

УДК 622.831

В.Г. Хлопцов, Ю.А. Цыплухина, А.Е. Кошелев

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ПРИМЕНЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ
В СНИМАЕМЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ
ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

На основе результатов экспериментальных исследований показана правомочность применения для решения геомеханических задач расчетной схемы в снимаемых напряжениях, как более адекватной условиям нагружения породного массива при сооружении подземных горных выработок.

Ключевые слова: подземное хранилище, горная порода, напряженное состояние, расчетная схема.

Семинар № 3

В работе на основе результатов экспериментальных исследований показана правомочность применения для решения геомеханических задач расчетной схемы в снимаемых напряжениях, как более адекватной условиям нагружения породного массива при сооружении подземных горных выработок.

Расчетная схема в снимаемых напряжениях была предложена для использования при решении геомеханических задач И.В. Родиным [1] в качестве альтернативы традиционной расчетной схеме в полных напряжениях, нашедшей широкое применение в геомеханических расчетах с использованием положений и методов механики сплошных сред [2 и др.].

Расчетная схема в полных напряжениях подразумевает приложение так называемых начальных напряжений, соответствующих напряженному состоянию массива до сооружения выработки, к расчетному фрагменту с уже имеющимся вырезом (горной выработкой).

Такая расчетная схема, более подходящая для расчета, например,

строительных конструкций, не соответствует условиям нагружения породного массива при сооружении в нем горной выработки в силу того, что выработка сооружается в породном массиве, находящемся в начальном напряженном состоянии, и на ее будущем контуре действуют нормальные и касательные начальные напряжения, являющие собой, по сути, реакцию, с которой действует выбираемая при сооружении выработка горная порода на остающуюся часть массива, обеспечивая его равновесное состояние (рис. 1).

При сооружении выработки эта реакция снимается. Именно эта снимаемая реакция и является единственным силовым фактором, выводящим окружающий выработку массив из состояния равновесия и приводящим к его деформированию. Поэтому при количественной оценке изменения механического состояния породного массива при сооружении выработки необходимо рассматривать действие только этого силового фактора, не принимая во внимание фоновое начальное напряженное со-

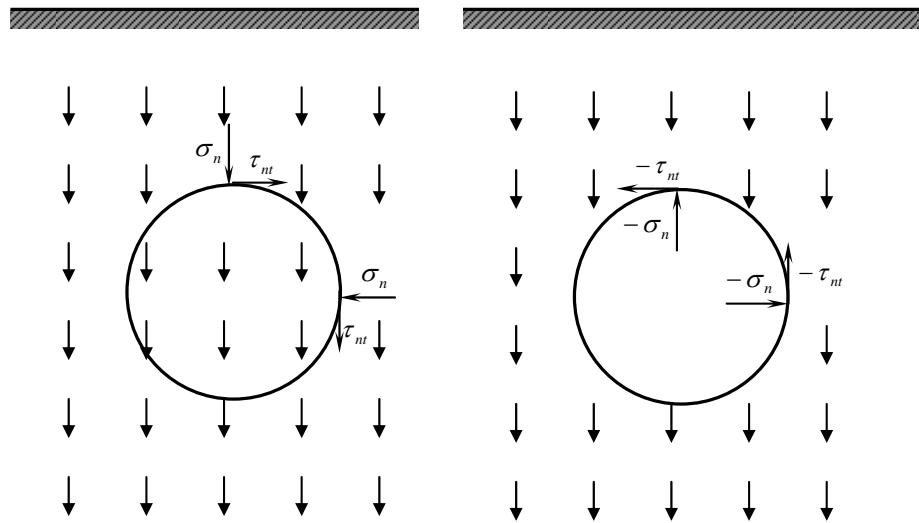


Рис. 1. Нагрузка, заменяющая действие на породный массив вынутой горной породы при сооружении выработки

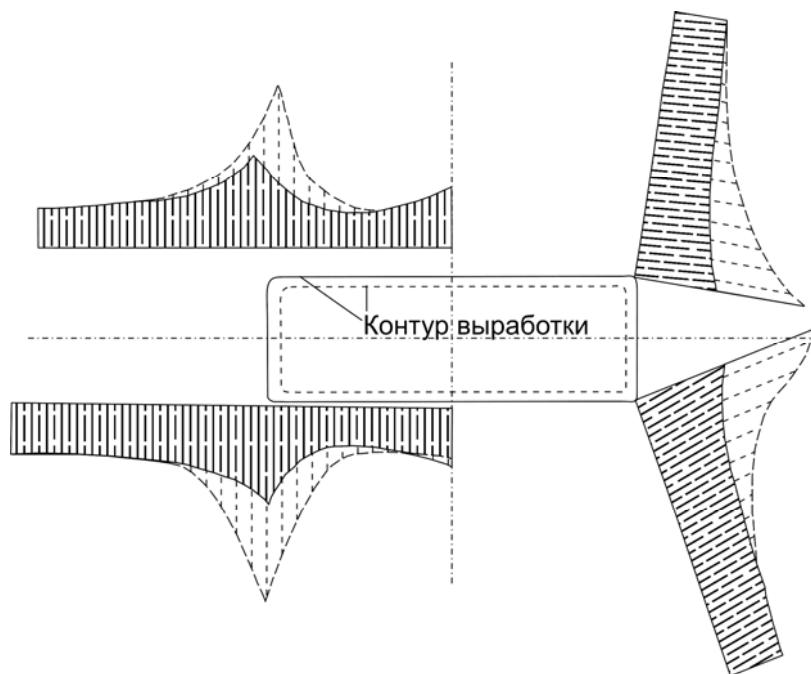


Рис. 2. Эпюры максимальных касательных напряжений τ_{\max} , построенные по результатам экспериментов на оптически-активных материалах для модели с нулевыми начальными напряжениями (пунктирные линии) и для предварительно нагруженной модели (сплошные линии) [1]

стояние, как это делается и при традиционной расчетной схеме для определения контурных смещений [3].

Таким образом, при использовании расчетной схемы в снимаемых напряжениях рассматривается ослабленный выработкой породный массив, нагруженный по контуру выработки снимаемой нагрузкой, равной по величине реакции вынимаемой породы, но взятой с обратным знаком.

В качестве обоснования правомочности использования в геомеханических расчетах схемы в снимаемых напряжениях автором приводятся результаты экспериментов на моделях из оптически активных материалов, заимствованные из работы [1]. На рис. 2 приведены эти результаты в виде распределений максимальных касательных напряжений

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \text{ в приконтурном массиве}$$

ве в кровле, почве и углах выработки, полученные на модели с нулевыми начальными напряжениями и на предварительно нагруженной модели.

В первом случае при образовании выреза модель находилась в горизонтальном положении, а после образования выреза устанавливалась в вертикальное положение, т.е. нагружалась силами гравитации. Во втором случае при образовании выреза модель находилась почти в вертикальном положении (под углом в 85°) и, следовательно, материал модели был заранее нагружен гравитационными силами.

Приведенные на рис. 2 распределения отражают, по крайней мере, количественное отличие механического состояния приконтурной области при различных условиях нагружения модели. Это отличие подтверждают и приведенные ниже результаты расчетов напряженного состояния вмещающего гипотетическую выработку прямоугольного поперечного сечения породного массива, выполненных с применением традиционной расчетной схемы в полных напряжениях и расчетной схемы в снимаемых нагрузках (рис. 3).

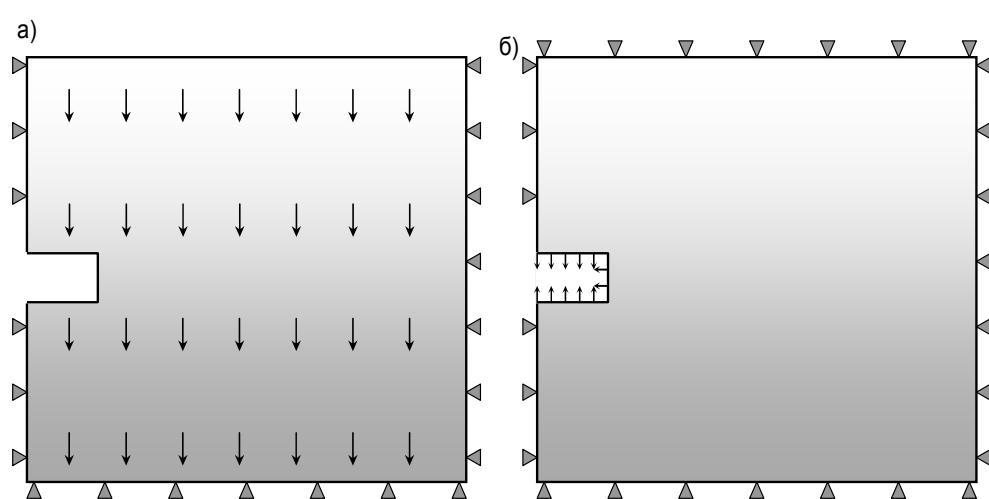


Рис. 3. Расчетные схемы решения задач о напряженном состоянии массива, вмещающего выработку прямоугольного поперечного сечения: а – традиционная схема нагружения, б – схема нагружения в снимаемых нагрузках

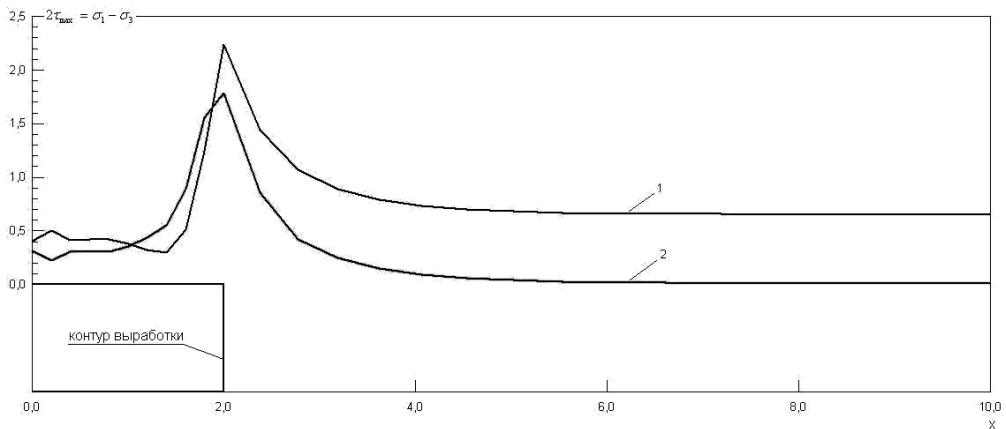


Рис. 4. Расчетные распределения максимальных касательных напряжений τ_{\max} на уровне кровли выработки с прямоугольным поперечным сечением, нормированных по действующему на уровне кровли начальному вертикальному напряжению: 1 – с применением расчетной схемы в полных напряжениях, 2 – с применением расчетной схемы в снимаемых напряжениях

Расчеты выполнены методом конечных элементов для неравнокомпонентного поля начальных напряжений с вертикальной и горизонтальной компонентами, составляющими при коэффициенте Пуассона $\mu = 0,35$ на уровне кровли выработки соответственно $\sigma_v = q$ и $\sigma_h = 0,54q$.

На рисунке 4 приведены построенные по результатам расчетов распределения в кровле выработки максимальных касательных напряжений $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$, нормированных по q .

Результаты расчетов качественно согласуются с результатами экспериментов на оптически активных материалах, о чем свидетельствует сопоставление полученных расчетным и экспериментальным путем распределений максимальных касательных напряжений. Это говорит об адекватности расчетной схемы в снимаемых напряжениях условию предварительно-

го нагружения модели гравитационными силами, что, в свою очередь соответствует условию нагружения породного массива при сооружении горной выработки.

Соответствие расчетной схемы в снимаемых напряжениях условиям нагружения пород в массиве при сооружении выработки подтверждают и результаты механических испытаний трубчатых образцов, выполненных в ООО «Подземгазпром».

Испытания проводились на образцах каменной соли при двух схемах нагружения (рис. 5). При первой схеме нагружение образцов осуществлялось в результате понижения внутреннего давления p при постоянных внешних нагрузках $\sigma_2 = \sigma_3 = const$, при второй – повышением внешнего давления $\sigma_2 = \sigma_3$ при постоянном внутреннем $p = const$.

При испытаниях по второй схеме нагружения образцы тоже подвергались предварительному обжатию, чтобы избежать влияния изменения

деформационных параметров породы при обжатии на результаты экспериментов.

Для интерпретации результатов механических испытаний трубчатых образцов используется известное решение задачи Ламе о толстостенном цилиндре, подверженном действию равномерно распределенных внутренних и наружных нагрузок (рисунок 6), в соответствии с которым относи-

тельное смещение внутреннего контура цилиндра определяется выражением [4]:

$$\frac{u_a}{a} = \frac{1 - \frac{1}{\mu}}{E} \cdot \frac{p_a - p_b \cdot k^2}{k^2 - 1} + \frac{1 + \frac{1}{\mu}}{E} \cdot \frac{(p_a - p_b) \cdot k^2}{k^2 - 1}, \quad (1)$$

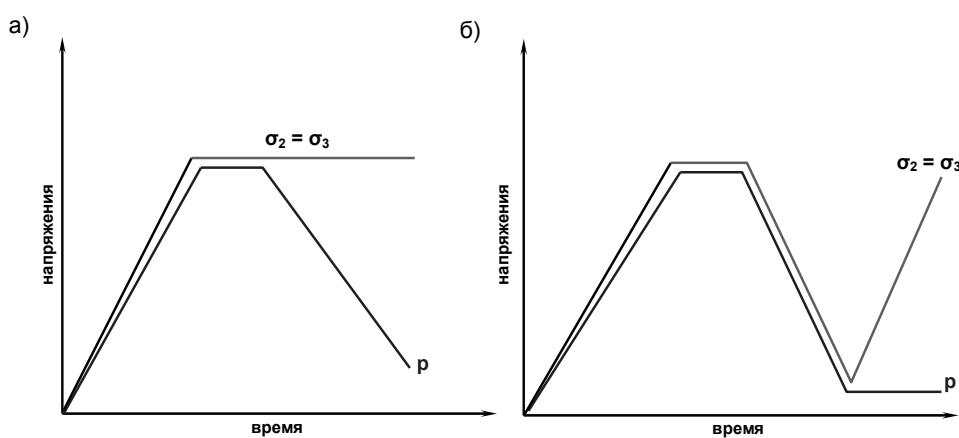


Рис. 5. Схемы нагружения трубчатых образцов: а – снижением внутреннего давления при постоянном наружном, б – повышением внешнего давления при постоянном внутреннем

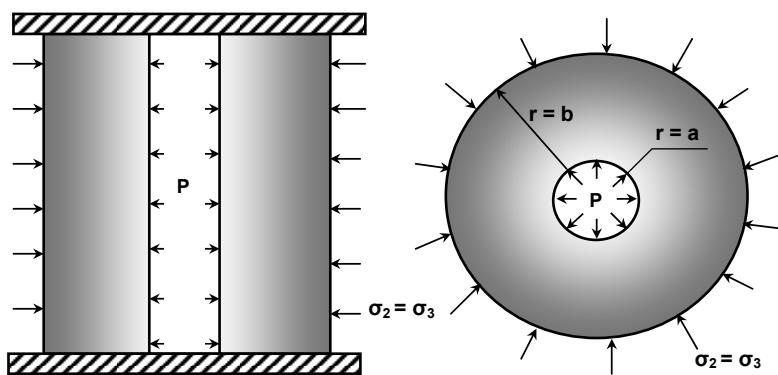


Рис. 6. Расчетная схема к интерпретации результатов экспериментов

Таблица 1
Результаты механических испытаний трубчатых образцов

№ образца	Геометрические размеры образца, мм	Начальные нагрузки, МПа		Конечные нагрузки, МПа		Смещение внутреннего контура, мм
		$\sigma_2^0 = \sigma_3^0 = p_b^0$	p_a^0	$\sigma_2 = \sigma_3 = p_b$	p_a	
2	$b = 27,30$	24,9	21,8	23,5	4,8	– 0,15
	$a = 6,00$					
	$k = 4,55$					
5	$b = 27,70$	28,0	25,0	25,0	2,0	– 0,40
	$a = 8,00$					
	$k = 3,46$					
6	$b = 27,25$	4,0	2,0	27,8	2,0	– 0,15
	$a = 6,00$					
	$k = 4,54$					
7	$b = 27,65$	3,9	2,0	50,0	2,0	– 0,35
	$a = 6,00$					
	$k = 4,61$					
8	$b = 27,40$	3,9	2,0	40,0	2,0	– 0,50
	$a = 8,00$					
	$k = 3,43$					

где u_a – смещение внутреннего контура цилиндра; a и b – радиусы соответственно внутреннего и внешнего контуров цилиндра; $k = b/a$; p_a и p_b – соответственно внутренние и наружные равномерно распределенные нагрузки на цилиндр; E и μ – соответственно модуль упругости (деформации) и коэффициент Пуассона материала цилиндра.

Результаты испытаний трубчатых образцов по первой (образцы 2 и 5) и второй (образцы 6, 7 и 8) схемам нагружения приведены в табл. 1.

Проанализируем результаты экспериментов, используя формулу (1) для определения смещений внутреннего контура.

Определим по смещениям внутреннего контура величины модуля деформации каменной соли, принимая для определенности величину ко-

эффициента Пуассона $\mu = 0,5$ и исходя из конечных нагрузок на цилиндрический образец, зафиксированных в экспериментах, т.е. фактически используя расчетную схему в полных напряжениях. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Как следует из табл. 2, образцы с примерно одинаковыми геометрическими параметрами, нагружаемые в результате снижения внутреннего давления при постоянных внешних нагрузках, деформируются более интенсивно, чем образцы, нагружаемые в результате повышения внешних нагрузок при постоянном внутреннем давлении. Но, при одинаковых деформационных характеристиках породы и геометрических параметрах образцов равные величины внешних и внутренних нагрузок на образцы должны приводить к равным смещениям их внутреннего контура

Таблица 2
**Оценка деформируемости цилиндрических образцов
с использованием расчетной схемы в полных напряжениях**

№ образца	Относительные геометрические размеры образца	Конечные нагрузки, МПа		Относительные смещения внутреннего контура $\frac{u_a}{a}$	Модуль деформации E , МПа
		p_b	p_a		
2	$k = 4,55$	23,5	4,8	- 0,025	1380
5	$k = 3,46$	25,0	2,0	- 0,050	963
6	$k = 4,54$	27,8	2,0	- 0,025	2089
7	$k = 4,61$	50,0	2,0	- 0,058	1702
8	$k = 3,43$	40,0	2,0	- 0,063	1258

В нашем же случае, смещения внутреннего контура образцов, нагружаемых по первой схеме, превышают, в среднем в 1,4 раза, смещения внутреннего контура образцов, нагружаемых по второй схеме. Это можно объяснить либо влиянием схемы нагружения на деформационные параметры породы, что маловероятно, либо неправомочностью использования одной расчетной схемы для интерпретации результатов экспериментов при различных схемах нагружения.

Проанализируем результаты эксперимента с использованием двух расчетных схем: в снимаемых напряжениях для первой схемы нагружения и в полных напряжениях – для второй.

Предположим, что на образец воздействуют только внешние нагрузки, т.е. $p_b = p > 0$ и $p_a = 0$ и образец нагружается по второй схеме. Тогда относительные смещения внутреннего контура цилиндра будут равны:

$$\frac{u_a}{a} = -\frac{2}{E} \cdot \frac{p_b k^2}{k^2 - 1} = -\frac{2}{E} \cdot \frac{p \cdot k^2}{k^2 - 1}. \quad (2)$$

Предположим далее, что на образец воздействует только внутренняя (снимаемая) нагрузка $p_a = -p < 0$ при $p_b = 0$ и образец нагружается по вто-

рой схеме. Относительные смещения внутреннего контура при $\mu = 0.5$ будут равны:

$$\begin{aligned} \frac{u_a}{a} &= \frac{1}{E} \cdot \frac{p_a}{k^2 - 1} \cdot (3k^2 - 1) = \\ &= -\frac{1}{E} \cdot \frac{p}{k^2 - 1} \cdot (3k^2 - 1). \end{aligned} \quad (3)$$

Отношение смещений $\frac{u_a}{u_a}$ будет равно:

$$\frac{u_a}{u_a} = 1.5 - \frac{1}{2 \cdot k^2} \quad (4)$$

и при $k^2 \gg 1$ будет приближаться к 1,5, т.е. $u_a \approx 1.5 \cdot u_a$, что согласуется с приведенными выше результатами механических испытаний.

Оценим деформационные свойства каменной соли по результатам испытаний цилиндрических образцов, нагружаемых за счет снижения внутреннего давления при постоянных внешних нагрузках, используя расчетную схему в снимаемых напряжениях. Результаты расчетов с использованием расчетной схемы в снимаемых напряжениях приведены в табл. 3.

Таблица 3
**Оценка деформируемости цилиндрических образцов
 с использованием расчетной схемы в снимаемых напряжениях**

№ об- разца	Относительные геометрические размеры образца	Снимаемые нагрузки, МПа		$\frac{u_a}{a}$	Модуль деформации E , МПа
		$p_b - p_b^0$	$p_a - p_a^0$		
2	$k = 4,55$	- 1,4	- 17,0	- 0,025	1991
5	$k = 3,46$	- 3,0	- 23,0	- 0,050	1333

Приведенные в табл. 3 расчетные величины модуля деформации согласуются с приведенными в табл. 2 расчетными величинами модуля деформации для образцов 6 и 8, имеющих аналогичные геометрические характеристики. Сходимость расчетных оценок деформируемости образцов, испытанных при различных условиях нагружения, позволяет сделать вывод о правомочности применения расчетной схемы в снимаемых напряжениях для интерпретации результатов испытаний трубчатых образцов при их на-

гружении за счет снижения внутреннего давления при постоянных внешних нагрузках.

Учитывая, что нагружение трубчатых образцов в результате понижения внутреннего давления при постоянных внешних нагрузках в большей степени соответствует условиям нагружения при контурного породного массива при сооружении горной выработки, можно говорить о правомочности применения расчетной схемы в снимаемых напряжениях в геомеханических расчетах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родин И.В. Снимаемая нагрузка и горное давление. В кн. Исследования горного давления. – М.: Госгортехиздат, 1960. – С. 373–374.
2. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. – М.: Углехимиздат, 1954. – 384 с.
3. Либерман Ю.М. Давление на крепь капитальных выработок. – М.: Наука, 1969. – 119 с.
4. Тимошенко С.П., Лессельс Дж. Прикладная теория упругости. – Ленинград: ГТИ, 1930. – 391 с. ГИАБ

Коротко об авторах

Хлопцов В.Г. – ООО «Подземгазпром», mail@podzemgazprom.ru
 Цыплухина Ю.А., Кошелев А.Е. –
 Московский государственный горный университет,
 Moscow State Mining University, Russiaaud@mstu.ru