

## ГЕОФИЗИКА

Г. В. ВАРДЕРЕСЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЪЕМНЫХ МОДЕЛЯХ  
МЕТОДОМ ФОТОУПРУГОСТИ

В настоящее время объемное моделирование напряженного состояния горного массива еще не нашло должного распространения. Это объясняется сложностью подготовки и проведения экспериментов, а также отсутствием решения ряда теоретических задач объемного моделирования.

В этой статье излагается методика объемного моделирования из оптически активных материалов, разработанная в лаборатории фотоупругости Днепропетровского горного института.

## Изготовление моделей

Модель изготавливали из эпоксидной смолы ЭД-6. В качестве отвердителя использовали малеиновый ангидрид. Соотношение между компонентами 7 : 3. После тщательного перемешивания расплавленного малеинового ангидрида и разогретой до 60° смолы их заливали в форму. Для изготовления кубов применяли металлические или картонные формы.

Металлическая форма представляет собой стальной куб, собранный из пластин. Перед каждым изготовлением модели внутренние полированные поверхности формы покрывались 4—5 слоями пятипроцентного раствора полиизобутилена в толуоле. После заливки эпоксимала в форму, куб помещали в термостат и выдерживали при температуре 60°C—12 часов, затем температуру в термостате поднимали по 2—3°C в час до 120°C. При 120°C выдерживали куб 2 суток. После полной полимеризации эпоксимала температуру понижали по 5°C через каждый час до комнатной.

Для снятия остаточных деформаций и стабилизации свойств материала со всех сторон куба обрезали пластинки, толщиной по 5 мм, и затем отжигали в термостате. Для равномерности нагревания и охлаждения отжиг производили в масле.

Когда нарушается температурный режим полимеризации или отжига, т. е. повышение или понижение температуры производится неравномерно, то на поверхности куба образуются трещины, глубиной 7—9 мм. При грубом нарушении режима трещины могут проникнуть до центра куба.

В зависимости от характера и сложности моделируемого объекта, изготовление выработок в моделях осуществлялось двояко:

1. Путем механической обработки;
2. С применением литейных форм из легкоплавких металлов.

Когда моделируемая выработка имела простую форму, то куб изготавливали из двух частей, для чего в форму вставляли стеклянную пластинку, покрытую слоем полиизобутилена, по которой модель разнималась на две части. В отожженном и обработанном кубе делали вырезы, имитирующие выработки. Потом склеивали обе части куба. Клей изготавливали из эпоксидной смолы с малеиновым ангидридом, причем весовые отношения их были такими же, как в материале модели. Склеенные кубы помещали в термостат с соблюдением определенного температурного режима. Склеивание модели рекомендуется только в тех случаях, когда плоскость склейки не попадает в сечения, подлежащие исследованию. Это объясняется тем, что в местах склейки всегда появляются остаточные деформации, не снимающиеся даже после вторичного отжига.

Когда моделируемый объект имеет сложную форму, то обработка выработки механическим путем не рекомендуется, вследствие появления больших остаточных напряжений, являющихся результатом длительной механической обработки и склейки.

В таких случаях точную конфигурацию внутренних размеров камер, целиков и потолочин воспроизводили установкой в кассете литейных форм. Последние, по окончании полимеризации смолы, выплавляются из модели. Для этой цели был использован эвтектический сплав, со следующим химическим составом: висмут—51,6%, олово—8,2% и свинец—40,2%. Температура плавления сплава—91,5%. При расплавлении сплав переходит из твердого состояния в жидкое без промежуточного размягчения.

Отливку камер или других выработок производили в гипсовых формах. После хорошей шлифовки моделей, выработки их вставляли в картонные формы. На фиг. 1 показана одна из таких форм очистных камер для условий Кафанского меднорудного месторождения.

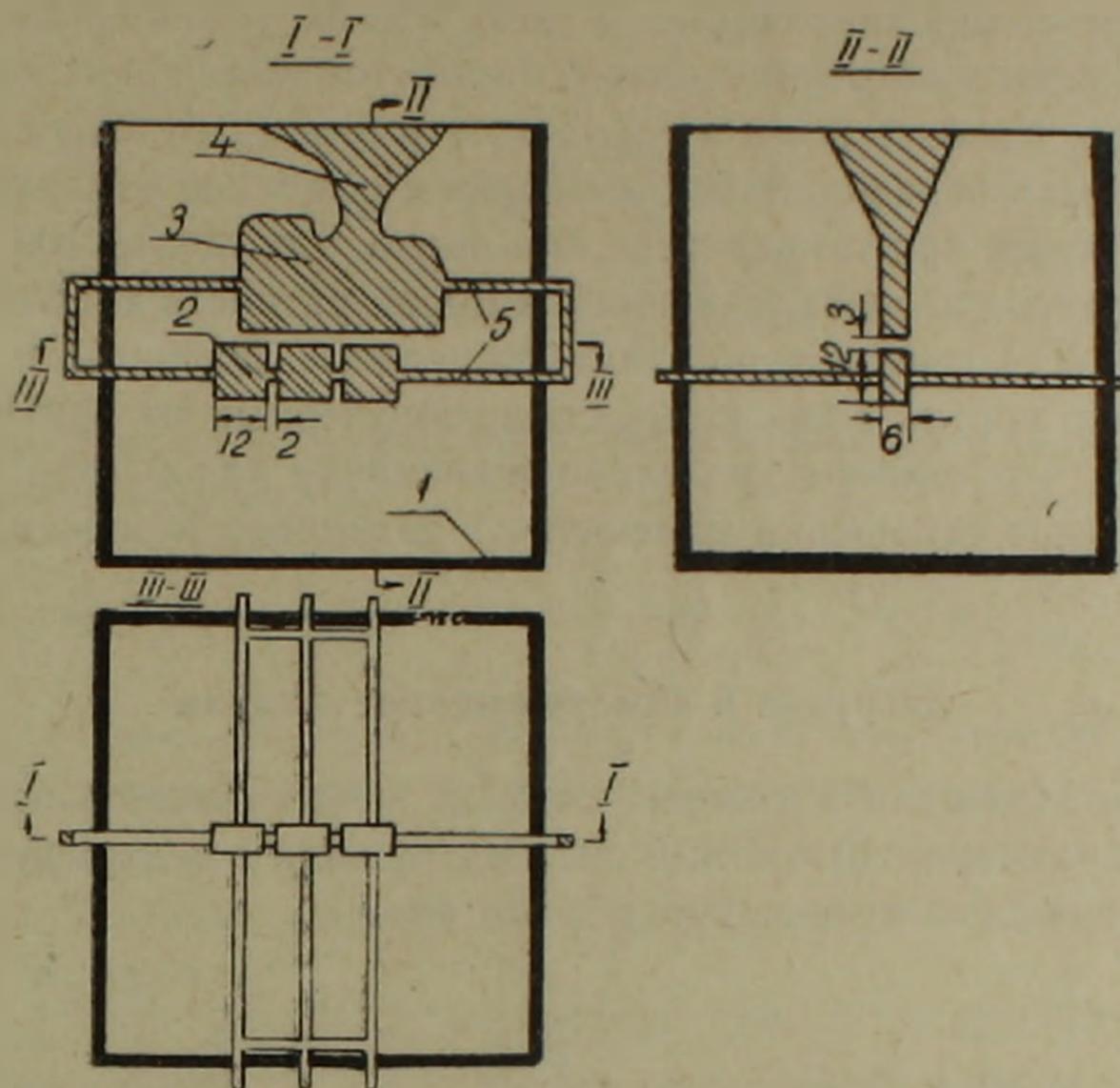
### А п п а р а т у р а

Нагружение моделей производили в центрифуге, диаметром 1,4 м. Для обработки экспериментальных данных был использован координатно-синхронный поляриметр КСП-5.

Когда размеры конструкции настолько малы, что при помощи КСП-5 трудно расшифровать картину полос, использовали прибор, сконструированный на базе спектропроекта ПС-18. В этом приборе модель помещается на стеклянный столик, перемещаемый в двух взаимоперпендикулярных направлениях в плане.

При этом изображение отдельных участков модели, увеличенное в 20 раз, проектируется на горизонтальный экран. Для получения поляризованного света на пути светового потока, перед моделью и за ней были

установлены два поляроида. Для полимеризации и отжига эпоксидной смолы использовались обычные термостаты, с максимальной температурой нагрева 200°C.



Фиг. 1. Модель камер Кафанского месторождения. 1—картонная форма, 2—камеры, 3—отработанная часть залежи, 4—зона обрушения, 5—каркас из сплава для удержания модели в форме.

### Механическая обработка

Обпиливание кубов, а также вырезание пластинок из нагруженных моделей, производили на обычном фрезерном станке, при помощи круглой фрезы, толщиной 3 мм и диаметром 200—250 мм.

При этом соблюдали следующие требования:

1. Фреза должна иметь не более 100 оборотов в минуту.
2. Подача должна быть минимальной.
3. Во избежание нагревания модели необходимо производить обильное смачивание водой.
4. Фрезу надо укреплять на валу станка так, чтобы вибрацию свести к минимуму.

### Определение оптико-механических характеристик материала

Оптико-механические характеристики материала определяли по методике, описанной в работе [3].

Свойство эпоксидной смолы зависит от количества эпоксидных групп. Последние непостоянны и изменяются в разных партиях эпоксид-

ной смолы, выпускаемой заводом. Поэтому для каждой партии эпоксидной смолы необходимо определять температуру «замораживания». Для этой цели используется специальный термостат, у которого две противоположные стенки стеклянные. У этих стенок установлены поляризационные пленки и источник света. В термостат помещают образец и нагружают его. Удобнее всего в термостате иметь нагрузочное устройство для растяжения образца. Затем измеряют с помощью компенсатора разность хода лучей при температуре, примерно, в пределах 100—105°C.

Температура нагрева, начиная с которой разность хода лучей не изменяется, и есть температура «замораживания». Нами были исследованы несколько партий эпоксидных смол, полученных из разных заводов, и оказалось, что температура «замораживания» колеблется в пределах 110—125°C (при отношении малеинового ангидрида к эпоксидной смоле 3:7).

### Загрузка и замораживание модели

Модель помещали в кассету, которая представляет собой металлический куб, размером 10×10×10 см, и нагружали в центрифуге с соблюдением следующего температурного режима.

Таблица 1

Температура °C	Время нагружения, час	Число оборо- тов центрифуги, в мин.	Температура °C	Время нагружения, час	Число оборо- тов центрифуги, в мин.
60	3	0	90	3	670
70	3	0	80	2	670
80	3	0	70	2	670
90	3	0	60	2	670
100	3	0	50	1	670
110	3	0	40	1	670
125	4	670	30	1	670
110	3	670	до полного остывания		
100	3	670			

### Выбор сечения и обработка полученных данных

При экспериментальном решении задач теории упругости обычно определяют напряжение не во всех точках модели, а по некоторым сечениям. Сечение выбирают так, чтобы напряжения, определенные в них, давали бы полное представление о характере напряженного состояния модели.

Для определения главных напряжений необходимо изготовить три одинаковых модели. Эти модели одновременно полимеризуются, отжигаются и нагружаются.

Из этих моделей, по интересующим нас сечениям, вырезаются две взаимно-перпендикулярные пластинки. Как известно, напряженное со-

стояние в каждой точке объемной модели характеризуется следующими дифференциальными уравнениями в частных производных:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} &= 0.\end{aligned}$$

Интегрируя первое уравнение по  $x$  и заменяя интегрирование суммированием, получаем

$$\sigma_x^n - \sigma_x^0 - \sum_{i=1}^n (\Delta y \cdot \tau_{xy})_i \cdot \frac{\Delta x_i}{\Delta y_i} - \sum_{i=1}^n (\Delta z \cdot \tau_{xz}) \frac{\Delta x_i}{\Delta z_i}$$

Все величины, входящие в формулу, получаем экспериментальным путем, при измерении разности хода в пластинках. Для удобства расчета величины  $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$  и  $\Delta z_i$  следует выбрать равными между собой (чаще всего их берут равным 1 мм);  $\sigma_x^0$  — исходное напряжение на свободном контуре.

На выпиленной пластинке проводят линию, вдоль которой будет вестись интегрирование. На несколько миллиметров ниже и выше этой линии проводят две вспомогательные линии. Через определенный интервал отмечают точки, в которых определяются все компоненты поля напряжений.

Результаты заносятся в табл. 2.

В зависимости от направления интегрирования по оси  $x$  или  $y$ , в графе 2 записываются координаты точек. Показания компенсатора для каждой точки пишутся в графе 3. По показаниям компенсатора определяется разность хода в каждой точке. По цене полосы материала  $\sigma_{(0)}^1$  определится величина касательных напряжений (графа 5). В графе 7 записываются параметры изоклин и заполняются остальные графы табл. 2. Дальнейшие вычисления продолжаются по табл. 3. Для каждого сечения составляются такие таблицы и определяются псевдоглавные напряжения.

Чтобы от псевдоглавных напряжений перейти к главным напряжениям, все эти измерения и вычисления делаются по трем взаимно перпендикулярным пластинкам.

### Переход от модели к натуре

При переходе от модели к натуре необходимо учесть влияние коэффициента Пуассона. Для ряда простейших объемных технических задач имеются подсчитанные погрешности от неравенства коэффициента Пуассона.

Таблица 2

## Сечение

	№ п/п.	x	$\tau$				$\varphi^\circ$	$\sin 2\varphi$	$\cos 2\varphi$	$\tau_{ky} = \tau \sin 2\varphi$	$2\tau \cos 2\varphi$
			g <sub>комп.</sub>	разность хода $\mu\mu$	$\tau$	2 $\tau$					
$\varphi = -0,1$	1	0,0	47	92	0,076		55	0,939		0,071	
	2	0,1	49	99	0,082		51	0,978		0,080	
	3	0,2	52	111	0,092		44	-0,999		-0,092	
	4	0,3	57	132	0,109		34	-0,927		-0,101	
$\varphi = 0,00$	1	0,0	49	99	0,082	0,164	53		-0,275		-0,045
	2	0,1	57	132	0,109	0,218	47		-0,069		-0,014
	3	0,2	56	128	0,106	0,212	43		0,069		0,014
	4	0,3	59	142	0,118	0,236	33		0,406		0,095
$\varphi = +0,1$	1	0,0	54	119	0,099		52			0,096	
	2	0,1	59	142	0,118		49			0,117	
	3	0,2	57	132	0,109		42			-0,108	
	4	0,3	64	165	0,137		31			-0,121	



Пересчет напряжений модели на натуру производим по формуле

$$\sigma_n = \sigma_m \frac{\gamma_n}{\gamma_m} \cdot \frac{H}{h},$$

где  $\sigma_m$ ,  $\sigma_n$  — напряжение в модели и натуре, кг/см<sup>2</sup>;

$\gamma_n$  — объемный вес породы натуре, т/м<sup>3</sup>;

$\gamma_m$  — объемный вес материала модели с учетом инерционных сил.

$$\gamma_m = \frac{E_m \cdot H \cdot \gamma_n}{E_n}.$$

$\frac{H}{h}$  — геометрический масштаб моделирования.

В лаборатории фотоупругости Днепропетровского горного института, по описанной выше методике, был решен ряд объемных задач, а именно: исследовано поле напряжений вокруг камер, в целиках и потолочинах для условий Кафанского рудника (Армения); такая же задача для условий Балейского рудника (Забайкалье); исследовано поле напряжений вокруг горизонтальной выработки круглого сечения при различной ее длине и поле напряжений вокруг горизонтальных камер прямоугольного сечения.

Днепропетровский Горный институт  
Кафедра РМПИ

Поступила 15.XII.1964.

Գ. Վ. ՎԱՐԴԵՐԵՍՅԱՆ

ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ԾԱՎԱԼԱՅԻՆ ՄՈՒԵԼՆԵՐՈՒՄ  
ՖՈՏՈՍՏՐԱԳՐԱԿԱՆ ՄԵԹՈՒՊԻ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Հողվածում շարադրված է լեռնային զանգվածի լարված վիճակի ծավալային մոդելացման մեթոդիկան: Վերջինիս հիման վրա հետազոտված է լարումների դաշտը լեռնային փորվածքների խուցերի շուրջը, հանքասյուներում (целики) և առաստաղային մասերում Ղափանի հանքավայրի պայմաններում:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Фрохт М. Фотоупругость, т. 1, 1948, т. II, 1950.
2. Трумбачев В. Ф. и Молодцова Л. С. Методика исследования напряжений в объемных моделях методом фотоупругости в применении к задачам горного давления. Физико-мех. свойства давления и разрушение горных пород. Вып. 1, 1962.
3. Борисенко С. Г., Комский Е. И., Тубольцев В. М. Фотоупругость при нагружении моделей в центрифуге. Вопросы горного давления. Сиб. Отд. АН СССР, № 19, 1964.
4. Пригоровский Н. И., Прейсс А. К. Исследование напряжений и жесткости деталей машин на тензометрических моделях, 1958.
5. Прошко В. М. «Вопросы исследования напряжений на объемных моделях». Поляризационно-оптический метод исследования напряжений, 1956.