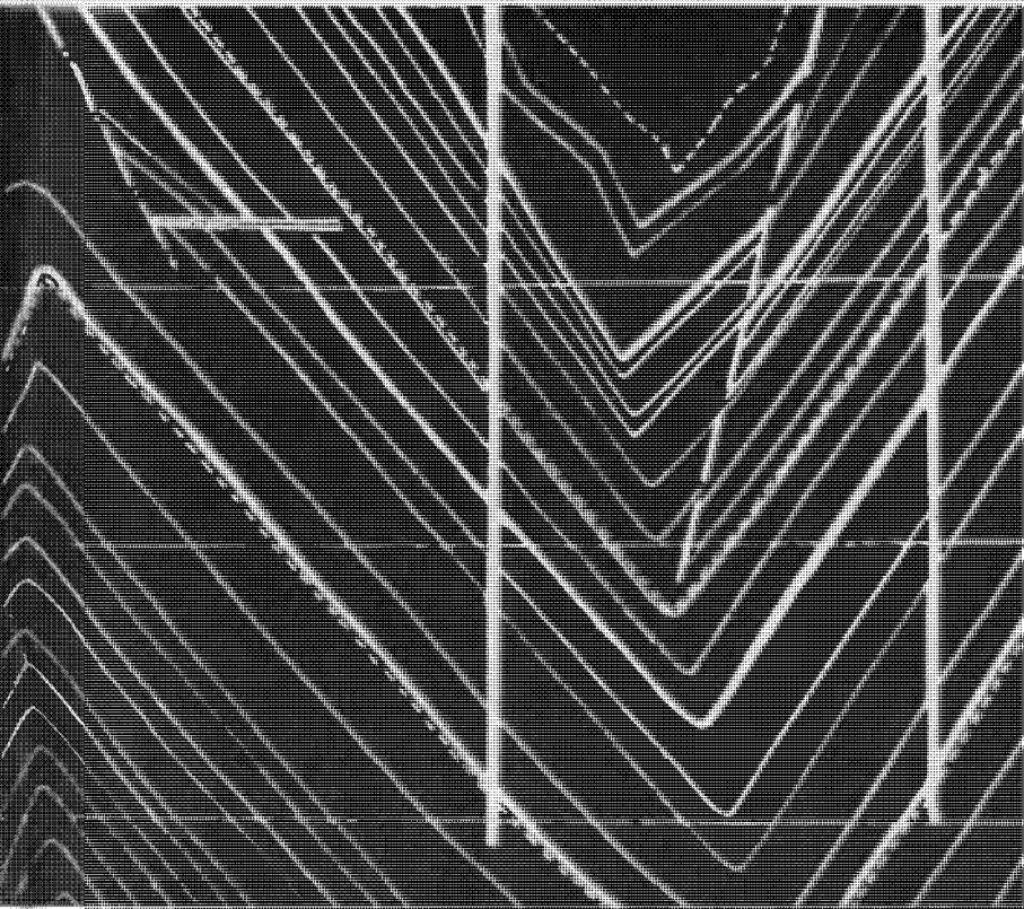


К. И. ДУДУШКИНА, Г. Ф. БОБРОВ

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ



К. И. ДУДУШКИНА, Г. Ф. БОБРОВ

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ
СВОЙСТВА ПОРОД
ГЛУБОКИХ
ГОРИЗОНТОВ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «Н Е Д Р А»
Москва 1974

Дудушкина К. И., Бобров Г. Ф. Деформационные свойства пород глубоких горизонтов М, «Недра», 1974 128 стр

В книге приведены сведения о комплексе свойств горных пород и углей глубоких горизонтов Кузбасса, полученных при изучении Прокопьевско-Киселевского месторождения

Основное внимание уделено прочностным и деформационным параметрам в связи с проблемой освоения больших глубин и необходимостью оценки поведения пород в различных горно-геологических условиях. В работе приводятся сведения о инженерно-геологических условиях формирования прочности, деформируемости и ползучести горных пород и углей. Предлагается комплексная оценка свойств пород на основе вдавливания плоского штампа, обосновываются теоретические и физические возможности метода. Анализ обширного экспериментального материала ведется на основе расчленения пород по основным структурам; рассматривается возможность использования физико-механических свойств пород при оценке горно-геологических явлений.

Монография рассчитана на научных работников, специалистов в области горной механики и проектировщиков

Таблиц 24, иллюстраций 48, список литературы — 59 назв.

Д 30702—061
043(01)—74 417—74 © Издательство «Недра», 1974

Клавдия Ивановна Дудушкина, Геннадий Федосеевич Бобров
**ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД
ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ**

Редактор издательства И. В. Коваль
Технический редактор Л. В. Дунаева
Корректор К. И. Савенкова

Сдано в набор 2/X 1973 г Подписано в печать 17/I 1974 г Т 03442
Формат 84×108^{1/2} Бумага № 2 Печ л 40 Усл п. л. 6,72 Уч-изд л 6,70
Тираж 1600 экз Заказ № 1712/4479-10 Цена 67 коп

Издательство «Недра» 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19
Московская типография № 32 «Союзполиграфпром» при Государственном
комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли Москва, К 51, Цветной бульвар, д 26

ВВЕДЕНИЕ

Разработка глубоких горизонтов угольных бассейнов страны неразрывно связана с изучением механических процессов в толщах горных пород, содержащих полезное ископаемое.

Основными механическими процессами в горном массиве являются деформации и разрушения горных пород, вызываемые комплексом горнотехнических и геологических факторов. Проблема освоения больших глубин состоит в том, что традиционные представления о геодинамических процессах, свойствах пород и их поведении в верхних частях земли в значительной мере осложняются новыми условиями подземной среды, где процессы и явления должны протекать по иным законам. С увеличением глубины расположения выработок возможность развития деформаций пород возрастает, а ползучесть пород может быть одной из важнейших причин увеличения горного давления. Опыт работы глубоких шахт Донбасса, Рура (ФРГ), Рьеде Кер (Бельгия) показывает, что с глубиной изменяются свойства пород, характер их сдвижения и проявление горного давления. При этом важно знать не только напряжения, присущие горным породам, окружающим выработку, но и физико-химические процессы, которые протекают в них и изменяют их состояние и свойства.

Эффективность решения вопросов горного давления и устойчивости выработок будет определяться степенью знаний прочностных, деформационных и реологических свойств пород. Перечисленный комплекс вопросов должен быть обязательным при решении таких крупных задач, как горное давление и

устойчивость. К сожалению, в горной практике часто показатель одного вида напряжений принимается как характеристика массива. Редко учитываются его инженерно-геологические и структурные особенности. Комплексные исследования свойств пород месторождения в целом в начальной стадии его проектирования почти не практикуются.

В данной работе делается попытка представить породы основных структур Прокопьевского месторождения количественной характеристикой физико-механических свойств.

Прокопьевско-Киселевский район Кузбасса находится в стадии доработки верхних горизонтов, и единственной перспективой добычи качественных углей в районе являются глубокие горизонты. По запасам и качеству углей это месторождение считается жемчужиной Кузбасса, однако освоение больших глубин будет предопределяться тектоникой района, имеющей исключительно сложное строение. Вмещающие породы месторождения дислоцированы в такой степени, что добыча производится порой с большими потерями. Различный уровень тектонических напряжений, сложные комбинации действующих сил привели к интенсивным тектоническим разрывам и трещиноватости. Последние явились основными факторами, исчерпывающими ресурсы прочности, пластичности и ползучести горных пород.

Основная цель исследований Прокопьевского района сводилась не только к стремлению получить объективные характеристики свойств пород больших глубин, но и проследить их закономерности по элементам слагающих массив структур, падению их и простиранию. Это оказалось возможным при детальном анализе тектонофизической обстановки района и инженерно-геологических явлений при проведении горных выработок. За основу сетки опробования приняты скважины глубокого бурения по V—VI—VII и VIII разведочным линиям, пересекающие 11 шахтных полей и охватывающие 5 синклиналей и 6 антиклиналей. Всего использовано для исследований около 70 скважин глубиной от 200 до 1200 м. Самые мощные пласти угля — IV Внутренний, Горелый, Мощный — приняты как маркирующие при оценке

прочности пород кровель и почв. Характер вскрытия этих пластов отображен в табл. 1. Основной удельный вес в общем объеме исследований занимала оценка нетронутого массива, но в качестве сравнительной характеристики использованы данные шахтных проб из скважин, пробуренных в тело массива из кровли выработок.

Выполнение намеченной программы исследований требовало специальных методических разработок, позволяющих учесть все деформационные особенности поликристаллических агрегатов, какими являются горные породы. Поскольку оценка свойств и состояния массива должна быть экспериментально статистической, метод определения должен обладать свойствами экспресс-анализа при сохранении полностью комплексной информации о прочности, деформируемости и ползучести горных пород. Для оценки пород, претерпевших объемные деформации, анализ прочности должен осуществляться в координатах напряжение — деформация.

Деформационные свойства горных пород обычно изучаются в области упругих деформаций, и только в последние годы более внимательно рассматривают их пластическое деформирование. Значительные успехи в изучении этих явлений достигнуты в исследованиях, связанных с изучением строения земной коры в условиях высоких температур. В этой области имеется огромный экспериментальный материал. Основу составляют многолетние труды Лаборатории высоких давлений Института физики Земли АН СССР под руководством М. П. Воларовича, Лаборатории экспериментальной геотектоники Института геологии и геофизики СО АН СССР под руководством И. В. Лучицкого, работы, проводимые в ИГИРГИ и ВНИИБТ Л. А. Шрейнером, Н. Н. Павловской, Б. В. Байдюком и другими. Во ВНИМИ — А. Н. Ставрогиным, в ИГД им. А. А. Скочинского Л. И. Бароном и другими. Большой вклад в изучение закономерностей развития деформации пород в толще земной коры внес замечательный советский ученик | М. В. Гзовский | , создавший новое направление — тектонофизику, рожденную на стыке фун-

Характер выражения макрофлористических памятников

Код описания и номер по- следней ре- гистрации	Шахта №	Местоизы- менения	Признаки шахты	Признаки шахты	Геопалеонтологи- ческое значение
Пласт IV Венгерский					
Улановская шахта Красногорск	To №	—	To. 140 (столбина 160 м.)	Сланцы битуминозные	Фауна
Об. 14019	Спасская	VII	To. 220 500—561	Зеленые яйца II стадии Бородавчатые	Фауна
Об. 630	Красногорская	X	335—451	Зеленые яйца Красногорской ани- малии	Фауна
Об. 630	Красногорская	Средняя часть	450—550	Бородавчатые яйца V стадии	Фауна
Об. 11017	Дальневосточная шахта № 1 Красногорская	VII	835—880	Установка (заслонка для II ста- диии)	Фауна
Об. 11011	Нарышкинская	VIII	868—878	Зеленые яйца V стадии	Фауна
Об. 11020	Нр. Красногор.	VII	890—900	Зеленые яйца III стадии	Фауна
Об. 11023	To №	VI	450—460	Бородавчатые яйца III стадии	Фауна
Об. 11020	Нр. Бородавчатая	VI	652—659	To же	Фауна
Об. 11023	Нр. Красногор.	VII	881—892	Бородавчатые яйца Глубокой ани- малии	Фауна
Об. 635	Красногорская	X	103—117	Бородавчатые яйца Красногорской ани- малии	Фауна
Об. 636	Таганрогская	X	890—908	Бородавчатые яйца Красногорской ани- малии	Фауна

Гр. 657	To же	X	320-342	To же
Гр. 658	у	VII	600-633	Западное крыло II северо-западной
Гр. 652	Граница участка «Кокорине и им. Воронежа»	VII	550-677	Восточное крыло Абаканской зоны
Гр. 673	Красногорск	VI-VII	290-304	Западное крыло Абаканской зоны
Гр. 649	To же	VI-VII	553-583	To же
Гр. 680	«Нарымское»	VII	120-152	Восточное крыло Гайской зоны
Гр. 646	Кокорине	Северо-западный	290-318	V перекрытие V северо-западной
Гр. 668	Красногорск	X	450-465	Западное крыло Красногорской зоны
Гр. 661	To же	X	395-415	To же
Гр. 650	у	X	915-933	" "
Гр. 1105	«Целинное»	V	817-835	V западная Караулская синклиниальная
Местные прибр.	«Краснодар»	VI-VII	Гор. 100	Восточное крыло V синклиниальной
To же	To же	VI-VII	Гор. 200	Западное крыло VI синклиниальной
Платформенный				
Местные прибр.	п. Калмыкия	VI-VII	Гор. 1-130 (Гор. 110 к)	Балашовское крыло II северо-западной
To же	«Нарымское»	VI-VII	Гор. - 220	To же
Гр. 11012	Северо-западный	VIII	330-408	Западное крыло Гайской зоны
Гр. 11020	Северо-западный	VII	470-498	To же
Гр. 905	Красногорск	X	557-582	Западное крыло Красногорской зоны

Продолжение табл. 1

Номер изученного объекта и по- дразделение	Место ложе	Приблизитель- ное время	Лихина логариф- мическая шкала	Справочное значение логариф- ма
Обр. № 30	Слюдяные породы	IX	70—75	Залегание аргиллитов кислотного оттенка
Обр. № 27	Алевриты с глинистым включением	V	100—101	Залегание алевритов III стадии
Обр. № 39	To №	V	80—84	To №
Обр. № 61	Алевритовая шлакоглинка	VI	30—35	Встречное залегание I стадии (у II)
Обр. № 47	Илья Каменский глинистые глины	VI	70—75	Встречное залегание I стадии
Обр. № 50	Глинистые глины	VII—VIII	60—62	У берега I стадии
Обр. № 41	Алевриты известковистые	V	45—49	Встречное залегание I стадии
Обр. № 63	Алевриты известковистые	V	51—53	Залегание залегание I стадии
Обр. № 66	Глинистые глины	VII	70—77	Залегание залегание II стадии
Обр. № 68	Красные глины	VII	65—70	Встречное залегание Абсолютной стадии (примесью зелени)
Обр. № 69	Илья Бородинская кварциты	VII	70—75	Залегание залегание IV стадии
Обр. № 73	To №	VI	26—28	Залегание залегание V стадии
Обр. № 75	To №	VI	26—28	Встречное залегание Голубинской стадии
Обр. № 80	?	VI	75—77	Залегание залегание V стадии
Обр. № 88	?	VI	25—27	У берега Голубинской стадии
Обр. № 90	Илья Бородинская кварциты	VII—VIII	28—30	Залегание залегание V стадии
Обр. № 92	To №	VII	78—82	To №
Обр. № 93	Алевритовая шлакоглинка	X	9—100	Залегание залегание V стадии

Ср. 655	10 кв.	X	-	Богородицкое I село Красногород
Ср. 1145	Нр. Катерка	VII	445-500	Зименское село Голубинка
Ср. 930	Шахтерский	VI-VII	20	Богородицкое Абакумовка
Шахтерский	Шахтерский	VI-VII	300	Богородицкое Григорьевка
16 кв.		VI		КМ

Пласт Годлево

Шахтерский	на Катерка Красногород	V-VI	III	Зименское село III село Красногород
Ср. 655	Годлево	Годлево, Богородицкое	III	Зименское село III село Красногород
Ср. 930	Годлево	Годлево, Богородицкое	III	Зименское село III село Красногород
Ср. 1145	Годлево	Годлево, Богородицкое	III	Зименское село III село Красногород
Ср. 1025	Годлево	Годлево, Богородицкое	III	Зименское село III село Красногород
Ср. 1050	Годлево	Годлево, Богородицкое	III	Зименское село III село Красногород
Ср. 1017	Годлево	Годлево, Богородицкое	III	Зименское село III село Красногород
Ср. 1025	Годлево	Годлево, Богородицкое	III	Зименское село III село Красногород
Ср. 1169	Годлево	Годлево, Богородицкое	III	Зименское село III село Красногород
Ср. 930	Годлево	Годлево, Богородицкое	III	Зименское село III село Красногород
Ср. 975	Годлево	Годлево, Богородицкое	III	Зименское село III село Красногород
Ср. 654				

Приложение №5. 1

Начало строительства и конец строительства	Шансон гене-	Разработка	Гражданская война, XIX	Современное положение
С.е. 6570	Сибирьская	VIII	242—268	У Ильинки I сплошное.
С.е. 6586	То же	VII	313—318	Земляные крепости II сплошные.
С.е. 6727	Им. Катерина	VI	301—306	To же
С.е. 11012	То же	VII	352—371	Бутылочное крепление II сплошное.
С.з. №92	Гражданская война в Китае. Его и т.д. Воронеж. Чехия	VII	915—935	Бутылочное крепление АМЕРИКАНСКОЕ
С.е. 6448	Китай	VI	40—50	У села Гаоцзиньское Дунхуань.
С.е. 6745	То же	VI	661—687	Бутылочное крепление Гаоцзиньское Хань.
С.е. 6940	?	VI	199—211	Земляные укрепления Гаоцзиньское Хань.
С.е. 6930	?	VI	625—630	Бутылочное крепление Гаоцзиньское Хань.
С.е. 6550	«Сибирьская»	IX	922—935	Бутылочное крепление I сплошное.
С.е. 6587	То же	IX	520—540	To же
Шансон №106	«Китайская»	VI—VII	109—140	Земляные крепости БАЛТИЙСКОЕ земляные.
Л.к.	То же	VI—VII	109—207	To же

даментальных наук — геотектоники и геофизики. Успехи развития тектоники обусловлены более глубоким изучением пластических свойств горных пород. Дальнейшие исследования в этом направлении возможны лишь с привлечением понятий и алгоритмов механики твердого тела (горных пород).

В механике горных пород при изучении неупругого поведения в настоящее время имеются интересные наблюдения как описательного характера (с формальных позиций), так и в области проникновения в физический смысл деформационных явлений. Это, например, феноменологическая теория ползучести горных пород Ж. С. Ержанова, в которой впервые используются некоторые положения теории дислокаций и трещин. Изучение пластического последействия при ползучести пород на контуре выработки проводятся ИГТМ АН УССР под руководством В. Т. Глушко. В настоящее время общепризнано положение о том, что временной фактор при изучении пластического поведения горных пород является одним из главных, поскольку во времени изменяются условия, состояние и свойства горных пород массива. Эти исследования убедительно доказывают необходимость применения такой методики, которая при сохранении объема информации дает комплекс параметров прочности, деформативности и ползучести в сложнонапряженном состоянии и одновременно раскрывает механизм деформирования пород в тесной связи с физической сущностью явлений.

Метод вдавливания плоского штампа принят как наиболее полно отвечающий этим условиям. При этом методе используется камера высокого давления (до 600 кгс/см²), имитирующая горное давление на глубине 1000—1500 м. Исследуя ограниченный породный объем, сводящий к минимуму влияние анизотропии, метод позволяет провести крупномасштабное изучение пород по всему месторождению с установлением закономерностей изменения свойств по глубине и площади.

Ультразвуковой импульсный метод на иммерсионных установках позволяет с достаточной точностью и быстрой определять по скорости распространения и коэффициенту затухания упругих волн упругие па-

раметры, а по ним и вязкопластические характеристики пород с возможностью учета их анизотропии. Метод принят как экспрессный для определения параметров ползучести акустическим способом, в большой степени сокращающий время испытаний в сравнении с общепринятым методом изгиба.

Емкостная информация, получаемая из глубоких разведочных скважин (до 1200 м) и шахтных проб, обрабатывалась методами математической статистики с применением БЭСМ. Данные физико-механических испытаний пород оценивались как простой линейной моделью, так и многомерной.

Таким образом, свойства пород месторождения оценивались комплексной методикой, включающей инженерно-геологическую основу опробования по стратиграфическому расчленению угленосной толщи, послойно-поглубинное изучение свойств пород в пределах характерных структур шахтных полей с расшифровкой результатов исследований методами теории упругости и пластичности и последующей обработкой методами математической статистики.

Подобный подход к оценке угленосного месторождения делается впервые и авторы, естественно, не могли охватить весь круг факторов, влияющих на физико-механические свойства пород, так же как и рассмотреть все технологические варианты. В главе III (анализ результатов) предлагаются основные пути решения горно-геологических явлений на основе использования физико-механических характеристик пород. Даются предварительные заключения о напряженности отдельных структур шахтных полей, которые помогут при решении задач, связанных с проектированием глубоких горизонтов.

Авторы глубоко признательны за ценные замечания академику АН КазССР Ж. С. Ержанову, чл.-корр. АН СССР И. В. Лучицкому, докторам техн. наук Е. И. Шемякину, Г. И. Грицко, Н. Н. Павловой, канд. техн. наук Б. В. Байдюку, канд. физико-математ. наук В. С. Никифоровскому, а также за помощь в проведении исследований И. Л. Рузиновой и И. П. Шумскому. Авторы считают своим долгом выразить искреннюю благодарность за внимательное рецензирование книги проф., докт. техн. наук Г. Я. Новику.

ГЛАВА I

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОКОПЬЕВСКО-КИСЕЛЕВСКОГО РАЙОНА

§ 1. ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ И ГЕОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ СТРУКТУР РАЙОНА

Прокопьевско-Киселевский район расположен на границе Салаира и Кузбасса, где в результате длительного и сложного процесса тектонических дислокаций образовалась своеобразная сложная Присалаирская структурная зона. Тектоника его является в основном следствием резко выраженных тангенциальных давлений с юго-запада на северо-восток со стороны Салаира. По-видимому, определяющую роль в формировании структур имели также вертикальные движения, связанные с неравномерным поднятием отдельных блоков фундамента и обусловившие в целом брахисинклинальную структуру района. Все это привело к образованию серии крупных линейно-вытянутых брахискладок с крутыми углами падения крыльев и большим количеством разрывных нарушений с амплитудами смещений в сотни и тысячи метров, разбивающих зону на ряд тектонических чешуй, взброшенных друг на друга. Крупные складки нередко осложнены дополнительными складками более высоких порядков, что в сочетании с разнообразными тектоническими разрывами еще более усложняет строение и значительно затрудняет проведение разведочных и эксплуатационных работ. На площади района установлено девять синклиналей, получивших название (с запада на восток) Притырганская, Нулевая, I, II, III, IV, V, VI, VII с разделяющими их ан-

тиклиналями, причем на протяжении всего этого района прослежены лишь пять первых складок, а остальные — развиты в юго-восточной части района и быстро погружаются на север под отложения Кузнецкой свиты.

Пликативным структурам района присущи некоторые особенности строения, учет которых позволяет более правильно оценить тектоническую обстановку на том или ином участке. Сохранность замков антиклинальных складок далеко не везде одинакова. В целом в правобережной части района сохранились лишь замки синклинальных складок. Замки антиклиналей нарушены крупными тектоническими разрывами и сдемуированы. В левобережной части сохранились как замки синклиналей, так и замки антиклиналей. Кроме того, установлено, что антиклинали с сохранившимися замками на глубоких горизонтах будут подвержены значительным изменениям: почти все замки антиклиналей по глубине поражаются крупными тектоническими разрывами, и ведущей формой становятся синклинали. Так, замок II Тырганской антиклинали на глубоких горизонтах поражается разрывом *RR*, Красногорской — разрывом *PP* и *SS*, Голубевской — разрывом *GG*, Малой антиклинали и антиклинали «Муравейник» — разрывом *JJ*, а замок Маганакской антиклинали — разрывом *NN* (см. рис. 1 и 42).

Весьма характерным для складок района является также ундуляция их осевых линий с образованием брахискладок. Здесь наряду с крупными волнами, образовавшими замкнутые контуры Нулевой, I и III синклиналей, отчетливо проявляются волны второго, третьего и более высоких порядков, благодаря чему нередко пласти залегают в виде цепочки брахискладок и при общем выдержанном простирании складки элементы залегания пластов характеризуются значительными изменениями.

Почти для всех пликативных образований района характерна асимметрия. Преобладающим является падение осевых плоскостей на запад, но нередко падение и на восток. Иногда одна и та же складка по простиранию имеет как бы винтовую осевую плоскость с падением то на запад, то на восток.

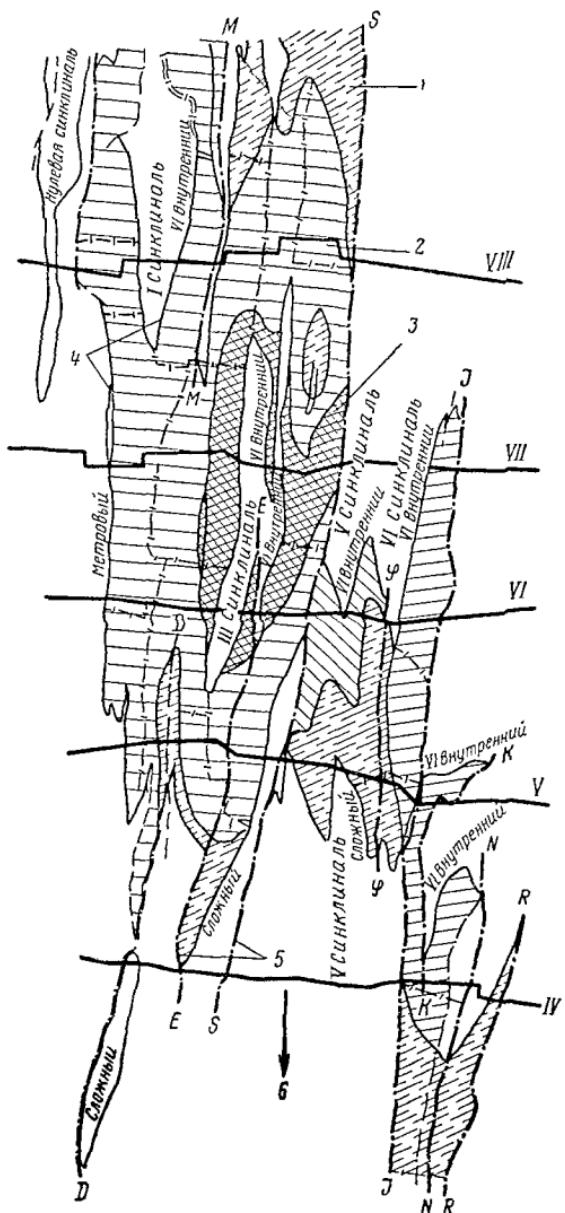


Рис. 1. Карта прогноза температур юго-восточной части Прокопьевско-Киселевского района на глубине 900 м (по Э. Сендерзону)

1 — площади с температурой более 25°C, 2 — то же, от 20 до 25°C, 3 — то же, менее 20°C, 4 — выходы пластов угля на гор 600 м, 5 — зоны крупных разломов и нарушений; 6 — направление общего подъема структур района по простиранию; IV—VIII — разведочные линии

Наконец, нельзя не отметить широкое развитие в районе дополнительных складок. Здесь имеют место все группы складок, выделенные А. А. Белицким и Э. М. Пах, образовавшиеся в результате нормальных меж- и внутрислойных перемещений при увеличении угла падения крыльев основных складок и в связи с деформацией пород в боках тектонических разрывов на участках перегибов осей основных складок.

Разрывные нарушения в районе имеют весьма широкое развитие. Только крупных разрывов с амплитудой в несколько сотен и тысяч метров, прослеженных на расстоянии выше 10 км, насчитывается около 20. Все они располагаются почти параллельно простиранию складок и падают, как правило, на юго-запад под углом 70—85°. Исключение составляет разрыв *ММ*, падающий на северо-восток.

Помимо крупных тектонических разрывов в районе имеют место многочисленные разрывы более высоких порядков. Амплитуда таких разрывов весьма разнообразна, от сантиметров до десятков и сотен метров. Иногда они одиночны, но чаще концентрируются на отдельных участках, создавая настолько сложные условия, что отработка угольных пластов становится невозможной.

На глубоких горизонтах более отчетливо выражен закрытый характер трещиноватости. Доля открытых трещин, выполненных кальцитом, кварцем и т. п., невелика. Как правило, они наблюдаются вблизи тектонических разрывов. По скважинам на глубоких горизонтах выделяются зоны интенсивной трещиноватости, дробления, милонитизации, развития мелких тектонических разрывов, обычно сопровождающих крупные тектонические разрывы.

Этот факт, наряду с тем, что и по горным выработкам на нижних горизонтах не наблюдается упрощения тектоники, дает основание считать тектонику глубоких горизонтов столь же сложной, как и на верхних горизонтах [56].

Механизм образования трещин довольно сложный и в общем виде может быть объяснен последовательно проявляющимися стадиями деформаций, которые испытывают породы на протяжении длительного времени формирования складчатой струк-

туры. В процессе упругопластической деформации образуются складки, в породах возникают плоскости скольжения, со временем преобразующиеся в трещиноватость. Затем пластические возможности исчерпываются, наступает предел прочности пород, последнее разрушается с образованием вязких разрывов. Однако неоднородный характер деформаций приводит на некоторых участках к убыстрению процесса, что вызывает образование разрывов (в стадию пластической деформации) с одновременным формированием подгибов и складок волочения. Огромный фактический материал по Кузбассу и установленные здесь структурные закономерности подтверждают мнение о ведущей роли пластической стадии деформации. Последняя, по утверждению А. А. Белицкого, объясняет механизм образования поперечных, продольных и диагональных схем трещин.

Возникновение изгиба осевых складок в вертикальной плоскости с образованием брахискладок объясняется их объемным напряженным состоянием. В сложной обстановке деформации горных пород в направлении, перпендикулярном общему сжатию, удлинение и сжатие присутствуют одновременно; они являются как бы противоречивыми элементами одного и того же процесса. Если представить, что деформируемые горные породы обладают сравнительно высокими пластическими деформациями, то удлинение неизбежно должно привести к увеличению размеров деформируемой толщи пород по простиранию складок. Увеличение размеров толщи вдоль осевых линий складок обязательно встретит сопротивление окружающей среды в этом направлении, что приведет к возникновению напряжения сжатия, которое и будет являться причиной образования изгибов осевых линий складок в вертикальной плоскости.

Образование крупных тектонических разрывов района объясняется концентрацией напряжений в местах складчатой структуры. Когда деформация горных пород достигает предела прочности, породы оказываются пронизанными трещинами, которые приводят к тектоническим разрывам. С образованием разрывов происходит разрядка напряжений, поэтому в данной стадии деформации могут образоваться только две

системы продольных разрывов, которые соответствуют максимальному касательному напряжению. Развитие крупного тектонического разрыва с большой амплитудой перемещения невозможно без образования мелких разрывов в боковых породах. Возникшие при этом напряжения находят выход в образовании мелких разрывов по трещиноватости, как по направлению наименьшего сопротивления. Чем сложнее сетка трещиноватости, тем сложнее сетка тектонических разрывов, приводящая к образованию боковых структур.

Таким образом, в Кузбассе намечается определенная последовательность в образовании тектонических разрывов. К наиболее древним относятся разрывы Прокопьевского района, которые заложились еще при горизонтальном или слабонаклонном залегании пород и затем были собраны в складки вместе со всей толщей угленосных отложений. Вероятно, в первые моменты складкообразования на отдельных участках создавались благоприятные условия для достижения предела прочности пород с образованием подобных разрывов. Затем одновременно с формированием складчатости в пластическую стадию деформаций угленосной толщи бассейна образовались системы плоскостей скольжения, которые постепенно преобразовались в трещиноватость.

Таким образом, состояние массива Прокопьевско-Киселевского района в настоящее время определяется не только статическим давлением вышележащих толщ по и наличием остаточных полей тектонических напряжений.

В дислоцированной толще пород района все процессы литогенеза завершены, а участвующие в них напряжения и деформации определили прочностные и деформационные свойства пород.

В литолого-минералогическом отношении угленосные отложения Прокопьевско-Киселевского района представлены Балахонской свитой, в составе которой по стратиграфическому расчленению выделяются две серии — нижнебалахонская и верхнебалахонская. Верхнебалахонская серия имеет по-всеместно промышленное значение, нижнебалахонская содержит маломощные невыдержаные пропла-

стки углей. По этой причине верхнебалахонская серия является объектом полувековой эксплуатации и изучена достаточно хорошо.

Более дробное деление серий на подсерии основано на литолого-фациальных признаках и угленосности.

Кемеровская подсерия отличается наличием в ней мощных пластов с песчанистым составом вмещающих пород и имеет непостоянную общую мощность, которая объясняется неустойчивым положением верхней границы, за которую принят слой конгломерата, свидетельствующий о перерыве в отложении осадков в эрозионном размыве отложившихся ранее пород.

Вмещающие породы представлены, в основном, песчаниками. Алевролиты и аргиллиты залегают в кровле и почве угольных пластов слоями в 10—15 м. Углистые аргиллиты встречаются редко.

Усатская подсерия завершает разрез углистых отложений. Нижней границей ее является горизонт упомянутого конгломерата, верхняя определяется по появлению Кузнецкой фауны верхнепермского возраста и находится в 260—350 м выше пласта VI Внутреннего. В этих границах средняя мощность подсерии 450—475 м.

По характеру угленосности подсерии можно разделить на две части: нижнюю, продуктивную, с рабочими пластами углей и верхнюю — безугольную. Условная граница между ними проводится по кровле пласта VI Внутреннего. Мощность продуктивной части составляет в среднем 285 м. В разрезе этой части установлено от шести до восьми пластов угля, из которых интенсивно разрабатывается пять — семь. Эти пласты в основном с довольно выдержанной мощностью, прекрасными коксующимися углями, известные в районе под названием Внутренних. Наиболее мощным среди них является пласт IV Внутренний.

В литологическом отношении свита представлена всеми разностями пород песчано-глинистого комплекса. Наибольшее развитие имеют алевролиты, менее распространены песчаники. Аргиллиты, углистые породы и конгломераты играют незначительную роль.

Песчаники имеют преобладающее распространение

и представлены преимущественно мелко- и среднезернистыми разностями с характерной серой окраской, массивной или слоистой текстурой. В генетическом отнесении они являются прибрежно-бассейновыми отложениями и осадками выносов в бассейн, по составу песчаники полимиктовые. Исследованиями ВСЕГЕИ (1962 г.) установлено, что состав их остается постоянным независимо от стратиграфического положения. Сопоставление плотности пород с данными микроскопического анализа показало, что плотность зависит главным образом от содержания в цементе карбонатов и составляет $2,60 \text{ г/см}^3$, плотность пород с серицитовым, глинистым или смешанным цементом — меньше $2,60 \text{ г/см}^3$. Кроме того, при одинаковом составе цемента значение плотности выше у более мелкозернистых разностей пород. Тип цементации, особенно в породах с карбонатным цементом, не оказывает влияния на плотность при относительно однообразном минералогическом составе песчаников и алевролитов.

Деформация горных пород проявляется в широком диапазоне от упругих, упруго-пластических и пластических деформаций. Характер этих деформаций, вероятно, зависит не только от минералогического состава, но и от физической породы деформационных явлений.

ГЛАВА II

ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРОД

§ 1. ВОПРОСЫ МЕХАНИКИ ГОРНЫХ ПОРОД

Механика сплошных сред изучает механическое движение различных твердых, жидких и газообразных тел под влиянием прилагаемых сил. Одним из основных методов исследования сплошных сред является использование физических моделей. Системы уравнений, соответствующих принятым моделям, связывают историю деформирования частиц тел с ее напряженным состоянием. Модель строится с тем расчетом, чтобы охарактеризовать главные черты процессов (давления, скорости, усилия, температуры и пр.) для некоторого класса реальных тел [21, 33, 55].

К началу XX в. интенсивно и, по сути дела, независимо развивались математические теории идеально упругого (Гукова) тела и идеальной (невязкой) жидкости, обсуждалась модель Ньютона вязкой жидкости (Дж. Стокс). Появилась модель идеально пластического тела Сен-Венана, были предложены схемы описания релаксационных явлений Вольтерра, Фойхта, Максвелла, Кельвина. Количество моделей возросло настолько, что ранее созданные модели зачастую не увязывались между собой. С другой стороны, появились новые материалы и процессы, не укладывающиеся в рамки уже созданных моделей. Механика сплошных сред выделилась как самостоя-

тельная дисциплина, связанная с термодинамикой необратимых процессов, электродинамикой сплошных сред, химической кинетикой, теорией массотеплопередачи и другими отраслями знаний. Вариационный принцип, сформулированный Л. И. Седовым, дал возможность построить класс моделей сплошных сред, включающий известные модели и новые, учитывающие вязкие, упругие, пластические эффекты, движение дислокаций и т. д. Механика сплошной среды основана на макроэксперименте, хотя построение конкретных моделей по некоторому «паспорту» экспериментальных данных и представляет собой весьма сложную задачу. Граница между так называемым твердым деформируемым телом, жидкостью и газом, определяемые для реальных тел физическими параметрами (давлением, температурой, скоростью процесса и пр.), стираются в их модельном описании. Например, модель несжимаемого упруговязкопластического тела включает в себя как частные (пределные) случаи упругое тело, вязкую жидкость, идеальную несжимаемую жидкость, идеально пластический материал.

Механика твердого тела как раздел механики сплошных сред применительно к горным породам имеет некоторые особенности. Физическое истолкование потерь твердыми телами их свойств при изменении термодинамических условий привело к созданию теории дислокаций, которая связывает механику и физику твердого тела. Использование физических констант при описании механических свойств материалов наиболее эффективно проведено исследованием С. Н. Журкова.

Горные породы имеют множество дефектов структуры, но другого порядка, нежели дислокации, и слабое сцепление элементов структуры, что проявляется, например, в пониженной прочности их на отрыв и скальвание, склонности к ползучести при нормальных давлениях и температурах. Факт увеличения объема при ползучести, в 2—28 раз превышающего вычисленный по теории упругости, полученный А. Н. Ставрогиным, согласуется с результатами натурных измерений по смещениям контуров горных выработок во времени. Для объяснения этого явления

Ж. С. Ержановым и Ю. А. Векслером привлечены теория дислокаций и теория трещин с использованием физических соотношений Г. И. Гуревича [17], в основу которых положен параметр, регулирующий ползучесть пород — время релаксации по Я. И. Френкелю. Разрушение породного контура при ползучести объяснено эмпирическим коэффициентом, а разрушение лабораторных образцов — на основе б-модели хрупкого тела М. Я. Леонова — В. В. Панасюка. Привлечение энергетической теории для объяснения прочности пород становится более обоснованным, когда учитываются их напряженное состояние и влияние пластических деформаций. Использование модели упругопластического тела открывает широкие возможности оценки прочности пород на основе теории трещин. Модель С. А. Христиановича — Е. И. Шемякина согласуется с данными эксперимента, на основе теории прочности Мора отражает деформационные особенности пород и позволяет пользоваться только двумя фундаментальными характеристиками: упругого и пластического состояния. Такие характеристики, как вязкоупругость, вязкость, заимствованные из реологии, заменяются в этом случае представлениями упругопластического поведения. Например, упругое последействие имеет физический смысл перераспределения напряжений во времени, пластическое последействие имеет тот же смысл, но отличается только скоростью движения границ пластических зон.

Экспериментальные данные, используемые в настоящей работе, получены на основе современных представлений об упругопластическом поведении пород при деформировании и применении методов, наиболее полно раскрывающих эти возможности материала. Развитие метода вдавливания плоского штампа в сочетании с динамическим методом привело к созданию комплексного метода, вполне отвечающего задаче оценки деформационных особенностей пород угленосного района и базирующегося на современных модельных представлениях механики твердого тела.

Как будет показано далее, метод обладает информационной емкостью, значительно сокращает трудоемкость массовых измерений, сохраняет достоинства экспресс-метода,

§ 2. О КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ ТРЕЩИН

Деформационные свойства реальных твердых тел определяются не только их физико-химической природой, но и дефектностью структуры. В структуре реальных твердых тел всегда имеются различного рода дефекты — концентраторы напряжений, такие как макро- и микротрешины, различного происхождения полости и включения, границы зерен и блоков структуры, скопления дислокаций, вакансий и др. [28, 39]. В процессе деформации твердого тела в окрестностях таких дефектов имеет место высокая концентрация напряжений, сопровождающаяся образованием зародышевых и ростом уже имеющихся в теле трещин, т. е. локальным, либо полным разрушением тела. Горные породы в отличие от искусственных материалов имеют более продолжительную деформационную историю накопления повреждаемости, что сказывается на их деформационном поведении. При нагружении породы более вероятным следует считать процесс развития готовых элементов несплошности, поскольку энергетические затраты на образование дефектов более значительны.

Деформации пород в горном массиве под влиянием естественных (геотектонических) и искусственных (горнотехнических) факторов имеют общую закономерность роста несплошности во времени. Исследования механики деформируемых хрупких тел с концентраторами напряжений типа остроконечных полостей-трещин интенсивно развиваются в последние два десятилетия.

Возникшая 40 лет назад теория трещин А. А. Гриффитса получила значительное развитие в работах С. А. Христиановича, Г. И. Баренблата, М. Я. Леонова, Г. П. Черепанова, В. В. Панасюка. Предложены расчетные модели, определены значения предельных нагрузок для некоторых случаев деформации твердого тела, намечены перспективы решения задач деформации пород. В методах исследований физико-механических свойств горных пород зачастую предлагаются расчетные схемы, далекие от реального их поведения. Детальные макро- и микроскопические

исследования пород показывают, что степень изменения их различна и определяется интенсивностью развития трещин, микро- и ультрамикротрещин, т. е. степенью диспергирования, прямым следствием которого является уменьшение плотности. При этом следует помнить, что до достижения критического размера дефект обладает обратимыми свойствами (частичное либо полное восстановление, «залечивание» трещин). Например, дислокации обладают свойством обратимой подвижности; дислокации разного знака уничтожаются. Дефекты, превысившие критический размер, склонны к росту в условиях статического равновесия внешних сил либо к магистральному распространению при избытке подводимой извне энергии.

Задача о разрушении пластины с прямолинейной трещиной, когда пластина растягивается внешними напряжениями p , впервые была изучена А. А. Гриффитсом, сформулировавшим так называемый энергетический метод.

Для выяснения сущности этого метода рассмотрим потенциальную энергию деформированного хрупкого тела, ослабленного трещиной $2l$ и подвергнутого расщеплению внешними напряжениями p . Эту энергию можно представить в следующем виде:

$$\Pi = \Pi_0 - W(p, l) + U_{(l)}, \quad (1)$$

где Π_0 — потенциальная энергия деформируемого твердого тела без трещины; $W(p, l)$ — энергия упругих деформаций, обусловленная раскрытием трещины длиной $2l$ при воздействии на тело напряжениями p ; $U_{(l)}$ — поверхностная энергия трещины.

Энергетический метод Гриффита формулируется так: для распространения трещины необходимо и достаточно, чтобы с ростом ее длины $2l$ энергия деформированного тела Π не увеличивалась. Следовательно, предельные напряжения $p=p_r$ для тела с трещиной длиной $2l$ должны удовлетворять уравнению

$$\frac{\partial}{\partial l} [U_{(l)} - W(l, p_r)] = 0. \quad (2)$$

Предельная нагрузка в задаче разрушения пластины прямолинейной трещиной

$$p_* = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi(1-\nu^2)l}}, \quad (3)$$

где E и ν — упругие постоянные; γ — плотность эффективной поверхностной энергии материала.

Известно, что для неидеально хрупких тел, к которым относится горная порода, энергия разрушения не совпадает с поверхностной энергией, однако из критерия Гриффитса можно получить формальные критерии разрушения для сред с различными реологическими свойствами. Скорость распространения трещины имеет тесную связь с пластической деформацией на ее поверхности [20], поэтому экспериментальные значения поверхностной энергии порой значительно отличаются от теоретических.

Теоретическая величина γ для кристаллов: углерода со структурой алмаза $\gamma_a=56,6$, со структурой графита $\gamma_g=23,4 \div 0,27$ эрг/мм²; стекла (экспериментальная величина) $\gamma_{ст}=12,14$ эрг/мм²; для структуры объемно-центрированного куба α -Fe теоретическая величина находится в пределах $26,8 \div 55,1$ эрг/мм².

Экспериментальные значения поверхностной энергии метаморфических пород, необходимой для образования новой единичной поверхности, полученные методом термического разрушения, составляют $122 \div 157$ эрг/мм² для гранитов и $248 \div 490$ эрг/мм² для железистых кварцитов [25]. Очевидно, подавляющая часть энергии затрачивается на неупругие деформации пород. Поликристаллы, содержащие большое число дислокаций и границ зерен, поглощают значительно большую энергию, идущую на разрывы структурных связей в условиях высоких концентраций напряжений.

Различие экспериментальных и теоретических значений γ , объясняемое поглощением энергии за счет пластической деформации, может быть представлено зависимостью [20]

$$\gamma_{пл} = 9\gamma_y \ln \frac{G}{\pi \tau_y}, \quad (4)$$

где $\gamma_{\text{пл}}$ — плотность эффективной поверхностной энергии материала, затраченная на пластические деформации при разрушении; γ_y — теоретическая величина, рассчитанная в предположении хрупкого скола в условиях плоской деформации; G — модуль сдвига; τ_y — предел текучести.

Крайние значения $\gamma_{\text{пл}}$ порядка 10^3 — 10^5 эрг/мм².

При разрушении породы плоским штампом, как позже будет рассмотрено, хрупкому сколу предшествуют пластические деформации. Предлагаемая ниже формула позволяет оценить разницу между величиной γ_y при магистральном распространении трещины и $\gamma_{\text{пл}}$, определяемой экспериментально при наличии пластических деформаций породы, искривляющих траекторию трещины,

$$\frac{\gamma_{\text{пл}}}{\gamma_y} = 9 \ln \frac{(1 - v) \sqrt{7 - 2v} \pi}{\sqrt{8(1 - v)} \left[1 - \left(\frac{1 - 2v}{2} \pi \right)^2 \right]}, \quad (5)$$

где v — коэффициент Пуассона.

При изменении v от 0,1 до 0,3 отношение $\gamma_{\text{пл}}/\gamma_y$ снижается в 4 раза (соответственно от 828 до 207).

Величина $\gamma_{\text{пл}}/\gamma_y$ для большинства горных пород составляет пределы (250—200) соответственно характерным для них значениям $v=0,25 \div 0,3$.

Таблица 2
Плотность эффективной поверхностной энергии

Порода	Диаметр зоны разрушения $D_{3,1}$, мм	Условный предел текучести p_0 , кгс/см ²	Динамический модуль Юнга $E_D \cdot 10^{-5}$, кгс/см ²	Временное сопротивление растяжению σ_p , кгс/см ²		Плотность эффективной поверхностной энергии $\gamma_{\text{пл}}$, эрг/мм ²
				расчетное	при раскальвании	
Аргиллит тонкослоистый	5,7	66	5,0	103	104	53,5
Сидерит	5,7	95	6,5	147	130	81,5
Алевролит	5,6	86	5,5	138	142	85,8
Песчаник тонкозернистый	4,9	81	5,6	162	170	93,1
Алевролит с глинистым карбонатным цементом	6,6	123	5,5	166	188	151,0
Песчаник мелкозернистый с глинистым цементом	6,5	128	7,5	166	187	108,0

Таким образом, экспериментальные значения уп-
лотнности эффективной поверхности энергии мате-
риала содержат информацию о пластических свойст-
вах пород и используются при изучении деформаци-
онного поведения горных пород (табл. 2).

§ 3. РАСШИФРОВКА КРИВОЙ НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ВДАВЛИВАНИИ ПЛОСКОГО ШТАМПА

Пластические свойства пород имеют важное значе-
ние при решении ряда вопросов механики горных по-
род. Наиболее пригодным методом, позволяющим проводить оценку пластических свойств пород, яв-
ляется метод вдавливания плоского штампа Л. А.
Шрейнера. В силу того, что метод развивался и стан-
дартизирован применительно к технологии глубинно-
го бурения, он обладает специфичностью получаемых параметров. Характеристики, рассчитываемые по дан-
ным вдавливания, носят качественный характер. На-
пример, коэффициент пластичности $K_{пл}$ характеризу-
ет отношение затраченной работы к работе упругих деформаций; условный предел текучести p_0 считают критическим давлением, фиксирующим начало пере-
хода породы в пластическое состояние. Связь p_0 с касательными напряжениями в породе удаётся при допущении равномерного контактного давления на основе упругого решения задачи [58]. Ввиду сложно-
го характера пластических деформаций под штампом p_0 является относительной характеристикой. Резкая концентрация контактных давлений на кромке штам-
па переводит породу в предельное состояние при невысоких нагрузках. При этом ошибочно считать, что контактные давления затем полностью выравни-
ваются. Их снижение ограничивается величиной, рав-
ной пределу текучести (либо прочности для хрупких пород). Существует классификация горных пород, основанная на зависимости деформации вдавливания штампа от нагрузки, предложенная Л. А. Шрейнером: хрупкие, пластично-хрупкие и высокопластич-
ные горные породы.

Р. М. Эйгелес подразделяет породы на две группы по характеру поведения поверхности полупрост-
ранства между штампом и диаметром зоны разруше-

ния D_{3-p} , причем пластично-хрупкие и высокопластичные породы входят во вторую группу.

Для пород первой группы (класс хрупких пород) получено решение задачи в упругой постановке, из которой мы используем зависимость

$$\left. \begin{aligned} \tau_{\max} &= \frac{K}{2\pi} p_{kp}; \\ K &= 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{1 - 2v}{2} \pi \right)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где τ_{\max} — максимальные касательные напряжения в полупространстве.

Породы первой группы имеют высокую сопротивляемость растягивающим напряжениям, что приводит к достижению высокого уровня гидростатического давления под штампом, разрушающего породу хрупким сколом с разлетом осколков. Поскольку предельный переход под кромкой штампа наступает при нагрузке, равной $K/2\pi$ от p_{kp} ($0,347$ при $v=0,3$), дальнейшее нагружение сопровождается развитием конической трещины, углубляющейся в полупространство от кромки. Затухание ее в глубине обусловлено падением уровня растягивающих напряжений согласно упругому решению контактной задачи. Боковой распор, вызванный гидростатически сжатым объемом, смыкает берега трещины, которые в процессе нагружения проскальзывают. Вследствие искривления траектории трещины при проскальзывании возникают напряжения отрыва консоли, составляющей «матрицу», в которой находится объем всесторонне сжатого материала.

Породы второй группы отличаются тем, что вследствие низкого предела текучести предельный переход под кромкой штампа начинается пластическим течением. Согласно решению соответствующей задачи для плоского штампа с использованием вариационного метода [5], появление пластической зоны под его кромкой наступает также раньше достижения условного предела текучести p_0 . При достижении же p_0 зона пластичности уходит вглубь настолько, что смыкается на оси симметрии полупространства. Дальнейшее нагружение сопровождается

расширением зоны с возрастанием нагрузки либо с неизменным ее уровнем. Эти особенности еще будут рассмотрены далее. До достижения p_0 , несмотря на протекающие пластические деформации, упругое решение задачи остается в силе [16]. Имеет место состояние неполной пластичности, т. е.

$$\tau_{13} \geq \tau_{\max}; \quad \tau_{12}, \quad \tau_{23} \leq \tau_{\max}. \quad (7)$$

Когда при нагружении достигается условный предел текучести, часть материала начинает переходить в состояние полной пластичности. В состоянии неполной пластичности деформации течения сдерживаются упругой связью в двух других направлениях. В состоянии полной пластичности процесс течения регулируется двумя факторами: сужением пластической зоны при подходе к поверхности полупространства и сопротивлением течению вследствие деформационного упрочнения. Если модуль пластичности невысок, то возможно значительное выдавливание пород из-под штампа (глина). Сопротивление течению под влиянием указанных факторов способствует расширению пластических зон.

Для изучения пластических зон [58] при различных режимах нагружения образцы разгружались из состояния предразрушения, а анишлифы облучались методами γ - и люминесцентной дефектоскопии. Установлено, что зона интенсивного свечения, соответствующая области τ_{\max} , деформировалась с интеркри сталлическим характером скольжения, а зона слабого свечения, где также протекали пластические деформации, деформировалась преимущественно за счет поворота зерен. Высокопластическая порода (каменная соль) деформировалась с образованием только одной зоны полной пластичности. Следует отметить, что для каменной соли также свойственно возрастание нагрузки с деформацией за p_0 .

Если учитывать способность породы к упрочнению, всестороннее сжатие приводит к значительному увеличению предела текучести. Так, например, в результате сжатия глины под высоким боковым давлением она превращается в аргиллит [41]. Глинистый материал постепенно переходит из высокопластического состояния в упругопластическое с ярко

выраженным пределом текучести. Однако в данном случае происходят качественные изменения — меняется структура породы.

Если рассматривать породу без изменений в процессе ее испытания, деформационное упрочнение способствует росту τ_{\max} в условиях практической несжимаемости матрицы, в которой сжимается образец. Особенностью схемы вдавливания штампа является то, что порода сжимается в матрице из того же материала и их взаимодействие необходимо учитывать.

Податливость матрицы предотвращает выдавливание материала из зоны полной пластичности, кроме случая низкого предела текучести и слабого деформационного упрочнения. Расширение пластических зон при постоянной скорости нагружения происходит при $\tau_{\max} = \text{const}$, аналогично постоянству температуры вод при таянии льда. Изменение внешнего (гидростатического) давления влияет на величину $\tau_{\max} = \text{const}$. Увеличение скорости нагружения влияет аналогично: при постоянной скорости нагружения более высокого уровня напряжений $\tau'_{\max} = \text{const}$; $\tau'_{\max} > \tau_{\max}$ т. е. изменение термодинамических условий влияет на величину τ_{\max} , однако механизм взаимодействия сжимаемого материала с матрицей не изменяется.

Вследствие возрастания уровня τ_{\max} при повышении скорости удара размер пластической зоны уменьшается при одинаковых размерах индентора [58]. Установлено, что верхняя граница пластической зоны совпадает с поверхностью согласно упругому решению задачи, а нижняя граница с ростом скорости нагружения приближается к верхней. После достижения критической скорости (для мрамора $v_{kp} = 32 \div 40$ м/сек) сжимаемый объем под штампом скачком переходит в пластическое состояние, причем радиус сферы несколько превышает радиус штампа. (Аналогичный переход для каменной соли осуществляется при небольших давлениях, так как предел текучести ее почти не зависит от величины нормального напряжения, действующего в плоскости скольжения.)

Соответственно с ростом скорости нагружения возрастает условный предел текучести и твердости, причем эти показатели возрастают и при совместном

действии фактора скорости и всестороннего сжатия.

Практика показала, что выдавливания породы из-под штампа в диапазоне скоростей указанных пределов, как правило, не происходит. Только в случае высоких скоростей движения индентора наблюдается выплескивание части пластичного материала чащевидной формы.

Таким образом, приходим к следующему выводу: в процессе образования и роста пластических зон при вдавливании штампа максимальное касательное напряжение, достигаемое первоначально в локальных зонах, остается постоянным вплоть до разрушения при условии, что скорость нагружения и гидростатическое давление постоянны. Это позволяет использовать упругое решение контактной задачи для упругих пород или пользоваться пластическим решением задачи по Л. Прандтлю для пластичных пород [58]

$$\tau_{\max} = \frac{P_{kp}}{2 \left(1 + \frac{\pi}{4}\right) \sqrt{1 + 2\nu}}, \quad (8)$$

где ν — коэффициент трения, принятый равным коэффициенту Пуассона.

Породы, представляющие промежуточный класс между упругохрупкими и высокопластичными, имеют свои деформационные особенности; τ_{\max} при их нагружении достигается прежде наступления условного предела текучести p_0 [5], и между ними можно найти связь согласно упругому решению задачи, однако расчет p_0 , как отношение нагрузки к площади контакта, имеет погрешность вследствие неравномерного контактного давления. Если использовать пластическое решение задачи по Прандтлю, то необходимо найти такую критическую точку на диаграмме вдавливания плоского штампа, при которой контактное давление близко к равномерному. Предел пластичности p_s характеризует преимущественное пластическое деформирование и может быть использован в расчете по формуле (8) вместо p_{kp} . Точка p_s находится аппроксимацией кривой вдавливания двумя касательными к начальному и конечному участкам. Используя аналогию пластического решения задачи

упругому решению [6], был рассчитан модуль пластичности

$$E_p = \frac{(p_{sh} - p_s) (1 - v^2)}{2al}. \quad (9)$$

Рассмотрим возможность использования данной аналогии для случаев статического и динамического внедрения штампа. Известно [58], что распределение контактных давлений геометрически подобно для обоих случаев и позволяет ограничиться рассмотрением статического случая внедрения.

Модуль пластичности характеризует деформационное упрочнение, поэтому после достижения предела текучести дальнейший пластический сдвиг должен сопровождаться ростом нагрузки. Учитывая, что площадки сдвига вдоль изолиний τ_{max} в полупространстве разориентированы относительно друг друга, более вероятным следует считать не общее их подвигание с результирующим выдавливанием из-под кромки штампа, а переход в предельное состояние соседних изолиний касательных напряжений. Однако по мере роста нагрузки и увеличения зоны полной пластичности возможность общего подвигания появляется вследствие все увеличивающейся податливости матрицы. Критическое состояние, когда деформация матрицы начинает следовать за процессом расширения пластических зон, а не сдерживать его, по-видимому, соответствует пределу p_s , что приводит к линейной зависимости между нагрузкой и перемещением (и соответственно между нагрузкой и расширением пластической зоны).

Модуль пластичности — есть показатель скорости распространения пластических волн [28], и в данном случае расширение пластической зоны представлено этим показателем. С увеличением скорости нагружения модуль пластичности возрастает аналогично возрастанию скорости пластических волн при переходе трещины из вязкой в упругую область, или, наоборот, подобно тому, как в процессе развития образования трещины степень пластической деформации и, следовательно, энергия пластической деформации для образования новой поверхности быстро уменьшаются.

§ 4. К МЕХАНИЗМУ РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД ПОД ШТАМПОМ

При вдавливании плоского штампа разрушение породы носит хрупкий характер, даже если перед этим наблюдаются значительные пластические деформации. Высокопластичные породы деформируются с выдавливанием породы из-под штампа, причем нагрузка остается неизменной при значительном внедрении, однако в итоге достигается все тот же эффект хрупкого скола породы вокруг штампа. Процесс разрушения начинается с образования кольцевой конической трещины в глубине полупространства на границе с ядром всесторонне сжатого материала. Если порода имеет выраженные упругие свойства, переход в предельное состояние на кромке штампа может осуществляться развитием конической трещины, углубляющейся в полупространство [58]. Под влиянием бокового распора со стороны всесторонне сжатого материала берега трещины сомкнуты и проскальзывают. Распределение напряжений за пределами трещины соответствует упругому решению задачи, даже если материал переходит в состояние неполной пластичности в зоне действия максимальных касательных напряжений. Нормалью по исходной трещине при определенных условиях развивается коническая трещина хрупкого скола, выходящая на поверхность полупространства. Ее развитие начинается в области действия t_{max} , снижающихся по мере ее подвигания.

В случае более пластичной породы предельный переход под кромкой штампа может не сопровождаться развитием конической трещины, уходящей в глубь полупространства. Взамен этого происходит продвижение пластической зоны с одновременным ее расширением. При достижении r_0 — условного предела текучести — зона смыкается на оси симметрии [58]. При некоторой нагрузке в процессе расширения зоны происходит образование конической трещины, выходящей на поверхность полупространства, аналогично первой схеме [22]. Таким образом, разрушение при вдавливании штампа происходит после развития трещины, отрывающей консоль за контуром штампа.

Если на поверхности полупространства создать дополнительно распределенную нагрузку, то происходит увеличение пределов r_0 и r_{pl} , а хрупкий характер скола может смениться вязким. Кривая погружения может приобрести значительный горизонтальный участок.

Процесс развития трещины можно разделить на этапы: докритический, когда ее продвижение невозможно при значительных энергетических затратах, критический и самопроизвольный, когда для развития трещины не требуется подачи энергии извне. Первый этап сопровождается медленным ростом трещины, поскольку ее продвижение происходит в зоне полной либо неполной пластичности. Если сравнить размер заодившейся трещины с размером пластической зоны, то, очевидно, пластическая волна при ее движении будет распространяться согласно зависимости [28]

$$\frac{s}{l} = \frac{v_p}{v_y - v_p} \left(\frac{v_y}{v_t} - 1 \right), \quad (10)$$

где v_p — скорость пластических волн; v_y — скорость упругих волн; v_t — скорость образования трещины; s/l — безразмерная толщина пластического слоя на кончике трещины.

Поскольку $s/l \rightarrow \infty$, $v_t \rightarrow 0$.

При выходе трещины из зоны пластичности скорость ее становится равной скорости пластической волны v_p , распространяемой кончиком трещины, $v_t = v_p$, так как $s/l = 1$.

Скорость пластических волн

$$v_p = \sqrt{\frac{E_p}{\rho}},$$

где E_p — модуль пластичности для данной скорости нагружения породы.

Критическая скорость разрушения

$$v_{kp} = \int_0^{\varepsilon_m} v_p d\varepsilon, \quad (11)$$

где ε_m — максимальная пластическая деформация за фронтом пластической волны, до которой не происходит разрушения,

Это означает, что, кроме наличия пластического перехода в виде пластической волны под штампом, для появления трещины отрыва консоли необходимо достижение ε_m . Постоянство параметров кривой вдавливания, таких, как модуль деформации и коэффициент пластичности, свидетельствует о стабильности ε_m в состоянии предразрушения породы.

Ряд упругопластичных пород при деформировании дает горизонтальный участок кривой (рис. 2), что

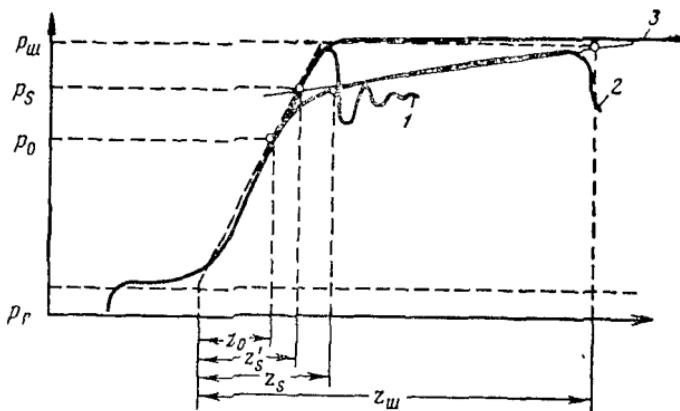


Рис. 2. Связь между нагрузкой и перемещением при вдавливании плоского штампа:

1 — для упругорых; 2 — для хрупкопластичных; 3 — для высокопластичных пород; p — критические нагрузки; z — соответствующие перемещения штампа

свидетельствует о процессе спонтанного, ускоряющегося развития трещины отрыва консоли, сопровождающегося снижением энергетических затрат. При отсутствии горизонтального участка скорость образования трещины в упругой области приближается к скорости упругих волн. Если подходить к понятию твердости, как к мере поверхностного натяжения материала, то показателем нужно считать поверхностную энергию. Для расчета плотности эффективной поверхностной энергии породы, по данным разрушения ее штампом, используется следующая модель. Отрыв консоли представляется идеализированной схемой распространения дискообразной кольцевой конической трещины вдоль изолиний растягивающих

напряжений в полупространстве, выходящих на поверхность. В данном случае применима формула Сака

$$p_{kp} = \sqrt{\frac{2E\gamma_{pl}}{(1-\nu^2)\pi(D_{z,p}-d)}}, \quad (12)$$

где γ_{pl} — плотность эффективной поверхностной энергии, необходимой на развитие трещины в пластической области при $\gamma_y < \gamma_{pl}$; $D_{z,p}$ — диаметр зоны разрушения, оконтуривающий выход изолинии растягивающего напряжения, по которой полупространство близ поверхности находилось в упругом состоянии, свидетельством чего является хрупкий скол в завершающей стадии разрушения; p_{kp} — критическая величина растягивающего напряжения, при которой трещина получила возможность продвигаться вдоль изолинии.

Величину p_{kp} , неизменную на поверхности и в глубине полупространства, получаем из выражения

$$p_{kp} = \tau_{kp} = p_0(p_s) \frac{1-2\nu}{2} \cdot \frac{d^2}{D_{z,p}^2} \cdot \frac{\pi}{4},$$

где $p_0(p_s)$ — условный предел текучести для хрупких пород (и высокопластичных) или предел пластичности для упругопластичных пород.

В табл. 2 приведены значения плотности эффективной поверхностной энергии γ_{pl} для некоторых осадочных пород, полученных методом вдавливания. По мере возрастания их упругих и прочностных характеристик увеличивается и γ_{pl} .

Коэффициент интенсивности напряжений на кончике трещин для хрупкого разрушения в условиях плоской деформации

$$K^* = \sqrt{\frac{2E\gamma_y}{\pi(1-\nu^2)}}. \quad (13)$$

Используя положения, развитые Б. В. Костровым и другими, имеем

$$\frac{K_*}{K^*} = \sqrt{\frac{\gamma_{pl}}{\gamma_y}} = \sqrt{\frac{l_{pl}}{l_y}}, \quad (14)$$

где K_* — коэффициент интенсивности напряжений вязкого разрушения; l_{pl} — критический размер вяз-

кой трещины; l_y — критический размер хрупкой трещины.

Зная соотношение между $\gamma_{пл}/\gamma_y$, по формуле (12) определяем $\gamma_{пл}$ и на ее основе рассчитываем K^* и K_s , а также l_y .

§ 5. ПОСТРОЕНИЕ ПАСПОРТА ПРОЧНОСТИ

Известно, что максимальные касательные напряжения являются функцией полного тензора и зависят от соотношения его компонент. Теории прочности горных пород, основанные на гипотезе Мора, с различной степенью точности совпадают с опытными данными. Отход от классических представлений о твердом теле, как о сплошной и однородной среде, и введение понятий о дефектах, статистически распределенных в теле, привели к развитию статистических теорий прочности А. П. Александровым и С. Н. Журковым, Я. И. Френкелем и Г. А. Конторовой, С. Д. Волковым, М. М. Протодьяконовым, А. Н. Ставрогиным и другими.

Еще Прандтль указывал на то, что следует различать два типа разрушения: хрупкое (отрыв), происходящее по плоскостям, перпендикулярным растягивающей силе, и вязкое (от сдвига). Эти вопросы получили широкое развитие в трудах советских ученых: Н. Н. Давиденкова, Я. Б. Фридмана и других. В настоящее время установлено, что разрушение в чистом виде практически невозможно. Если пластическая деформация, вызываемая касательными напряжениями, разрыхляет и готовит материал к разрыву, то нарушение сплошности происходит под действием нормальных растягивающих напряжений. Однако наиболее удобной мерой прочности материала оказываются касательные напряжения. Паспорт прочности породы, построенный на основе закона сухого трения, имеет линейную связь между касательными и нормальными напряжениями, но часто значительно отличается от истинной зависимости.

А. Н. Ставрогиным проведены многочисленные эксперименты по изучению деформационных и прочностных свойств горных пород в сложном напряженном состоянии. Результаты исследований опубликованы в

виде атласа паспортов прочности горных пород, где предельные состояния представлены в координатах $\lg \tau_{\max} - \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$. Зависимость посит линейный характер, причем ее можно аппроксимировать уравнением

$$\lg \tau_{c_x} = (c_x + 1)(\lg \tau_{c=0} - \lg \tau_{c=-1}) + \lg \tau_{c=-1}, \quad (15)$$

где $c = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$.

В данном случае аппроксимация сделана для упругохрупких пород (см. рис. 2), у которых разрушение наступает при достижении предела упругости. Для упругопластичных пород аппроксимация ведется по верхней прямой

$$\lg \tau_{c_y} = (c_y + 1) \lg \tau_{c=0};$$

$$\lg \frac{\sigma_p}{2} \approx 0,6 \lg \frac{\sigma_{cж}}{2}. \quad (16)$$

Характер разрушения породы может быть предсказан коэффициентом вида напряженного состояния, установленного Лодэ — Надаи

$$\mu = \frac{\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}, \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3.$$

По мере изменения σ_2 от σ_3 до σ_1 меняется условие перехода отрыва в сдвиг.

В экспериментах А. Н. Ставрогина $\sigma_2 = \sigma_3$, величина μ была неизменной, равной -1 . Это накладывает ограничения на использование результатов. Однако с учетом [58] имеем

$$\tau_{\max}^{\mu=+1} = 2\tau_{\max}^{\mu=-1}, \quad \sigma_1 = \text{const.} \quad (17)$$

Приведенные аппроксимации используются нами в методических решениях.

Обозначение максимальных касательных напряжений сопровождается соответствующей индексацией, учитывающей как вид напряженного состояния μ , так и пропорциональность вида нагружения c

$$\tau_{\max c_I = \text{const}}^{\mu_i = \text{const}} = \text{const.}$$

При вдавливании плоского штампа в полупространство имеет место спектр характеристик $\tau_{\max c_j}^{\mu i}$, причем для элементов симметрии (оси полупространства и поверхности) можно определить величину $\tau_{\max c_j}^{\mu i}$ из опытных данных, как было показано выше. Учитывая равенство $\sigma_1 = \sigma_2$ вдоль оси полупространства, величина μ равна $+1$. Согласно упругому решению задачи величина c вдоль оси к точке с максимальной величиной касательных напряжений близка 0,2 для пород с диапазоном коэффициента Пуассона в пределах 0,1—0,35. Считаем, что в данной точке соотношение компонент до разрушения остается в той же пропорции.

На поверхности полупространства промежуточное главное напряжение $\sigma_2 = 0$, а две другие равны и имеют разные знаки σ ($\sigma_1 = -\sigma_3$). Величина $c = -1$ и $\mu = 0$ характеризует напряженное состояние деформации чистого сдвига.

В диапазоне значений

$$\tau_{\max c=1}^{-\infty} \div \tau_{\max c=1}^{-1}$$

согласно расчету и экспериментальным данным имеет силу условие прочности Мизеса $\tau_{\max} = \text{const}$, причем эта величина может быть определена либо при одновременном растяжении, либо при чистом сдвиге. При вдавливании плоского штампа расчетная зависимость приведена выше.

Сопоставляя распределение напряжений согласно упругому решению задачи с границами между зонами полной и неполной пластичности, делаем предположение, что зарождение вязкой трещины происходит в зоне преобладающего влияния σ_3 по сравнению с σ_2 и σ_1 , согласно чему (табл. 3) имеем

$$\tau_{c=0}^{\mu=1} = \frac{\sigma_3}{2} = 0,1 p_0. \quad (18)$$

В свою очередь,

$$\sigma_{\text{сж}} = 2\tau_{c=0}^{\mu=-1} = \tau_{c=0}^{\mu=1} = 0,1 p_0. \quad (19)$$

Таблица 3

Расчет $\sigma_{сж}$ пород с учетом развития пластических зон под штампом

Порода	Глубина отбора пробы, м	Показатель развития пластической зоны		Временное сопротивление одноосному сжатию, кгс/см ²	
		$\left(\frac{2p_ш}{p_0 + p_ш} \right)^2$	$\left(\frac{p_ш}{p_0} \right)^2$	расчетное	экспериментальное
Поле шахты «Коксовая» (скв. 6946)					
Песчаник:					
мелкозернистый . . .	380	1,49	1,70	1130	1260
мелкозернистый, карбонатный	422	1,42	1,84	2140	2076
среднезернистый . . .	520	1,42	2,00	1150	1088
Алевролит песчанистый, карбонатно-глинистый	570	1,40	2,50	1500	1895
Песчаник:					
тонкозернистый, глинисто-карбонатный	580	2,00	5,00	1400	1480
среднезернистый, карбонатный	585	2,00	5,50	2000	1880
мелкозернистый, карбонатный	615	1,70	3,30	1270	1065
то же	625	1,60	2,30	1500	1425
»	645	1,50	2,30	1320	1370

Поле шахты «Красногорская» (скв. 6947)

Песчаник:					
мелкозернистый, гидрослюдистый . . .	204	1,90	5,25	1160	1036
то же	280	1,50	2,23	960	980
среднезернистый, полимиктовый . . .	325	1,60	3,00	860	1050
мелкозернистый . . .	330	2,00	5,50	1070	1200
среднезернистый, карбонатный . . .	345	1,80	4,50	1060	1140
то же	350	1,70	4,20	1230	1020
»	360	1,80	4,00	1390	1080
мелкозернистый, полимиктовый . . .	395	1,88	4,00	1320	1250

Примечания: 1. При $\left(\frac{2p_ш}{p_0 + p_ш} \right)^2 < 1,5$ получают $\sigma_{сж} = 0,1 p_0$,

в остальных случаях $\sigma_{сж} = 0,05 (p_0 + p_ш)$, учитывая деформационное упрочнение в стадии предразрушения.

2. Экспериментальные значения $\sigma_{сж}$ определялись методом раздавливания кубиков полуправильной формы в количестве 15—20 шт., коэффициент вариации при этом не превышал 30%.

Обозначим через K модуль сцепления с индексами вида напряженного состояния

$$K_{c=0}^{\mu=1} = K_{c=-1}^{\mu=0} \sqrt{\frac{\gamma_{\text{пл}}}{\gamma_y}}. \quad (20)$$

Это означает, что при изменении σ_2 до 0 развитие трещины вдоль изолинии σ_1 в зоне неполной пластичности сопровождается ее ускорением, приводящим к хрупкому разрушению при $\sigma_3 \rightarrow 0$.

Полагая

$$K_{c=0}^{\mu=1} \approx \sigma_{cж} K_{c=-1}^{\mu=0} \approx \sigma_p,$$

получим

$$\sigma_{cж} \sqrt{\gamma_y} \approx \sigma_p \sqrt{\gamma_{\text{пл}}}.$$

Связь параметров вдавливания с увеличением гидростатического давления на образец. Согласно теориям прочности горных пород наложение гидростатической составляющей увеличивает их прочность на сдвиг. Породы в условиях их естественного залегания находятся под влиянием веса вышележащей толщи и напряжений тектонического происхождения. В сравнении с односторонним нагружением сопротивляемость породы при вдавливании штампа отражает возрастание прочности ее, обусловленное объемным напряженным состоянием. Если при этом образец дополнительно нагружается гидростатическим давлением, параметры вдавливания штампа, отражающие пластические и прочностные свойства пород, возрастают. Эти закономерности были установлены при внедрении штампа в образцы, предварительно помещенные в камеру для поддержания заданного гидростатического давления. Камера высокого давления (до 600 кгс/см²) монтируется в общей схеме с установкой УМГП-З. Изменение гидростатического давления на образце в первом приближении можно отождествить с изменением глубины залегания породы или давлением, соответствующим γH .

На рис. 3—5 представлены параметры по данным вдавливания в функции глубины ($4\rho_f = \gamma H$), изменение которых можно отождествить с кривой предельных состояний. Диапазон параметров, характеризую-

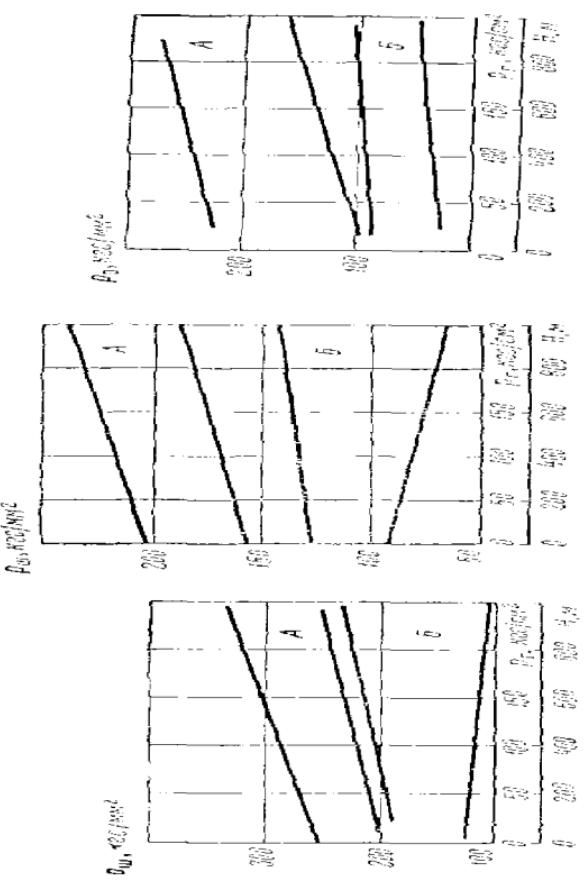


Fig. 3. Variations of the parameter β_0 in dependence on the parameter α_0 for different values of the parameter γ . Curves A, B, C, D, E, F correspond to the values of $\gamma = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$, respectively.

Fig. 4. Influence of the parameter α_0 on the dependence of the parameter β_0 on the parameter γ for different values of the parameter β_0 . Curves 1, 2, 3, 4, 5 correspond to the values of $\beta_0 = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$, respectively.

Fig. 5. Influence of the parameter β_0 on the dependence of the parameter β_0 on the parameter γ for different values of the parameter α_0 . Curves 1, 2, 3, 4, 5 correspond to the values of $\alpha_0 = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$, respectively.

Fig. 6. Dependence of the parameter β_0 on the parameter γ for different values of the parameter α_0 and β_0 .

Fig. 7. Dependence of the parameter β_0 on the parameter α_0 for different values of the parameter γ and β_0 .

Fig. 8. Dependence of the parameter β_0 on the parameter γ for different values of the parameter α_0 and β_0 .

щих предельные состояния песчаников поля шахты «Коксовая» (скв. 6946), несколько выше диапазона параметров соответствующего песчаникам поля шахты «Красногорская» (скв. 6947).

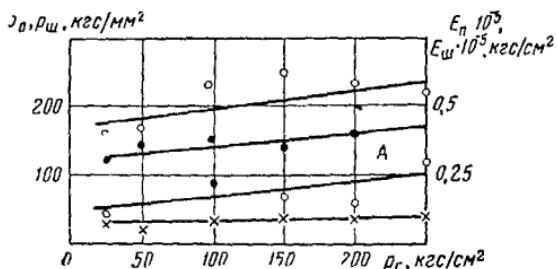


Рис 6 Параметры кривой вдавливания плоского штампа в песчаник крупнозернистый светло-серый с кремнисто-глинистым цементом (поле шахты «Ноградская», 12 м от контура выработки в пласте Горелом, глубина 225 м)

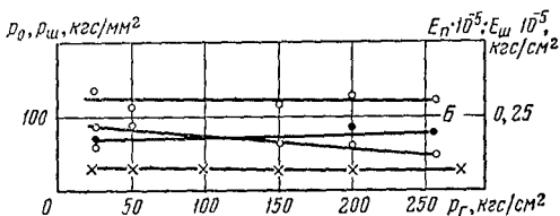


Рис 7 То же, что на рис. 6, дополнительно 20 м от контура выработки и при горизонтальной слоистости за счет дегрита

Наличие элементов структурного ослабления в виде дегритовых включений, глинистого состава цемента и т. д. характеризуют породу как материал ослабленный с выраженным пластическими свойствами (зона *Б*). Аналогично поведение пород, испытанных по шахтным пробам (рис. 6 и 7).

Модуль пластичности пород E_p при этом практически постоянная величина (рис. 8). Показателем изменения пластических свойств пород служит отношение твердости по штампу p_{sh} к условному пределу текучести p_0 , рост которых с изменением гидростати-

ческого давления p_g неоднозначен. Как следует из рис. 9, для пород с преобладанием пластических свойств отношение $p_0/p_{\text{ш}}$ ощутимо уменьшается с ростом p_g .

Отношение $p_0/p_{\text{ш}}$ имеет определенный физический смысл. Оно отражает отношение работы чисто упругих деформаций к работе упругих деформаций вплоть до разрушения.

Отношение $p_0/p_{\text{ш}}$ характеризует склонность породы к накапливанию упругой энергии, которая возрастает с ростом $p_0/p_{\text{ш}}$. Это обстоятельство свидетельствует о предрасположенности пород к хрупкому разрушению и об ограниченном диапазоне изменения пластических свойств.

Из кривой вдавливания плоского штампа и физического смысла параметров, рассчитанных по ней, получаем

$$K_{xp} K_{pl} = \left(\frac{p_0}{p_{\text{ш}}} \right)^2.$$

Следует оговорить условия эксперимента с гидростатическим давлением, где влияние среды, передающей давление, играет не маловажную роль. Снижение эффекта всестороннего сжатия при взаимодействии неизолированного образца с жидкостью изучалось специальным экспериментом. В качестве жидкости использовали воду и масло (табл. 4). При испытании в масле увеличение параметров вдавливания с ростом давления подчинялось установленной закономерности, значит отрицательное влияние среды на

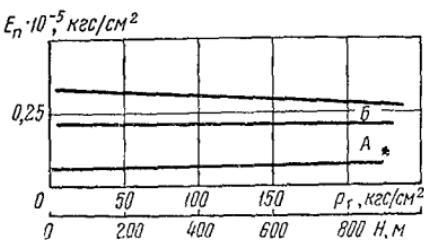


Рис. 8. Изменение модуля пластичности E_p песчаников поля шахты «Коксовая» с ростом гидростатического давления на образце

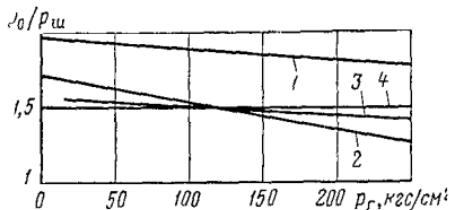


Рис. 9. Уменьшения отношения $p_0/p_{\text{ш}}$ с ростом гидростатического давления p_g на образце как показателя пластических свойств песчаников Прокопьевско-Киселевского месторождения Кузбасса.

1 и 2 — породы с преимущественно пластическим поведением, 3 и 4 — породы с преобладанием упругих свойств

Таблица 4

Параметры кривой нагружения в условиях гидростатического сжатия и дополнительного вдавливания плоского штампа

Параметры вдавливания штампа	Величина гидростатического давления на образец, кгс/см ²					
	1	25	50	100	150	250
Условный предел текучести p_0 , кгс/мм ²	28	20	60	32	50	70
	28	18	63	29	50	80
	28	18	55	55	50	75
	90	95	110	80	180	—
Твердость по штампу p_{sh} , кгс/мм ²	55	48	102	42	90	82
	53	20	108	42	92	110
	57	20	70	58	95	80
	120	110	125	130	205	—
Диаметр зоны, разрушения $D_{z,p}$, мм	3,1	5,25	4,85	3,0	3,2	3,2
	4,3	—	—	3,0	—	—
	5,25	—	—	3,35	3,65	2,75

П р и м е ч а н и я 1. Алевролит темно-серый, тонкозернистый, слоистость горизонтальная, переслаивание крупных и мелких разновидностей, цемент глинистый довольно крепкий (0,6—0,5 см от контура выработки).

2. Первые три значения отражают испытания в водной среде с временем замачивания t , равным 0, 5, 10 и 15 мин, четвертое значение — испытания в масле.

породу не проявилось. При испытании в водной среде влияние (рис. 10) последней хорошо заметно и зависит от времени выдержки образца под давлением.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности увлажнения с целью снижения концентрации упругой энергии в породах и увеличения пластических свойств. Чем выше давление подаваемой жидкости и продолжительнее процесс, тем большее его влияние на свойства горных пород.

§ 6. УПРУГИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Упругие свойства горных пород чаще всего проявляются в совокупности с неупругими эффектами. Поведение пород, наиболее близкое к упругому, наблюдается при динамическом нагружении. При ста-

тических нагрузжениях длительность приложения нагрузки влияет существенно, что приводит к необходимости пользоваться такими понятиями, как модуль деформации, коэффициент поперечной деформации,

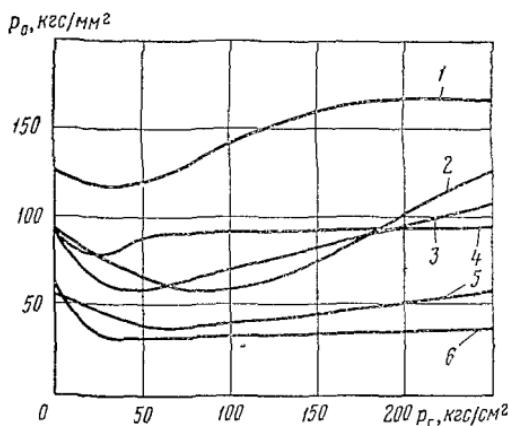


Рис. 10. Изменение условного предела текучести p_0 песчаников, нагруженных в водной среде штампом при различном гидростатическом давлении p_r :

1 — песчаник среднезернистый, цемент кремнисто глинистый; 2 — песчаник крупнозернистый, цемент кремнисто глинистый; 3 — песчаник крупнозернистый, карбонатный; 4 — песчаник крупнозернистый с обломками алевролита диаметром 2–3 см, 5 — песчаник крупнозернистый, косослоистый, с кремнисто-глинистым цементом; 6 — песчаник среднезернистый, с кремнисто глинисто-кальцитовым цементом

чтобы отличить их от модуля сдвига и коэффициента Пуассона. Упругие и прочностные свойства пород изменяются в зависимости от их агрегатного состояния. Многочисленные данные свидетельствуют в пользу развития акустических методов определения физико-механических параметров горных пород, дающих интегральные характеристики, многократно воспроизводимые и быстро определяемые.

Дополнительным требованием при этом является стабилизация условий проведения экспериментов, в частности скорости приложения нагрузки, центрирование образцов и т. д. При массовых определениях упругих параметров горных пород динамический ме-

тод имеет значительные преимущества и используется нами как составная часть комплексного экспресс-метода.

Поскольку акустические свойства осадочных пород Кузбасса не подлежали систематическому изучению, в исследование были включены основные литологические разновидности различных глубин (от 100 до 1200 м). В результате установлено, что скорость распространения для исследуемых пород находится в пределах от 3000 до 5500 м/сек (продольные волны) и от 2000 до 2900 м/сек (сдвиговые волны). Наибольшая скорость продольных и поперечных волн характерна для мелкозернистых пород, причем песчаники и алевролиты характеризуются одинаковым интервалом изменения скоростей (средние значения продольных и поперечных волн мелкозернистых пород 4500 и 2850 м/сек). Минимальные значения скоростей распространения характерны для аргиллитов, а также других разновидностей пород, обладающих более высокой пористостью и наличием органогенного дегрита.

§ 7. ПОЛЗУЧЕСТЬ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

Свойства ползучести осадочных пород Прокопьевско-Киселевского месторождения Кузбасса изучены различными методами, в частности при нагружении изгибом с использованием теории ползучести Ж. С. Ержанова [29]. Ползучесть осадочных пород удовлетворительно аппроксимируется абелевым ядром линейной теории наследственности. Безразмерный параметр слабых пород (алевролита, аргиллита) и углей в расчете на ползучесть элемента массива близок постоянной величине, равной 0,8. Отклонения от указанного среднего на отдельных образцах значительны, соответственно их индивидуальным особенностям и изменяющимся условиям нагружения. Средние значения параметров ползучести, полученных в лабораторных и натурных условиях, согласуются между собой. Деформации ползучести углевмещающих пород разных формаций ряда бассейнов страны, удовлетворительно описываются линейной теорией наследственности с абелевым ядром ползучести. Сум-

марный диапазон значений параметров ползучести пород и углей Кузбасса равновелик диапазону параметров ползучести аналогичного комплекса пород и углей Караганды [31].

Испытания горных пород в условиях поперечного изгиба при нагружении на ползучесть общеприняты по ряду практических соображений. Получить надежные результаты при растяжении образцов горных пород длительно действующими нагрузками трудно как в связи с необходимостью разделывания головок образца под захваты испытательной машины и его точного центрирования, так и из-за очень малой сопротивляемости пород растягивающим усилиям.

Постановка опытов на одноосное сжатие цилиндрических или призматических образцов пород проще. Получаемые при этом результаты тем ближе к одномерным, чем больше высота образца. Если высота образца более чем в 4 раза превышает его средний поперечный размер, то незначительная эксцентренность нагружения может вызвать заметный эффект продольного изгиба, существенно меняющий распределение напряжений в образце [37, 50]. Механическое состояние изгибающего образца близко к одномерному, если размеры его поперечного сечения достаточно малы по сравнению с пролетом; при таких испытаниях, естественно, следует учитывать неоднородность напряженного состояния образца.

Важно отметить, что перечисленные особенности выявлены при испытаниях образцов, имеющих равномерную структуру.

Особенностью деформирования пород изгибом является образование упругопластических шарниров, порождающих явление последействия, сложно развивающихся в анизотропных и неоднородных породах.

Методика испытаний ползучести изгибом

Вспомогательные опыты имеют целью:

определение прочностных характеристик, необходимых для расчета величин нагрузок при основных испытаниях;

определение модуля упругости горных пород;

предварительную оценку характера проявления свойств ползучести рассматриваемых горных пород.

Прочностные характеристики при изгибе для каждой породы определяются как средние результаты испытаний шести балок.

Модули упругости определяются для каждой балки по кривой $\Delta P - \Delta H$, а также в специальном опыте циклического нагружения по последним петлям гистерезиса.

Величина немедленного (упругого) прогиба в середине пролета балки прямоугольного сечения, опирающейся концами и нагруженной в середине пролета сосредоточенной силой P , равна

$$y_0 = \frac{kP}{E}, \quad (21)$$

где E — модуль упругости материала балки; k — коэффициент влияния геометрических параметров балки,

$$k = \frac{l^3}{4bh^3} \left(1 + 2,95 \frac{h^2}{l^2} - 0,02 \frac{h}{l} \right), \quad (22)$$

где h , b и l — высота, ширина и пролет балки.

Опыты, предназначенные для оценки проявления свойств ползучести горных пород, проводятся при нагружении и последующей разгрузке балок равными ступенями. Величина ступени нагружения (разгрузки) равна примерно $1/6$ максимальной нагрузки, равной 60% соответствующей разрушающей. После приложения каждой ступени нагружения (разгрузки) образец выдерживается под нагрузкой в течение 48 ч.

Горизонтальные отрезки графиков в координатных осях нагрузка — прогиб отражают проявление ползучести горной породы. Делается оценка суммарной деформации ползучести по сравнению с упругой как прямой, так и обратной.

Основные опыты имеют целью:

установление степени нелинейности процесса ползучести; получение опытных данных о ползучести горных пород при длительном действии нагрузок, вплоть до стабилизации процесса деформирования.

Исследования свойств ползучести пород можно осуществить либо задаваясь постоянной нагрузкой

на образец и замеряя величины деформации во времени (простая ползучесть), либо поддерживая постоянную деформацию и замеряя величины напряжений (простая релаксация).

Ползучесть реальных материалов делят на линейную и нелинейную. При линейных зависимостях приращения деформаций во времени пропорциональны приращениям нагрузок. Для того чтобы выявить, в какой мере ползучесть рассматриваемых пород можно полагать линейной, ставятся специальные опыты. Последние заключаются в том, что балки загружаются пятью постоянными нагрузками, составляющими от 20 до 80% соответствующей разрушающей; время выдерживания образца под одним грузом равняется 48 ч. Перед нагружением для исключения влияния ползучести дается «отдых» (полная разгрузка образца) продолжительностью не менее 48 ч. Для каждого образца получается серия кривых ползучести в координатах прогиб — время, позволяющих построить изохронные кривые в координатах нагрузка — прогиб (рис. 11—14).

Основные испытания, по результатам которых устанавливаются величины параметров ползучести и изучаются закономерности деформирования, также проводятся на сериях породных образцов-балок. Скорость нагружения статическая; в момент окончания приложения нагрузки делаются первые отсчеты деформации ползучести. Испытания проводятся вплоть до стабилизации процесса ползучести, когда скорость прогиба не превышает 0,2 мк в сутки. На основе опытных данных строятся графики ползучести в координатах прогиб — время.

Обработка результатов исследований выполняется на основе закона линейного деформирования материалов, обладающих свойством наследственности, предложенный в 1874 г. Больцманом, позднее математически развитый Вольтерра, в следующей форме:

$$\epsilon_{(t)} = \frac{1}{E} \left[\sigma_{(t)} + \int_0^t L(t,\tau) \sigma_{(\tau)} d\tau \right], \quad (23)$$

где $\epsilon_{(t)}$ и $\sigma_{(t)}$ — деформация и напряжение, соответствующие рассматриваемому моменту времени t , от-

считываемому от момента начального нагружения тела; E — модуль упругости; $L(t, \tau)$ — отражает (наследует) влияние единичного напряжения $\sigma(\tau)$, дей-

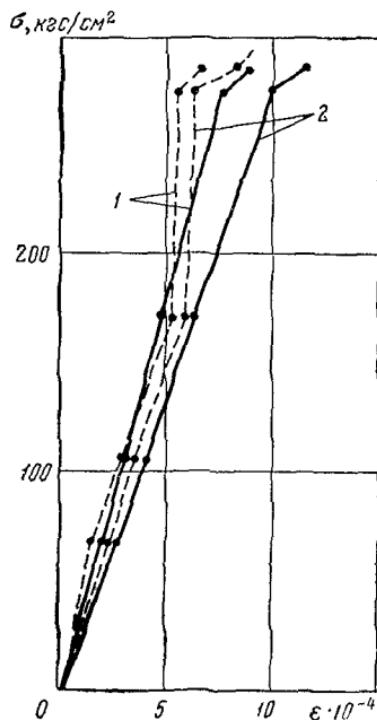


Рис. 11. Изохронные кривые песчаника, нагруженного перпендикулярно слоистости:

(— — —) прямая ползучесть;
 (— — —) обратная ползучесть,
 1 — время условно-мгновенное,
 2 — по истечении 50 ч

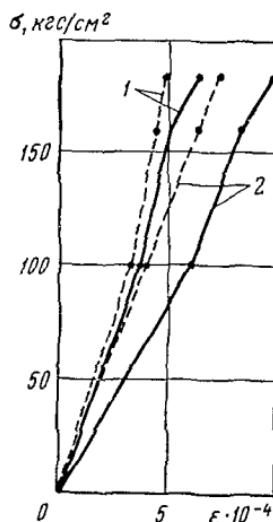


Рис. 12. Изохронные кривые аргиллита:
 1 — время условно-мгновенное,
 2 — по истечении 40 ч

ствующего в единичный промежуток времени τ на деформацию в момент t .

В случае инвариантности уравнения относительно отсчета времени ядро $L(t, \tau) = L(t - \tau)$. При $\sigma(t) = \text{const}$; $t - \tau = s$, получим

$$\varepsilon_{(t)} = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \int_0^t L(s) ds \right].$$

Для горных пород Ж. С. Ержановым предложено ядро ползучести в виде степенной функции

$$L(t, \tau) = \delta(t - \tau)^{-\alpha},$$

где δ и α — параметры ползучести ($0 < \alpha < 1$).

Закон деформирования балки с привлечением абелева ядра следующий:

$$y_{(t)} = y_{(0)} + y_{(0)} \frac{\delta}{1 - \alpha} (1 - \alpha), \quad (24)$$

где y_0 — мгновенный прогиб; $y_{(t)}$ — прогиб во времени t .

$\sigma, \text{кгс}/\text{см}^2$

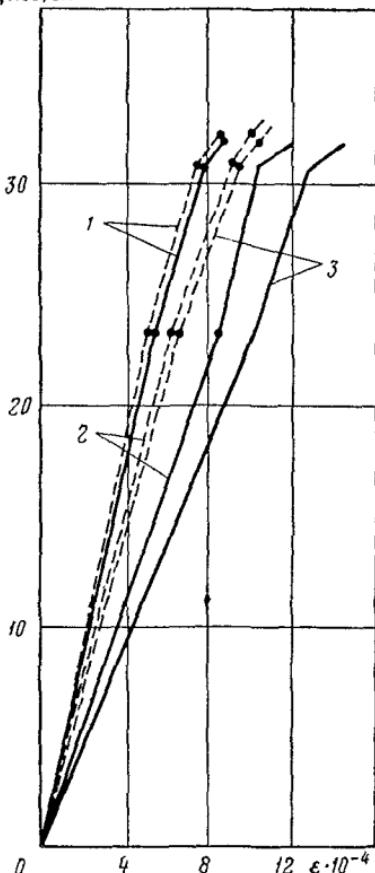


Рис. 13. Изохронные кривые угля:

1—время условно-мгновенное; 2—по истечении 10 ч; 3—по истечении 100 ч

Скоростному и масштабному факторам, их влиянию на параметры ползучести при изгибе уделялось особое внимание. При нагружении пород и углей изгибом отмечается линейная связь между нагрузкой P и прогибом y . На рис. 15—20 представлены зависимости $P—y$ для различных углей, поскольку в литературе этот вопрос почти не освещен.

$\sigma, \text{кгс}/\text{см}^2$

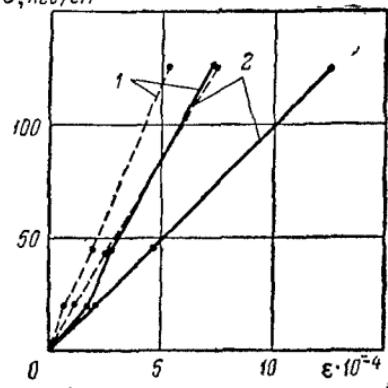


Рис. 14. Изохронные кривые песчаника, нагруженного параллельно слоистости:

1—время условно-мгновенное; 2—по истечении 10 ч; 3—по истечении 100 ч

Ф. А. Белаенко было установлено, что скорость приложения нагрузки влияет на величину модуля деформации балок, наряду с влиянием других факторов (анизотропия, влажность и т. д.). Оценку этого влия-

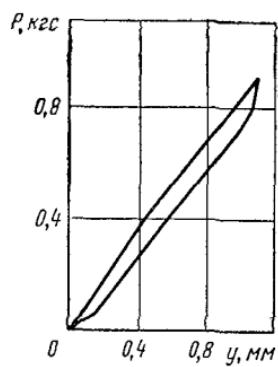


Рис 15 Зависимость $P - y$ для балки $1 \times 1 \times 26$ см (уголь пластиа Мощного шахты № 5/6)

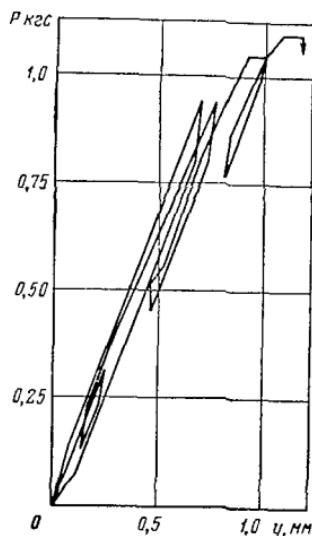


Рис 16 Зависимость $P - y$ при многократном нагружении балки $1 \times 1 \times 25$ см (уголь пластиа Мощного шахты им. Ворошилова)

ния в наших испытаниях проводили на образцах с одинаковыми характеристиками, условиями испытаний для каждой серии (приблизительно 6 балок) и ориентацией слоистости в образце.

Связь между геометрическими параметрами балок, нагрузкой, прогибом и модулем деформации представлена в формуле (21); влияние касательных напряжений учитывается формулой (22). На рис. 21 изображена зависимость между модулем деформации E углей пластиа Мощного шахты им. Ворошилова и скоростью v роста напряжений σ_t для случая, когда размеры балок были неизменны, а различная по величине нагрузка прикладывалась в середине пролета в один и тот же промежуток времени.

Подобный же рост E получен для углей пласта Прокопьевского шахты им. Вахрушева (рис. 22) при нагружении балок с ориентацией слоистости вдоль и поперек пролета. В данном случае отношение пролета к высоте квадратного сечения балки L/H изменялось

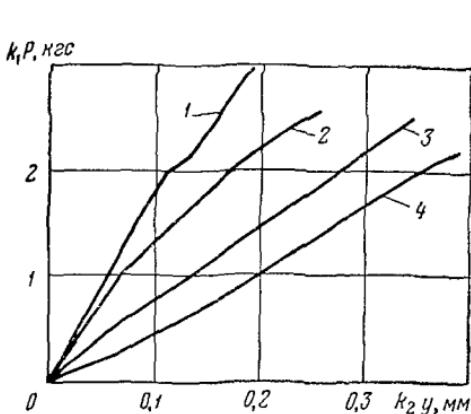


Рис 17 Изгиб балок параллельно слоистости (уголь пласта Мощного шахты им Ворошилова).

1 — $k_2=5$, $k_1=0,5$, $1 \times 1 \times 21$ см, $\sigma=47,5$ кгс/см², $E=4,15 \cdot 10^4$ кгс/см², 2 — $k_2=1$, $k_1=50$, $2 \times 2 \times 21$ см, $\sigma=55,0$ кгс/см², $E=3,50 \cdot 10^4$ кгс/см², 3 — $k_2=1$, $k_1=10$, $3 \times 29 \times 28$ см, $\sigma=45,0$ кгс/см², $E=2,90 \cdot 10^4$ кгс/см², 4 — $k_2=0,5$, $k_1=50$, $5,2 \times 4,8 \times 27$ см, $\sigma=37,0$ кгс/см², $E=1,00 \times 10^4$ кгс/см²

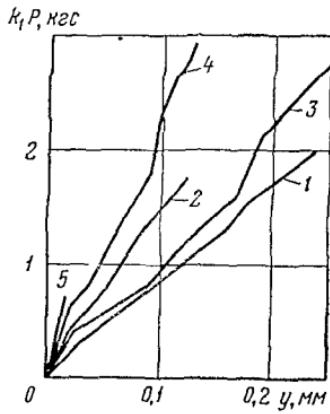


Рис 18 Изгиб балок перпендикулярно слоистости (уголь пласта Прокопьевского шахты им Вахрушева)

1 — $k_1=10$, $0,9 \times 1 \times 23$ см, $\sigma=38$ кгс/см², $E=5,15 \cdot 10^4$ кгс/см², 2 — $k_1=5$, $1,9 \times 2,05 \times 28$ см, $\sigma=47,5$ кгс/см², $E=5,15 \cdot 10^4$ кгс/см², 3 — $k_1=5$, $2,4 \times 2,2 \times 36,5$ см, $\sigma=66$ кгс/см², $E=5,2 \cdot 10^4$ кгс/см², 4 — $k_1=5$, $3 \times 3 \times 37$ см, $\sigma=30$ кгс/см², $E=2,9 \cdot 10^2$ кгс/см², 5 — $k_1=5$, $5,15 \times 5,25 \times 27$ см, $\sigma=2,4$ кгс/см², $E=2,65 \cdot 10^4$ кгс/см²

в пределах 25—30. Модуль деформации при нагружении параллельно слоистости более высок и чувствителен к скорости нагружения.

Геометрические параметры балок также являются фактором влияния. Условием получения одноосного напряжения в балке является отношение $L/H \geqslant 7$. На рис. 23 изображена зависимость модуля деформации E от отношения L/H , а на рис. 24 — зависимость для $L/H = \text{const}$ и изменяющихся размеров сечения и скорости приложения нагрузки. Аналогично известному эффекту влияния масштабного фактора для одноосного сжатия при изгибе существует оптимальный размер сечения, при котором это влияние

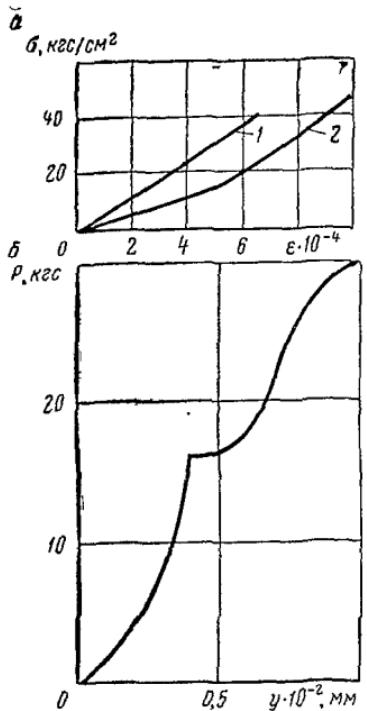


Рис. 19. Зависимости при изгибе образцов угля пласта II Внутреннего шахты им. Ворошилова:

a — призма $5 \times 5 \times 12$ см; $E = 2,4 \cdot 10^4$ кгс/см 2 ; $v=0,3$; 1 — продольные деформации; 2 — поперечные деформации; *b* — балка $5 \times 5 \times 24$ см (перпендикулярно слоистости), $E=2,1 \cdot 10^4$ кгс/см 2

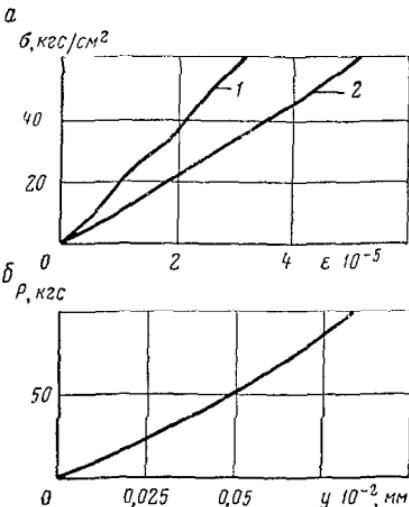


Рис. 20. Зависимости при изгибе образцов угля пласта мощного шахты «Черная гора»:

a — призма $5 \times 5 \times 12$ см; $E=2 \cdot 10^4$ кгс/см 2 ; $v=0,3$; 1 — продольные деформации; 2 — поперечные деформации; *b* — балка $5,2 \times 4,8 \times 27$ см (перпендикулярно слоистости); $E=1 \cdot 10^4$ кгс/см 2

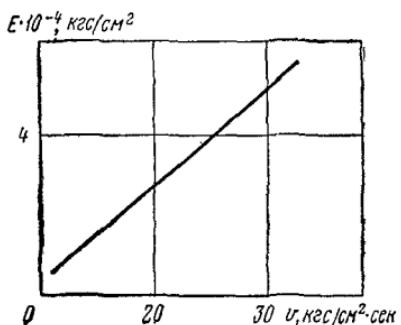


Рис. 21. Зависимость модуля деформации E от скорости v , роста напряжений σ для угля пласта Мощного шахты им. Ворошилова (перпендикулярно слоистости):

$B=H=\text{const}$; $L=\text{const}$; балка $1 \times 1 \times 26$ см

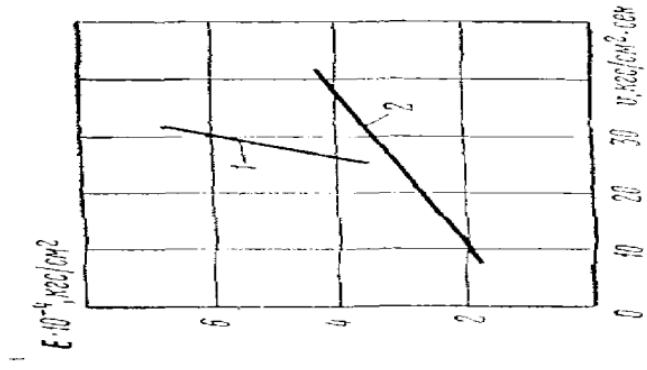


Рис. 22. Зависимость $E - l$ для упругого Плобильевского шары из ваннуемого от напряжения нарушением: $R = h = \text{const}$, $Lh = 35 - 3l$, 1 — параллельное сжатия; 2 — поперечное сжатия.

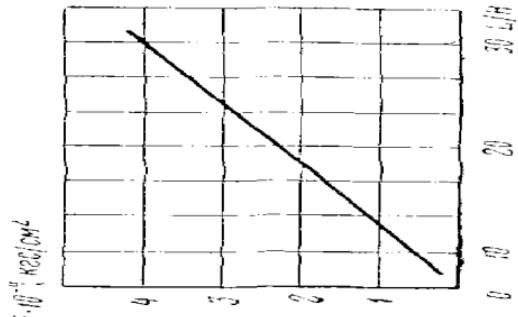


Рис. 23. Зависимость модуля упругости E от L/h для упругих пластин из стекла (закономерность Бахчанова [Бахчанов, 1955], касательно параллельного сжатия).

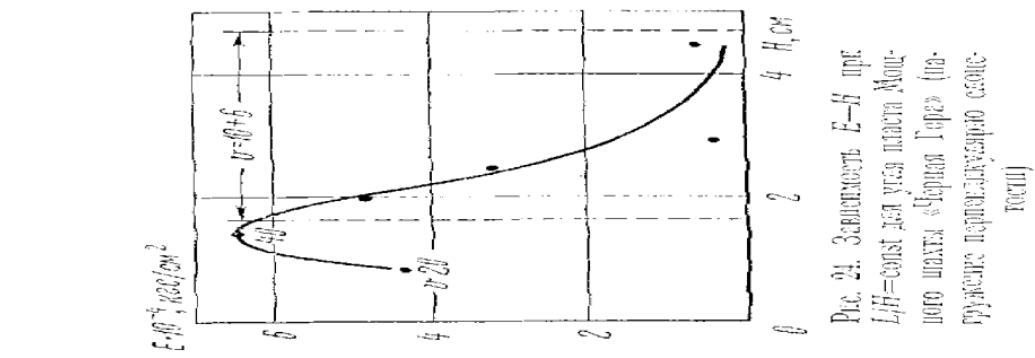


Рис. 24. Зависимость E/H при $L/H = \text{const}$ для узкой пласти Монго шахты «Черное Горе» (на границе гидротранспортного соединения)

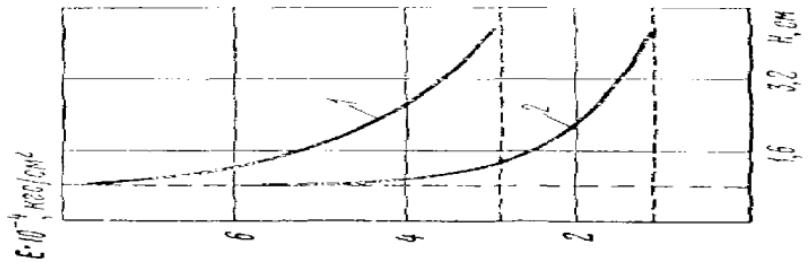


Рис. 25. Влияние разницы сопротивления ведущей и магнитной систем на величину максимальной индукции магнитной деформации образцов из железа Грабовьевского
1 — для системы с постоянной константой, 2 — для системы с переменной константой

ослабевает. Для углей величина оптимального размера квадратного сечения имеет пределы 3—5 см (рис. 25—27), если судить по координате слияния кривой с асимптотой.

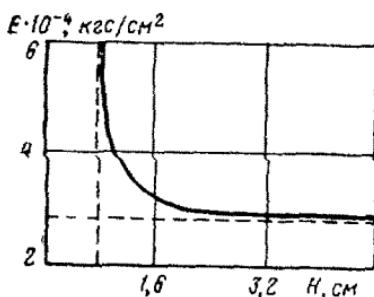


Рис. 26 Влияние размеров сечения на величину модуля деформации образцов угля пласта Мощного (параллельно слоистости)

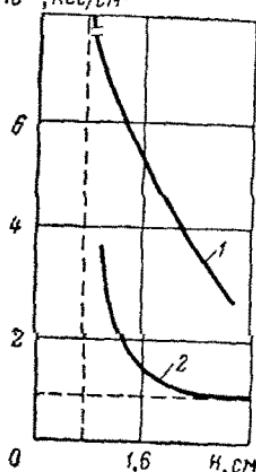


Рис. 27. Влияние размеров сечения на величину модуля деформации образцов песчаника:
1 — параллельно слоистости,
2 — перпендикулярно слоистости

В табл. 5 представлены параметры ползучести углей пласта Прокопьевского. Средние значения параметров абелева ядра, независимо от направления нагрузки, соответствуют примерно одинаковым деформациям ползучести (коэффициент анизотропии равен 1,2). Деформация обратной ползучести наполовину меньше прямой. Модуль деформации с ростом сечения балки уменьшается как результат проявления масштабного фактора.

Неоднородность строения образца также значительно сказывается на величине модуля деформации, что подтверждается испытанием железных руд с различным содержанием железа (табл. 6). Для получения правильных результатов необходимо нагружать либо большой объем породного материала (переходить к натурным испытаниям), либо использовать методы, аналогичные сейсмическим, т. е. позволяющие интегрировать данные при повторяемости в оди-

Таблица 5

Параметры ползучести углей пласта Прокопьевского
шахты им. Вахрушева, $\sigma_u=45$ кгс/см²

№ балки	Размер балки $B \times H \times L$, см	Прочность при изгибе σ_u , кгс/см ²	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$, кгс/см ²	Абелево ядро ползучести			
				прямой		обратной	
				α	δ , сек ^{$\alpha-1$}	α	δ , сек ^{$\alpha-1$}
1	$0,9 \times 1 \times 22$	36,7	4,390	0,710	0,0017	—	—
2	$1 \times 1 \times 21$	18,8	2,890	0,750	0,0079	—	—
3	$0,8 \times 0,8 \times 23$	13,4	0,287	0,777	0,0075	—	—
4	$1 \times 1 \times 25$	23,3	3,150	0,839	0,0100	0,660	0,00065
5	$3 \times 3 \times 28$	4,7	3,800	0,750	0,0048	0,830	0,00455
6	$3 \times 3 \times 36$	12,0	0,375	0,730	0,0088	0,830	0,00400
Среднее по пласту перпендикулярно слоистости		—	2,482	0,759	0,0063	0,745	0,00270
1	$1 \times 1 \times 15$	22,5	2,280	0,713	0,00108	—	—
2	$1 \times 1 \times 23$	17,2	4,850	0,750	0,00175	—	—
3	$0,9 \times 0,9 \times 24$	24,7	5,600	0,750	0,00300	—	—
4	$1 \times 1 \times 25,5$	22,7	4,850	0,844	0,01000	0,883	0,0088
5	$1,5 \times 1,35 \times 28$	10,0	2,880	0,820	0,00300	—	—
6	$1,9 \times 2,1 \times 32$	7,0	3,180	0,750	0,00750	0,870	0,0015
7	$2,4 \times 2,2 \times 33$	10,0	3,100	0,850	0,01100	0,850	0,0035
8	$5,15 \times 5,25 \times 27$	4,3	1,170	0,820	0,00840	0,530	0,0003
Среднее по пласту параллельно слоистости		—	3,49	0,787	0,00572	0,783	0,0035

наковых условиях, либо набирать статистические данные с применением существующих методов. Трудоемкость первых и последних велика, а влияние всех существенных факторов трудно предусмотреть. Если количество членов выборки достигает 6—8, то, согласно математической статистике, среднее значение выборки близко среднему генеральной совокупности [54]. Это условие не всегда удается сохранить, учитывая сложность соблюдения постоянными еще целого комплекса признаков.

Таблица 6

Параметры ползучести железных руд Таштагола

Размеры сечения образца $B \times H$ (см); объем (см^3) V	Модуль упругости $E \cdot 10^{-5}$ кгс/см 2	Абелево ядро ползучести	
		a	δ , сек a^{-1}
Fe = 58,2%			
3×3; 240	1,78	0,61	0,0021
2×2; 75	2,70	0,75	0,0045
1×1; 20	3,80	0,67	0,00116
Среднее	2,79	0,68	0,00258
Fe = 34,2%			
3×3; 240	3,05	0,525	0,0011
2×2; 110	6,10	0,790	0,0022
1×1; 30	8,00	0,725	0,0071
Среднее	5,70	0,680	0,00346
Fe = 29%	12,60	0,950	0,0100

В табл. 7 и 8 представлены параметры ползучести слабых пород и углей шахты им. Ворошилова, полученные на основе методики испытания на изгиб. Уровень ползучести при нагружении параллельно слоистости, как правило, выше, что объясняется особенностями пластического деформирования в противоположном направлении. Упругие параметры углей с глубиной возрастают.

Сопоставление лабораторных и натуральных параметров ползучести проводится для распространения на массив полученных данных. Совместно с Сибирским филиалом ВНИМИ был проведен эксперимент на шахте «Черная гора», где в отрелаксированном элементе массива устанавливались станции для длительного нагружения. В краевой части пласта в вырезанной нише устанавливались гидродомкраты, распирающие выработку с заданной величиной постоянного давления во времени. Изме-

Таблица 7

Параметры ползучести пород поля шахты им. Ворошилова

Порода междупластья	Число образцов	Прочность при изгибе σ_i , кгс/см ²	Модуль упругости $E \cdot 10^{-5}$, кгс/см ²	Абелево ядро ползучести			
				прямой		обратной	
				α	δ , сек α^{-1}	α	δ , сек α^{-1}
Песчаник среднезернистый (почва пласта Характерного) . . .	12	190	2,28	0,802	0,0106	0,760	0,00227
Алевролит тонкозернистый (почва пласта Горелого)	8	160	2,78	0,793	0,0073	0,828	0,0039
Аргиллит углистый (кровля пласта IV Внутреннего) . . .	12	32	0,50	0,685	0,0028	—	—

рение деформаций краевой части пласта вдоль и по перек действия нагрузки производили над и под домкратами с помощью индикаторов часового типа, укрепленных на реперах, забитых в зоне действия аппаратуры. Длина базы измерения 250 мм. Первоначально определялась прочность краевой части пласта при нагружении со скоростью 3—5 кгс/см². сек.

Для определения простой ползучести угля в натурных условиях угольный элемент массива нагружали в четырех опытах нагрузками, составляющими 30, 45, 70 и 82 % разрушающей, равной 175 кгс/см². Из кусков угля, выпиленных при проведении ниш, образцы в виде балок были испытаны в лаборатории (табл. 9). Совпадение результатов довольно хорошее.

Натурные испытания проводились при неизвестных величине и направлениях напряжений, существовавших в элементе массива до и после его обнаружения. За показатель приемлемости исходных данных брались отношения поперечных деформаций к продольным. Расчет произведен по методике

Таблица 8

Параметры ползучести углей поля шахты
им. Ворошилова

Пласт	Ориентация слоистости	Число образцов	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$, кгс/см ²	Абелево ядро ползучести	
				α	δ , сек α^{-1}
Мощный		6	3,86	0,764	0,0073
	—	—	—	—	—
Горелый		3	2,65	0,850	0,0185
	—	3	1,30	0,700	0,0035
IV Внутренний		4	2,78	0,815	0,0172
	—	4	1,51	0,855	0,0177
III Внутренний		6	1,52	0,775	0,0274
	—	6	0,66	0,839	0,0142
II Внутренний		4	2,30	0,890	0,0094
	—	3	1,32	0,880	0,0075

Ж. С. Ержанова. Изменение параметров ползучести связано с рядом факторов, к которым можно причислить различную способность к пластическим деформациям пород. Свойство ползучести пород есть проявление упругопластического последействия во времени в результате движения зон пластического состояния вслед за перемещением зон с различной концентрацией напряжений.

Применение пластических шарниров при деформациях балок. При поперечном изгибе балки сосредоточенной нагрузкой упругая линия может быть представлена выражением

$$f(x) = -\frac{P l^3}{48 E J} \left(3 \frac{x}{l} - 4 \frac{x^3}{l^3} \right),$$

где $f(x)$ — прогиб на расстоянии x от опоры вдоль пролета; P — нагрузка; E и J — модуль упругости и момент инерции сечения.

Таблица 9

Параметры ползучести углей пласта Мошного
шахты «Черная гора» ($\sigma_n = 52 \text{ кгс}/\text{см}^2$)

№ балки	Размеры балки $B \times H \times L$, см	Прочность при изги- бе σ_n , кгс/ см^2	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$, кгс/ см^2	Абелево ядро ползучести			
				прямой		обратной	
				α	δ , сек $\alpha - 1$	α	δ , сек $\alpha - 1$
1	$0,9 \times 0,9 \times 20$	39,0	6,15	0,730	0,00350	0,810	0,0014
2	$0,9 \times 0,9 \times 20$	41,0	5,25	0,750	0,00275	0,900	0,0015
3	$0,8 \times 0,9 \times 21,5$	20,0	4,00	0,816	0,01000	0,830	0,0034
4	$0,9 \times 0,9 \times 22$	22,6	6,00	0,847	0,00450	0,847	0,0025
5	$0,9 \times 0,9 \times 22$	45,2	6,00	0,800	0,00370	—	—
6	$2 \times 1,8 \times 27$	12,5	4,20	4,800	0,00580	—	—
7	$2,1 \times 2 \times 21,5$	15,4	2,88	0,800	0,00750	0,900	0,0017
8	$5,2 \times 4,8 \times 28$	10,0	0,36	0,760	0,00865	—	—
Среднее по пласти перен- дикулярно слоистости		25,7	4,35	0,788	0,0058	0,857	0,0020
По данным натуальных на- бледений		$\sigma_{\text{сж}, \text{в}} =$ $= 175$	2,00	0,780	0,0060	—	—

Для сечений, находящихся на расстоянии $x \leqslant 0,3l$, последним членом можно пренебречь. Тогда

$$\frac{f(x)}{x} \approx \text{const}; \quad \theta = \frac{Pl^2}{16EJ} \approx \text{const},$$

где θ — угол наклона данной аппроксимированной линии.

На основе сделанных допущений граничные условия для упругой и пластической зон следующие:

$$1. \quad \frac{f(x_1)}{f(x_2)} = \frac{x_1}{x_2}.$$

Если при этом $\frac{f(x_2)}{f\left(\frac{l}{2}\right)} \geq 0,78$, то по всей балке от-

сутствуют пластические зоны. Если это отношение $< 0,78$, пластическая зона находится между сечениями x_2 и $\frac{l}{2}$;

2. $\frac{f(x_1)}{f(x_2)} < \frac{x_1}{x_2}$ — пластическая зона образуется между сечениями x_1 и x_2 ;

3. $\frac{f(x_1)}{f(x_2)} > \frac{x_1}{x_2}$ — пластическая зона находится между опорой и сечением.

На рис. 28 представлены схемы упругой линии с учетом пластических зон. Параметры нагружения приведены в табл. 10).

Балка угля пласта Прокопьевского размером $1 \times 1 \times 25$ см в момент нагружения (табл. 10, поз. а) имеет пластическую зону между x_1 и x_2 (см. рис. 28, кривая 2). Во времени (поз. б) схема не меняется. При разгрузке (поз. в) сечение x_1 и x_2 переходит в упругое состояние (кривая 3), причем во времени (поз. 2) наблюдается дополнительно восстановление. Следующая балка $1 \times 1 \times 25,6$ см имеет ту же схему (кривая 4), но при восстановлении область между x_1 и x_2 полностью

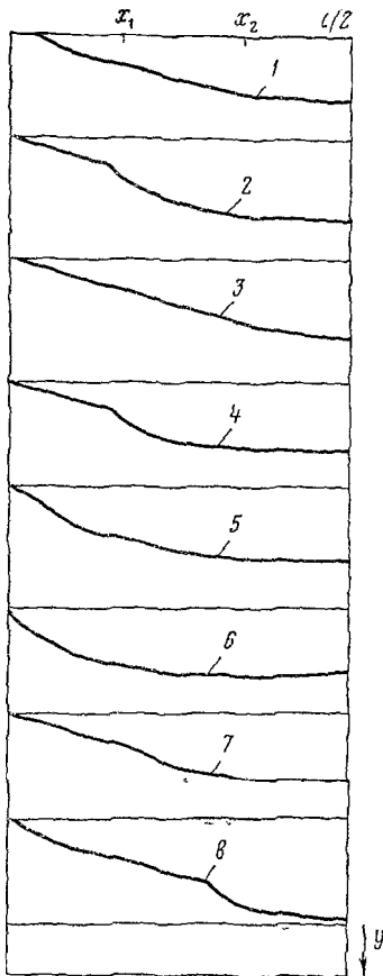


Рис. 28. Схемы упругой линии балок с учетом пластических зон

T 36 III 29 10

Параметры изображения для второй зоны

не возвращается в упругую зону. При нагружении (поз. а) балки угля размером $1 \times 1 \times 32$ см пластическая зона возникает между опорой и сечением x_1 , а в месте приложения нагрузки деформация незначительная (кривая 5). Во времени (поз. б) пластическая деформация у опоры увеличивается, а в середине пролета снижается (кривая 6). При разгрузке (поз. в и г) пластическая зона смещается в сторону опор. При нагружении балки песчаника размером $2 \times 2 \times 35,4$ см поведение ее чисто упругое (кривая 1), однако во времени (поз. б) появляются пластические зоны у опор и в месте приложения нагрузки (кривая 7). При разгрузке (поз. в и г) пластическая зона сокращается с общей тенденцией возврата породы в упругое состояние (кривая 8). Следовательно, из-за неоднородности свойств и анизотропии порода переходит в пластическое состояние в локальных зонах, не обязательно приуроченных к местам концентрации напряжений. Во времени происходят смещение и рост пластических зон, порождая эффект ползучести.

Определение реологических свойств пород вдавливанием штампа

Реологические свойства контакта двух твердых тел рассматривались при описании механического поведения плексигласа и полимеров ФК-16Л, 6КХ-1. При этом получен интересный результат: форма индентора практически не влияет на численные значения реологических коэффициентов. В инженерной практике широкое применение находит закон деформирования в дифференциальной форме, предполагающий простую зависимость между напряжением, деформацией и временем (аналогично описанию поведения модели Томсона — Ишлинского, Бюргерса и др.). Используются методы операционного исчисления с привлечением преобразования типа Лапласа — Карсона. Более гибкие соотношения можно получить на основании исследования интегралов Больцмана — Вольтерра, если располагать параметрами функции наследственности. Хорошее совпадение расчетных данных с экспериментальными дает применение

$\mathcal{E}(a)$ — функции Ю. И. Работнова и аппроксимации М. И. Розовского.

Была проведена серия опытов на угольных образцах вдавливанием плоского штампа в условиях ползучести и релаксации. Кривые обрабатывались с заменой упругих постоянных временными операторами. Зависимость между нагрузкой P и перемещением плоского штампа l представляется как

$$P(t) = \frac{2l(t)\bar{G}}{\pi(1-\bar{v})a},$$

где \bar{G} и \bar{v} — временные операторы упругих постоянных; a — радиус штампа.

В операторной форме получается более простое решение, если задаться условиями испытаний (например, при $l=\cos nt$) и считать коэффициент Пуассона при этом неизменным. Тогда

$$\frac{P_{(t_1)}}{P_{(t_2)}} = \exp \left[-\frac{3\omega\delta\Gamma(1-\alpha)(l_2^{1-\alpha} - l_1^{1-\alpha})}{2(1-\bar{v})} \right], \quad (25)$$

где α и δ — параметры абелева ядра ползучести; $\Gamma(1-\alpha)$ — гамма-функции (использована аппроксимация М. И. Розовского).

Техника экспериментов не представляет каких-либо затруднений; опыты можно проводить на простейших рычажных приборах. Расчетные параметры ползучести α сравнивались с параметрами, полученными при испытании на ползучесть изгибом угольных балок из той же пробы, и дали хорошее совпадение.

Величина деформации, определяемая вторым параметром δ , при вдавливании (т. е. в сложном напряженном состоянии) в два раза превышает одноосную, что естественно. Очевидно, что склонность породы к пластическому течению сказывается на параметрах ползучести. В табл. 11 представлены параметры ползучести алевролитов и песчаников поля шахты «Коксовая», полученные методом вдавливания. Деформации алевролитов, определяемые приведенными средними значениями параметров, в полтора раза превышают деформации песчаников. В пределах каждой разновидности пород относительная деформация тем выше, чем больше содержание глинистых фракций в

Таблица 11

Параметры ползучести пород поля шахты «Коксовая»

Глубина, м	Порода	Абелево ядро ползучести		Относительная деформация за 300 ч $\frac{y_t - y_0}{y_0}$
		α	$\delta, \text{ сек}^{\alpha-1}$	
358—361	Алевролит с карбонатным цементом	0,61	0,00055	0,125
657—662	Алевролит	0,88	0,00445	0,148
620—624	Алевролит песчанистый с глинисто-карбонатным цементом	0,85	0,01080	0,400
693—701	Алевролит песчанистый с карбонатно-глинистым цементом	0,75	0,00094	0,066
Среднее по алевролитам		0,77	0,00418	—
265—270	Песчаник тонкозернистый	0,70	0,00077	0,078
368—380	Песчаник мелкозернистый алевролитовый с карбонатно-глинистым цементом	0,90	0,00155	0,049
434—435	Песчаник мелкозернистый алевролитовый с глинисто-карбонатным цементом	0,70	0,00240	0,251
574—578	Песчаник мелкозернистый	0,723	0,00126	0,110
586—592	Песчаник средне-зернистый с глинисто-кальцитовым цементом	0,83	0,00660	0,273
Среднее по песчаникам		0,77	0,00251	—

цементе. Если полученные параметры перевести применительно к одноосной ползучести, то их величины для пород поля шахты «Коксовая» значительно меньше, полученных по полю шахты им. Ворошилова (табл. 12). Однако пробы последних приурочены к более слабым и пластичным породам на контурах выработок, в то время как для пород больших глубин характерны некоторые признаки метаморфических изменений.

Для оценки влияния различных факторов на проявление пластических деформаций в разных условиях

Таблица 12

Параметры ползучести углей пласта III Внутреннего
шахты им. Ворошилова

Вид нагрузки, размер, мм	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$, кгс/мм ²	Абсолютое ядро ползучести		Примечание
		α	$b, \text{сек}^{\alpha-1}$	
Изгиб перпендикулярно слоистости: $20 \times 20 \times 170$	0,78	$0,862 \over 0,766$	$0,0175 \over 0,001$	$K = \frac{E_{\text{разгр}}}{E_{\text{нагр}}} = 0,87$
$25 \times 27 \times 180$	0,66	$0,902 \over 0,912$	$0,0264 \over 0,0148$	$K = 1,29$
$30 \times 30 \times 170$	0,26	$0,920 \over 0,874$	$0,0250 \over 0,0200$	$K = 1,74$
Изгиб параллельно слоистости: $20 \times 20 \times 150$	1,42	$0,800 \over 0,859$	$0,0053 \over 0,0117$	$K_1 = \frac{E_{\text{изг}}}{E_{\text{изг}}} = 0,93$
$23 \times 25 \times 185$	0,97	$0,851 \over 0,851$	$0,0087 \over 0,0087$	$K_1 = 0,63$
$30 \times 30 \times 210$	1,63	$0,750 \over 0,750$	$0,00185 \over 0,00185$	$K_1 = 1,07$
Сжатие перпендикулярно слоистости: $50 \times 50 \times 120$	1,53	$0,846 \over 0,846$	$0,0061 \over 0,0061$	$K_1 = 1,07$
Вдавливание штампа перпендикулярно слоистости:				
$d_w = 2$	1,08	$0,864 \over 0,795$	$0,0685 \over 0,0330$	$p = 3,35 \text{ кгс/мм}^2$
$d_w = 2,5$	0,90	$0,840 \over 0,840$	$0,0130 \over 0,0130$	$p = 2,22 \text{ кгс/мм}^2$
$d_w = 8$	0,43	$0,860 \over 0,860$	$0,0174 \over 0,0174$	$p = 12,60 \text{ кгс/мм}^2$
$d_w = 10$	0,24	$0,880 \over 0,700$	$0,0172 \over 0,0030$	$p = 7,60 \text{ кгс/мм}^2$
$d_w = 2$	0,14	$0,725 \over 0,725$	$0,0172 \over 0,0098$	$p = 1,37 \text{ кгс/мм}^2$
$d_w = 2,5$	0,24	$0,800 \over 0,800$	$0,0086 \over 0,0086$	$p = 0,20 \text{ кгс/мм}^2$
Вдавливание штампа параллельно слоистости:				
$d_w = 2,5$	0,90	$0,897 \over 0,705$	$0,0375 \over 0,0092$	$p = 2,08 \text{ кгс/мм}^2$
$d_w = 8$	0,56	$0,846 \over 0,846$	$0,0685 \over 0,0685$	$p = 1,22 \text{ кгс/мм}^2$
$d_w = 10$	0,28	$0,725 \over 0,800$	$0,0098 \over 0,0086$	$p = 0,80 \text{ кгс/мм}^2$
Вдавливание цилиндра по образующей перпендикулярно слоистости, $d_c = 6$	0,32	$0,843 \over 0,826$	$0,0082 \over 0,0034$	$p = 0,92 \text{ кгс/мм}^2$

Примечание. Параметры α и b в знаменателе даны для обратной ползучести.

нагружения проведены испытания угля пласта III Внутреннего шахты им. Ворошилова поперек и вдоль слоистости, изгибом и вдавливанием плоского штампа, с изменением размеров сечения при изгибе и диаметра штампа при вдавливании, с различным уровнем приложенного напряжения и т. д.

Модуль упругости при изгибе, перпендикулярном слоистости, уменьшается, при этом отношение модулей по данным разгрузки и нагрузки свидетельствует о повышении доли пластических деформаций. Изменение модуля деформации при испытании штампами различных диаметров также существенно. При этом неравномерный характер эпюры контактных давлений с резкой концентрацией на кромке штампа тем больше оказывается на процессе их перераспределения во времени, чем меньше диаметр штампа.

Сопоставимые результаты получаются при испытаниях, когда нагружаемый объем условно можно считать однородным (при одноосном сжатии, при диаметре штампа 8—10 мм, при вдавливании цилиндра, при изгибе балок с равными прямой и обратной деформациями условно-мгновенного нагружения).

Определение реологических свойств пород акустическим методом

В последние годы рядом исследователей делаются попытки определения реологических свойств пород акустическим методом. Исследования в данной области развиваются по двум направлениям. Представители первого направления исходят из того, что при периодическом действии напряжения существует угол сдвига фаз между напряжением и деформацией. В частности, при продольном растяжении — сжатии тонкого стержня в первом приближении на основании закона Гука можно написать

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{de}{dx},$$

где σ — напряжение; ε — деформация; E — модуль упругости.

Однако для горных пород как реальных сред зависимость неоднозначна и обусловлена изменением этих величин во времени

$$\sigma = A_1 \frac{d\sigma}{dt} + A_2 \frac{d^2\sigma}{dt^2} + \dots + E \frac{de}{dt} + E_1 \frac{d^2e}{dt^2}.$$

Если напряжения изменяются гармонически с круговой частотой, то

$$\sigma = \sigma_0 \cos \omega t.$$

Следовательно, деформации изменяются с той же частотой, отставая на угол

$$\frac{de}{dx} = \left(\frac{de}{dx} \right)_0 \cos(\omega t - \varphi),$$

где σ_0 и $\left(\frac{de}{dx} \right)_0$ — амплитудные значения напряжений и деформаций, которые связаны между собой соотношением

$$\sigma_0 = \frac{E_{дин}}{\cos \varphi} \left(\frac{de}{dx} \right)_0.$$

Таким образом, при гармонических колебаниях постоянные E , E_1 , E_2 , ... и A_1 , A_2 , ..., соответствующие внутренней структуре материала, сводятся к двум функциям ($E_{дин}$ и $\varphi E_{дин}$) и характеризуют упругие свойства тела, а угол сдвига фаз между напряжениями и деформацией φ или тангенс этого угла характеризуют неупругие свойства тела.

Фазовый угол связан с декрементом затухания в виде:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1}{\pi \frac{A_2}{G}}.$$

Связь фазового угла с коэффициентом вязкости

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\eta \omega}{G} = \frac{\operatorname{tg} \varphi G}{2\pi f},$$

где G — модуль сдвига; f — частота.

Время релаксации

$$\tau_{rel} = \frac{\eta_s}{G}. \quad (26)$$

Подлежит уточнению возможность применения

данного метода для определения реологических свойств, поскольку результаты измерений коэффициента вязкости отличаются от результатов, получаемых статическим методом, на несколько порядков [45].

Другие исследователи исходят из известной классической теории Стокса — Кирхгофа, согласно которой поглощение упругих колебаний для однородных тел и монокристаллов определяется следующим выражением:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = -\frac{2\pi f}{v_s^3 \rho} \left(\frac{4}{3} \eta + \lambda \frac{c_p}{c_V/c_p} - 1 \right),$$

где α_1 — коэффициент поглощения, обусловленный вязкостью; α_2 — коэффициент поглощения, обусловленный теплопроводностью; v_s — скорость распространения сдвиговых волн; ρ — плотность среды; η_s — вязкость; f — частота колебаний; c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении; c_V — удельная теплоемкость при постоянном объеме; λ — коэффициент теплопроводности.

При рассмотрении поглощения ультразвуковых колебаний в горных породах влиянием теплопроводности обычно пренебрегают. В данном случае формула для определения вязкости приобретает вид:

$$\eta_s = \frac{3\rho v_s^3 \alpha_s}{8\pi^2 f^2}. \quad (27)$$

Исходя из анализа механизма поглощения ультразвука и особенностей распространения волн в среде с затуханием, получены следующие эмпирические формулы для коэффициентов вязкости осадочных пород:

$$\eta_s = 1,5K\rho v_s^3 \alpha_s;$$

$$\eta_p = 0,15K\rho v_p^3 \alpha_p,$$

где $\eta_{s,p}$ — коэффициенты сдвиговой вязкости и вязкости, связанной с запаздыванием упругих деформаций, $v_{s,p}$ — коэффициенты затухания ультразвука, связанные с вязкостью и псевдовязкостью; K — коэффициент размерности.

Упругие модули связаны с указанными коэффициентами вязкости зависимостями:

$$\tau_{rel} = \frac{\eta_s}{G}; \quad \tau_{ret} = \frac{\eta_p}{E},$$

где τ_{rel} и τ_{ret} — времена релаксации и запаздывания.

В исследовании функций последействия с применением операционного метода теории функций комплексного переменного предложена модель осадочных горных пород, родственная стандартному линейному телу. При анализе операторной формы записи этой модели и тела Бюргерса можно заметить, что они эквивалентны, если вязкость породы на 1—2 порядка превышает модуль упругости (размерность времени при этом берется в секундах). Предложенная модель эквивалентна двухэкспоненциальному ядру ползучести. Известно [29], что описание ползучести пород степенным и двухэкспоненциальным ядрами ползучести приводит к одинаковому результату для уставновившейся ползучести. Это означает, что между коэффициентом вязкости тела Бюргерса и представленной в выражении (27) сдвиговой вязкостью η_s существует прямая зависимость. Считаем, что время релаксации зависит от принятой модели и является константой породы, т. е. $\tau_{rel} = const$. В этом случае

$$\tau_{rel} = \frac{\tau'_{rel}}{2(1+v)} = \frac{\eta_2}{E_2} = \frac{1}{K},$$

где η_2 , E_2 и K — параметры тела Бюргерса; E_2 — модуль упругости

$$E_2 = 2G(1+v).$$

Связь между параметрами тела Бюргерса и абелева ядра ползучести следующая:

$$K = \frac{\delta}{1-\alpha} \cdot \frac{t_2^{1-\alpha} - t_1^{1-\alpha}}{t_2 - t_1},$$

где $t_{1,2}$ — две точки кривой ползучести, принадлежащие аппроксимированной касательной к ее начальному участку.

Из практических соображений можно принять $t_1=2$ ч; $t_2=4$ ч; $\alpha=0,7$ для песчаников, $\alpha=0,8$ — для алевролитов, $\alpha=0,85$ — для углей. Тогда для песча-

Таблица 13

Расчетные данные для определения параметра ползучести
с помощью ультразвукового метода
(поле шахты «Красногорская» скв. 6950)

Порода	Глубина отбора пробы, м	Модуль сдвига $G \cdot 10^{-5}$, кгс/см ²	Коэффициент вязкости $10^{-15} \times \eta_s$, н·сек/м ²	Среднее значение параметра абелева ядра ползучести δ , сек ^{0.1}
Песчаник крупнозернистый	600	0,89	5,2	$\alpha = 0,7$
	642	1,57	3,3	
	786	1,26	4,8	
	790	1,12	5,4	
	798	0,99	5,0	
	831	1,03	4,0	
Песчаник среднезернистый	Среднее	1,14	4,6	$0,00160 \text{ сек}^{0.3}$
	723	1,51	4,7	$\alpha = 0,7$
	725	1,39	4,1	
	726	1,21	2,7	
	785	1,79	4,2	
	835	1,58	3,4	
Песчаник мелкозернистый	Среднее	1,50	3,8	$0,00245 \text{ сек}^{0.3}$
	523	1,38	3,4	$\alpha = 0,8$
	532	1,38	4,2	
	542	1,69	3,1	
	649	1,64	3,4	
	656	1,89	6,1	
Переслаивание песчаника с алевролитом	666	1,57	3,3	$\alpha = 0,8$
	704	1,32	5,2	
	814	1,57	3,6	
	Среднее	1,55	3,9	$0,00256 \text{ сек}^{0.3}$
	556	1,57	4,2	
	593	0,95	5,3	
	724	1,56	4,1	$\alpha = 0,8$
	849	1,29	3,3	
	852	1,26	4,1	
	874	1,80	3,2	
	1075	1,65	2,95	
	Среднее	1,44	3,9	$0,00552 \text{ сек}^{0.2}$

ников $\delta = 240 \text{ К сек}^{0,3}$ для алевролитов $\delta = 600 \text{ К сек}^{0,2}$ и для углей $\delta = 1060 \text{ К сек}^{0,15}$.

В табл. 13 представлены расчетные данные для определения параметров ползучести пород поля шахты «Красногорская». Величина параметров определяет деформацию установившейся ползучести, на 30% меньшую соответствующей песчаникам поля шахты «Коксовая».

Для практических целей такие результаты являются удовлетворительными. Экспресс-метод определения параметров ползучести с помощью акустики нами принят в качестве составной части комплексного метода.

§ 8. РАЗВИТИЕ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Успешное развитие современной горной акустики стало возможным благодаря достижениям электроники, импульсной техники, методов измерения малых промежутков времени, т. е. скоростей распространения упругих волн. Наиболее изученной остается пока закономерность распространения скоростей продольных волн в горных породах. Известны зависимости скоростей продольных волн от вещественного состава, строения, условий образования горных пород. Наиболее перспективными исследованиями при рассмотрении деформационных процессов можно считать изучение коэффициента затухания упругих колебаний.

Коэффициент затухания упругих колебаний

Известно, что коэффициент затухания упругих колебаний дает возможность дальнейшего расширения информативной способности акустических методов исследования горных пород. Кроме того, как будет показано дальше, он является важной характеристикой, входящей в формулы для определения вязкости пород акустическим способом.

Ультразвуковые колебания, распространяясь в горной породе, превращаются в другие виды энергии.

Изменение интенсивности ультразвуковых колебаний, проходящих через горную породу, зависит от целого ряда факторов, многие из которых при установлении зависимостей трудно учесть.

В общем случае коэффициент затухания можно представить в виде:

$$\alpha = F(f, \rho, \eta, P, T, n, K_{tr}),$$

где f — частота колебаний; ρ — плотность среды; η — вязкость; T — температура; n — пористость; P — нагрузка; K_{tr} — трещиноватость.

Уменьшение интенсивности и амплитуды упругих колебаний может быть получено из соотношений:

$$J_t = J_0 e^{-2\alpha x};$$

$$A_t = A_0 e^{-\alpha x},$$

где α — амплитудный коэффициент поглощения; J_t — интенсивность колебаний в одной из точек среды; J_0 — интенсивность колебаний в точке $x=0$; A_t — амплитуда колебаний в одной из точек исследуемой среды; A_0 — амплитуда колебаний в точке $x=0$.

Из этих соотношений вытекают формулы для практического определения коэффициента затухания:

$$\alpha = \frac{1}{2(x_2 - x_1)} \ln \frac{J_1}{J_2};$$

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \frac{A_1}{A_2},$$

где x_1 и x_2 — две различные точки породы.

Уменьшение амплитуд колебаний с расстоянием вызывается не только поглощением, но и геометрией расхождения волнового фронта, поэтому при измерении затухания на образцах различной длины необходимо учитывать коэффициент расхождения. Коэффициент затухания является более чувствительной характеристикой, чем скорость распространения, и может служить мерой отличия горной породы от идеально упругого тела.

Полученные результаты по определению коэффициента затухания углевмещающих пород Прокопьевско-Киселевского месторождения Кузбасса показали, что затухание упругих колебаний характеризуется су-

щественным различием для отдельных литологических типов пород. Особенно большое затухание присуще аргиллитам, что объясняется, вероятно, их агрегатным состоянием. Кроме определения численных значений коэффициента затухания, установлены зависимости коэффициента затухания от частоты, пористости, внешней нагрузки и некоторых структурных факторов.

При исследовании затухания от частоты обычно исходят из аналитического выражения

$$\alpha = Af + Bf^4,$$

где A и B — коэффициенты потерь на поглощение и рассеивание.

Выражение справедливо для предельных однокомпонентных сред (чистые металлы). При переходе к веществам, состоящим из нескольких фаз разной дисперсности (каковыми являются горные породы) и с разными акустическими свойствами, процессы затухания значительно осложняются, поэтому для оценки затухания горных пород в зависимости от частоты целесообразно пользоваться величинами, полученными эмпирическими измерениями.

Результаты испытаний углевмещающих пород показали, что зависимость коэффициента затухания от частоты носит почти линейный характер (рис. 29).

Многими исследователями установлена связь между коэффициентом затухания и пористостью (рис. 30),

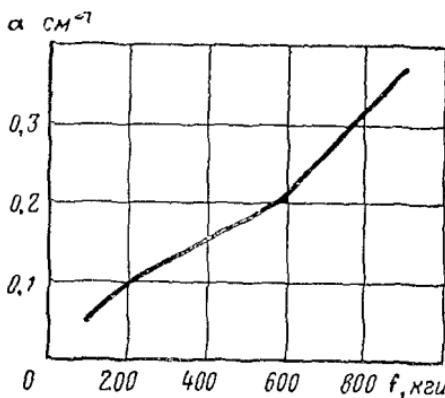


Рис. 29 Зависимость коэффициента затухания от частоты колебаний упругих волн

а именно: незначительное увеличение пористости ведет к резкому увеличению затухания. Отклонение от линейной зависимости объясняется наличием микротрещин, за счет которых происходит сильное затухание упругих колебаний.

При исследовании влияния давления на величину коэффициента затухания для углевмещающих пород выявлена зависимость от прочности. Для данных пород характерно, что при достижении нагрузки, равной примерно 50% предельной, коэффициент затухания заметно снижается (до 50%).

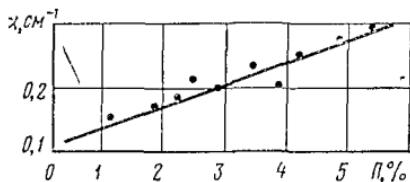


Рис. 30. Изменение коэффициента затухания песчаника от его пористости

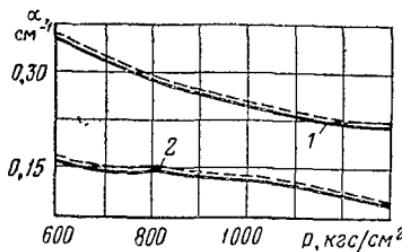


Рис. 31. Изменение коэффициента затухания продольной волны с ростом давления на образец:

1 — параллельно слоистости;
2 — перпендикулярно слоистости

Исследования показали (рис. 31), что снижение величины α в результате воздействия нагрузки носят необратимый характер, следовательно, в данном случае возникают структурные изменения в породе. Объясняется это закрытием пор и микротрещин, а также улучшением контактов между зернами. При данных нагрузках изменение другого акустического параметра — скорости распространения продольной волны — зафиксировать чрезвычайно трудно.

Изменение скорости отчетливо регистрируется, когда происходит нарушение структуры (трещины), т. е. на окончательной стадии напряженного состояния. Этот факт подтверждает положение о том, что контроль за прочностью пород необходимо проводить одновременно по двум характеристикам: по скорости распространения и коэффициенту затухания упругих волн.

Коэффициент затухания как более чувствительная величина дает возможность судить о начальной стадии пластического течения породы, а по скорости распространения продольной волны можно судить только о конечном процессе деформирования — разрушении по трещинам.

Анизотропия коэффициента затухания для горных пород. Почти для всех пород характерно различие в акустических параметрах вдоль и вкрест слоистости, что позволяет судить о наличии акустической анизотропии, с которой тесно связана и анизотропия упругих свойств. Наибольшей анизотропией обладают осадочные породы, в частности алевролиты, аргиллиты, сланцы и глины (табл. 14 и 15).

Таблица 14

Коэффициенты анизотропии пород поля шахты
«Коксовая»

Песчаник	Глубина отбора пробы, м	Скорость продольной волны, м/сек		Коэффициент анизотропии K_a
		$v_p \parallel$	$v_p \perp$	
Мелкозернистый, алевролитовый с карбонатно-глинистым цементом	374,8—380,8	3990	3800	1,05
Мелкозернистый	420,7—422,4	4820	3870	1,24
Тонкозернистый	446,9—454,2	4120	3890	1,06
Мелкозернистый	483,1—488,8	4120	3750	1,10
Среднезернистый с карболитовым цементом	493,7—497,0	4800	4620	1,04
Мелкозернистый с карбонатно-глинистым цементом	503,9—509,2	4620	4450	1,04
Среднезернистый с карбонатным цементом	519,9—522,4	4500	4000	1,13
Разнозернистый гравелистый	529,6—530,7	3740	3040	1,23

Для осадочных пород Кузбасса определены скорости продольных волн и коэффициенты затухания в различных направлениях по отношению к слоистости, что позволило судить об его анизотропии для разных пород (рис. 32). Анализ полученных результатов показывает, что коэффициенты затухания вдоль и вкрест слоистости могут отличаться более чем в 2 раза.

Таблица 15

Коэффициент анизотропии углей различной степени метаморфизма

Марка угля	Выход летучих v^r , %	Скорость продольной волны, м/сек		Коэффициент анизотропии K_a
		$v_{p\parallel}$	$v_{p\perp}$	
СС	2,5—14	2240	2125	1,06
К	18—23	1835	1795	1,02
КЖ	20—26	1760	1740	1,01
Ж	30	1450	1230	1,20
ГЖ	30—35	1780	1420	1,25
Г	39	1975	1310	1,50

Наличие акустической анизотропии объясняется преимущественно различной ориентировкой зерен по-

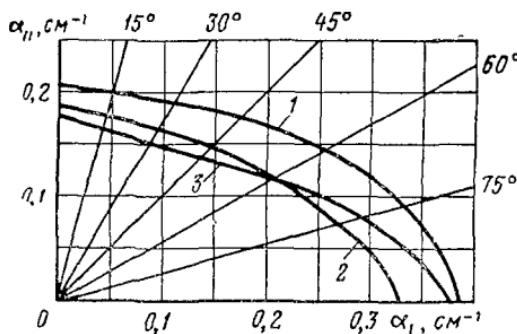


Рис. 32. Изменение коэффициента затухания от направления прозвучивания относительно слоистости для:

1 — алевролита; 2 — песчаника среднезернистого, 3 — песчаника мелкозернистого

родообразующих минералов и площадью контактов между ними. Повышенной акустической анизотропией обладают алевролиты. На характер анизотропии влияют структурные и текстурные свойства пород, а также размер зерен и примеси углистого вещества.

Изменение анизотропии акустических свойств, в частности коэффициента затухания от направления, перпендикулярного слоистости, к направлению, парал-

лельному слоистости, можно в первом приближении описать выражением

$$\alpha_\varphi = \frac{\alpha_{90}}{\cos^4 \varphi + B \sin^2 \varphi + C \sin^4 \varphi}, \quad (28)$$

$$\text{где } C = \frac{\alpha_{90}}{\alpha_0}; \quad B = \frac{\alpha_{90}}{\alpha_{45}} - \frac{C + 1}{4};$$

α — коэффициент затухания соответствующих углов.

Таким образом, чтобы определить затухание ультразвуковых колебаний в произвольном направлении, необходимо измерить его в продольном, поперечном и диагональном направлении и затем по формуле (28) — в заданном направлении.

Анализ зависимостей показывает, что более высокое значение анизотропии характерно для крупнозернистых пород. Особенно большое влияние на величину затухания оказывают примеси углистого вещества в породах. Разброс акустических параметров при этом обусловлен степенью неоднородности распределения примесей.

Между упругими параметрами горных пород и показателями затухания упругих колебаний известна тесная корреляционная связь. Так, декремент затухания Δ , равный произведению коэффициента затухания на скорость волн, отнесенную к частоте, гиперболически связан с модулем упругости E

$$\Delta = \alpha \frac{v}{f} = \frac{K}{E^2}, \quad (29)$$

где K — постоянная, установленная для широкого ряда горных пород, в том числе и осадочных, резонансным методом изгиба, равная $6 \cdot 10^{21}$ дин $^2/\text{см}^4$.

Величина декремента Δ для поперечных волн близка декременту изгибных (несколько больше), поэтому, исходя из выражения (29), можно определять коэффициент затухания, используя приведенную величину K ,

$$\alpha_s = \frac{Kf}{v_s G^2}, \quad (30)$$

где α_s — коэффициент затухания поперечных волн, см $^{-1}$; G — модуль сдвига, кгс/см 2 ; v_s — скорость поперечных волн, м/сек.

Сравнение экспериментальных и расчетных величин α_s и α_p приведено на рис. 34 и 35.

Величина коэффициента затухания продольных волн α_p определяется по формуле (30) с подстановкой скорости продольных волн v_p и величины модуля упругости E . При этом коэффициент K равен $2 \cdot 10^{22}$ дин $^2/\text{см}^4$, что установлено сравнением с экспериментальными значениями α_p (см. рис. 33).

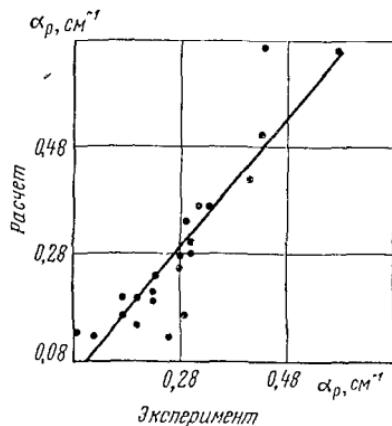


Рис. 33. Соотношение между экспериментальными и расчетными коэффициентами затухания продольных ультразвуковых волн α_p в песчаниках

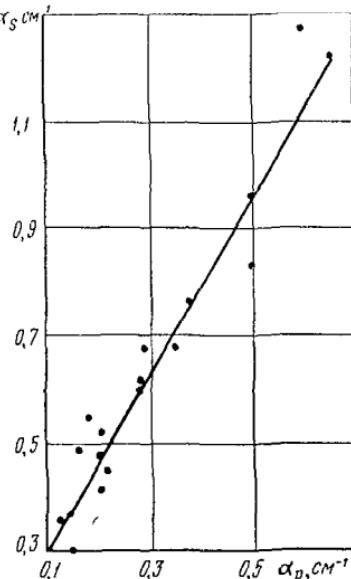


Рис. 34. Соотношение между коэффициентами затухания продольной α_s и поперечной α_p ультразвуковых волн в песчаниках, полученное расчетным методом

Пользуясь зависимостями, приведенными на стр. 74 и формулой (30), можно расчетом определить время релаксации τ_{rel}

$$\tau_{\text{rel}} \approx 1,5v_s\alpha_s,$$

что позволяет упрощенным способом определять параметры ползучести пород, используя зависимость (29).

§ 9. АППАРАТУРА, ПРИМЕНЯЕМАЯ В КОМПЛЕКСНОМ МЕТОДЕ

Упругие свойства горных пород (модуль упругости, коэффициент Пуассона, модуль сдвига) опре-

делялись импульсным иммерсионным методом прибором конструкции ДонУГИ (рис. 35).

Метод основан на измерении скоростей распространения ультразвуковых продольных и поперечных волн при углах полного внутреннего отражения (кри-

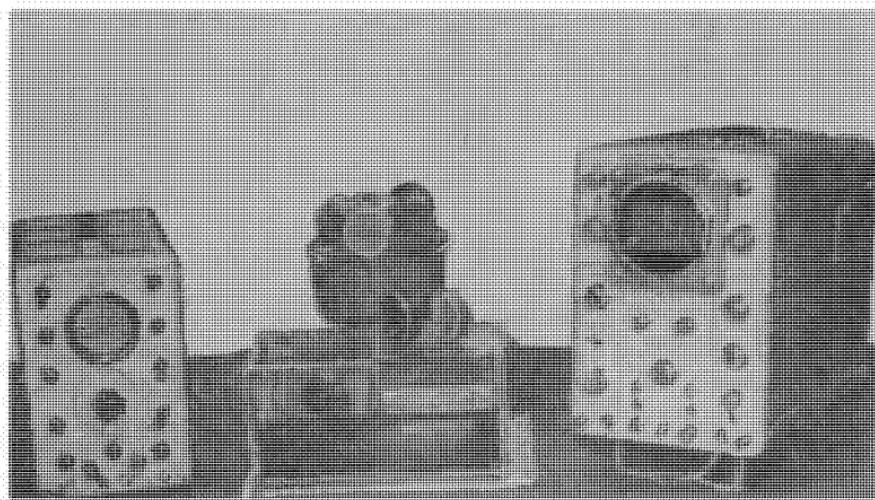


Рис. 35 Прибор конструкции ДонУГИ для определения упругих свойств горных пород

тических углах). Образец породы (отрезок керна длиной 20 или 30 мм) помещается на поворотной площадке в сосуд с жидкостью между пьезоэлементами (датчиками). Один из них (излучатель) подсоединен к генератору колебаний, другой (приемник) — к выходу электронного осциллографа с «ждающей» разверткой (собственная частота датчиков 500 кгц).

Излучаемая ультразвуковая волна при падении на границу жидкость — горная порода возбуждает в образце две волны — продольную со скоростью v_p и поперечную со скоростью v_s .

При изменении угла падения волны на образец при повороте последнего изменяется величина отражения волны от образца, и при некотором значении угла поворота θ_1 продольная волна v_p претерпит полное внутреннее отражение. Увеличивая угол падения волны на образец, можно добиться полного внутреннего отра-

жения и поперечной волны (угол θ_2). Скорости v_p и v_s рассчитываются по формулам:

$$v_p = \frac{v_{ж}}{\sin \theta_1}; \quad v_s = \frac{v_{ж}}{\sin \theta_2},$$

где $v_{ж}$ — скорость волны в используемой жидкости, м/сек.

Прибор позволяет проводить измерения коэффициента затухания продольных и поперечных волн (методика «двух баз»).

Основные преимущества прибора — одновременное измерение целого комплекса акустических параметров и высокая точность измерений (при многократном измерении на одном и том же образце погрешности измерений не превышает 0,5%). Недостаток — прибор предназначен только для лабораторных исследований.

Для проведения исследований пород и углей в природе и в лабораторных условиях используется ультразвуковой прибор Штейнкампа, (производство фирмы «Кретцтехник», Австрия). Прибор импульсный (рис. 36) (собственная частота излучателей 50 кгц)

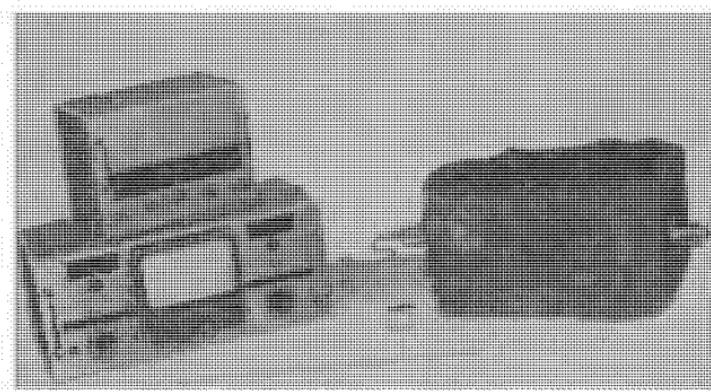


Рис 36 Ультразвуковой прибор фирмы «Кретцтехник» (Австрия) (схема измерения v_p в угольном блоке)

позволяет измерять скорость продольной волны в породах в пределах 3000—4000 м/сек на расстоянии 9—12 м. Кроме того, прибор измеряет относительную величину принимаемой при «прозвучивании» амплитуды ультразвука.

Регистрация акустических параметров может осуществляться двумя способами: с помощью прибора стрелочного типа и методом осциллографирования. Первый способ позволяет проводить специальные исследования по определению трещиноватости, структурой неоднородности и т. д.

Погрешности измерений не более 1%. При наличии искробезопасной оболочки прибор может применяться при исследовании угольного массива.

Полуавтоматический рычажный прибор УМГП-3 (рис. 37), изготовленный Феодосийским механическим

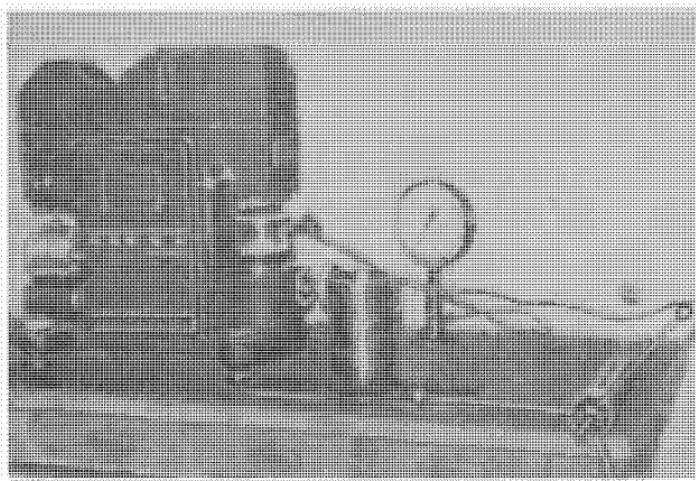


Рис. 37. Установка УМГП-3 (ИГИРГИ) при нагружении штампом породы, помещенной в камеру высокого давления

заводом, применяется для построения кривой нагрузки — перемещение при вдавливании в плоский образец толщиной 30—50 мм плоского штампа диаметром 1,6—2,5 мм. Максимально создаваемая нагрузка 1000 кгс. Чувствительная электромагнитная муфта обеспечивает запись деформации 3,8 мк в 1 мм. К прибору прилагается камера для всестороннего сжатия образца гидравлическим способом до 600 кгс/см² с одновременным вдавливанием в него плоского штампа с записью диаграммы нагрузления. По полученным графикам рассчитывают прочностные,

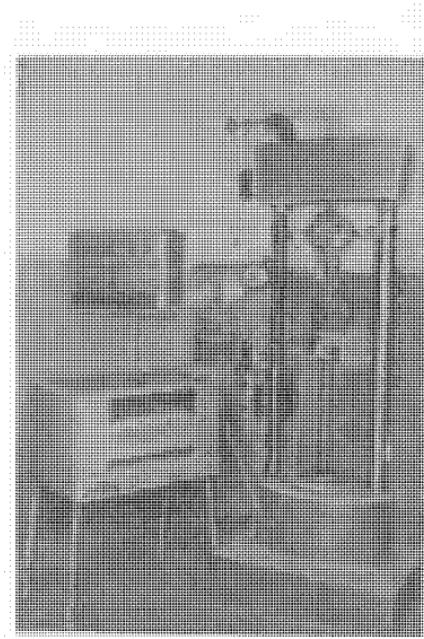


Рис. 38. Рычажный пресс УМ-5
с диаграммным аппаратом

упругие и пластические свойства породы: твердость $p_{ш}$, условный предел текучести p_0 , модуль упругости $E_{ш}$, коэффициент пластичности $K_{пл}$, условный предел пластичности p_s , коэффициент хрупкости $K_{хр}$, удельную объемную работу разрушения A_V , удельную контактную работу разрушения. Исследование проводится на тех же образцах, что и при испытании ультразвуком.

Длительные испытания на ползучесть или релаксацию напряжений при одноосном сжатии либо вдавливании плоского штампа производятся на рычажном прессе УМ-5 (рис. 38) с диаграммным аппаратом, выпускаемым Армавирским заводом механических прессов. На прессе УМ-5 проводятся испытания крепких горных пород штампами диаметром 5—10 мм. Предел прочности на одноосное сжатие и растяжение определяется раскалыванием образцов соосными клиньями прибора. Результаты исследований этим методом сравнивались с расчетными и показали надежную сопоставимость (до 30%).

ГЛАВА III

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ПОРОД ОСНОВНЫХ СТРУКТУР РАЙОНА

§ 1. СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОБ

Соответственно программе исследования, породный материал глубоких скважин испытан комплексным методом, изложенным в главе II, а также экспресс-методом раскалывания — раздавливания, общепринятым в практике регионального опробования. Результаты испытаний сгруппированы по шахтным полям, так как эти поля, как правило, располагаются по простирианию основных структур. Дальнейший анализ проводился с привязкой физико-механических данных к элементам структур (западным, восточным крыльям и замкам синклиналей и антиклиналей). Полученные параметры механических свойств горных пород есть результат статистической обработки толщи пород до 1000 м. Статистические параметры кривых распределений (рис. 39—41) свидетельствуют о приемлемости закона нормального распределения к углевмещающим породам месторождения. Средние значения прочности $\sigma_{сж}$ песчаников, независимо от их текстуры, состава, трещиноватости, в пределах района изменяются в диапазоне 550—1300 кгс/см². Такой интервал изменения прочности получается и при единичных испытаниях крайне сложных по составу песчаников одной скважины. Распределение средних значений $\sigma_{сж}$ в пределах структуры отражает влияние их строения и внешних условий на свойства породной толщи.

Для установления наиболее общих закономерностей по месторождению указанный среднестатистический параметр $\sigma_{сж}$ вполне приемлем

Рис. 39 Экспериментальные кривые распределения прочности песчаников

1 — песчаник мелкозернистый (по поле шахты «Коксовая», глубина 450 м, скв 6939, $\sigma_{сж}=974$ кгс/см², $n=85$), 2 — песчаник мелкозернистый (по поле шахты «Красногорская» глубина 520 м, скв 6950, $\sigma_{сж}=1230$ кгс/см², $n=54$), 3 — песчаник среднезернистый (по поле шахты «Красногорская», глубина 450 м скв 6947, $\sigma_{сж}=1263$ кгс/см², $n=113$), 4 — песчаник разнозернистый (по поле шахты «Коксовая», глубина 370 м, скв 6946, $\sigma_{сж}=1472$ кгс/см², $n=132$), 5 — песчаник среднезернистый (по поле шахты «Красногорская» глубина 520 м, скв 6950, $\sigma_{сж}=1273$ кгс/см², $n=72$)

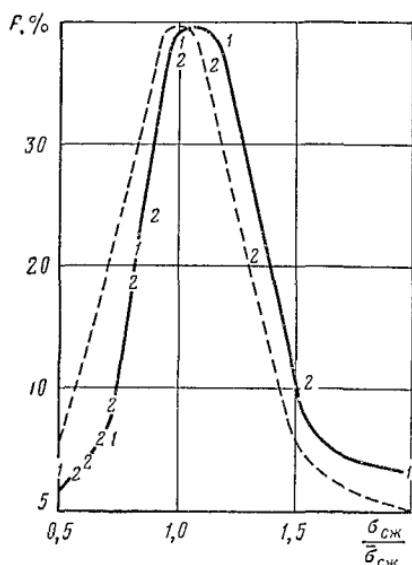
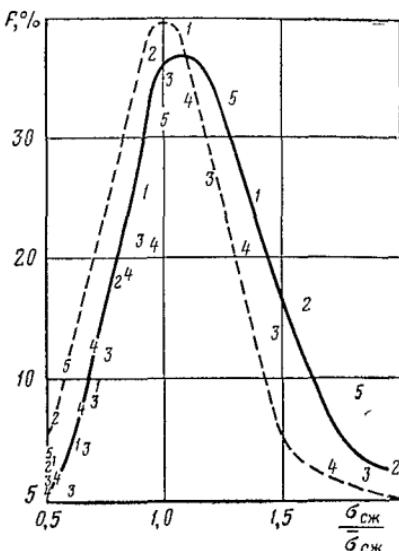


Рис. 40 Экспериментальные кривые распределения прочности алевролитов

1 — в зонах влияния выработок (по поле шахты «Коксовая» глубина 450 м и более, $\sigma_{сж}=895$ кгс/см², $n=36$)
2 — в зонах влияния выработок (по поле шахты им Калинина, глубина в пределах 300 м, $\sigma_{сж}=623$ кгс/см², $n=175$)

Самой представительной разновидностью пород массива, составляющей его скелет, является песчаник. Он наиболее прочен и поэтому показатель $\sigma_{сж}$ песча-

ников наиболее достоверен при анализе взаимосвязи внешних условий и прочности породной толщи. Меха-

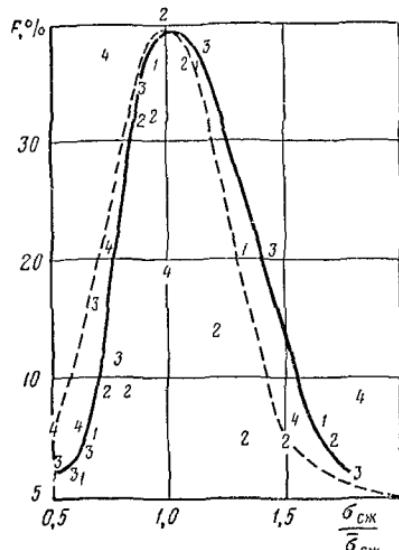


Рис. 41. Экспериментальные кривые распределения прочности песчаников (глубина менее 450 м):

1 — разнозернистых (контуры выработок шахты им. Калинина; $\sigma_{сж} = 928 \text{ кгс/см}^2$; $n=106$); 2 — среднезернистых (поле шахты «Красногорская»; скв. 6947; $\sigma_{сж} = 1214 \text{ кгс/см}^2$; $n=43$); 3 — мелкозернистых (там же; $\sigma_{сж} = 1242 \text{ кгс/см}^2$; $n=71$); 4 — крупнозернистых кровли пласта Горелого (поля шахты «Ноградская»; $\sigma_{сж} = 1220 \text{ кгс/см}^2$; $n=42$)

нические параметры позволяют оценить устойчивость пород и предрасположенность их к проявлению горных ударов.

§ 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ПЕСЧАНИКОВ В ПРЕДЕЛАХ ЭЛЕМЕНТОВ ТИПОВЫХ СТРУКТУР

I синклиналь изучена в пределах X—V разведочных линий по полям шахт «Тырганская», «Зиминка», им. Калинина и «Прокопьевская». На западе эта синклиналь ограничена II Тырганской антиклиналью, тектонически нарушенной разломами *LL* и *RR*, на востоке примыкает к II синклинали, тектонически нарушенной разломом *MM*, сливающимся к югу с разломами *BB* и *DD* (рис. 42). В промежутке между IX—VIII разведочными линиями слияние разломов образует апофизы с четко выраженными диагональными разрывами. В южном замыкании синклиналь граничит с участком, по которому запасы списаны из-за сложной тектонической обстановки.

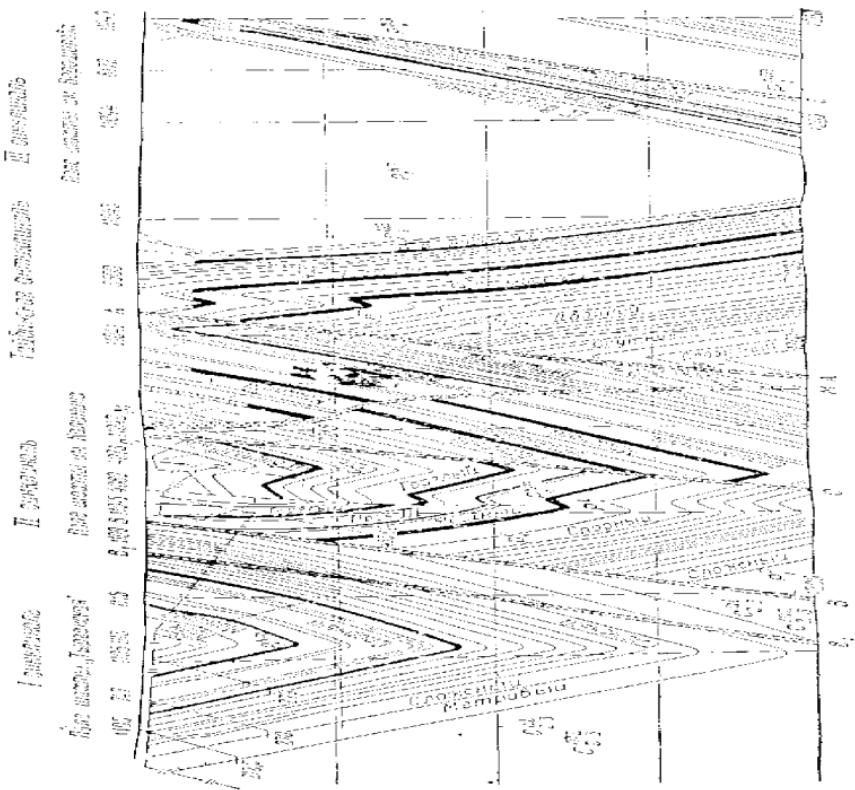
По простиранию западного крыла I синклинали от IX разведочной линии к VI прочность возрастает (разлом *LL*, апофизы), затем уменьшается (группа

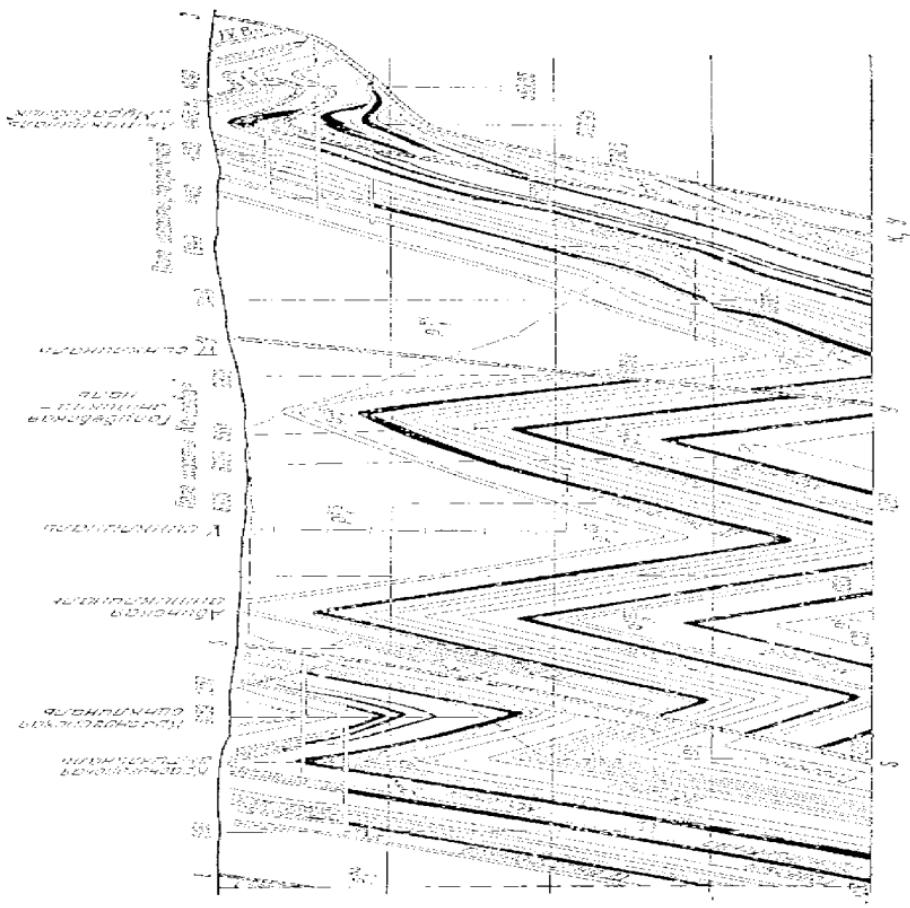
скважин IX разведочной линии, $\sigma_{сж}$ изменяется от 900 до 1180 кгс/см², VIII разведочной линии до 1400 кгс/см², VI разведочной линии до 500 кгс/см²). По западному крылу вкрест простирания к замку II Тырганской антиклинали прочность возрастает до 1180 кгс/см². Прочность в замке синклинали равна или выше, чем в крыльях. Прочность восточного крыла в южном замыкании синклинали выше, чем западного. Восточное крыло находится в лежачем боку разлома, западное — в висячем. Связь изменения прочности в элементах структуры I синклинали с тектоникой выражается в повышении величины $\sigma_{сж}$ песчаников в зоне повышенной тектонической нарушенности.

II синклиналь находится в зоне влияния разлома *ММ*, зарождающегося близко к центру синклинали (восточное крыло) и уходящего на север. Разломы *ВВ*, *СС* и *ДД* вновь образуют апофизы. Синклиналь ограничена с востока Тайбинской антиклиналью и в северном замыкании на западе — I синклиналью. Изучена в пределах IX—VI разведочных линий полями шахт им. Калинина и «Тырганская». Вкрест простирания западного крыла в зоне апофиза прочность к замку возрастает до 1500 кгс/см². По простиранию западного крыла к югу прочность уменьшается до 675 кгс/см². По простиранию восточного крыла в зоне апофиза прочность сначала возрастает, затем уменьшается к III разведочной линии до 750 кгс/см².

Прочность восточного крыла примерно равна прочности западного. Более высокая прочность пород II синклинали, чем I синклинали, должно быть связана с тем, что она зажата лежачими крыльями разломов с запада и востока. Особенность обратного падения разлома *ММ* в отличие от всех других разломов сказалась на напряжении всей структуры. Изменение прочности в элементах структуры II синклинали, очевидно, связано с неравномерной ее нарушенностью.

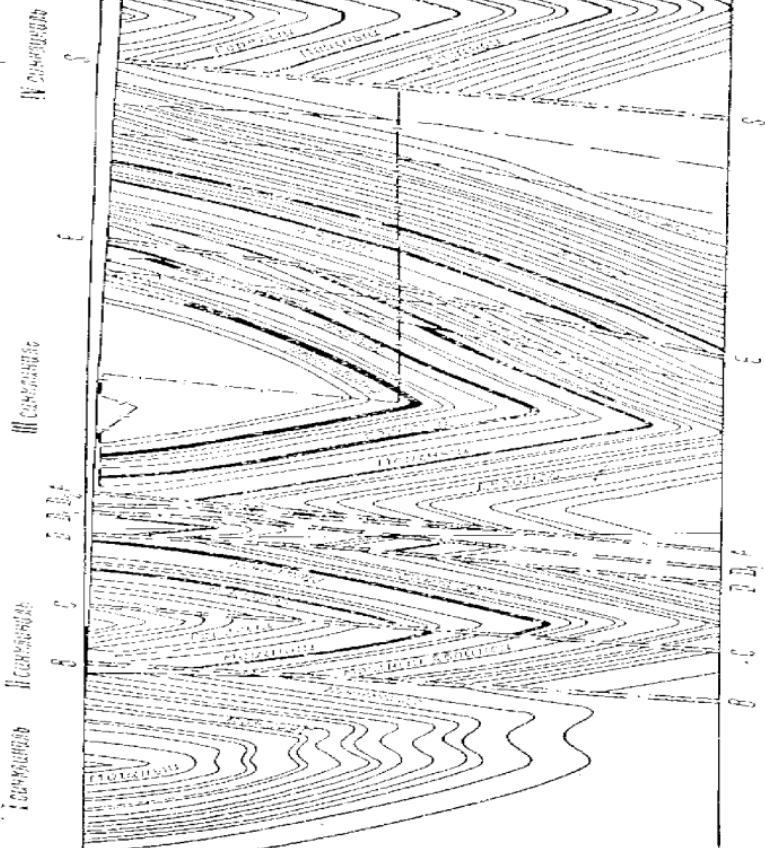
Тайбинская антиклиналь располагается на границе I—II синклиналей и отделяет от них III синклиналь (поля шахт им. Калинина, «Зиминка»). По замку антиклинали проходит разлом *ММ*. Крылья антиклинали поражены апофизами. При рассмотрении западного крыла вдоль II синклинали от IX разведочной линии к югу прочность пород возрастает





6

Рисунок 5
Планы сечений
для изучения
влияния
направления



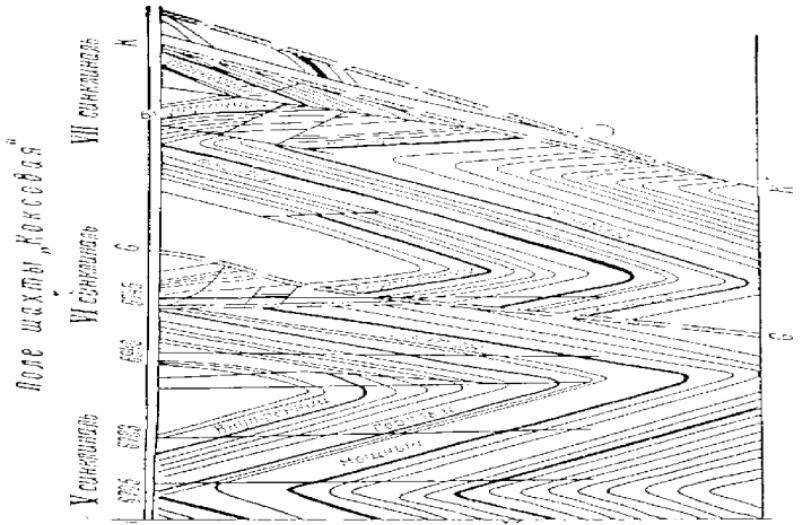


Рис. 2. Структурные геологические пластины
Киевско-Киевецкого района:
а - РС VII и VII предположительный
пласт; б - РС VII предположительный
пласт

до 2140 кгс/см², а затем уменьшается до 640 кгс/см².

Пик возрастания прочности находится на том же уровне, что и в I и II синклиналях. Прочность пород в замке довольно высокая (1138 кгс/см²).

III синклиналь изучена в пределах IX—IV разведочных линий (поля шахт «Тайбинская», «Зиминка-Капитальная», им. Калинина, им. Ворошилова). Ограничена Тайбинской антиклиналью с запада и Красногорской — с востока. Западное крыло нарушено разломами *MM* и *AA*, восточное — частично захвачено влиянием разломов *EE* и *SS*. Однако в отличии от II синклинали III синклиналь находится в висячих боках разломов *MM* и *SS*, доминирующих в районе. По западному крылу прочность стабильна с некоторым уменьшением до VIII разведочной линии, (880 кгс/см²), причем с погружением крыла характер изменения прочности пород не меняется. В замке синклинали на VIII разведочной линии прочность та же, но при этом следует учесть, что скважина пересекает дополнительную антиклиналь *A* на глубине 600 м. На уровне группы скважин ниже VIII разведочной линии, аналогично I и II синклиналям, прочность резко возрастает до 1500 кгс/см² и затем к V разведочной линии снижается до 650 кгс/см².

По восточному крылу прочность от IX разведочной линии до УП снижается до 550 кгс/см², затем несколько возрастает до 750 кгс/см². Это возрастание, по-видимому, связано с влиянием разлома *EE*.

Прочность пород восточного крыла несколько ниже прочности пород западного, что, вероятно, связано с особенностями залегания III синклинали. На уровне одной разведочной линии прочность в замке синклинали несколько ниже (780 кгс/см²), чем в западном крыле ее (822 кгс/см²) и выше, чем в восточном (580 кгс/см²) крыле.

При переходе к замкам Тайбинской и Красногорской антиклиналей прочность пород резко возрастает до 124 кгс/см².

Красногорская антиклиналь изучена в пределах IX—VI разведочных линий поля шахт «Красногорская» и им. Ворошилова. Отделяет область пликтавных структур на южном замыкании (IV, V синклинали и др.) от III синклинали. По восточному крылу нарушена разломом *SS* и *PP* (в призамковой

части). Прочность призамковой части западного крыла и в ядре антиклинали высока и достигает 1240 кгс/см². От IX разведочной линии к VII на стыке с Абинской антиклиналью в зоне резких пликативных перегибов прочность западного крыла Красногорской антиклинали сравнима с прочностью восточного крыла III синклиналии и возрастает при подходе к лежачему крылу разлома *EE* до 988 кгс/см². По восточному крылу антиклинали прочность пород так же достигает 1250 кгс/см², а по крылу до 980 кгс/см², причем прочность в лежачем крыле, зажатом между разрывами *SS* и *PP*, равна 1040 кгс/см², а под разрывом в висячем крыле *SS* резко снижается до 590 кгс/см².

V синклиналь изучена в пределах полей шахт «Коксовая» и «Центральная». На западе она отделена от Красногорской синклиналии Абинской антиклиналью; нарушена разломом *SS*, на востоке граничит с Голубевской антиклиналью, нарушенной разломом *GG*.

По западному крылу синклиналии, находящемуся в спокойном висячем крыле разлома *GG*, прочность невелика (540 кгс/см²). В замке прочность значительно выше. В восточном крыле прочность еще выше и к югу снижается до 885 кгс/см². Под разломом *GG* в висячем крыле *JJ* прочность понижается до 790 кгс/см². Прочность восточного крыла выше прочности в замке и значительно выше прочности в западном крыле.

VI синклиналь изучена в пределах VIII—V разведочных линий поля шахт «Ноградская», «Коксовая», «Центральная», им. Дзержинского. На западе ограничена Голубевской антиклиналью, нарушенной разломом *GG*, на востоке антиклиналями Муравейник, Малой и Маганакской, нарушенными апофизами разлома *JJ*.

Прочность пород западного крыла довольно высокая и достигает 1150 кгс/см². Прочность в восточном крыле несколько выше, чем в западном и постепенно снижается к югу до 890 кгс/см².

Показатель прочности крыльев синклиналей и антиклиналей хорошо согласуется с положением их в крыльях тектоноблоков горного массива, образованных крупными продольными разломами. Прокопьевский горный массив расчленен на ряд таких элемен-

тов, наложенных друг на друга с наклоном на восток. Такую же морфологию имеют и находящиеся в них синклиналии Восточные крылья, как правило, более прочные, чем западные, и находятся в лежачих боках тектоноблоков. Только III синклиналь, расположенная между разломами MM и SS , отличается тем, что обратное падение разрыва MM как бы способствует ее разгрузке от напряжений скатия, и поэтому прочность всей структуры заметно понижена. Прочность западного крыла в ней, наоборот, несколько выше прочности восточного. Это говорит о различной напряженности самих структур и их элементов.

Приведенные значения прочностей и характер их структурного распределения позволяют в первом приближении оценить степень напряженности. За единицу берем напряженность восточного крыла III синклиналии, как наиболее разгруженного от напряжения. На глубине 1000 м прочность породы поперек простирации по γH , равна примерно 250 кгс/см² и принимается за единицу.

В табл. 16 принято, что напряжения в элементах структур пропорциональны их прочности. На глубине

Таблица 16

Коэффициенты тектонических напряжений

Структура	Западное крыло	Замок	Восточное крыло
I синклиналь	1,4—1,7	1,86—2,1	1,8
II синклиналь	1,45—1,55	2,2—3,15	1,47—1,7
Тайбинская антиклиналь .	0,95—1,7	1,7	—
III синклиналь	1,1—1,35	1,15—2,2	0,8—1,1
Красногорская антиклиналь	0,9—1,8	1,85	1,5—1,95
V синклиналь	0,8	1,55	1,4—1,9
VI синклиналь	1,35—1,7	—	1,4—1,8

1000 м в призамковых элементах структур напряжения в естественном состоянии могут достигать 800 кгс/см². Коэффициенты тектонических напряжений можно использовать при расчетах устойчивости выработок на глубоких горизонтах с поправкой на концентрацию напряжений от проведения горных выработок.

§ 3. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ПОРОД СТРУКТУР

Своебразной особенностью пород является их более высокая прочность в тектонически нарушенных участках по сравнению со спокойными. Связывать это явление только с более высоким уровнем напряжений ошибочно. Упрочнение в процессе высокого всестороннего сжатия характерно для слабых пород с высоким содержанием глинистых фракций.

Эффект упрочнения хорошо прослеживается на глине, которая под действием очень высоких давлений приобретает свойства аргиллита — резко выраженный предел текучести, повышенные упругие и предельные характеристики. Эффект упрочнения отсутствует при сжатии песчаников с высоким содержанием кварца, зерна которого дробятся при высоких всесторонних давлениях. Поэтому повышенная прочность песчаников, относящихся к тектонически нарушенным зонам, не может объясняться механическим упрочнением. Объяснение, очевидно, кроется в особых геотермических условиях, способствующих региональному метаморфизму углей района. Примером ясно выраженной пропорциональности градиентов метаморфизма и современных температур является восточное крыло III синклинали. В наиболее погруженной части этой структуры (северная часть поля шахты им. Ворошилова, скв. 6971) градиент изменения летучих равен 1,05, температурный градиент до 2 (см. рис. 1). К северо-западу и юго-востоку ось III синклинали вздымается, происходит постепенное увеличение температур и метаморфизма углей. В северо-западном направлении упомянутые градиенты возрастают до 3,2, в южной части поля шахты им. Ворошилова — до 3,0.

Термокаротаж устанавливает широкий диапазон геотермических градиентов, показывающих достаточно четкую связь их с тектоническими структурами. Наиболее высокими температурами здесь характеризуются крупные продольные поднятия и зоны разломов (взбросов), ограничивающие эти поднятия. Выше приведенные повышенные градиенты приурочены к крыльям разломов ММ (северо-запад) и SS (юго-восток). От крупных взбросов в сторону висячего его

крыла температура уменьшается постепенно, а в сторону лежачего очень резко. Поэтому изменение прочности на значительном простирации крыльев III синклинали небольшое, резко возрастающее в перегибе оси (достигает — 1500 кгс/см²).

Возрастание прочности в перегибе имеет место одновременно со снижением градиентов температур и метаморфизма. Для пород, вероятно, это не является противоречием, поскольку указанные факторы не являются главными при объяснении их прочности. Температурная карта района помогает оконтурить зоны влияния геотермических условий на свойства пород. Наиболее крупные разрывы или несколько сближенных разрывов, сопровождающихся широкой зоной трещин, служили путями движения перегретых термальных вод, паров и газов с больших глубин, что и явилось причиной относительного повышения прогрева толщ и метаморфизма углей. С этой точки зрения объясняется повышенный метаморфизм углей узких, зажатых между крупными взбросами зон угленосных отложений синклиналей.

Породы испытывают воздействие геотермальных вод, способствующих минерализации скелета структуры и повышающих их прочность. С этой точки зрения становится объяснимым повышение прочности в месте изгиба оси III синклинали, являющимся естественным резервуаром. Аналогично, породы в замках синклиналей должны иметь прочность более высокую, нежели в их висячих крыльях. Восточные крылья синклиналей располагаются в лежачих боках структур (кроме III синклинали) и прочность пород в них выше, чем в западных. Повышенная прочность пород в замках антиклиналей, пораженных крупными разломами, также объяснима с данных позиций, поскольку они являются путями миграции подземных вод и газов, при этом температура реагентов здесь более высока и эффект упрочнения должен быть выше. Например, западное крыло Красногорской антиклинали является висячим разлома SS, и изменение температурного градиента по нему небольшое. Прочность пород от замка на запад резко уменьшается. Восточное крыло, напротив, отличается высокой прочностью. К югу разлом SS уходит на Абинскую антиклиналь, и прочность пород

уменьшается. Невысокие градиенты в III синклинали являются результатом ее изоляции разломами *ММ* и *SS*, а также низкой теплопроводностью безугольной толщи.

Температурный градиент кузнецкой свиты (1,6—2,3 °C), в основании которой имеется мощная пачка глинистых пород, значительно ниже градиента верхнебалахонской, возрастающего скачком до 3,4—4,3 (прослежены по Ольжерасскому моноклиналу). Различие состоит, по-видимому, в соответствующей теплопроводности и трещиноватости глинистых пород, с одной стороны, и песчаников с углями, с другой.

Упрочнение песчаников происходит вследствие физико-химического воздействия газовой среды и термальных вод в зоне тектонически нарушенных элементов залегания, являющихся или путями их миграции, или естественными резервуарами. При этом следует отметить, что не только жидкая среда, но и газовая способствует повышению механической прочности пород и это сказывается не только в «залечивании» трещин кальцитом и образовании вторичных минералов, но и в глубоких структурных изменениях породного скелета и его минерализации.

Высокий уровень напряжений отражается на физико-механических свойствах пород; повышаются упругие свойства и способность к накапливанию энергии, снижается пластичность. Так, соответственно давлению налегающей толщи ~1 км скорость распространения упругих волн увеличивается на 20—40% (рис. 43 и 44), а анизотропия пород уменьшается. Плотность пород (см. табл. 17 и 18) с глубиной незначительно возрастает, что способствует росту упругих показателей (рис. 45). Эксперименты при вдавливании штампа в гидростатически нагруженный образец в этом отношении показательны (см. главу II, § 5).

Градиент увеличения модуля упругости составляет 4% на 100 м глубины. Связь прочности при одноосном сжатии с глубиной не устанавливается. В качестве более надежного технологического показателя следует принимать предложенный Л. И. Бароном так называемый осредненный коэффициент крепости, сочетающий сжимающие и растягивающие напряжения и

наиболее полно отражающий физический смысл актов разрушения пород. Этот коэффициент согласуется с производственными нормативами, имея градиент 0,07 на 100 м глубины.

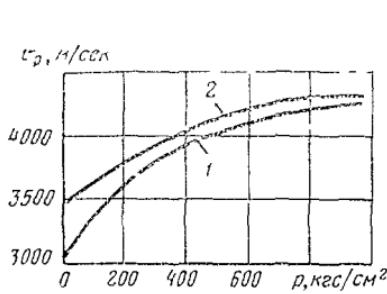


Рис. 43. Зависимость скорости распространения продольной волны v_p в песчанике от одностороннего давления p .

1 — параллельно слоистости,
2 — перпендикулярно слоистости

На основе статистически осредненных данных были получены некоторые корреляционные связи, позволяющие на основе показателя $\sigma_{\text{ж}}$ рассчитать необхо-

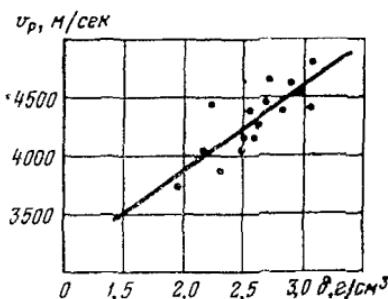


Рис. 44. Зависимость скорости распространения продольной волны v_p от плотности δ

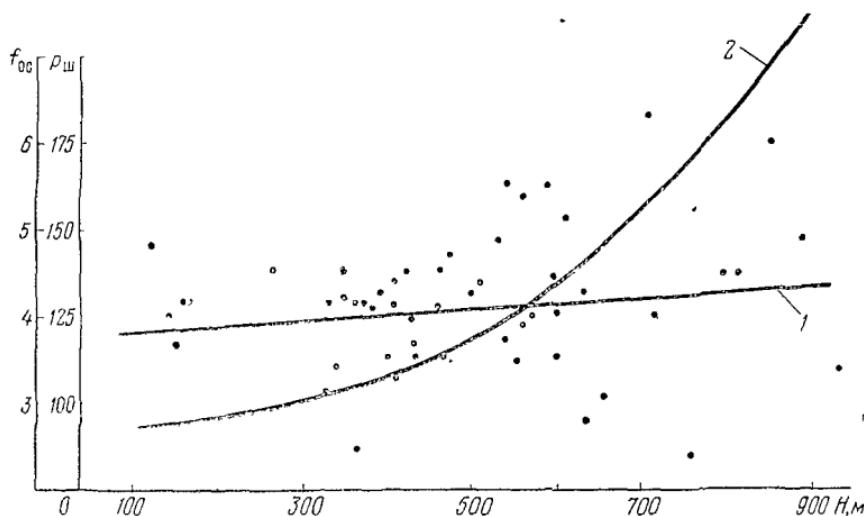


Рис. 45. Изменение свойств пород с глубиной:
1 — зависимость осредненного коэффициента $f_{\text{ос}}$ от глубины H ; 2 — зависимость твердости $\rho_{\text{ш}}$ от глубины H

димые механические параметры, т. е. $\sigma_{сж} = 7,7\sigma_p + 226$ с коэффициентом корреляции $r=0,6$ и границами доверительного интервала $0,27 < r_0 < 0,76$, где σ_p — прочность при одноосном растяжении. Связь между параметрами вдавливания p_0 и $p_{ш}$ и прочностью $\sigma_{сж}$ представляется зависимостью

$$\sigma_{сж} = 0,1 \left(\frac{p_0 + p_{ш}}{2} \right),$$

где $p_0 = 0,6p_{ш} + 9,5$ ($r=0,78$; $0,6 < r_0 < 0,87$).

На этой основе величина $p_{ш}$ определяется, как $p_{ш} = 12\sigma_{сж}$. В свою очередь, твердость по штампу $p_{ш}$ имеет связь с величиной модуля упругости, т. е. $p_{ш} \approx 0,04E$ ($r=0,8$; $0,64 < r_0 < 0,9$) или $E = 300\sigma_{сж}$.

Используя связи между различными механическими параметрами, можно дать приближенную оценку тех структур, по которым имеется только величина прочности $\sigma_{сж}$.

Прочностные, упругие и реологические параметры породной толщи (см. табл. 17—20) позволяют количественно более строго оценить свойства пород глубоких горизонтов.

Таблица 17

Расчетные механические параметры песчаника
по I синклинали

№ скважин	Предел прочности, кгс/см ²		Твердость по штампу $p_{ш}$, кгс/мм ²	Модуль упругости $E \cdot 10^{-5}$, кгс/см ²	Коэффициент сцепления, кгс/см ²
	сжатие $\sigma_{сж}$	растяжение σ_p			
6536	900	88	108	2,7	225
6557	1000	100	120	3,0	250
6541	900	88	108	2,7	225
6528	1180	124	142	3,54	295
6570	1280	136	154	3,84	320
6532	1400	151	168	5,2	350
6724	500	30	60	1,5	125
6903	1230	133	150	3,8	308

При анализе факторов, влияющих на прочность пород важное значение уделено гидрогеологическим условиям бассейна, поскольку горный массив является двухфазной системой (порода — жидкость в тре-

Таблица 18

**Свойства плотности и пористости пород шахты
«Верхняя Маганакская»**

Порода	Глубина отбора проб, м	Пористость, %		Плотность, г/см ³
		открытая	абсолютная	
Скв. 6506				
Песчаник тонкозернистый	295,20	3,09	6,8	2,60
Песчаник алевритовый	299,50	5,07	8,6	2,54
То же	314,50	3,25	5,13	2,59
»	320,20	5,07	7,0	2,53
»	327,0	6,06	8,4	2,51
Песчаник тонкозернистый	328,0	2,47	4,69	2,65
Песчаник алевритовый	329,0	5,72	8,06	2,51
Песчаник среднезернистый	344,0	3,9	6,21	2,57
Песчаник тонкозернистый	479,0	4,04	7,28	2,55
Переслаивание песчаника и алевролита	518,0	6,01	7,3	2,54
То же	527,0	7,48	8,71	2,51
Алевролит	534,5	6,46	7,33	2,53
То же	557,0	4,22	5,51	2,58
»	558,0	5,23	7,98	2,53
»	560,0	6,0	8,15	2,48
»	561,0	6,4	8,01	2,52
Переслаивание алевролита	640,0	3,55	5,84	2,59
То же	656,0	4,74	4,98	2,48
Песчаник среднезернистый	765,9	2,21	3,64	2,76
То же	791,0	4,41	4,76	2,61
Переслаивание алевролита и песчаника	851,0	3,07	4,43	2,6
То же	936,0	5,8	7,89	2,56
»	944,5	5,99	8,06	2,51
Песчаник мелкозернистый	971,5	2,46	3,68	2,64
То же	984,5	4,06	5,86	2,58
»	999,0	3,34	4,99	2,67
Переслаивание песчаника и алевролита	1069,8	3,86	5,54	2,56
То же	1074,0	2,66	3,65	2,66
Песчаник мелкозернистый	1091,0	3,84	5,19	2,56
То же	1097,5	4,51	5,11	2,6
»	1099,5	3,07	4,65	2,67
Песчаник алевритовый	1100,5	4,07	4,08	2,59
То же	1101,5	3,89	4,75	2,61
»	1102,5	3,37	5,51	2,58
Песчаник мелкозернистый	1133,0	2,4	2,61	2,66
То же	1134,6	2,2	3,26	2,68

щинах и порах) с точки зрения механики и трехфазной — при рассмотрении кинетики химических реакций. Влияние побовой и трещинной вод следует рассмотреть раздельно. Пбровое давление значительно в глубинных породах с очень большим тектоническим напряжением. Однако породы месторождения даже на верхних горизонтах редко имеют открытую пористость выше 4—6 %, что, в свою очередь, мало снижает их прочность. С глубиной плотность пород незначительно возрастает, например по полю шахты «Верхняя Магаканская» (см. табл. 18).

Пбовая вода, как было установлено при экспериментах вдавливанием штампа с нагнетанием воды под давлением, значительно увеличивает пластичность пород и снижает прочность. Снижение прочности (при одноосном сжатии) имеет место и в условиях длительного замачивания без давления (рис. 46

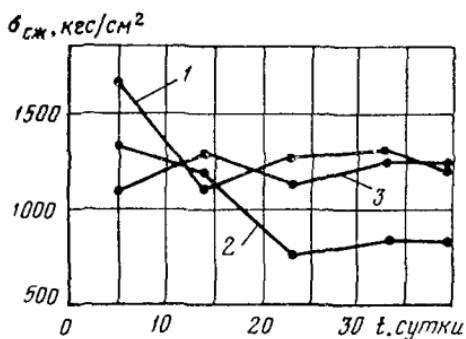


Рис. 46. Изменение прочностных свойств песчаников при увлажнении: для различной глубины:

1 — 422,4 м, 2 — 424,5 м, 3 — 500,0 м

и 47). Фильтрация растворов в геологические промежутки времени через породный скелет даже с низкой открытой пористостью способствует глубоким физико-химическим его преобразованиям, влияющим на прочность. Переход от глинистых и глинисто-карбонатных цементов к гидрослюдистым, карбонатно-глинистым и карбонатным с увеличением глубины свидетельствует об активных процессах минерализации породного скелета.

Не меньшее значение имеют пути движения подземных вод, являющиеся границами раздела пород различной прочности. Такими путями являются трещины. При переходе на большие глубины приобретает значение давление воды в трещинах, которое вследст-

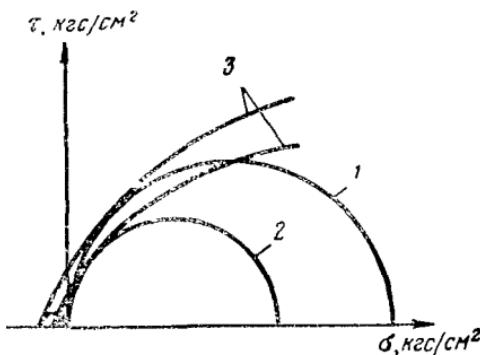


Рис. 47 Влияние увлажнения песчаников на их прочность

1 — воздушно сухие ($C_0=275$ кгс/см², $\phi_0=51^\circ$), 2 — увлажненные в течение 1—5 суток ($C_1=161$ кгс/см², $\phi_1=51^\circ$), 3 — увлажненные в течение 20—30 суток ($C_2=110$ кгс/см², $\phi_2=48^\circ$)

вие гидравлического эффекта способствует повышению напряженности в менее напряженных элементах массива под действием более напряженного. Проницаемость трещин с глубиной увеличивается вследствие снижения вязкости растворов при возрастании температуры.

Зональное распределение различных типов вод (в окислительной и восстановительной фазе, интенсивного и медленного водообмена) определилось в результате длительного палеогидрологического и тектонического развития бассейна. В крупных зонах нарушений имеется возможность разгрузки глубоких подземных вод. Трещины заполняются карбонатом, иногда с сульфидной минерализацией (1—1,5 г/л) и битумизацией. В зоне эффективной трещиноватости выветривания воды опреснены (~0,6 г/л). Пути миграции вод осадочного происхождения также имеют свою зональность и приурочены к тектонически нарушенным элементам структур. В подземных водах на та-

Таблица 19

**Физические свойства пород поля шахты «Коксовая»
(скв. 6946)**

Порода	Глубина отбора пробы, м	Объемный вес γ , гс/см ³	Удельный вес δ , гс/см ³	Влажность W , %	Гористость d , %
Алевролит с карбонатным цементом	358—360	2,64	2,7	0,36	2,22
То же	360—365	2,7	2,74	0,46	1,45
Песчаник мелкозернистый алевролитовый	368—374	2,66	2,68	0,46	0,75
То же	374—380	2,68	2,72	0,42	1,47
»	380—387	2,58	2,62	0,4	1,53
Песчаник мелкозернистый с глинисто-карбонатным цементом	390—388	2,63	2,7	0,35	2,39
То же	420—422	2,8	2,87	0,32	0,42
»	424—430	2,66	2,75	0,28	3,27
Песчаник мелкозернистый с глинисто-карбонатным цементом	440—454	2,6	2,67	0,35	2,55
То же	474—480	2,64	2,69	0,31	1,88
Песчаник мелкозернистый, карбонатный	485—490	2,62	2,68	0,68	2,24
То же	490—495	2,65	2,68	0,61	1,12
»	495—500	2,52	2,6	0,62	3,08
Песчаник мелкозернистый с глинисто-карбонатным цементом	502—509	2,65	2,7	0,54	1,85
То же	609—514	2,66	2,72	0,35	2,2
Песчаник среднезернистый с карбонатным цементом	519—525	3,0	3,2	0,52	2,5
Песчаник разнозернистый, гравелистый	525—530	2,6	2,65	0,5	1,9
Алевролит доломитизированный	532—550	3,0	3,2	0,2	2,3
То же	550—560	2,6	2,7	0,2	2,2
Алевролит доломитизированный	562—565	2,62	2,68	0,51	2,24
То же	565—570	2,65	2,65	0,58	1,49
Песчаник мелкозернистый, карбонатный	574—578	2,65	2,69	0,4	1,49
Песчаник среднезернистый с глинисто-кальцитовым цементом	580—585	2,62	2,68	0,61	2,24
То же	585—595	2,62	2,65	0,55	1,13
Песчаник мелкозернистый	600—615	2,72	2,72	0,53	1,45
То же	615—630	2,66	2,7	0,72	1,48

T-6

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД КОНГРУБ ВЫДАЮТСЯ ИМ. КАЛНИНА

ких участках очень высокое содержание сульфат-иона (>1 г/л) и низкое значение рН ≈ 6 . Вмещающие уголь породы (песчаники, аргиллиты) на этих участках осветлены и выщелочены на значительную глубину (до 120—250 м). Имеет значение тип нарушения элемента структуры. Несогласные взбросы и надвиги образуют карманы, препятствующие свободному протеканию вод, что отразилось на свойствах пород восточных крыльев.

§ 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ОЦЕНКЕ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

При переходе на глубокие горизонты наиболее перспективными в отношении наличия коксующихся углей является I и III синклинали. Тектоническая осложненность Прокопьевского горного массива с глубиной не ослабевает, поэтому возрастают напряженность, газообильность, температура и т. д. Удароопасность с глубиной, как правило, повышается. Однако ее снижение возможно при грамотных технологических решениях и всестороннем учете ряда факторов. Важное значение приобретает изученность механических свойств пород.

Как показывает анализ ситуаций, сопутствующих проявлениям горных ударов, зафиксированных в Кузбассе, можно выделить несколько основных факторов. Подавляющее количество горных ударов в Прокопьевском районе произошло на сближенных пластах Внутренних, Горелом и Лутугинском. Обычно это результат разрушения целиков, реже — призабойной части пластика. При этом редко учитывается влияние целиков на проводники пластов, ослабление целиков шурфом, при подходе к нарушению, при встречном ведении забоев и т. д.

Сближенность пластов приводит к концентрации напряжений при отработке подрабатываемого либо надрабатываемого пластика. Особую роль играет нарушенность массива. На пластах Лутугинском и Горелом зафиксирован ряд горных ударов в аналогичной ситуации, когда пласты сближены и находятся в зоне крупных тектонических нарушений. Отработка верхних пластов, вероятно, способствовала возможности

сдвижений значительной массы пород разбитого на блоки западного крыла V синклинали. При этом на увеличение напряжений оказывается близость замка синклинали. Такая нарушенность может способствовать длительным сдвигениям и привести к горным ударам.

Сопутствующим фактором при горных ударах является повышенная газоносность, приводящая к выбросу разрушенной горной массы. В пликативных нарушениях и в зонах разломов, как правило, имеются участки повышенной газоносности, которая с глубиной заметно повышается. Температура пород на глубине 1000 м повышается до 20—25°C.

Во всех приведенных ситуациях прочность пород непосредственной и основной кровли высокая и мощность слоев от средних (10—15 м) и выше. Для пород характерна анизотропия свойств вдоль и поперек слоистости, при этом упругие свойства вдоль слоистости с увеличением размера слоя снижаются незначительно. Упругие параметры при увеличении размера слоя поперек слоистости заметно убывают (рис. 48). При увеличении размера угольного блока коэффициент анизотропии параболически возрастает. Отсюда сле-

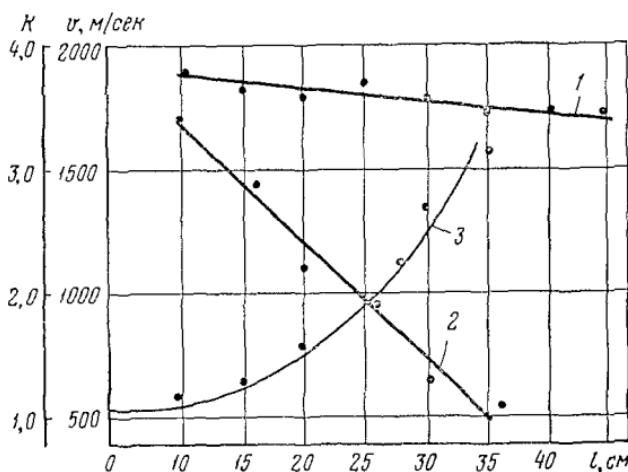


Рис. 48. Анизотропия скоростей распространения продольных ультразвуковых волн в угольных блоках различного размера:

1 — параллельно слоистости, 2 — перпендикулярно слоистости, 3 — коэффициент анизотропии

дует вывод, что при круtyх пластиах и расположении забоя поперек простираия трещин породы могут накапливать упругую энергию и тем больше, чем значительней пласт и прочнее порода. Разрядка энергии может быть двоякой. При высоких пластических свойствах пород и склонности их к ползучести деформация во времени снимает часть напряжений. Если породы имеют выраженные хрупкие свойства, то разрядка возможна за счет мгновенного разрушения. Критерием должна служить скорость деформаций. Если скорость деформаций меньше скорости смещения, то возможен горный удар.

Приведенный анализ показывает, что удароопасность является предельной характеристикой устойчивости пород и включает в себя весь комплекс факторов, учитываемых при расчете устойчивости выработок: нарушенность элемента структуры; углы падения; углы встречи выработки с нарушением; сближенность пластов, мощность их и слоев, слагающих кровлю; газоносность пластов; анизотропия пород; паспортные данные прочности пород; упругие характеристики и склонность к ползучести; хрупкопластические свойства пород.

В местах, где были зарегистрированы случаи горных ударов (в восточном крыле VI синклинали, в замке Абинской антиклинали, в западном крыле V синклинали поля шахты «Коксовая» и в западном крыле Маганакской антиклинали поля шахты «Ноградской») определены физико-механические свойства пород, которые сравнивались с породами остальных синклиналей (табл. 21).

Принимая за эталон удароопасность пород V и VI синклиналей, и учитывая строение толщи, можно сделать следующие обобщения. Основные маркирующие пласти IV Внутренний, Горелый, Мощный имеют высокую крепость, превышающую 1,5. Напряженность структур I и II синклиналей несколько ниже напряженности V и VI синклиналей, для III синклинали она значительно понижается. Рассредоточенность пластов, небольшая мощность пластов углей и породных слоев, преобладание алевролитовых разностей снижают возможности возникновения удароопасных ситуаций в I синклинали. Однако высокая газообильность и пере-

91

Сравнительные данные свойств пород по степени издробленности

III		IV		V		VI		VII		VIII	
CHARGE	V _{TH}	CHARGE	V _{TH}	CHARGE	V _{TH}	CHARGE	V _{TH}	CHARGE	V _{TH}	CHARGE	V _{TH}
Печанкин	0,5- 1,5	600-900	15-20	35	3,15-4,2	1,95- 1,55	0,5- 0,3	1,8- 3,0	2,9- 3,6	1,3-1,7	1,5-1,7
Архипов	550-850	8,5-17,5	50	-	-	0,4- 0,6	1,8- 2,1	0,75- 3,9	-	-	-
Печанкин	0,6- 1,4	600-1500	170-242	39	3,1)-4,15)	3-4,79	0,5- 0,7	1,7- 2,8	2,3- 4,3	1,5- 2,8	1,5- 2,1
Архипов	700-1000	20-192	37	2,5-3,2	1,0-1,4	0,4- 0,5	1,1- 2,0	1,0- 2,2	-	-	-

Таблица 22

Физико-механические свойства пород контуров выработок шахты «Коксовая»

Выработка, координаты	Порода, координаты пробы	Временное сопротив- ление сжатию $\sigma_{\text{сж}}$, кгс/см ²		Временное сопротив- ление растяжению $\sigma_{\text{р. }}$, кгс/см ²		Коэффициент вариа- ции, %	Временное сопротив- ление растяжению $\sigma_{\text{р. }}$, кгс/см ²		Скорость упру- гих волн, м/сек	Модуль упругос- ти (динамический) $E_d \cdot 10^{-5}$, кгс/см ²	Коэффициент Пуассона, ν	Условный предел текущести ρ_0 , кгс/см ²	Твердость по штампу $\rho_{\text{шт}}$, кгс/см ²
		продольных v_p	поперечных v_s	продольных v_p	поперечных v_s		продольных v_p	поперечных v_s					
Квершилаг № 56, гор. 100 м, рассто- яние 15 м от кров- ли пласта IV Внут- реннего	Алевролит, переслаи- вание с песчаником, кровля пласта IV Внут- реннего	715	170	8	90	3550	2345	3.0	0,14	75	115		
То же	Песчаник мелковзернистый, кровля пласта IV Внутреннего (30 м от контакта)	615	120	12	95	3670	2470	3,2	0,11	58	100		
Штрек II оси антиклинали, гор. 100 м	Песчаник мелковзернистый (5 м от замка антиклинали пласта IV Внутреннего, кровля)	940	95	20	60	3600	2400	3,2	0,14	88	140		
Квершилаг № 39, гор. 200 м	Переслаивание песчаника и алевролита (5 м от пласта Мощного, кровля)	670	170	14	85	3700	2370	3,15	0,15	65	110		

Конфид. № 39 тп. 200 к.	Архивный реестр	38	11	70	530	9280	6300	611	55	104
Прил. 1	Пересыпало архивные документы в ящики	50	55	7	50	6300	3940	25	61	69
Прил. 2	Пересыпало архивные документы в ящики	45	105	18	30	3820	200	25	50	55
Прил. 3	Архивные документы в ящики	50	105	15	55	9180	9200	93	619	55
Прил. 4	То же, на 10 кг	50	115	15	55	9180	9200	93	619	55
Прил. 5	Пересыпало архивные документы в ящики	40	55	25	32	3800	3295	325	615	40
Конфид. № 33 тп. 207	Пересыпало архивные документы в ящики	100	150	12	95	3700	2950	315	61	125
Прил. 1	Пересыпало архивные документы в ящики	100	150	12	95	3700	2950	315	61	125
Прил. 2	Архивные документы в ящики	100	120	10	75	360	250	35	618	71
Прил. 3	Архивные документы в ящики	100	120	10	75	360	250	35	618	71
Конфид. № 36 тп. 200 к.	Архивный реестр	35	15	60	269	2070	920	615	45	88
Прил. 1	Пересыпало архивные документы в ящики	450	100	19	70	3970	2950	275	611	108
Прил. 2	Пересыпало архивные документы в ящики	450	100	19	70	3970	2950	275	611	108

Городской потребительский кооператив	Белогорск № 36, ул. Северная, 20, к. дом 200 и	Печник с магазином Сергей Петрович Макаров	1000	180	16	19	3720	2430	3,4	0,4	109	21
Городской потребительский кооператив	Белогорск № 36, ул. Северная, 20, к. дом 200 и	Печник с магазином Сергей Петрович Макаров	1000	180	16	19	3720	2430	3,4	0,4	109	21
Городской потребительский кооператив	Белогорск № 36, ул. Северная, 20, к. дом 200 и	Печник с магазином Сергей Петрович Макаров	1000	180	16	19	3720	2430	3,4	0,4	109	21
Городской потребительский кооператив	Белогорск № 36, ул. Северная, 20, к. дом 200 и	Печник с магазином Сергей Петрович Макаров	1000	180	16	19	3720	2430	3,4	0,4	109	21
Городской потребительский кооператив	Белогорск № 36, ул. Северная, 20, к. дом 200 и	Печник с магазином Сергей Петрович Макаров	1000	180	16	19	3720	2430	3,4	0,4	109	21

Пасеки при р. 200 км (на 0,9° з півдня- ми) в Бургун- дії	Ансбах, Універ- ситет, 190	70	14	55	300	200	17	0,9	87	55
To the Ansbach University, (anterior), near the r. N. Bautzen, 2— 5 km northward	Ansbach University, ca. 1/4 Bautzen, 5-7 km from Ansbach	100	12	70	380	295	9,7	0,17	65	101
To the Ansbach University, 113	15	80	370	265	6,1	0,12	36	96		
To the Ansbach University, 125	11	90	380	230	6,0	0,17	66	133		
To the Ansbach University, 100	13	80	380	250	3,5	0,12	39	91		
To the Ansbach University, 141	14	92	390	260	3,7	0,14	56	92		
To the Ansbach University, 153	15	93	375	230	5,6	0,11	72	116		
To the Ansbach University, 161	19	83	375	240	5,6	0,11	72	116		
To the Ansbach University, 180	15	80	370	240	5,6	0,13	61	92		
To the Ansbach University, 190	10	55—58	370	250	5,4	0,16	66	115		

Таблица 23

Физико-химические свойства горючих смол Гарсона (шахта «Коксова»)

Номер ядра	Горючая часть трубки из кокса, %	УМПИ-3 ^a и III, МС-30 ^b и III	Химический анализ			Прочее профиль. аналог.			
			С ₁ %	С ₂ %	С ₃ %	С ₄ %	С ₅ %	С ₆ %	
Алгоритм горючий	0,0-0,5	130	330	210	0,22	0,9	30	120	155
Алгоритм термо-термий	0,6-2,5	120	335	215	0,21	0,9	30,5	125,5	179,9
Печная смоло-термий	2,5-7	160	335	220	0,2	0,8	95	164	135
Алгоритм термо-термий	7,0-8,0	275	365	210	0,33	2,6	366	255,5	151
Печник смоло-термий	8,0-12,0	100	330	210	0,11	2,1	92	140,5	114,1
Печник термо-термий смоло-термий	12,0-16,5	900	350	255	0,18	2,5	150	215	111,5
Печник коксо-термий	16,5-17,0	225	415	260	0,19	3,2	110	186,5	120
То же	17,0-18,0	215	350	250	0,19	2,3	95	175	130
Печник смол. коксо-термий	18,0-20,0	140	410	210	0,27	2,9	170	270,1	146,7
Печник термо-термий смоло-термий	20,0-22,0	140	450	265	0,22	3,8	190	107,5	
Алгоритм коксо-термий	22,0-24,0	120	400	220	0,26	3,8	80	151,7	114,7
Печник смол. смоло-термий	22,0-26,0	180	365	215	0,24	2,3	105	193	154
Печник коксо-термий, тепло-термий	25,0-28,0	245	365	210	0,36	2,8	94	185	162
Алгоритм термий	28,0-35,5	104	365	215	0,22	2,4	35,5	144	91,1
Печник в пачке для коксо-термий	38,5-50,0	153	400	220	0,21	3,2	175	165	

* $K_{10} = 1,64 - 2,25$

TÓM 91

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛЮ КОНКУРСА ВЫРАБОТКА УСТРИЦ «НГДУКА»

мятые пласти тонкослоистой толщи на юге указывают на возможность появления внезапных выбросов. По механическим параметрам породы близки к свойствам пород V и VI синклиналей.

II синклиналь по всем показателям физико-механических свойств менее удароопасна по сравнению с V и VI синклиналями. Для II синклинали характерны тонкие сближенные угольные пласти, преобладание алевритовых разностей и наличие угольных примесей на контактах слоев. Породы упругие и менее склонны к ползучести, но с выраженной склонностью к мгновенным пластическим деформациям. В области повышенного горного давления в тектонически нарушенных зонах на контуре выработок породы склонны к пучению и неограниченно вязкому течению. В северном замыкании II синклинали устойчивость пород выше, но появляется опасность проявления горных ударов.

Таким образом, породы III синклинали по показателям механических свойств менее предрасположены к горным ударам на глубоких горизонтах.

Устойчивость пород III синклинали более высокая, чем II синклинали, поскольку показатели прочности, упругости, пластичности и ползучести характеризуют породы как податливую и устойчивую среду. Высокий коэффициент хрупкости (0,5—0,8) и низкий коэффициент пластичности (1,8—3,0) дают основание полагать, что сдвижение кровли будет происходить без особых осложнений.

Для более детального исследования устойчивости пород глубоких горизонтов с учетом влияния горных выработок могут быть использованы результаты испытаний шахтных проб (табл. 22—24).

Приведенные данные экспериментов могут быть взяты за основу характеристики почвы и кровли угольных пластов, которые еще детально не изучены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Закономерности тектонического развития Кузнецкого бассейна отразились на формировании в Прокопьевско-Киселевском районе своеобразной структурной зоны синклинальных и антиклинальных прогибов, разбитых на тектоноблоки серией разломов северо-восточного простираия. Детальное изучение гидро-геологической и геотермической обстановки, условий метаморфизма и газоносности пород больших глубин свидетельствует о тектонической активности бассейна и в настоящее время. Между этими процессами и возникающими явлениями устанавливается взаимообусловленность и закономерность зонального их распространения.

Влияние вековых тектонофизических и гидрохимических процессов в угленосной толще подчилило такой же закономерности и формирование физико-механических свойств горных пород и углей.

Анализ физико-механических свойств пород и углей глубоких горизонтов Прокопьевского месторождения дает основание сделать следующие выводы.

1. Напряженность рассматриваемого элемента горного массива в пределах Прокопьевского месторождения определяется своеобразным расположением разломов, расчленивших его на отдельные тектоноблоки. Тектоническая составляющая напряженности в элементах складок второго порядка (синклиналях и антиклиналях) изменяется соответственно ориентации разломов. Обратное (юго-западное) падение разлома *ММ* как бы изолирует III синклиналь от высоких тектонических напряжений. Напротив, II синклиналь и граничащая с ней Тайбинская антиклиналь сдавлены противоположным падением разломов *ММ*, *RR*,

VV и др. Тектоническая напряженность II синклинали, а также в осложненных участках I, V и VI синклиналей значительно выше, чем III синклинали. В южном замыкании перечисленных структур напряженность снижается.

2. Исходя из допущения пропорциональности между прочностью и действующими в толще напряжениями, в качестве показателя напряженности структур использована среднестатическая величина прочности песчаника как основного материала до глубины 1000 м. Как показали исследования, прочность песчаников в западных крыльях синклиналей ниже, чем в восточных (за исключением III синклинали), что соответствует общезвестному положению о разгруженности висячих боков тектоноблоков и большей напряженности лежачих. Прочность пород в замках синклиналей несколько ниже, чем в замках антиклиналей, но, как правило, выше, чем в крыльях. По простиранию структур паибольшая концентрация напряжений соответственно максимальному значению прочности отмечена для I синклинали на уровне VII разведочной линии и VI разведочной линии для VI синклинали.

3. Зоны наиболее высокой прочности песчаников совпадают с путями движения (и разгрузки) минерализованных подземных вод (карбонатная, иногда сульфидная минерализация), что позволяет считать природу упрочнения пород результатом физико-химических преобразований и не связывать с прямым воздействием тектонической раздробленности. Своеобразное падение глубоких разломов *MM* и *SS*, оконтуривающих III синклиналь, ограничивает зону менее активных химических процессов, способствующих восстановительной фазе, за счет чего породы более осветлены и выщелочены на значительную глубину (до 250 м).

4. Удароопасность пород в районе является следствием ряда факторов: высокой тектонической напряженности структуры, сближенности угольных пластов, высокой прочности, упругости угольных и породных слоев и несовершенства технологических решений при отработке пластов. Зоны высокой концентрации напряжений, пересекающие структуры с северо-запада на

юго-восток, являются благоприятными для проявления горных ударов как с точки зрения природных обстоятельств, так и физико-механических свойств. При переходе к пликативным нарушениям на участках высокой газообильности, установленных ранее для Кузбасса, удароопасность снижается, но появляется возможность появления внезапных выбросов. В целом III синклиналь наименее удароопасна, II синклиналь по удароопасности сравнима с V и VI синклиналями, в которых зафиксированы горные удары, I синклиналь несколько менее удароопасна.

5. Критерием оценки предрасположенности пород к горным ударам можно считать физико-механические свойства угольных пластов и породных слоев (в удароопасной ситуации):

а) высокую крепость углей в основных пачках ($f \geq 1,5$) и в среднем по пласту ($f \geq 0,6$);

б) мощные слои пород основной кровли (более 10 м), имеющие следующие прочностные и деформационные характеристики: $\sigma_{сж} = 800 \div 1200$ кгс/см², коэффициент сцепления 200—260 кгс/см², модуль упругости $3 \div 4 \cdot 10^{-5}$ кгс/см², параметры ползучести $\delta = 1,5 \div 2 \cdot 10^{-3}$ сек^{0,3}, коэффициент хрупкости $K_{xp} = 0,5 \div 0,7$, коэффициент пластичности $K_{pl} = 1,5 \div 2$;

$$\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} = 12 \div 30 \text{ и } \frac{\sigma_{p\parallel}}{\sigma_{p\perp}} = 1 \div 2.$$

6. С переходом на глубокие горизонты возрастает напряженное состояние пород, что вместе с тектонической нарушенностью будет способствовать снижению их устойчивости. Детальная оценка устойчивости пород может быть выполнена на основе сведений о свойствах пород в зависимости от глубины.

7. Разносторонняя характеристика свойств и состояния пород массива может быть получена только по комплексной методике исследований.

8. Полученные сведения о комплексе свойств пород могут быть использованы при составлении паспортов горных пород (по методике В. В. Ржевского и Г. Я. Новика), кадастра по угольным бассейнам, а также при оценке горно-геологических явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Аммосов И И, Еремин И В Трещиноватость углей М, изд АН СССР, 1960
- 2 Аксененко М И, Ненашева Р И, Пельдяков Е Б Изменение состава в крепости горных пород Прокопьевского района Кузбасса — В сб «Исследования по вопросам горного дела в Кузбассе» М, «Недра», 1968 «Труды КузНИИ», вып 16
- 3 Аксененко М И, Болдырев П И Исследование физико-механических свойств алевролитов и аргиллитов и классификация горных пород Прокопьевско Киселевского района Кузбасса — В сб «Исследования по вопросам горного дела в Кузбассе» Вып 11, М, «Недра», 1964
- 4 Белицкий А А Классификация тектонических разрывов и геометрические методы их изучения М, Госгеолтехиздат, 1953
- 5 Баничук Н В Расчет нагружения упругопластического тела — Изв АН СССР, «Механика твердого тела», 1969, № 1.
- 6 Безухов И И Основы теории упругости, пластичности и ползучести М, «Высшая школа», 1968
- 7 К методу исследования механических свойств горных пород Криворожского бассейна — В сб «Механические свойства горных пород», М, ЦТИУгия, 1959 Ф А Белаенко, Ж С Ержанов, В Т Глушко, Ю Д Берлин
- 8 Белицкий А А Механизм образования трещиноватости и тектонических разрывов — В сб «Проблемы тектонофизики», М, Госгеологотехиздат, 1960
- 9 Бобров Г Ф Анизотропия углей Кузбасса и их реологические свойства — «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», № 2, 1970
- 10 Балута А М, Ривкин Н Д, Тохтуев Г В Ожидаемые горно-геологические условия и формы проявления горного давления на глубоких горизонтах шахт Криворожского бассейна Киев, «Наукова думка», 1972
- 11 Бялик Д Я, Курленя М В, Леонтьев А В Влияние предварительного распора инденторов скважинного деформометра на их перемещения Новосибирск, «Наука» Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых» 1969, № 6

12. Белицкий А. А. К вопросу о механизме образования клиновидных трещин. Новосибирск, «Наука», 1949 («Труды горно-геологического института ЭСФАН СССР», вып. 6.)
13. Волков С. Д. Статистическая теория прочности. Машгиз, Свердловск, 1960.
14. Воларович М. П., Балашов Д. В. Изучение влияния всестороннего давления до 1000 кг/см² на скорость распространения упругих волн в образцах углей. М., изд. АН СССР, 1966. («Труды геофиз. ин-та», вып. 34.)
15. Воларович М. П. Исследования упругих свойств горных пород при высоких всесторонних давлениях. — В сб.: «Физические свойства горных пород при высоких давлениях». М., изд. АН СССР, 1962.
16. Востров В. К. Осесимметрическая контактная упругопластическая задача для полупространства. — «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», 1970, № 2.
17. Гуревич Г. И. О зависимости между напряжениями и перемещениями при больших деформациях в общем случае трехмерного нагружения. — В сб.: «Некоторые вопросы механики деформируемых сред». М., изд. АН СССР, 1959.
18. Гзовский М. В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байкальского антиклинария. Части III и IV. М., изд. АН СССР, 1963.
19. Гзовский М. В. Тектонофизическая оценка напряжений в земной коре. — Доклады на Всесоюзной конференции по механике горных пород. Апатиты, Ротапринт, 1970.
20. Гилман Дж. Дж. Скол. Пластичность и вязкость кристаллов. — В сб.: «Атомный механизм разрушения». М., Металлургиздат, 1963.
21. Глушко В. Т., Усаченко Б. М., Шепелев А. С. Об описании реологических свойств пород механическими моделями. — В сб.: «Проблемы реологии горных пород». Киев, «Наукова думка», 1970.
22. Голубицев О. Н. Механические и абразивные свойства горных пород и их буримость. М., «Недра», 1968.
23. Грицког И., Акимов В. С., Цыцаркин В. Н. Описание работы крепи горных выработок с помощью структурных реологических моделей. — В сб.: «Горное давление в капитальных и подготовительных выработках». Новосибирск, «Наука», 1969.
24. Дацко Р. Э., Кузнецов Ю. Ф. Оценка механических свойств пород кровли сложного строения в шахтах Ленинградского месторождения горючих сланцев. — Записки ЛГИ, т. VII, вып. 1. «Шахтное строительство». Л., «Недра» 1969.
25. Гончаров С. А., Дмитриев А. П., Кузяев Л. С. Экспериментальное определение энергии излома при тепловом разрушении крепких пород. — «Физико-технические проблемы разработки полезных», 1968, № 3.
26. О сопоставимости лабораторных и натуральных параметров ползучести. — «Уголь», 1970, № 5. Авт. К. И. Дудушкина, Г. Ф. Бобров, П. В. Егоров, Г. П. Шамаиский.
27. Дудушкина К. И., Бобров Г. Ф. Комплексный метод определения физико-механических свойств горных пород. —

«Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», 1971, № 2.

28. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. М., «Металлургия», 1971.

29. Ержанов Ж. С. Теория ползучести горных пород и ее приложения. Алма-Ата, «Наука», 1964.

30. Ержанов Ж. С. Механизм возникновения тектонической составляющей горного давления в кристаллических породах. — Доклады на Всесоюзной конференции по механике горных пород. Апатиты, Ротапrint, 1970.

31. Ползучесть осадочных горных пород. В сб.: «Теория и эксперимент», Алма-Ата, «Наука», 1970. Авт.: Ж. С. Ержанов, А. С. Сагинов, Г. Н. Гуменюк, Ю. А. Векслер, Г. А. Нестеров.

32. Ержанов Ж. С., Смирнов В. Ф., Серегин Ю. Н. Ползучесть горных пород Джезказганского месторождения при изгибе. — «Вестник АН КазССР», 1970, № 9.

33. Зубков С. И. О расчете реологическими методами временного хода напряженний в очаговых зонах землетрясений. — В сб.: «Физика Земли», № 4, Изв. АН СССР, М., «Наука», 1969.

34. Заславский Ю. З. Исследование проявлений горного давления в капитальных выработках глубоких шахт Донецкого бассейна. М., «Недра», 1966.

35. Свойства горных пород и методы их определения. М., «Недра», 1969. Авт.: Е. И. Ильницкий, Р. И. Тедер, Е. С. Ватолин, М. Ф. Кунтыш.

36. Койфман М. М. Скоростной комплексный метод определения механических свойств горных пород. — В сб.: «Механические свойства горных пород». М., Изд. АН СССР, 1963.

37. Кононенко Е. С. Задача о сжатии параллепипеда между жесткими плитами без скольжения. — В сб.: «Исследования по теории сооружений», т. VI. М., Госстройиздат, 1954.

38. Костров Б. В., Никитин Л. В., Флитман Л. М. Механика хрупкого разрушения. — Изв. АН СССР, МТТ, 1969, № 3.

39. Котрелл А. Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М., Металлургиздат, 1958.

40. Крылов В. Ф. Главные направления в вопросах изучения горного давления в Кузбассе. — В сб.: «Вопросы горного давления», вып. 14. Новосибирск, изд. СО АН СССР, 1962.

41. Лучицкий И. В., Громин В. И., Ушаков Г. Д. Эксперименты по деформации горных пород. Новосибирск, «Наука», 1971.

42. Мюллер Л. Инженерная геология. М., «Мир», 1971.

43. Надай А. Пластичность и разрушение твердых тел. Т. 2. М., «Мир», 1969.

44. Осокина Д. Н., Левыкин А. И., Кудряшова В. В. Исследование поглощающих и упругих свойств горных пород и корреляций между ними. — В сб.: «Тектонофизика и механические свойства горных пород», М., «Наука», 1971.

45. Осокина Д. Н. О корреляции между затуханием упругих колебаний и сдвиговой вязкостью у твердых тел и жидкостей. — В сб.: «Тектонофизика и механические свойства горных пород». М., «Наука» 1971.

46. Пах Э. М., Сайдерсон Э. Н. Самовозгорание уг-

лей и формы выгорания угольных пластов — В сб «Геология месторождений угля и горючих сланцев», вып 7 М, «Недра», 1969

47 Панасюк В В Предельное равновесие хрупких тел с трещинами Киев, «Наукова думка», 1968

48 Панасюк В В, Андреиков А Е Об одной задаче предельного равновесия для неограниченного хрупкого тела с трещиной — В сб «Прикладная механика», т VI, вып 6 Киев, «Наукова думка», 1970

49 Петухов И М, Егоров П В Разработка мер борьбы с горными ударами на шахтах Кузбасса В сб «Горное давление и горные удары» Л, «Недра», 1971 (Труды ВНИИИ вып 82)

50 Писаренко Г С, Лебедев А А Сопротивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряженном состоянии Киев «Наукова думка» 1969

51 Работнов Ю Н Ползучесть элементов конструкции М, «Наука», 1966

52 Ржевский В В, Новик Г Я Основы физики горных пород М, «Недра», 1967

53 Ржевский В В Ямщиков В С Ультразвуковой контроль и исследования в горном деле М, «Недра», 1969

54 Руппенерт К В, Долгих М А, Матвиенко В В Вероятностные методы оценки прочности и деформируемых горных пород М «Недра», 1964

55 Рейннер М Реология М, «Наука» 1965.

56 Скок В И Тектоника и глубинный метаморфизм в Кузнецком бассейне — «Советская геология», 1963, № 5

57 Чернов О И Внезапные взбросы угля и газа Геология месторождений угля и горных сланцев М «Недра» 1969

58 Шрейнер Л А и др Деформационные свойства горных пород при высоких давлениях и температурах М, «Недра», 1968

59 Ямщиков В С, Лыкова Э Л О возможности определения вязкоупругих свойств горных пород акустическими методами — В сб «Проблемы реологии горных пород» Киев, «Наукова думка», 1970

О ГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Г л а в а I Характеристика Прокопьевско-Киселевского района	13
§ 1 Тектонофизическая и геолого-петрографическая характеристика основных структур района	13
Г л а в а II Физическое обоснование комплексного метода оценки деформационных свойств пород	21
§ 1 Вопросы механики горных пород	21
§ 2 О критерии разрушения горных пород с позиций теории трещин	24
§ 3 Расшифровка кривой нагрузления при вдавливании плоского штампа	28
§ 4 К механизму разрушения пород под штампом	34
§ 5 Построение паспорта прочности	38
§ 6 Упругие свойства горных пород	46
§ 7 Ползучесть осадочных пород	48
§ 8 Развитие акустических методов при изучении механических параметров горных пород	76
§ 9 Аппаратура, применяемая в комплексном методе	83
Г л а в а III Анализ прочности и деформируемости пород основных структур района	88
§ 1 Структурно-механический анализ проб	88
§ 2 Распределение прочности песчаников в пределах элементов типовых структур	90
§ 3 Условия формирования прочности пород структур	99
§ 4 Использование физико-механических характеристик при оценке горно-геологических явлений	111
Заключение	123
Список литературы	126