Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, LXI, вып. 1, 1972 г.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛОТНОСТНЫХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ВСЕСТОРОННЕГО СЖАТИЯ

Э. П. Попов, В. И. Кимков

Наряду с развитием и совершенствованием традиционных способов определения давления, основанных на исследовании величин упругих деформаций горных пород, все шире применяются различные физические методы, в том числе гамма-методы определения плотности пород [1].

Первый опыт нахождения величины горного давления плотностным гамма-гамма-методом относится к 1957—1959 гг. когда совместно советскими и чехословацкими исследователями на шахтах «Анна» «Елена» в Чехословакии были выполнены измерения интенсивности гамма-излучения, рассеянного в породе, при различных внешних давлениях, испытываемых породой. Несмотря на несовершенство аппаратуры, были зафиксированы существенные изменения плотностных свойств пород в процессе изменения напряжений [2].

Эффективность плотностных методов для исследования напряженного состояния массива в первую очередь определяется деформационными свойствами пород и связанной с ними зависимостью плотностных свойств пород от величины давления, под которым эта порода находится. С целью изучения деформационных свойств пород на кафедре разработки пластовых месторождений ЛГИ изучалось (рис. 1) изменение плотности (объемного веса) образца методом узкого пучка гамма-излучения [1] в условиях всестороннего сжатия.

Испытуемый образец цилиндрической формы помещается внутрь вставной матрицы между подвижным и неподвижным пуансонами. Вставная матрица, выполненная в виде стального цилиндра с толщиной стенок 5 *мм* и с приливом в верхней части, размещается внутри основной матрицы. Толщина стенок основной матрицы равна 40 *мм*. Внутренний диаметр вставной матрицы, равный диаметру испытуемого образца, составляет 58,5 *мм*. Неподвижный пуансон упирается в выдвижной вкладыш. В приливах, заполненных свинцом и располагающихся на противоположных сторонах основной матрицы, находится источник гамма-излучения и детектор гамма-излучения. Расстояние между центрами источника и детектора составляет 20 *см*. В свинце, заполняющем приливы, и в основной матрице строго соосно просвер-

лены отверстия (коллимационные каналы) диаметром 5 *мм* и протяженностью 55 *мм* каждый, с помощью которых создается узкий пучок гамма-излучения. Как показали измерения, подобная конструкция обеспечивает коэффициент коллимации гамма-излучения для источника цезий-137, равный 0,95. Высота неподвижного пуансона выбирается таким образом, чтобы центр испытуемого образца располагался против коллимационного канала.

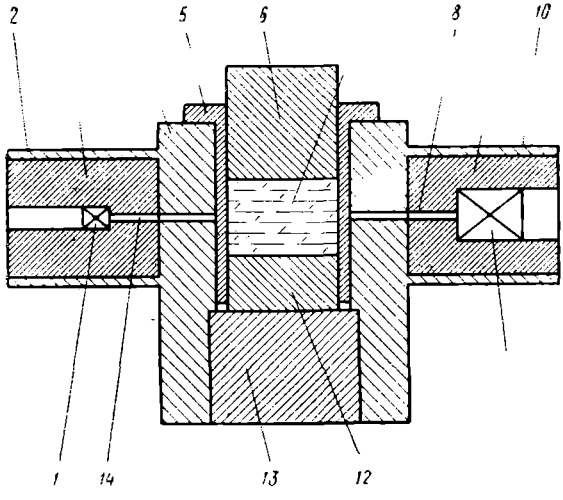


Рис. 1. Схема изменения объемного веса пород в условиях всестороннего сжатия

1 — источник гамма-излучения; *2* и *10* — приливы основной матрицы; *3* и *9* — свинцовые экраны; *4* — основная матрица; *5* — вставная матрица; *6* — подвижной пуансон; *7* — испытуемый образец; *8* и *14* — коллимационные каналы; *11* — детектор гамма-излучения; *12* — неподвижный пуансон; *13* — выдвижной вкладыш

Для создания всестороннего давления в установке используется способ матриц в модификации метода Адамса—Никольсона [3]. Давление, сжимающее образец, прикладывается к подвижному пуансону. Метод Адамса-Никольсона имеет существенные недостатки: в результате трения о стенки матрицы возникают касательные силы на внешней поверхности образца, и таким образом образуется неоднородность напряженного состояния. Исследование плотностных свойств способом просвечивания образцов узким пучком гамма-излучения позволяет устранить недостатки метода Адамса — Никольсона. Это достигается тем, что плотность определяется лишь в узкой области в пределах центральной «нейтральной» части образца.

После окончания эксперимента деформированный образец выдавливается из матрицы с помощью пресса. Предварительно, после снятия нагрузки, извлекается выдвижной вкладыш.

Для изучения деформационных свойств пород определяются плотности образца в процессе увеличения давления и постепенного уменьшения нагрузки. Установка позволяет проводить исследования при сжимающих нагрузках, достигающих 150 *т* Изменение плотности образца в ходе испытаний рассчитывается, исходя из величины интенсивности гамма-излучения, поглощенного в образце. Интенсивность излучения, прошедшего через образец, регистрируется самописцем

Н-361, движение ленты которого синхронизировано с изменением давления.

Чтобы увеличить чувствительность метода узкого пучка к изменению плотности, рекомендуется применять по возможности наиболее мягкие источники излучения (селен-75, тулий-170 и др.) Использование в установке источника селен-75 активностью около 30 *мг-экв* радия и сциптилляционного счетчика, состоящего из кристалла NaJ(Tl) размером 18×30 *мм* и фотоэлектронного умножителя ФЭУ-31, позволило добиться чувствительности аппаратуры, равной 0,005 *г/см*^{3} на 1 *мм* ленты при среднем уровне флюктуаций стрелки, не превышающем ±1 *мм*.

Плотность образца, по данным измерений интенсивности прошедшего через образец гамма-излучения, рассчитывается на основании результатов эталонирования аппаратуры на образцах с известной плотностью. Для построения эталонировочного графика используется зависимость доли гамма-излучения, поглощенного в образце, от величины произведения ρd, где ρ — плотность образца, а d — его толщина. Учитывая применение мягких источников гамма-излучения, для приготовления эталонных образцов рекомендуется брать породы или искусственно приготовляемые среды с эффективным атомным номером, равным или достаточно близким к эффективному атомному номеру исследуемых пород. Эталонные образцы приготовляются в виде плоских пластин различной толщины. Плотность эталонных образцов должна быть выше плотности исследуемых пород, чтобы обеспечить перекрытие всего диапазона изменения величины произведения ρd для испытуемого образца в процессе его нагружения. Для снятия эталонировочной зависимости эталонные образцы помещаются поочередно внутрь вставной матрицы на место испытуемого образца таким образом, чтобы плоские грани пластин были перпендикулярны оси коллимационных каналов. Регистрируемая при этом интенсивность гамма-излучения соответствует величине плотности

$$\rho = \frac{\rho_0 d}{d_0}$$

где ρ_0 — плотность эталонного образца, *г/см*^{3}; d — толщина эталонного образца, *см*; d_0 — внутренний диаметр вставной матрицы, равный диаметру испытуемого образца, *см*.

С помощью описанной установки были изучены зависимости плотности пород от давления для образцов пород с Ленинградского месторождения горючих сланцев. Исследовались две основные группы пород: известняки и горючие сланцы кукерского горизонта. Цель работ — изучить влияние перераспределения напряжения в массиве, связанного с очистными работами, на характер структурно-плотностного разреза кровли промышленного пласта и выяснить возможности использования этих изменений для выявления зон опорного давления в камерах-лавах.

Из отобранных для исследования пород приготовлялись цилиндрические образцы диаметром, соответствующим внутреннему диаметру вставной матрицы, и высотой от 3 до 4 *см*. Чтобы на результаты эксперимента не влияла инерционность аппаратуры, выбирались достаточно малые скорости нагружения. Полный цикл нагрузки и разгрузки образца до давления в 150 *т* совершался за 1,5—2 *ч*, при этом скорость нагружения и скорость разгрузки принимались равными.

При проведении эксперимента изучались: 1) зависимость плотности образцов от давления в процессе увеличения нагрузки и снятия

напряжения для пород различного состава; 2) величина остаточных уплотнений пород при различных предельных значениях нагружения; 3) характер изменения величин остаточных уплотнений при многократных нагружениях и разгрузках образцов.

В результате проведенных экспериментов установлено следующее.

На характер зависимости плотности образца от величины всестороннего сжатия существенно влияет литологический состав породы. При увеличении нагрузки до 150 *т* плотность известняка изменилась на 0,140 *г/см*^{3}, т. е. увеличилась на 6%. Для горючего сланца абсолютные величины изменения плотности достигали 0,675 *г/см*^{3}, что составляло почти 50% первоначальной плотности. Изменение плотности для известняка и горючего сланца при увеличении и уменьшении нагрузки показано на рис. 2, *а*. Величина уплотнения пород различного состава

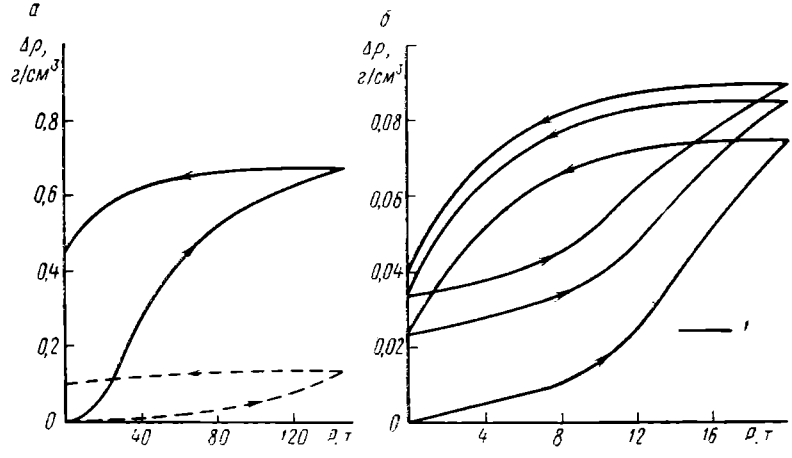


Рис. Изменение объемного веса пород: *а* — при однократном; *б* — при многократном нагружениях
1 — горючий сланец; *2* — известняк

при увеличении давления определяется главным образом их исходной пористостью. По данным анализов пористость известняков составляла 11,9%, а горючих сланцев 37%. Некоторое превышение величины уплотнения над величиной пористости для горючих сланцев может быть объяснено недостаточно плотным контактом поверхности образцов с внутренней поверхностью матрицы. Не исключено также, что при больших давлениях происходит нарушение внутренней кристаллической структуры породы и уплотнение образца за счет уменьшения межмолекулярных расстояний.

Обращает на себя внимание различный характер зависимостей плотности от давления для известняков и горючих сланцев в области больших давлений. Хотя в целом абсолютная величина изменений плотности известняка незначительна, ход кривой показывает, что степень уплотнения породы еще далеко не исчерпана. Градиент изменения плотности зависит от величины нагрузки. Для горючего сланца наибольший градиент относится к интервалу давлений 20—40 *т* На графике явно проявляется асимптотическое стремление плотности сланца при увеличении нагрузки к некоторой предельной величине. Эта тенденция к дальнейшему уплотнению при увеличении нагрузок (особенно

для известняков) подтверждает возможность уплотнения образца и после полной реализации пористости.

Во всех опытах после снятия нагрузки в образцах наблюдались довольно значительные остаточные уплотнения, величина которых возрастала с увеличением напряжения. При давлениях 150 *т* величина остаточных уплотнений в среднем составляла $^2/_3$ от общего уплотнения образца. По данным экспериментов, величина остаточного уплотнения для известняков и горючего сланца в относительных единицах оказалась одинаковой. Изменение величин предельной нагрузки показывает существенную зависимость остаточного уплотнения от предельного напряжения. Так, величина остаточного уплотнения в горючем сланце составляла 30% при увеличении нагрузки до 20 *т*, 38% — до 40 *т*, 45% — до 60 *т* и 67% — до 150 *т* Хотя при уменьшении предельных нагрузок величины остаточных уплотнений уменьшаются, указать предельное значение давления, при котором остаточные уплотнения отсутствуют, по данным экспериментов невозможно.

Многократные нагружения и разгрузки образцов показали изменение величин остаточных уплотнений. На рис. 2, *б* приведены результаты трехкратного нагружения образца горючего сланца до давления в 20 *т*. По данным эксперимента четко устанавливается уменьшение остаточного уплотнения с каждым нагружением. Так, если после первого нагружения остаточное уплотнение составляло 30%, то после второго — только 16%, а после третьего 9%. Подобный характер изменения свойств образцов может быть, очевидно, объяснен последовательным разрушением всех участков образца, в которых первоначально имелись местные нарушения целостности структурных компонентов.

Установленные при экспериментальных исследованиях закономерности изменения плотности образцов при увеличении напряжений, определяемые деформационными свойствами пород, указывают на возможность значительных структурно-плотностных изменений разреза при перераспределении напряжений в массиве, которые должны учитываться, если структурно-плотностные свойства пород используются при решении каких-либо геологических или горнотехнических задач. Вместе с этим зависимость плотности от давления подтверждает возможность применения плотностных методов для изучения напряженного состояния массива. Однако наличие остаточных уплотнений, определяющих различный ход кривой при нагружении и разгрузке, зависимость остаточных уплотнений от величины предельного нагружения и числа нагружений приводят к неоднозначности зависимости плотности пород от величины давления, что должно учитываться при разработке плотностного метода определения напряженного состояния массива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арцыбашев В. А. Гамма-метод измерения плотности. Атомиздат, 1965.

2. Ризниченко Ю. В. и др. Исследование горного давления геофизическими методами. Наука, 1967

3. Adams F., Nicholson Proceeding of the Royal Society of London. Ser. A., v. 195, p. 363—401, 1901.