Записки Ленинградского орденов Ленина Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLIV, вып. 1, 1961 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАМЕРНОЙ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМОМЕТРИЧЕСКОГО ОСНОВАНИЯ

Н. З. Галаев

Изучение вопросов горного давления на моделях с количественным измерением нагрузок — довольно сложная задача. Для получения удовлетворительных результатов необходимо не только подобрать отвечающий конкретным условиям материал модели, но и располагать надежной в работе измерительной аппаратурой.

При исследовании на моделях был принят довольно широко распространенный метод эквивалентных материалов Г. Н. Кузнецова [1—4]. Динамометрическое основание впервые было применено в 1955 г. во Всесоюзном угольном институте (В. Г. Бочкаревым), а затем в Институте горного дела АН СССР, и отдельные опыты проводились ВНИМИ.

Для моделирования эквивалентными материалами используются различные по принципу действия динамометрические приборы или, как их обычно называют, датчики: гидростатические, механические, электрические. Конструкции датчиков самые различные и зависят от характера поставленной задачи.

В лаборатории горного давления Ленинградского горного института при моделировании эквивалентными материалами также применялись разные приборы гидростатического, механического действий, датчики на основе изменения электрического сопротивления или электрической емкости. В 1957 г. в этой лаборатории П. Д. Качановым и В. Ф. Федоровым при консультации П. И. Городецкого, А. А. Борисова и И. П. Толстунова была разработана конструкция струнных датчиков-динамометров ДС-1 и ДС-2. Датчик ДС-2, имеющий некоторые конструктивные улучшения, повышающие его надежность в работе, и был принят к исполнению. Измерительная станция сконструирована и изготовлена В. Ф. Федоровым. Испытание и тарировка аппаратуры, а также опыты на моделях проведены автором в 1958 г. совместно с В. Д. Палием под руководством П. И. Городецкого.

Конструкция струнного датчика ДС-2 и схема измерительной станции[1]. Работа датчика-динамометра ДС-2 (рис. 1) основана на принципе

[1] Описание конструкции датчика ДС-2 и измерительной станции составлено В. Ф. Федоровым.

изменения частоты колебаний натянутой стальной струны при изменении нагрузки на крышку датчика.

Датчик состоит из верхней крышки *1*, воспринимающей нагрузку, и корпуса *2*, в котором размещены струна и электромагнитная система. Верхняя крышка посредством винтов крепится к стойкам двух опор струны *3*. На дне корпуса имеется гребенка *8* для катушек. Чтобы регулировать зазор между магнитными сердечниками катушек *5* и струной *6*, под винты подкладываются шайбы. Струна металлическими клиньями

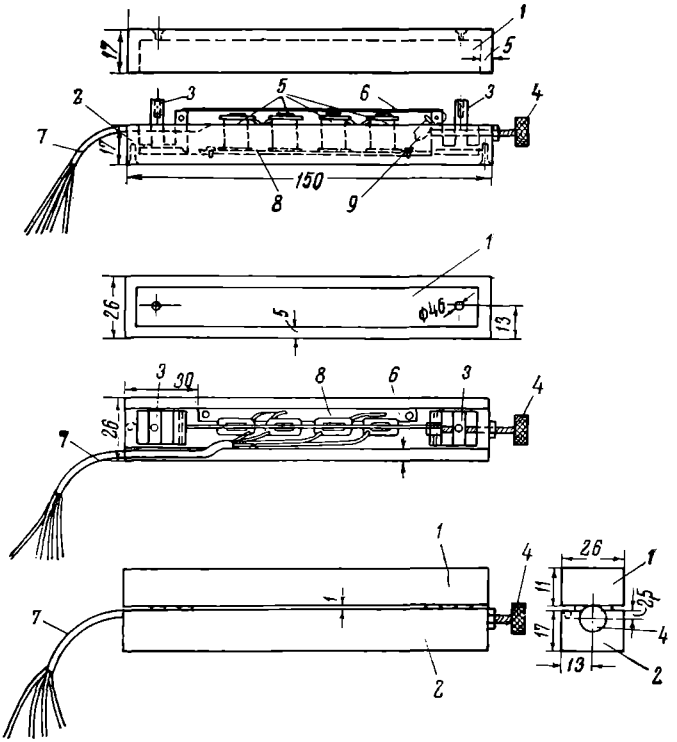


Рис. 1. Общий вид и детали датчика ДС-2:
1 — крышка; *2* — корпус; *3* — опоры струны; *4* — подстроечный винт; *5* — катушки; *6* — струна; *7* — выводные концы; *8* — гребенка; *9* — рычаг натяжения струны

закрепляется в отверстиях рычага натяжения *9* и крайней опоры *3*. Струна натягивается подстроечным винтом *4*, который, опираясь концом в рычаг натяжения струны *9*, поворачивает его и дает нужную настройку. Катушки *5* плотно надеваются на сердечники гребенки *8* и соединяются последовательно — попарно. Их концы в резиновой трубке через выфрезерованную канавку выводятся наружу датчика и присоединяются к коммутационной панели. При давлении на крышку датчика внутренние стойки — опоры, к которым крепится струна, отклоняются наружу, увеличивая ее натяжение. При снятии нагрузки опоры возвращаются в прежнее положение. Частота возбуждаемых колебаний струны воспринимается двумя приемными катушками и подается на последующий каскад усиления. Изменение величины электрического тока фиксируется гальванометром. Четыре провода, отходящих от каждого датчика, припаиваются к гнездам специальной коммутационной панели; гнезда и датчики нумерованы. Такая коммутационная панель может быть изго-

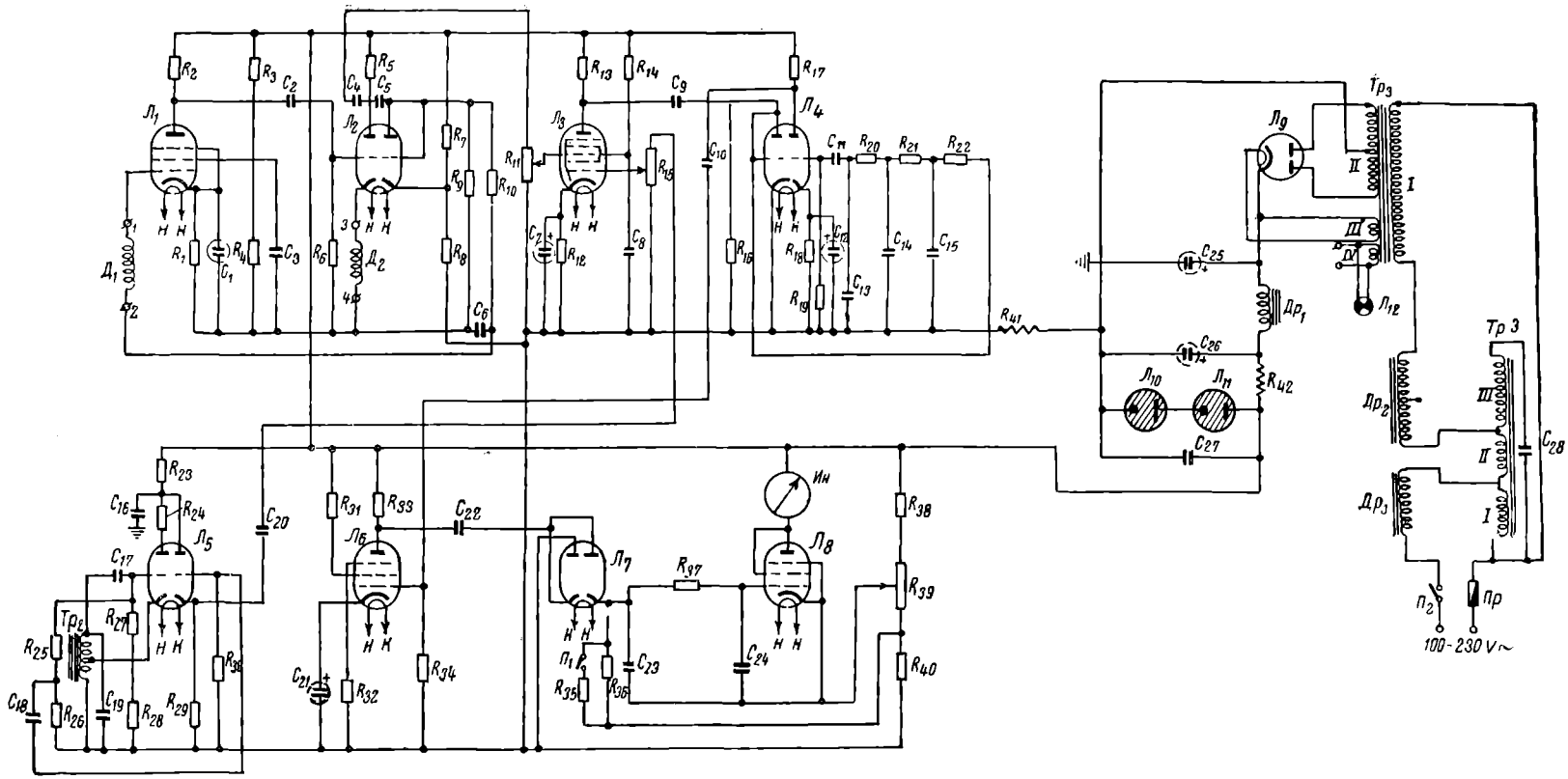


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема измерительной станции

товлена на любое число датчиков (в нашем случае станция была на 30 датчиков). Подключение к станции и переключение осуществляются телефонным штеккером.

Станция (рис. 2) работает от струнного генератора на лампах $Л_1$ и $Л_2$, где катушка $Д_1$ — возбуждающая, а $Д_2$ — воспринимающая с автоматической регулировкой усиления. С генератора сигнал поступает на потенциометр R_{11} установки амплитуды, с которого часть сигнала подается на управляющую сетку лампы $Л_3$, работающей как смеситель. Одновременно через потенциометр R_{15} регулировки амплитуды сигнал подается на смесительную сетку этой же лампы с генератора $Л_5$ фиксированной частоты 720 *гц*. Результирующая обоих сигналов выпрямляется детектором — левым триодом лампы $Л_4$, усиливается правым триодом этой же лампы и лампой $Л_6$, затем поступает на счетчик импульсов $Л_7$ и на оконечный каскад. В последнем в анод лампы $Л_8$ включен индикатор, показания которого пропорциональны разности частот струнного генератора и генератора фиксированной частоты.

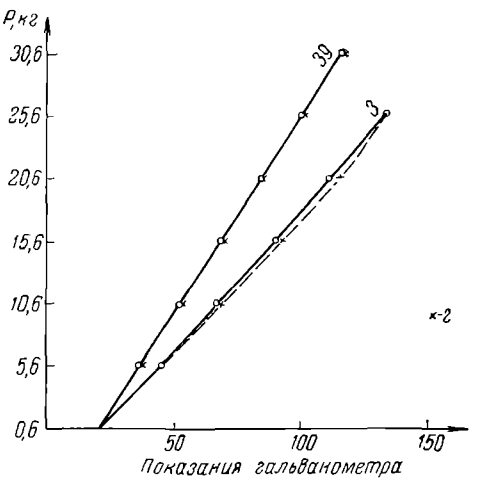


Рис. 3. Тарировочные графики датчиков *3* и *39*:
1 — при нагрузке датчика; *2* — при разгрузке

Перед началом измерений струна настраивается потенциометрами K_{11} и K_{12} и регулировочным винтом *4* таким образом, чтобы получить совпадение частот струнного генератора и генератора фиксированной частоты. Прибор в случае совпадения частот будет показывать нуль. При давлении на датчик струна натягивается и частота струнного генератора изменяется. Делитель, состоящий из сопротивлений R_{38}, R_{39} и R_{40}, служит для установки стрелки прибора при балансе частот в начальное положение. Выпрямитель — обычный двухполупериодный со стабилизаторами напряжения $Л_{10}$ и $Л_{11}$.

Тарировка датчиков. До проведения опытных работ все датчики подверглись тарировке на прессе УП-5. Для этого на середину верхней крышки датчика через ролик передавалась сосредоточенная нагрузка.

Сначала каждый датчик многократно обжимался, затем нагружался и через каждые 5 *кг* нагрузки (или разгрузки) снимались показания гальванометра станции. В нашем случае предельное усилие на датчик доходило до 50 *кг*. Практически величина нагрузки может быть и значительно большей в зависимости от условий опыта. Согласно нашим условиям моделирования, тарировка производилась при нагрузке до 30 *кг*. Одновременно замерялись нагрузка и деформация прогиба крышки датчика. Каждый датчик тарировался 3—5 раз. Повторные тарировки давали поверочные данные. Результаты показали, что датчики (за редким исключением из-за дефектов изготовления) имеют прямолинейную характеристику и довольно точную совпадаемость показаний при нагрузке и последующей разгрузке. В качестве примера на рис. 3 приведены тарировочные графики для датчиков *3* и *39*.

Абсолютная величина стрелы прогиба крышки при сосредоточенной нагрузке до 30 *кг* не превосходила 20μ, а для большинства датчиков была в пределах 5—10 μ. Такая жесткость датчиков имеет большое значение для работы в модели. Деформация крышки датчика прямо пропорциональна величине приложенной силы (рис. 4), погрешность измерения деформации датчика при испытаниях была не более 5%.

Датчики ДС-2 обладают довольно высокой чувствительностью: в наших условиях цена одного деления гальванометра для абсолютного большинства датчиков соответствовала сосредоточенной нагрузке 150—300 *г*. При этом после разгрузки показания датчиков почти точно возвращались к начальным (настроечным). Это подтвердилось и при испытании моделей. Отклонения в среднем составляли ±1—3 деления при продолжительности опыта 5—10 дней.

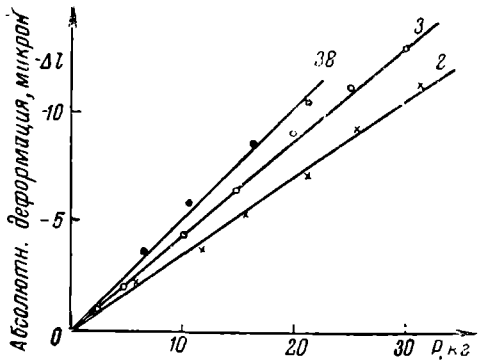


Рис. 4. Зависимость линейной деформации датчиков от величины нагрузки (*2, 3, 38* — номера датчиков)

Эквивалентный материал и конструкция модели. Эквивалентный материал в описываемых опытах представлял смесь кварцевого песка с парафином. Основная масса песка (около 90% веса) имела крупность 0,315 *мм*, остальная часть (10%) — от 0,315 до 0,650 *мм*. Содержание парафина в опытах изменялось от 1,5 до 0,3% (по весу) Материал приготовлялся путем перемешивания нагретого песка (до 80—90°) с необходимым количеством парафина.

Изменением содержания парафина регулировалось получение материала с различными физико-механическими свойствами (см. таблицу). Объемный вес эквивалентных материалов при изменении содержания парафина от 0,3 до 1,5% почти не изменялся и составлял 1,60—1,65 *г/см*^{3} В основном он зависел не от процентного содержания парафина, а от степени уплотнения при закатке модели. Как видно из таблицы, прочность материала с повышением процентного содержания парафина увеличивается. Такие эквивалентные материалы обладают упруго-пластическими свойствами и дают хрупкое разрушение.

Опыты велись на плоских моделях в масштабе 1 400, изготовлявшихся на малом и большом стендах, соответственно чему длина моделей была 1,2 и 2,8 *м* при высоте 0,5 *м*. В основании модели до закатки эквивалентного материала вплотную друг к другу или через определенные промежутки укладывались датчики ДС-2. С целью передачи давления на верхнюю крышку датчика в виде сосредоточенной нагрузки на середине пролета на крышку помещался стальной ролик диаметром 9 *мм* и поверх него стальная же планка толщиной 7 *мм*. На эти планки между предварительно установленной из толстых досок или швеллерных балок опалубкой осторожно загружался разогретый материал слоями и уплотнялся специальным катком. Как известно, в зависимости от условий опыта можно воспроизводить различное строение пород. В нашем случае моделировалась однородная толща покрывающих пород, поэтому для обеспечения однородности перед укладкой следующей порции материала прежняя поверхность разрыхлялась. Материал остывал, и модель была готова к испытанию примерно через сутки.

Таблица

Номер опыта	Содержание парафина в материале, %	Средние значения временного сопротивления, *кг/см²*			Модуль пропорциональных напряжений и деформаций, *кг/см²*
		сжатию	разрыву	изгибу	
—	2,00	1,540	0,356	1,223	—
I	1,50	0,955	0,205	0,685	—
II	0,750	0,377	0,104	0,348	100—120
III	0,375	0,178	0,050	0,165	30—40
—	0,300	0,173	0,049	0,162	30—40
IV	0,250	0,075	0,032	0,105	—

Моделирование камерной разработки горизонтально залегающего рудного тела. Как указано выше, масштаб моделирования был выбран в соответствии с размерами стендов 1 400, поэтому приняты размеры ширины камер и целиков по 3 *см* (соответствовали в натуре 12 *м*) при высоте камер 5 *см* (20 *м* в натуре) При высоте модели 0,5 *м* (или 200 *м* в натуре) длина отработки была 50—55 *см* (200—220 *м* в натуре). Отработка моделей заключалась в последовательной выемке камер и междукамерных целиков.

Показания датчиков, на которые опирались целики и рудный массив за пределами камер, позволили установить распределение напряжений в разные стадии разработки. Рассмотрим порядок проведения двух опытов (II и IV) и полученные результаты.

Опыт II. Материал модели содержал 0,75% парафина. Было отработано девять смежных камер, причем оказалось, что опорное давление на междукамерные целики начинает заметно проявляться при достижении определенной величины пролета выработанного пространства. В данном опыте это было после отработки пяти смежных камер, что соответствует общему пролету 30 *см* или 120 *м* в натуре. После отработки девяти смежных камер, когда величина общего пролета составила 51 *см* или 204 *м* в натуре, наибольшую величину опорного давления, как видно из графика *1*, приведенного на рис. 5, *а*, показали датчики *10* и *12*, расположенные в центральной части пролета. Давление на соседние с массивом датчики было значительно меньшим. Если максимальное давление на центральный целик (датчик *10*) принять за 100%, то давление на соседние с массивом целики (датчики *6* и *16*) в среднем составит 25—30%.

Нарастание опорного давления на целики при условии сохранения их несущей способности по мере увеличения длины пролета выработанного пространства происходит постепенно. Иногда датчики при неизменном пролете показывали некоторое снижение давления на одни целики и увеличение на другие, т. е. происходило постепенное перераспределение напряжений. Опорное давление на прилегающий массив стало заметным после того, как ширина подработанного камерами пространства достигла 36 *см* (144 *м* в натуре).

Интересную картину, иллюстрирующую рост опорного давления на массив при постепенной подработке целиков и наглядно показывающую хорошую работу датчиков, дает последовательное рассмотрение графиков, приведенных на рис. 5, *б*, *в*, *г*.

Опыт IV Содержание парафина в материале было уменьшено до 0,25%, что сделало его менее прочным и легче обрушающимся. На рис. 6 показаны четыре стадии отработки модели и соответствующие эпюры напряжений.

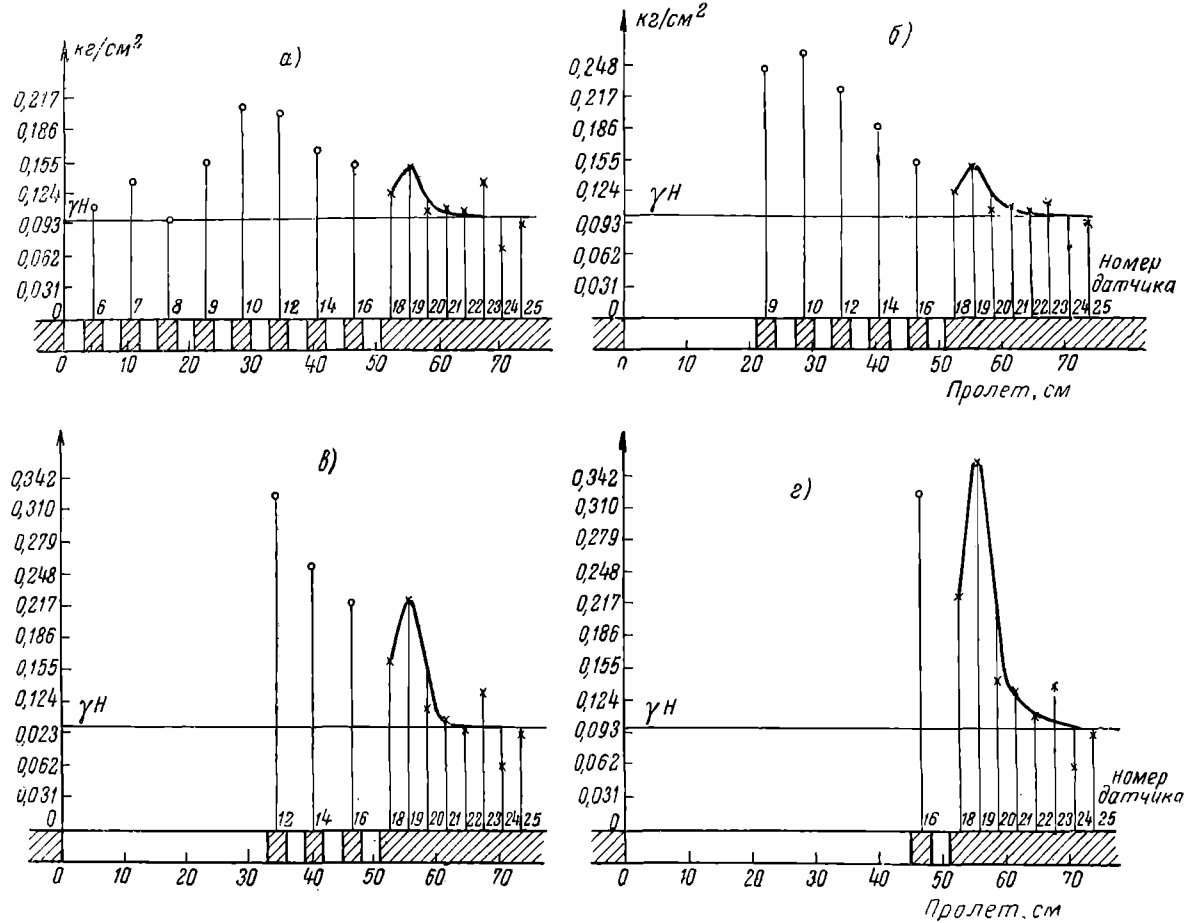


Рис. 5. Эпюры опорного давления в опыте II

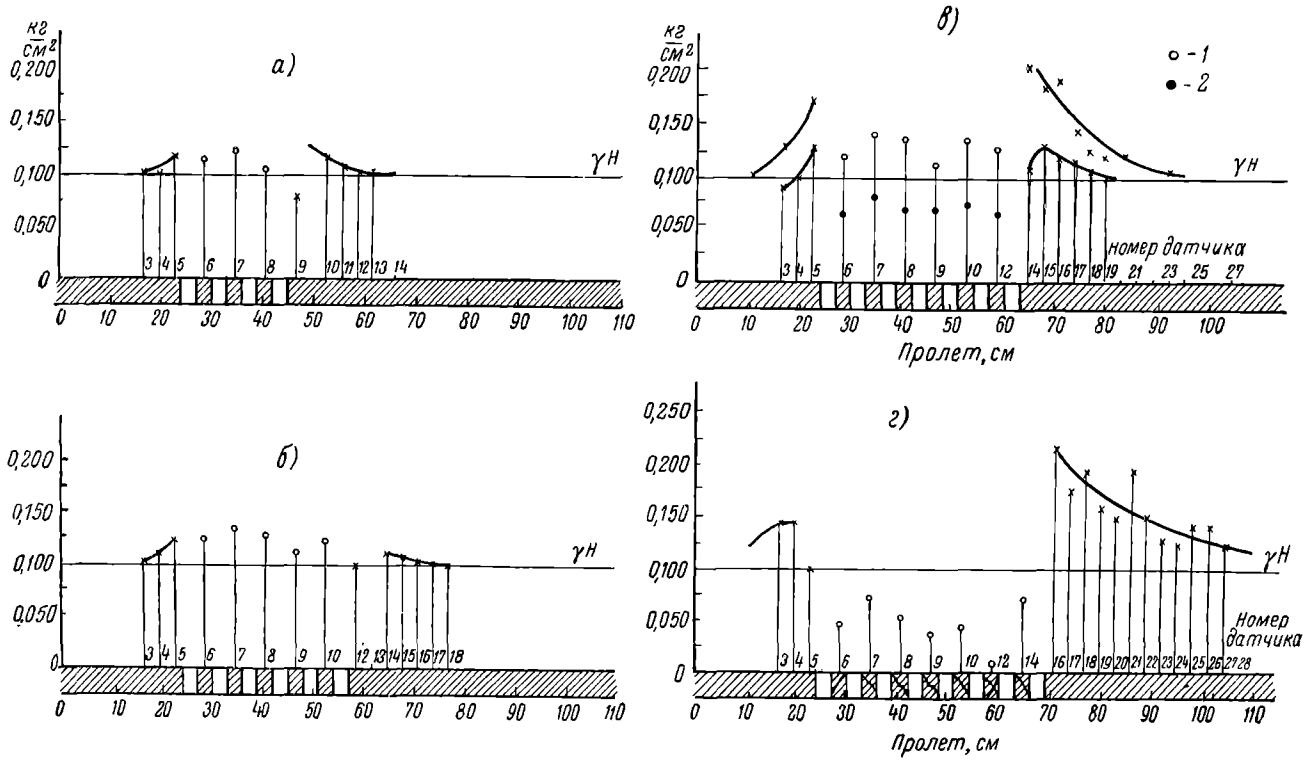


Рис. 6. Эпюры опорного давления в опыте IV:

а — после выемки четырех камер; *б* — после выемки шести камер; *в* — после выемки семи смежных камер (*1* — начальное положение, *2* — положение через 17 *час.*); *г* — после разрушения междукамерных целиков

После последовательной отработки семи смежных камер, когда ширина общего пролета подработки достигла 40 *см* (160 *м* в натуре), модель была оставлена в таком положении на 3,5 суток. В первые сутки датчики показывали возрастание давления на целики, затем целики начали медленно разрушаться, и вследствие потери ими несущей способности давление на целики стало постепенно снижаться и возрастать на прилегающий массив. По истечении указанного времени была вынута восьмая камера, после чего целики были раздавлены и налегающие породы обрушились в форме свода.

Эпюры опорного давления, полученные в разные моменты отработки моделей в опытах II и IV, а также в других опытах, подтверждают известное положение о распределении напряжений. Так, например, при сохранении статического равновесия массива, когда целики работают в пределах прочного сопротивления (опыт *II*), они воспринимают бо́льшую часть веса подработанного массива покрывающих пород, причем опорное давление на целики распределяется неравномерно (наибольшее воспринимают целики, расположенные в средней части пролета). При менее прочном и склонном к податливости материале (опыт IV) распределение давления на целики и прилегающий массив иное. При снижении прочности материала, наоборот, зона распространения опорного давления расширяется, а максимум опорного давления понижается.

Суммарная нагрузка на междукамерные целики при условии сохранения их устойчивости уменьшается при породах, обладающих большей податливостью. Например, в опыте II при том же общем пролете подработки суммарное давление на междукамерные целики было значительно больше, чем в опыте IV При обрушении междукамерных целиков снова происходит перераспределение опорного давления, причем наибольшей нагрузке, естественно, подвергается крайний целик, соседний с подработанным пространством. Графики, приведенные на рис. 5, показывают, что при этом значительно возрастает «пик» давления.

Результаты описанных в данной статье, а также и других опытов (всего их было сделано 11) показали, что датчики ДС-2 обладают достаточно высокой точностью и устойчивостью в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Г. Н. Экспериментальные методы исследования вопросов горного давления. Труды совещания по горному давлению. Углетехиздат, 1948.

2. Ильштейн А. М., Брокмиллер М. Б., Руппенейт К. В. Исследования проявлений горного давления методом моделирования эквивалентными материалами. Сб. научных работ ВУГИ (Вопросы горного дела), 1953, № 10.

3. Кузнецов Г Н., Будько М. Н., Филиппова А. А. и др. Изучение проявлений горного давления на моделях. Углетехиздат, 1959.

4. Городецкий П. И., Галаев Н. З., Палий В. Д. Вопросы механики массива горных пород. «Горный журнал», 1959, № 5.