². — В кн.: Проблемы геологии горных пород. Киев, «Наукова думка», 1970, с. 38—41.
52. Волярович М. П., Левыкин А. И., Галдин Н. Е. Изучение скоростей продольных волн в образцах горных пород при давлениях до 20 000 кгс/см². — В кн.: Физико-механические свойства горных пород верхней части земной коры. М., «Наука», 1968, с. 127—130.
53. Гороян В. И., Коцеруба Л. А., Рабиц Э. Г. Методы исследования пород — коллекторов. М., Изд. ВНИГНИ, 1970, 235 с.
54. ГОСТ 12288—66. Группа А09. Горные породы. Метод определения механических свойств вдавливанием пуансона (утвержден 17/X 1966).
55. Григорян С. С. Об основных представлениях динамики грунтов. «Прикладная математика и механика», т. 24, 1960, № 6.
56. Гришин А. С., Константинов Л. Г., Королько Е. И. Механизмы разрушения горных пород при шарошечном бурении. М., «Недра», 1968 («Труды ВНИИБТ». Разрушение горных пород, вып. XX), с. 5—17.
57. Гудок Н. С. Изучение физических свойств пористых сред. М., «Недра», 1970, 205 с.

58. Демущин Ю. И., Сахибгареев Р. С., Свищев М. Ф. Изменение проницаемости продуктивного горизонта БВ₂ Мегнионского месторождения в процессе эксплуатации.— «Нефтегазовая геология и геофизика», 1970, № 8, с. 7—9.
59. Дмитриев А. П., Кузьев Л. С., Протасов Ю. И. Физические свойства горных пород при высоких температурах. М., «Недра», 1969, 160 с.
60. Добрынин В. М. Подсчет начальных запасов нефти при водонапорном режиме с использованием упругих характеристик пласта.— «Геология нефти и газа», 1964, № 1, с. 51—60.
61. Добрынин В. М. Физические свойства нефтегазовых коллекторов в глубоких скважинах. М., «Недра», 1965, 163 с.
62. Добрынин В. М. Изменение максимальной первичной пористости песчаников на больших глубинах.— «Геология нефти», 1968, № 9, с. 44.
63. Добрынин В. М. Деформация и изменение физических свойств коллекторов нефти и газа. М., «Недра», 1970, 240 с.
64. Ержанов Ж. С. Теория ползучести горных пород и ее приложение. Алма-Ата, «Наука», 1964, 175 с.
65. Жданов Г. С. Физика твердого тела. М., Изд. МГУ, 1961, 502 с.
66. Желтов Ю. П. Деформации горных пород. М., «Недра», 1966, 1968 с.
67. Журков С. Н., Нарзуллаев Б. Н. Временная зависимость прочности твердых тел.— «Техника физики». 23, вып. 10, 1953.
68. Журков С. Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел.— «Вестник АН СССР», 1968, № 3, с. 46.
69. Ильюшин А. А. Пластичность. Изд-во АН СССР, 1963, 271 с.
70. Карпов П. А. Некоторые закономерности изменения пористости терригенных пород в зависимости от глубины залегания (на примере девонских отложений Волгоградской области).— «Литология и полезные ископаемые». 1964, № 5.
71. Качанов Л. М. К кинетике роста трещин. «Прикладная математика», 1961, № 1.
72. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. М., «Наука», 1969, 420 с.
73. Клубова Т. Т. Влияние глинистых примесей на коллекторские свойства песчано-алевритистых пород. М., «Наука», 1970, 114 с.
74. Ключко Н. А. Зависимость механических свойств горных пород от температуры. Глава VIII монографии Шрейнера Л. А. и др. «Механические и абразивные свойства горных пород». М., Гостоптехиздат, 1958, с. 98—104.
75. Комаров В. Л., Постников Д. В. Влияние геологического возраста и глубины залегания на коллекторские свойства песчаных пород. Докл. АН СССР, № 1, 1964, с. 106.
76. Конторова Т. А., Френкель Л. И. Статистическая теория хрупкой прочности реальных кристаллов.— «Техника физики», XI, вып. 3, 1941, с. 173.
77. Конюхов И. А. О зависимости петрофизических свойств терригенных пород от их литологии. Вестник МГУ, 1961, № 3, с. 57.
78. Коттрел А. Х. Дислокация и пластическое течение в кристаллах. М., Металлургиздат, 1958, 267 с.
79. Крылов А. П., Баренблатт Г. И. Об упруго-пластическом режиме нефтяного пласта. IV Международный нефтяной конгресс, т. III. М., Гостоптехиздат, 1967.
80. Кузнецов Г. Н., Будько И. Н. Исследования предельных состояний хрупкого материала в различных условиях трехосного сжатия. Л., 1968 («Труды ВНИМИ», вып. XX), с. 22—44.
81. Кусаков М. М., Гудок Н. С. Влияние внешнего давления на фильтрационные свойства нефтесодержащих пород.— «Нефтяное хозяйство», 1958, № 6, с. 40.
82. Лапинская Т. А. Главнейшие типы кристаллических пород фундамента Волго-Уральской нефтегазоносной области и их распространение. М., Гостоптехиздат, 1962 («Труды МИНХиГП». Петрография фундамента и осадочных отложений нефтегазоносных областей СССР, вып. 38), с. 3—17.
83. Леонов М. Я., Панасюк В. В. Развитие найдрібніших тріщин в твердому тілі.— «Прикладна механіка», вып. 3, 1959, с. 391—401.
84. Лебедев Т. С., Корниец Д. В., Шаповалов В. И. Упругие

свойства горных пород при высоких давлениях. Киев, «Наукова Думка», 1972, 185 с.

85. Марков Г. А. Методические приемы при непосредственных определениях современных полей механических напряжений в массиве пород в натуральных условиях.— В кн.: Тезисы докладов к Всесоюзному совещанию «Внутренняя геодинамика», вып. 3. «Вопросы динамики подвижных фаз земной коры, методика, экспериментальные и математические исследования». Центр. и Ленинград. Обл. Правление науч.-техн. горн. общества ВСЕГЕИ, Л., 1972.

86. Марморштейн Л. М., Меклер Ю. Б. Оценка возможности изучения физических свойств песчаных коллекторов. «Состояние и перспективы изучения коллекторов нефти и газа». Тезисы IV Всес. Совещ. по коллекторам нефти и газа. М., Изд. ВНИГНИ, 1971, с. 51—53.

87. Миркин Л. И. Физические основы прочности и пластичности. М., Изд. МГУ, 1968, 538 с.

88. Мирчинк М. Ф., Бухарцев В. П. К изучению истории формирования платформенных структур.— В кн.: Опыт применения математической статистики при изучении локальных структур Волго-Уральской нефтегазоносной области. М., Изд. ЦНИИТЭИН нефтегаз, 1962, с. 13—32.

89. Мухомелешвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. Основные направления, плоская теория упругости, кручение и изгиб. М., Изд-во АН СССР, 1954, 647 с.

90. Новожилов В. В. О пластическом разрыхлении.— «Прикладная математика и механика», т. 29, вып. 4, 1965.

91. Новожилов В. В., Рыбакина О. Г. Перспективы построения критерия прочности при сложном направлении.— «Механика твердого тела», 1966, № 5.

92. Павлова Н. Н. Влияние скорости деформирования на деформационные свойства горных пород. Раздел III монографии «Деформационные свойства горных пород при высоких давлениях и температурах». М., «Недра», 1968, с. 138—220.

93. Павлова Н. Н. Буримость различных горных пород на глубинах залегания до 15 км. В главе XIX монографии «Деформационные свойства пород при высоких давлениях и температурах». М., «Недра», 1968, с. 340—354.

94. Павлова Н. Н. Методика экспериментального исследования процесса деформации и разрушения горных пород при неравномерном объемно-напряженном состоянии. Темат. науч.-техн. обзор «Новые методы исследования трещинных коллекторов нефти и газа». М., ВНИИОЭНГ, 1970, с. 17—27.

95. Павлова Н. Н. Трещиноватость и разрушение горных пород. М., «Наука», 1970, 96 с.

96. Павлова Н. Н., Кузьменкова Г. Е. Исследование прочности и пластичности пород кристаллического фундамента Русской платформы при высоких давлениях.— В кн.: Физико-механические свойства горных пород верхней части земной коры. М., «Наука», 1962, с. 197—207.

97. Павлова Н. Н., Шрейнер Л. А. Влияние скорости нагружения на пластичность мрамора при вдавливании. ДАН СССР, т. 137, № 2, 1961, с. 319—322.

98. Павлова Н. Н., Шрейнер Л. А. Разрушение горных пород при динамическом нагружении. М., «Недра», 1964, 160 с.

99. Павлова Н. Н., Шрейнер Л. А. Влияние скорости на процессы деформации и разрушения горных пород в условиях объемно-напряженного состояния.— В кн.: Физико-механические свойства горных пород верхней части земной коры. М., «Наука», 1968, с. 193—197.

100. Павлова Н. Н., Теодорович Г. И., Безбородова И. В. Прочностные, деформационные и упругие свойства горных пород в условиях объемно-напряженного состояния вдавливания, как показатель способности пород к трещинообразованию. В тем. науч.-техн. обзоре «Новые методы исследования трещинных коллекторов нефти и газа». М., ВНИИОЭНГ, 1970, с. 27—28.

101. Павлова Н. Н., Юрель Г. Н., Фомин А. А. Об особенностях деформации различных горных пород в условиях неравномерного всестороннего

- сжатия. Тем. науч.-техн. обзор «Новые методы исследований трещинных коллекторов нефти и газа». М., ВНИИОЭНГ, 1970, с. 73—85.
102. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. Киев, «Наукова Думка», 1968, 246 с.
103. Прандтль Л. О. О твердости пластических материалов и их сопротивление резанию.— В кн.: Теория пластичности, Л., 1948.
104. Протодяконов М. М., Койфман М. И. и др. Паспорта прочности горных пород и методы их определения. М., «Наука», 1964, 78 с.
105. Протодяконов М. М., Чирков Е. С. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве. М., «Наука», 1964.
106. Прошляков Б. К. Зависимость коллекторских свойств от глубины залегания и литологического состава пород.— «Геология нефти и газа», 1960, № 12, с. 24.
107. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. М., «Недра», 1967, 288 с.
108. Розанов Ю. А. Экспериментальные исследования деформаций горных пород при высоких давлениях и температурах до 200°С, 1962 («Труды ИГЕМ». Изд-во АН СССР, вып. 66), 84 с.
109. Розанов Л. Н. Физико-механические условия образования тектонических структур платформенного типа. Л., «Недра», 1965, 84 с.
110. Розанов Л. Н., Горелов С. К. Новейшие тектонические движения и распространение газонефтяных месторождений. Волго-Уральской области.— В кн.: Тектонические движения и новейшие структуры земной коры. М., «Наука», 1967.
111. Руппенейт К. В. Механические свойства горных пород. М., Углетехиздат, 1956, 324 с.
112. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М., «Металлургия», 1970, 376 с.
113. Смехов Е. М. (ред.) Проблема трещинных коллекторов нефти и газа и методы их изучения. Л., «Недра», 1968 («Труды ВНИГРИ», вып. 264), 179 с.
114. Смехов Е. М. (ред.) Методика изучения трещиноватости горных пород и трещинных коллекторов нефти и газа. Л., «Недра», 1969 («Труды ВНИГРИ», вып. 276), 129 с.
115. Смирнова Н. В. Типы цемента и влияние их на проницаемость песчаных пород.— «Геология нефти и газа», 1959, № 7, с. 33—39.
116. Смирнова Н. В., Якушев В. П. Свойства коллекторов песчаного типа на больших глубинах. М., «Наука», 1969, 84 с.
117. Ставрогин А. Н. О влиянии деформации на проницаемость горных пород.— В кн.: Физико-механические свойства горных пород верхней части земной коры. М., «Наука», 1968, с. 156—161.
118. Ставрогин А. Н. Исследование горных пород в сложных напряженных состояниях.— «Горный журнал», 1961, № 3.
119. Ставрогин А. Н., Георгиевский В. С. Влияние вида нагружения на процесс деформирования горных пород. Л., «Недра», 1968. («Труды ВНИИМ» Горное давление, сдвигание горных пород и методика маркшейдерских работ, том XX), с. 279—289.
120. Ставрогин А. Н. Деформация и прочность. Там же (а), с. 58—61.
121. Ставрогин А. Н. Анализ экспериментальных результатов по деформации и разрушению горных пород. Там же (б), с. 82—111.
122. Ставрогин А. Н., Фокиев И. В. Исследование механических свойств горных пород при разных скоростях приложения нагрузки.— «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», 1968, № 3, с. 40—44.
123. Сферина И. Д. Влияние всестороннего сжатия на механические свойства горных пород при вдавливании. Глава XVIII монографии. «Деформационные свойства горных пород при высоких давлениях и температурах». М., «Недра», 1968, с. 325—339.
124. Теодорович Г. И. Учение об осадочных породах. М., Гостоптехиздат, 1958, 572 с.
125. Тимофеев И. С., Вугин Р. Б. Оптимальные режимы бурения коренных пород.— «Нефтяное хозяйство», 1965, № 2, с. 8—12.

126. Томашевская И. С. Исследование модуля сдвига у образцов горных пород при высоких всесторонних давлениях методом кручения. Изд-во АН СССР, сер. «Геофизика», 1960.
127. Томашевская И. С., Хамидуллин Я. И. Возможности применения кинетической концепции прочности к горным породам при трехосном сжатии.— В кн.: Физические свойства горных пород при высоких давлениях, термодинамических параметрах. Киев, «Наукова Думка», 1971, с. 208—211.
128. Турчанинов И. А. Марков Г. А., Иванов В. М. Закономерности распределения тектонических напряжений по данным непосредственных измерений в горных выработках.— В кн.: Давления и механические напряжения в развитии состава структуры и рельефа литосферы. ЛНТГО, ВСЕГЕИ. Географ. общество СССР, Л., 1969.
129. Тхостов Б. А. Начальные пластовые давления и гидродинамические системы. М., «Недра», 1966, 268 с.
130. Федоров В. С. Бурение нефтяных и газовых скважин. М., Гостоптехиздат, 1961, 301 с.
131. Физико-механические свойства горных пород верхней части земной коры.— В кн.: Труды совещания. М., «Наука», 1968, 334 с.
132. Физические свойства горных пород при высоких термодинамических параметрах. Материалы третьего Всесоюзного Совещания. Киев, «Наукова Думка», 1971, 283 с.
133. Хан Д. Т., Авербах Б. Л., Оуэн В. С. Возникновение микротрещин скола в поликристаллическом железе и стали.— В кн.: Атомный механизм разрушения, ГОНТИ по черной и цветной металлургии, М., 1963, с. 109—137.
134. Ханин А. А. Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение. М., «Недра», 1969, 368 с.
135. Христианович С. А., Желтов Ю. П., Баренблатт Г. И. О механизме гидравлического разрыва пласта.— «Нефтяное хозяйство», 1957, № 1, с. 44.
136. Хьюстон А. Дисперсионный анализ. М., «Статистика», 1971.
137. Шрейнер Л. А., Петрова О. П. Метод определения пластических свойств горных пород. ДАН СССР, т. 46, вып. 3, 1954.
138. Шрейнер Л. А. Механические и абразивные свойства горных пород. М., Гостоптехиздат, 1958, 201 с.
139. Шрейнер Л. А., Павлова Н. Н., Байдюк Б. В. Методическое пособие по использованию результатов испытаний механических свойств горных пород вдавливанием штампа (для нефтяной и других отраслей горной промышленности). М., «Недра», 1967, 40 с.
140. Шрейнер Л. А., Байдюк Б. В., Павлова Н. Н. Деформационные свойства горных пород при высоких давлениях и температурах. М., «Недра», 1968, 358 с.
141. Шутлив Ф. А. Глубокое бурение в СССР и за рубежом и его роль в увеличении ресурсов нефти и газа.— В кн.: История и перспективы сверхглубокого бурения. М., «Наука», 1966.
142. Шелкачев В. П. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. М., Гостоптехиздат, 1959, 467 с.
143. Шелкачев В. П. Критический анализ новейших экспериментальных исследований особенностей деформации пористых горных пород. М., «Недра», 1965, (Труды МИНХиГП). Разработка нефтяных и газовых месторождений и подземная гидродинамика, с. 3—8.
144. Эйгелес Р. М., Эстрин Ю. Я. Построение поверхности предельных состояний горных пород на основании экспериментов по растяжению и сжатию при всестороннем давлении. «Проблемы механики горных пород» (материалы Всесоюзной научной конференции). Алма-Ата, «Наука», 1966, с. 486—490.
145. Эйгелес Р. М. (ред.) М., «Недра», 1968. («Труды ВНИИБТ»). Разрушение горных пород, вып. XX (а), с. 40—44.
146. Эпштейн Е. Ф. Теория бурения — резания горных пород твердыми сплавами. М., ГОНТИ, 1939.
147. Adams F. D., Coker E. C. An experimental investigation into the flow of rocks. The Amer. Y. of Science, v. 29, N 74, 1910, p. 465.

148. Baron G., Castel Y., Habib P. Deformations des roches sous contraintes Influence de la pression interstatelle sur les caracteristicques mecaniques des roches, en conditions de fond. Revue de L'Institute Francais du Petrole, vol. XVIII, Decembre (Nuors serie), 1965, p. 78—96.
149. Biot M. A. General Theory of three dimentional consolidation Y Appl. Physics, vol. 26, 1955, p. 155—165.
150. Biot M. A. Theory of elasticity and consolidation a porous anisotropic solid. Y. Appl. Physics, vol. 26, 1955, p. 182—185.
151. Birch F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, part I, Y. Geophys. Res., v. 65, N 4, 1960, p. 1082—1102.
152. Birch F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, part II, Y. Geophys. Res., v. 66, N 7, 1961, 2199—2224.
153. Böker R. Die Mechanik der bleibenden Formänderung in kristallinisch aufgebauten Körpern. Ver. deutsch Yngenieure Mitt. Forschungsarbeiten, Vol. 175, 1915, p. 1—51.
154. Brace W. F. Brittle fracture of rocks. Proceedings of the Intern. Conference "State of stress on the Earth's Crust", Amer. Els. Publishing Company, New York, 1964, p. 111—180.
155. Brace W. F. Some new measurements of linear compressibility of rocks. Y. Geoph. Research, vol. 70, 1965, pp. 394—398.
156. Brace W. F., Paulding B. W., Scholz C. D. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. Y. Geoph. Research. vol. 71, N 16, 1966.
157. Brady B. T. A Statistical Theory of brittle fracture for rock materials. Part I. Brittle failure under homogeneous axisymmetric states of stress. Inter. Journal of Rocks Mechanics and Mining Sciences, vol. 6, N 1 (a), 1969.
158. Brady B. T. A Statistical Theory of brittle fracture for rock materials. Part II. Brittle failure under homogeneous triaxial states of stress. Inter. Y. of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 6, N 3 (b), 1969.
159. Brady B. T. The nonlinear mechanical behaviour of brittle rock. Part III. Stress—strain behaviour during regions III and IV. Inter. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences. vol. 6, N 3 (c), 1969.
160. Brandt H. A. Study of the speed of sound in porous granular media. J. of Appl. Mechanics, vol. 22, N 1, 1955.
161. Bredthauer R. O. Strength characteristics of rock samples under hydrostatic pressure. Trans. of ASME, vol. 79, N 4, 1957.
162. Bridgman P. W. Volume changes in the plastic stages of simple compression. Y. Appl. Phys. vol. 20, 1949.
163. Brighenti C. Influence of pore pressure decline on the behaviour of petroleum reservoir rocks. Proceedings of the 7-th World Petroleum Congress, Mexico, 1967.
164. Chierici G. L. and oth. The effect of overburden pressure on some petrophysical characteristics of sandstone reservoir rocks. Proceedings of the 7-th World Petroleum Congress, Mexico, 1967.
165. Fatt I., Davis D. H. Reduction of Permeability with overburden pressure. J. Petrol. Technology, December, 1952.
166. Fatt I. The effect of overburden pressure on relative permeability. J. of Petroleum Technology, Oct., 1953.
167. Fatt I. The Network Model of Porous Media. Petr. Trans, AIME, vol. 207, 1956.
168. Fatt I. Compressibility of Sandstones at low to moderate pressures. Bull. Amer. Ass. Petrol. Geologists vol. 42, No 8, 1958.
169. Fatt I. Pore structure in sandstones by compressible sphere—jack models. Bull. Amer. Ass. Petrol. Geologists, vol. 42, No 8, 1958.
170. Gassman F. Über die elastisität poröser medien. Naturforschenden Gesellschaft Vierteljahrschrift, Zurich, v. 96, No 1, 1951.
171. Gassman F. Elastic waves through a packing of spheres. J. Geophysics, v. 16, No 4, 1951.
172. Geertsma J. The effect of fluid pressure decline on volume changes of porous rocks. Trans. AIME, v. 210, 1957, p. 331—339.

173. Granville C. R. Laboratory study indicates significant effect of pressure on resistivity of reservoir rocks. *J. Petrol. Technology*, vol. II, No 4, 1959.
174. Griffith A. A. The Phenomenon of rupture and flow in solids. *Philos. Trans. Roy. Soc. London, ser. A*, vol. 332, 1920, p. 163—198.
175. Griffith A. A. The theory of rupture. *Proc. First Internat. Congress Appl. Mech., Delft.*, 1924, p. 55—63.
176. Griggs D. T. Deformation of rocks under high confining pressures. *The Journal of Geology*, vol. 44, No 6, 1936, p. 541—577.
177. Griggs D. T. Creep of rocks. *The Journal of Geology*, vol. 47, p. 225, 1939, p. 225—251.
178. Griggs D. T. Experimental flow of rocks under conditions favouring recrystallization. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, vol. 81, p. 1001, 1940, p. 1001—1022.
179. Griggs D. T., Miller W. Deformation of Iule marble. Part I. *Bull. Geol. Soc. Am.*, vol. 62, No 8, 1951, p. 853.
180. Griggs D. T., Turner F., Durrell O. Deformation of rocks at 500°, 5000 atm pressure. *Bull. Geol. Soc. Am.*, vol. 65, No 12, 1954.
181. Griggs D. T., Turner F., Heard H. C. Deformation of rocks at 500 to 800° C. *The Geol. Soc. Amer. Mem.*, vol. 179, 1960.
182. Griggs D. T., Handin I. (eds). *Rocks deformation*. The Geol. Soc. Am. Mem., No 79, 1960.
183. Gzovsky M. V. A state of stress in the Earth's crust and the energy of tectonic processes associated with the upper mantle. *Geophysical. J. Astr. Soc.*, vol. 14, No 1—4, 1967.
184. Hall H. M. Compressibility of reservoir rocks. *Petr. Trans. AIME*, v. 198, 1953.
185. Handin I., Griggs D. Deformation of Iule marble. Part II. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, vol. 62, pp. 868—885, 1951.
186. Handin T., Fairbairn H. Experimental deformation of Hasmark dolomite. *Bull. Geol. Soc. Am.*, vol. 66, 1955, p. 1257—1273.
187. Handin I., Hager I. Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: tests at high temperature. *Bull. Ass. Petr. Geol.*, vol. 42, No 12, 1958, p. 2892—2934.
188. Handin I., Higgs D., O'Brien J. Torsion of Iule marble under confining pressure. *Geol. Soc. Am.*, v. 79, 1960.
189. Handin I., Strength and ductility. *Handbook of Physical constants*. The Geol. Soc. Am., Mem., No 97, 1966.
190. Handin I., Heard H. C., Magourik I. N. Effects of the intermediate principal stress on the failure of limestone, dolomite and glass at different temperatures and strain rates. *J. Geoph. Res.*, vol. 72, N 2, 1967.
191. Harrison E., Kieschnick W. F., McGuire W. J. The mechanics of fracture induction and extension. *J. of Petr. Technology*, vol. 6, N 10, 1954.
192. Hast N. The state of stresses in the upper part of the Earth's Crust. *Y. Engineering Geology*, vol. 2, N 1, 1967.
193. Hast N. The state of stresses in the upper part of the Earth's crust. *Tectonophysics*, vol. 8, N 3, 1969.
194. Heard H. C. The effect of time on the experimental deformation of rocks. *I. of Geoph. Res.*, vol. 66, N 8, 1961, p. 2534.
195. Hoshino K., Koide H. Process of deformation of the sedimentary rocks. *Proceedings of the 2-nd Congress of the Intern. Soc. for Rock Mechanics*, Beograd, Yugoslavia, vol. 1., 1970.
196. Irwin G. R., *Fracture Dynamics*. In "Fracturing of Metals", Amer. Soc. Metals, Cleveland, 1948.
197. Irwin G. R. *Appl. Mech.*, vol. 24, p. 361, 1957, p. 361—364.
198. Jaeger J. C. Punching tests on disks of rock under hydrostatic pressure. *J. of Geoph. Research*, vol. 67, No 1, 1962.
199. Jakobori T. *An Interdisciplinary Approach to Fracture and Strength of Solids*. Wolters-Noordhoff. scientific. Publications LTD. Groninger, 1965.
200. Kehle R. O. The determination of tectonic stresses through analysis of hydraulic well fracturing. *J. Geoph. Res.*, vol. 69, 1964, pp. 259—273.

201. Mair W. M., Pugh H., Li D. Effect of pre-strain on yield surface in copper. *J. Mech. Engng. Sci.*, June, 1964.
202. Mann R. L., Fatt I. Effect of pore fluids on the elastic properties of Sandstones. *Geophysics*, v. 25, No 2, 1960.
203. Marshall A. Relation between permeability and size distribution of pores. *J. Soil Sci.*, vol. 9, No 1, 1958.
204. Matsushima Sh. On the flow and fracture of igneous rocks. *Bull. Disaster Prevention Res. Inst. Kyoto Univ.*, vol. 36, pp. 1—9, 1960 (a).
205. Matsushima Sh. On the deformation and fracture of granite under high confining pressure. *Bull. Disaster Prevention Res. Inst. Kyoto Univ.*, vol. 36, pp. 11—12, 1960 (b).
206. Maxwell J. C. Influence of depth, temperature and geological age on porosity of Quartzose sandstones. *Bull AAPG*, vol. 48, N 5, 1964.
207. Murray A. S., Cunningham P. A. Effect of mud column pressures on drilling rates. *Petrol. Technology*, vol. 7, N 11, 1955.
208. Mc. Clintock F. A., Walsh Y. Friction on Griffith cracks in rocks under pressure. *W. S. Nat. Cong. Appl. Mech.*, Berkley, 1962.
209. Mc. Latchee A. S., Hemstock K. A., Young J. W. The effective compressibility of reservoir rocks and its effect on permeability. *J. of Petr. Technology*, No 6, 1958.
210. Love A. The stress produced in a semi-infinite solid by pressure on part of the boundary. *Philos. Trans. of the Roy. Soc., London*, A228, 1929, pp. 377—420.
211. Orowan E. O. Fundamentals of brittle behaviour of metals. In "Fatigue and Fracture of Metals", Wiley, N. Y., 1950.
212. Robertson E. C. Experimental study of the strength of rocks. *Bull. Geol. Soc. Am.*, vol. 66, No 10, 1955.
213. Robertson E. C. Creep of solenhofen limestone under moderate hydrostatic pressure. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, vol. 79, 1960.
214. Robertson E. C. Viscoelasticity of rocks. *Proceedings of the International Conference "State of stresses in the Earth's Crust"*. Am. Els. Publ. Co. J.N.C., New J., 1964.
215. Scheidegger A. E. On the connection between tectonic stress and well fracturing data. *Geoph. Pura Appl.*, vol. 46, 1960, pp. 66—76.
216. Scholz Ch. The role of microfracturing in rock deformation. *Proceeding of the Second Congress of the Intern. Society for Rock. Mech. Beograd, Yougoslavija*, vol. 1, 1970.
217. Schleicher F. Der Spannungszustand on der Elissgrenze. *Z. angew. Math. und Mech.*, Bd. 6, 1926.
218. Shozaburo N. Compaction of sedimentary rock — a consideration by the theory of porous media. *Bull. of the Earthquake Research Inst.*, v. 43, 1965.
219. Shreiner L. A., Bajdyuk B. V., Pavlova N. N. Deformational properties of rock as applied to petroleum geology and deep hole drilling. *Proceedings of the Seventh World Petroleum Congress, Mexico, 1967*.
220. Sneddon Y. Boussinesq's problem for of latend end cylinder. *Proc. of Cambridge Soc.*, part I, vol. 42, 1946, pp. 29—30.
221. Somerton W. H., Masonheimer R., Singhal A. Study of pore and matrix anisotropies of porous rocks. *Proceedings of the 2-nd Congress of the International Society for rock mechanics*. v. 1, Belgrad, Yuogoslavijia, 1970.
222. Van der Knaap W. Nonlinear behaviour of elastic porous media. *Trans. AIMMPE*, vol. 216, 1959.
223. Weibull W. A. Statistical theory of the strength of materials. *Proc. Roy, Swedish Inst. Ehg. Res.*, N 151, 1938, p. 5—45.
224. Wilhelmi B., Somerton W. H. Simultaneous measurement of pore and elastic properties of rocks under triaxial stress conditions. *Soc. Petrol. J.*, vol. 7, N 3, 1961.
225. Wyble D. O. Effect of applied pressure on conductivity, porosity and permeability of sandstones, *Petr. Trans. AIME*, v. 213, 1958, p. 430—432.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава I. Напряженное состояние горных пород в верхних частях земной коры	5
Глава II. Теоретические исследования процессов деформации и разрушения горных пород в условиях объемно-напряженных состояний	9
§ 1. Физические основы процесса деформации горных пород в условиях объемно-напряженных состояний	9
§ 2. Методы аналитического изучения процессов деформации и разрушения горных пород	14
§ 3. Изучение процессов деформации и разрушения горных пород на основе статистической оценки особенностей их состава и строения	35
§ 4. Обоснование единой схемы развития процессов деформации и разрушения горных пород при неравномерном трехосном сжатии и метод описания этих процессов	38
Глава III. Методы экспериментальных исследований деформационных, прочностных и коллекторских свойств горных пород при различных объемных напряженных состояниях и температурах	42
§ 1. Выбор комплекса методов для полной характеристики деформационных, прочностных и коллекторских свойств горных пород	45
§ 2. Экспериментальная аппаратура и методики испытаний	47
Глава IV. Деформационные и коллекторские свойства горных пород при различных эффективных напряжениях и температурах	59
§ 1. Результаты исследования объемных деформаций, коэффициентов сжимаемости, пористости и проницаемости песчано-алевритовых пород-коллекторов	61
§ 2. Результаты исследования объемных деформаций, коэффициентов сжимаемости и пористости карбонатных пород	87
§ 3. Результаты исследования объемных деформаций, коэффициентов сжимаемости и пористости магматических и метаморфических пород	96
Глава V. Деформационные и прочностные свойства различных горных пород в условиях неравномерных объемных напряженных состояний и температур	100
1. Деформационные и прочностные свойства магматических и метаморфических пород	105
2. Деформационные и прочностные свойства осадочных пород	137
	239

§ 3. Экспериментальное обоснование единой схемы деформационного процесса горных пород при неравномерном всестороннем сжатии	161
§ 4. О влиянии деформации на коллекторские свойства горных пород при неравномерном всестороннем сжатии	167
Глава VI. Некоторые направления практического использования результатов испытаний физико-механических свойств горных пород в условиях объемных напряженных состояний при решении задач геологии, бурения и разработки нефтяных и газовых месторождений	171
§ 1. Изменения физических свойств пород-коллекторов нефти и газа в процессе их упругой и неупругой деформации при объемных напряженных состояниях	172
§ 2. Об оценке влияния тектонической деформации на коллекторские свойства горных пород по результатам изучения их деформационных и прочностных свойств	181
§ 3. Кривые предельных напряженных состояний в области неравномерного трехосного сжатия	188
§ 4. О прогнозе сопротивления горных пород разрушению при проходке сверхглубоких скважин	198
Приложение I. Характеристика и физические свойства испытанных карбонатных пород различных структурно-генетических типов	208
Приложение II. Характеристика и физические свойства испытанных метаморфических и магматических пород, типичных для одного из разрезов Балтийского щита	212
Приложение III. Характеристика и физические свойства испытанных образцов песчано-алевритовых пород-коллекторов нефти и газа	220
Приложение IV. Состав и строение испытанных глинистых и сульфатно-галогенных пород	227
Список литературы	229

Нина Николаевна Павлова

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Редактор издательства *Н. А. Круглова*
Техн. редактор *В. Л. Прозоровская*
Переплет художника *Л. Н. Шопина*
Корректор *Э. Г. Агеева*

Сдано в набор 29/VIII 1974 г. Подписано в печать 27/II 1975 г. Т-00544. Формат Бумага № 2. Печ. л. 15. Уч.-изд. л. 15,29. Тираж 1600 экз. Заказ № 553/4779—5. Цен

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, Ленинградская типография № 8 Союзполиграфпрома при Государственном Совете Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной т., 190000, Ленинград, Прачечный пер., 6.