

УДК 622:551.242

**Б.Ю. Давиденко, В.Г. Хлопцов, Ю.А. Цыплухина**

## **РАСЧЕТНАЯ СХЕМА В СНИМАЕМЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ ДЛЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ**

*Дано описание расчетной схемы в снимаемых напряжениях при выполнении геомеханических расчетов. Задача решается в два этапа. Сначала определяются компоненты нормальных и касательных начальных напряжений, действующих в нетронutom массиве на контуре будущей выработки. На втором - дополнительное поле напряжений, деформаций и смещения в приконтурном массиве, обусловленные выемкой породы. Такая расчетная схема наиболее соответствует условиям нагружения приконтурной зоны породного массива при сооружении в нем горной выработки.*

*Ключевые слова: горная порода, напряжённое состояние, расчётная схема.*

---

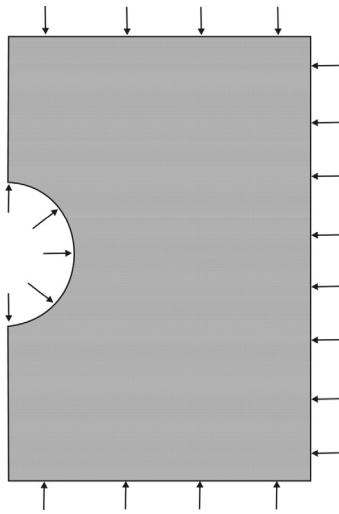
**О**беспечение устойчивости подземных горных выработок является основной из многочисленных научно-технических задач, решаемых при ведении подземных горных работ, к каковым относятся и строительство и эксплуатация подземных хранилищ газа.

Но несмотря на многочисленные исследования в этой области механики горных пород и очевидные достижения по части расчетов подземных горных выработок на устойчивость, можно сказать, что проблема на сегодняшний день отнюдь не решена. Дело в том, что результаты теоретических (аналитических или численных) расчетов, выполненных в рамках механики деформируемого твердого тела, как правило, качественно отличаются от данных натурных наблюдений за механическим состоянием горных выработок и характером разрушения вмещающего породного массива. Причиной этого является постановка задач при выполнении теоретических расчетов, а точнее - расчетная схема.

Геомеханические процессы, связанные с производством горных работ (сооружением выработок, извлечением полезных ископаемых и т.д.), активно реализуются только в некоторой ограниченной области массива в окрестности этих работ. Поэтому при построении расчетной схемы обычно рассматривается не весь массив, а некоторая его область, внешние границы которой выбраны таким образом, что исследуемые механические процессы в их окрестности практически затухают, а горные породы находятся в условиях начального напряженного состояния [1].

Постановка и расчетная схема решения задач по оценке устойчивости подземных горных выработок, и, в частности, подземных резервуаров предполагают выделение расчетного фрагмента вмещающего выработку породного массива и задание по его границам силовых и кинематических граничных условий.

Традиционная расчетная схема в полных напряжениях подразумевает приложение начальных напряжений, соответствующих напряженному состоянию породного массива до сооружения выработки, к расчетному фрагменту с уже имеющимся вырезом (рис. 1).

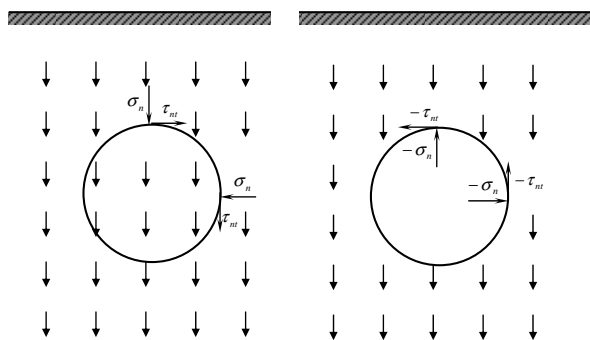


**Рис. 1. Постановка задачи и расчетная схема в полных напряжениях**

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).

Расчетная схема в снимаемых напряжениях была предложена для использования при решении геомеханических задач И.В. Родиным [3] в качестве альтернативы традиционной расчетной схеме в полных напряжениях, нашедшей широкое применение в геомеханических расчетах с использованием положений и методов механики сплошных сред [4 и др.].

Применение расчетной схемы в снимаемых напряжениях предполагает задание на внутренней границе расчетного фрагмента, т.е. контуре сооружаемой выработки, силовых граничных условий – снимаемых напряжений, т.е. напряжений, действующих

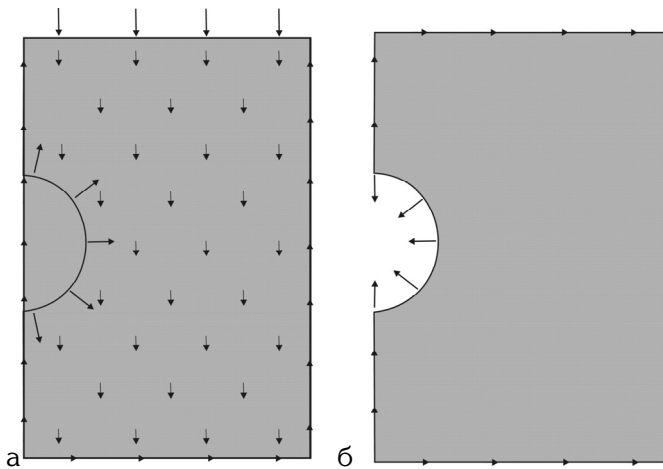


**Рис. 2. Нагрузка, заменяющая действие на породный массив вынудой горной породы при сооружении выработки**

Но на будущем контуре горной выработки, сооружаемой в породном массиве, который находится в начальном напряженном состоянии, уже действуют нормальные и касательные начальные напряжения, являющиеся, по сути, реакцией, с которой вынимаемая порода действует на оставшуюся часть массива, обеспечивая его равновесное состояние (рис. 2).

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 состояние, как это делается и при традиционной расчетной схеме для определения контурных смещений [2]. Расчетная

схема в снимаемых напряжениях предполагает задание на внутренней границе расчетного фрагмента, т.е. контуре сооружаемой выработки, силовых граничных условий – снимаемых напряжений, т.е. напряжений, действующих в массиве до сооружения выработки по ее будущему контуру, и на внешних границах расчетного фрагмента – кинематических граничных условий, которые сводятся к заданию нулевых смещений по нормальям к границам, что отражает отсутствие на границах расчетного фрагмента, т.е. вне зоны влияния выработки, смещений и деформаций, обусловленных сооружением последней (рис. 3).



**Рис. 3. Постановка задачи и расчетная схема в снимаемых напряжениях**

работки. На рис. 3, б приведена соответствующая расчетная схема, где изображен расчетный фрагмент невесомого массива, содержащий выработку. Как уже говорилось выше, граничные поверхности фрагмента закрепляются в направлениях по соответствующим нормальям, а к поверхности выработки прикладываются снимаемые начальные нормальные и касательные напряжения, действовавшие в нетронutom массиве на контуре будущей выработки и вычисленные на первом этапе.

Определение дополнительных напряжений, деформаций и смещений выполняется с учетом возможности перехода массива в стадию неупругого деформирования и разрушения. Соотношения, определяющие переход породного массива в стадию неупругого деформирования и разрушения и, в конечном итоге, характер и интенсивность проявления геомеханических процессов, должны включать в том или ином виде компоненты дополнительных напряжений, учитывая при этом, что нагружение массива происходит с начального напряженного состояния. Это можно сделать, исходя из следующих соображений [5].

Предположим, что породный массив на глубине заложения будущей выработки  $h$  находится в начальном напряженном состоянии с компонентами вертикального напряжения  $\sigma_v = -\gamma h$  и горизонтальных  $\sigma_h = -\lambda \gamma h$ , где  $\gamma$  – удельный вес пород вышележащей толщи,  $\lambda$  – коэффициент бокового отпора, принимаемый равным по двум горизонтальным направлениям (здесь и далее сжимающие напряжения считаются отрицательными, растягивающие – положительными). Будем считать это начальное напряженное состояние фоновым, по отношению к которому условие предельного состояния породного массива, т.е. его перехода в стадию неупругого деформирования и разрушения, описывается уравнением в инвариантах дополнительного напряженного состояния вида  $F(I_1, I_2) = 0$ , где  $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$  и  $I_2 = -\sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_3 \cdot \sigma_1$  – соответственно первый и второй инварианты тензора напряжений, в качестве которого примем наиболее простое линейное уравнение:

При такой постановке решение задачи распадается на два этапа. На первом этапе определяются компоненты нормальных и касательных начальных напряжений, действующих в нетронutom массиве по контуру будущей выработки (рис. 3, а).

На втором этапе расчета подземной горной выработки определяется дополнительное поле напряжений, деформации и смещения в приконтурном массиве, обусловленные сооружением вы-

$$\sigma_i = d - \operatorname{tg}\beta \cdot \sigma_{cp}, \quad (4)$$

которое можно использовать как в аналитических, так и численных расчетах и где  $\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$  - интенсивность напряжений;  $\sigma_{cp} = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$  - среднее напряжение;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  - главные дополнительные напряжения;  $d$  и  $\beta$  - прочностные параметры породы в массиве, определяемые относительно его фонового напряженного состояния.

Породный керн, отбираемый из массива для последующих лабораторных испытаний, равно как и изготавливаемый из него породный образец находятся по отношению к фоновому напряженному состоянию массива в дополнительном напряженном состоянии, характеризуемом инвариантами  $\gamma h(1 - \lambda)$  - интенсивностью и  $\frac{1}{3} \cdot \gamma h(1 + 2\lambda)$  - средним напряжением. Определяемое по результатам лабораторных испытаний условие прочности породы в образце запишем в виде, аналогичном (2.4):

$$\eta = c - \operatorname{tg}\rho \cdot \xi, \quad (5)$$

где  $\eta = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2}$  - интенсивность напряжений;  $\xi = \frac{1}{3} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$  - среднее напряжение;  $\sigma'_1$ ,  $\sigma'_2$  и  $\sigma'_3$  - главные напряжения в образце;  $c$  и  $\rho$  - прочностные параметры породы в образце, определяемые по результатам лабораторных испытаний.

Взаимосвязь между прочностными параметрами  $c$  и  $\rho$ , входящими в уравнение (5), и прочностными параметрами  $d$  и  $\beta$ , входящими в уравнение (4), можно оценить из рис. 4.

Для точки М, лежащей на прямолинейной огибающей предельных кругов напряжений, можно записать:

$$\eta = \sigma_i - \gamma h(1 - \lambda);$$

$$\xi = \sigma_{cp} - \frac{1}{3} \cdot \gamma h(1 + 2\lambda). \quad (6)$$

Подставляя выражения (6) в уравнения (5), получим:

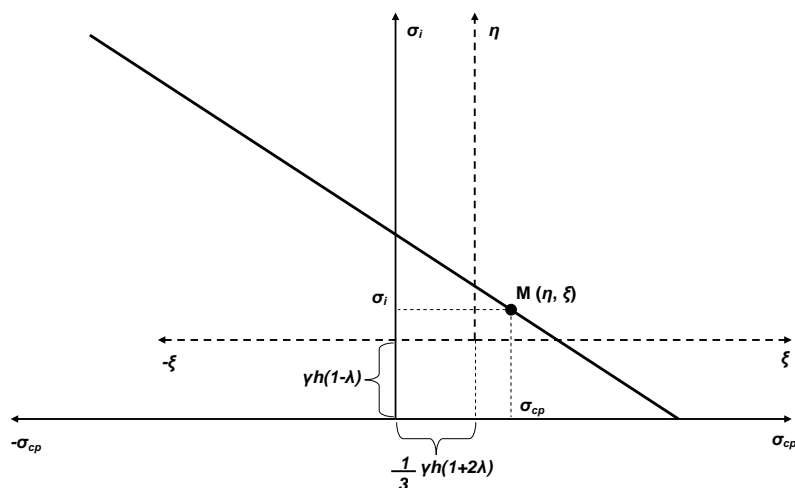
$$\sigma_i = c + \gamma h(1 - \lambda) + \operatorname{tg}\rho \cdot \frac{1}{3} \cdot \gamma h(1 + 2\lambda) - \operatorname{tg}\rho \cdot \sigma_{cp}. \quad (7)$$

Откуда:

$$d = c + \gamma h(1 - \lambda) + \operatorname{tg}\rho \cdot \frac{1}{3} \cdot \gamma h(1 + 2\lambda);$$

$$\beta = \rho, \quad (8)$$

где  $d$ ,  $\beta$  и  $c$ ,  $\rho$  определяются в пространстве трех главных напряжений.



**Рис. 4. Учет начального напряженного состояния массива в услови его перехода в стадию неупругого деформирования и разрушения, включающем дополнительные напряжения**

Соответствие расчетной схемы в снимаемых напряжениях условиям нагружения пород в массиве при сооружении в нем выработки подтверждают результаты испытаний трубчатых образцов, выполненные по различным схемам их нагружения [6].

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Баклашов И.В. Геомеханика. Том 1. Основы геомеханики, МГГУ, 2004. - 194 с.
2. Либерман Ю.М. Давление на крепь капитальных выработок. – М.: Наука, 1969. – 119 с.
3. Родин И.В. Снимаемая нагрузка и горное давление. В кн. Исследования горного давления. – М.: Госгортехиздат, 1960. - С. 373-374.
4. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. – М.: Углетехиздат, 1954. – 384 с.
5. Хлопцов В.Г., Баклашов И.В. О постановке задач при оценке устойчивости подземных горных выработок. - М.: МГГУ, ГИАБ, №4, 2004 г.
6. Хлопцов В.Г., Цыплухина Ю.А., Кошелев А.Е. Экспериментальное обоснование применения расчетной схемы в снимаемых напряжениях для решения геомеханических задач. - М.: МГГУ, ГИАБ, №4, 2010 г. **ГИАБ**

**КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

Давиденко Борис Юрьевич – профессор, кандидат технических наук,  
 Цыплухина Юлия Александровна – аспирант.  
 Московский государственный горный университет,  
 Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru  
 Хлопцов Валерий Геннадьевич – генеральный директор, Подземгазпром,  
 mail@podzemgazprom.ru

