

НОСАЧ А.К., РЯЗАНЦЕВ Н.А., КОДУНОВ Б.А, ВАЩЕНКО В.И., РЯЗАНЦЕВА Н.А,  
ЛЯЩЕНКО М.А  
(КИИ ДонНТУ)

## **ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ГОРНОМ МАССИВЕ НА РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ**

*Розглянуто сучасні уявлення про напружено-деформований стан масиву гірничих порід та їх вплив на ефективність рішення задач гірничої механіки.*

Успешное решение технологических проблем горного производства во многом определяется адекватностью наших представлений о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород и физических процессах, происходящих в нем. Между тем, практика последних десятилетий показывает, что традиционные представления о напряженном состоянии нетронутого массива, о поведении горных пород в неравнокомпонентном поле сжимающих напряжений, а также используемые для решения задач механики горных пород методы, оказались во многом несостоятельными.

На ряде шахт Красноармейского региона отказ от первоначальных проектных решений, основанных на традиционных геомеханических представлениях, и связанных со способом подготовки, системами разработки пластов, местом расположения и формой выработок, способами их охраны, увязкой работ на смежных пластах, оказался весьма полезным и оправданным. Особенно это касается шахт с глубиной разработки более 900-1000 м.

Особенно продуктивной в последние годы оказалась идея представления о горных породах как о блочных, иерархически организованных многомасштабных системах, а также о неравнокомпонентном напряженном состоянии, учитывающем тектонические силы.

В данной работе поставлена цель показать влияние современных представлений о горном массиве и поведении горных пород на решение задач горной механики.

Геомеханика – наука о механических состояниях земной коры и процессах, развивающихся в ней вследствие различных естественных физических воздействий (гравитационных, термических, ротационных, структурно-фазовых превращений и др.). Цель геомеханики – объяснение происшедших и предсказание развития предстоящих процессов изменения напряженно-деформационного состояния разных участков земной коры, установление объективных закономерностей формирования физико-механических свойств горных пород и протекания процессов перераспределения напряжений, деформирования, перемещения, разрушения и упрочнения участков земной коры [1,2].

Горная геомеханика (механика горных пород) – наука о механических свойствах породных массивов и механических процессах, происходящих в них при ведении горных работ. Основными задачами горной геомеханики являются: изучение прочностных и деформационных характеристик породных массивов, установление напряженно-деформированного нетронутого состояния горного массива и его изменение под влиянием естественных и производственных факторов при ведении горных работ, исследование вопросов управления горным давлением, взаимодействия крепи горных выработок с породными массивами, устойчивости горных выработок, вопросов борьбы с горными ударами, внезапными выбросами и др. [3,4].

Применительно к подземной добыче полезных ископаемых основные задачи геомеханики связаны с оценкой напряженно-деформированного состояния породных масси-

вов, ослабленных искусственными полостями, и расчетами на длительную прочность несущих элементов систем разработки, охранных сооружений и крепи горных выработок. Основопологающим при этом является правильность представлений о естественном напряженно-деформированном состоянии нетронутого массива.

В 1951 г. на Международной конференции по горному давлению в Бельгии были сформулированы представления, что земная кора находится в равновесном состоянии и единственной причиной напряжений в горных породах является гравитационная сила. Напряжения, даже если они изменяются под действием каких-либо факторов, со временем релаксируют, выравниваются. Указанной точки зрения придерживались известные зарубежные и отечественные геомеханики: Г. Эверлинг, О. Якоби, Р. Феннер, М. Протодьяконов, А. Динник, Л. Шевяков, П. Цимбаревич, В. Слесарев., К. Руппенейт, В. Давидянц и др. [5-8].

Согласно этим представлениям вертикальная составляющая поля напряжений является максимальной и равна весу вышележащих пород ( $\gamma H$ ), а горизонтальные составляющие равны между собой, являются реактивными и формируются за счет бокового распора ( $\lambda \gamma H$ ). Здесь  $\lambda = \nu / (1 - \nu)$  – коэффициент бокового распора,  $\nu$  – коэффициент поперечной деформации пород,  $\gamma$  – объемный вес пород,  $H$  – глубина разработки. Основываясь на этих представлениях и классических методах механики твердого деформируемого тела, быстро развивались аналитические методы механики горных пород. Фундаментальную роль здесь сыграли работы С. Михлина, Г. Баренблата, С. Христиановича и др. [9-12]. Ряд исследователей и сегодня при решении задач геомеханики опираются на гравитационную гипотезу.

Так, при определении напряженного состояния пород вокруг капитальных и подготовительных выработок, поля напряжений и смещений представляют как сумму начального поля напряжений и смещений нетронутого массива и дополнительного поля напряжений и смещений, являющегося результатом выемки породы при проведении выработок [13]. Задача решается, как правило, в упругой постановке для сплошного изотропного тела, с целью выявления влияния на напряженно-деформированное состояние размеров и формы выработки. При этом считается, что контур выработки нагружен напряжениями, численно равными напряжениям нетронутого массива в центре выработки. Коэффициенты концентрации напряжений на контуре выработки в зависимости от соотношения компонент напряжений в нетронутом массиве и размеров выработки могут принимать довольно приличные значения, однако гравитационная гипотеза все же не может объяснить величин напряжений, превышающих прочность пород в объемном поле сжимающих напряжений. Учет анизотропии, нелинейной упругости и пластичности пород приводит к более равномерному распределению напряжений вокруг выработки и снижает их значения, т.е. упругая постановка дает некоторый запас по напряжениям в результатах вычислений.

Решение задач геомеханики основывается, как правило, на детерминированных моделях. Это обстоятельство предполагает существенную идеализацию исследуемых объектов. На начальной стадии исследователи применяют достаточно простые модели, в которых изучаемый параметр зависит от небольшого числа влияющих факторов (обычно одного-двух). Реальный же породный массив обладает значительной неоднородностью, а конфигурация и размеры выработок отличаются от моделируемых. Это приводит к тому, что первоначально несложные модели недостаточно адекватны реальным объектам, что вынуждает усложнять исходные модели, увеличивая число факторов, предположительно влияющих на изучаемый параметр. При увеличении числа влияющих факторов изучаемая модель усложняется настолько, что перестает поддаваться анализу. Исследования показывают, что предельное число факторов, которое может быть учтено в модели поддающейся анализу, не превышает четырех [14, 15]. В

действительности же таких факторов гораздо больше, а их влияние носит случайный характер. Эта особенность приводит к тому, что расчеты на прочность в геомеханике, основанные на детерминированных представлениях, отличаются довольно низкой надежностью, повысить которую ряд авторов пытаются, перейдя к вероятностно-статистическим представлениям о природе изучаемых объектов [16].

В настоящее время считается, что тектонические напряжения рассчитать невозможно, поскольку о природе их мало что известно. Поэтому, прежде всего, требует объяснения наличие, как в вертикальном, так и в горизонтальном субширотном и субмеридиональном направлении активных сил и выяснения их природы. Кроме того, необходимо объяснить наличие в локальных объемах величин напряжений, превышающих прочность пород в объемном напряженном состоянии.

В работе [17] показано, что наличие активных горизонтальных сил в субширотном и субмеридиональном направлении обусловлено силами Кориолиса, приливными силами, силами объемного расширения восходящих потоков и др., которые обуславливают субширотную тектоническую составляющую поля напряжений для Донбасса порядка 10 МПа. В меридиональном направлении действуют, в основном, полюсобежная сила Этвеша (порядка  $10^{-4}$  МПа) и реактивные силы бокового распора.

Кроме того, Земля как физический объект представляет собой автоколебательную систему. Собственные колебания Земли делятся на два класса: крутильные или тороидальные колебания, вектор смещения которых перпендикулярны радиусу Земли, и сфероидальные колебания, вектор смещения которых имеет составляющие и по радиусу, и по азимутальным направлениям. Собственные колебания являются стоячими волнами. При этом крутильные колебания являются результатом интерференции двух бегущих волн Лява равной амплитуды, а сфероидальные – волн Рэлея.

К основным следствиям колебаний в геосферах относятся: вибромеханические, виброреологические и вибромеханохимические эффекты; преобразование сухого трения в вязкое; направленный массоперенос; резонанс; автоколебания; тиксотропность; механохимическая активация физических и химических процессов и др.

Частота собственных колебаний (резонансная частота) Земли в целом, отдельных геосфер и слоев может быть определена из зависимости [18]

$$f_0 = V_{sh} / h ; \quad (1)$$

где  $V_{sh}$  - скорость поперечных волн,  $V_{sh} = 2500$  м/с;

$h$  – характерный размер объекта, м.

Для Земли в целом расчетная собственная частота колебаний составляет  $2 \times 10^{-4}$  Гц, а период 85 мин, для поверхностных слоев пород –  $1,4 \times 10^{-4}$  Гц ( $T=2$  часа), собственная частота слоя мощностью 1 м – 2,5 кГц. Наблюдаемые резонансные частоты верхних слоев земной коры  $0,716 \times 10^{-4}$  и  $1,64 \times 10^{-4}$  Гц.

Каждый слой породы является монохроматором. Эффект монохроматора состоит в том, что в слое толщиной  $h$  укладывается целое число полуволн

$$h = n\lambda/2 = nV_{mh}/2f_{mh}; \quad (2)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$  - любое целое число;

$\lambda$  – длина волны, м ;

$V_{mh}$  – скорость волн поперек слоя, м/с;

$f_{mh}$  – частота монохроматора, Гц.

Эффект резонанса (АРП) – это момент совпадения собственной частоты колебательной системы с частотой внешнего воздействия. Эффект АРП и эффект монохрома-

тора наблюдается в режиме стоячих волн, потому скорость поперечных волн это фазовая скорость. Амплитуда колебаний планетарных пульсаций вследствие резонансных явлений может достигать  $\Delta \ell_{\text{мак}} = 10$  см. Напряжения в горных породах при распространении колебаний составляют [19]

$$\tau = \rho \omega V_{\text{sh}} \Delta \ell_{\text{мак}} \cos(\omega t + y_2); \quad (3)$$

где  $\omega = 2\pi f_0$  – угловая частота колебаний.

При резонансных явлениях напряжения могут достигать десятков и сотен мега Паскаль.

Таким образом, вследствие воздействия гравитационных, приливных, ротационных и тектонических сил в горном массиве распространяются деформационные волны различных частот и амплитуд. При отражении волн от границ раздела слоев и структурных блоков, вследствие интерференции и резонансных явлений возникают значительные концентрации деформации и напряжений, приуроченных к этим границам.

В статической постановке, как показано в [20], при плоской задаче коэффициент концентрации вертикальных напряжений на границе слоев составляет

$$k_{\text{в}} = 1 + 2 \frac{m^2}{b^2} \left(1 - \frac{E}{E_*}\right); \quad (4)$$

Коэффициент концентрации горизонтальных напряжений

$$k_{\text{г}} = 1 + \frac{m^2 + b^2}{b^2} \left(1 - \frac{E\nu_*}{E_*\nu}\right); \quad (5)$$

где  $m$  – мощность слоя, м;

$b$  – размер структурного блока по простиранию или падению,  $b = (3-4)m$ ;

$E$  и  $E_*$  – модули упругости соответственно менее жесткого и более жесткого слоев, МПа;

$\nu$  и  $\nu_*$  – коэффициенты поперечной деформации этих слоев.

Учитывая, что и в вертикальном, и в широтном, и в меридиональном направлении действуют активные силы и силы бокового распора, компоненты объемного поля напряжений в горном массиве можно записать в виде

$$\sigma_{\text{в}} = k_{\text{в}}\gamma H + \lambda k_{\text{г}} (\sigma_{\text{г}} + \sigma_{\text{ет}}); \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{ш}} = k_{\text{г}}\sigma_{\text{г}} + \lambda(k_{\text{в}}\gamma H + k_{\text{г}}\sigma_{\text{ет}}); \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{м}} = k_{\text{г}}\sigma_{\text{ет}} + \lambda(k_{\text{в}}\gamma H + k_{\text{г}}\sigma_{\text{г}}); \quad (8)$$

Здесь под тектоническими силами, действующими в широтном направлении, понимается совокупность собственно тектонических сил, ротационных сил (сил Кориолиса) и приливных сил. Их суммарная величина для Донбасса оценивается около 10 МПа. В меридиональном направлении основной активной силой является полюсобежная сила Этвеша, величина которой составляет  $10^{-4}$  МПа.

Максимальный коэффициент концентрации вертикальных напряжений при отличии модулей упругости на порядок (граница раздела уголь-песчаник) составляет  $k_{\text{в}}=1,2$ ; горизонтальных напряжений -  $k_{\text{г}} = 11$ .

Подставляя принятые исходные данные, оцениваем величину расчетных напряжений для границы раздела уголь-песчаник, и сравниваем их с замеренными на шахте им. А.А. Скочинского (табл.1).

Таблица 1-

Данные расчета и замера компонент поля напряжений

Глубина работ, м	Расчетные по гипотезе Динника		Расчетные по предлагаемой методике			Замеренные напряжения	
	$\sigma_v$ , МПа	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_v$ , МПа	$\sigma_{ш}$ , МПа	$\sigma_m$ , МПа	$\sigma_v$ , МПа	$\sigma_r$ , МПа
905	22,6	4,9...5,7	55	117	34	28...78	31,5...97

Данные, приведенные в таблице, свидетельствуют о том, что средняя замеренная величина вертикальных напряжений практически совпадает с расчетной, замеренные минимальные горизонтальные напряжения хорошо согласуются с расчетной меридиональной составляющей, а максимальные – с широтной.

Вводя коррективы в представления об исходном напряженном состоянии массива горных пород, и учитывая коэффициенты концентрации напряжений, полученные для ряда задач численными методами, получаем в горном массиве, нарушенном горными работами, напряжения, соизмеримые с прочностью пород в объемном неравнокомпонентном поле сжимающих напряжений и более. Это позволяет объяснить разрушение горных пород вблизи контура выработок и краевой части массива, возникновение аномальных геодинамических явлений.

Таким образом, учитывая современные представления о напряженном состоянии нетронутого горного массива, можно существенно приблизиться к практическому использованию результатов исследования напряженно-деформированного состояния вокруг горных выработок.

### Библиографический список:

1. Тер-Степанян Г.И. Ближайшие задачи геомеханики/ «Проблемы геомеханики», Ереван: 1967, с.1.
2. Wohlbier H. Bodenmechanik und Bergbau. «Bergbau-Wissenschaften», 1965, Bd 12, i.15-16.
3. Маньковский Г.И. Горная геомеханика и теория состояния горных пород. «Вестник АН СССР», 1963, №5.
4. Крупенников Г.А. О направлении и постановке аналитических исследований в механике горных пород. ФТПРПИ, 1966, №2.
5. Динник А.Н. О давлении горных пород и расчете крепи вертикальной шахты. // инт. Работник.- 1925.- №7.-С.15-18.
6. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. М.: Углетехиздат, 1954.- 384 с.
7. Слесарев В.Д. Вопросы управления кровлей. М.-Л.: ОНТИ НКТП, 1935.
8. Долгих М.А., Руппенейт К.В. К вопросу о разработке инженерной теории давления горных пород. – В кн.: Вопросы горного давления. Новосибирск: Изд-во АН СССР, 1963.- С.22-31.
9. Михлин С.Г. О распределении напряжений в полуплоскости с эллиптическим вырезом //Тр. Сейсмол.ин-та АН СССР. – М.: 1934.- С.47-51.
10. Бренблатт Г.И., Христианович С.А. Об обрушении кровли в горных выработках. Изв. АН СССР, ОТН, 1955, №11.
11. Христианович С.А. О волне выброса. – Изв. АН СССР. Механика и машиностроение, 1953, №12.- С.1679-1688.
12. Христианович С.А., Салганик Р.Л. Внезапные выбросы угля (породы) и газа. Напряжения и деформации. Препринт №153. М.: Ин-т проблем механики АН СССР, 1980. 88с.
13. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. – Л.: Недра, 1989.- 488с.

14. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения.- М.: Мир, 1980.- 240с.
15. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф.- М.: Мир, 1984.-Т.1.-320с.; Т.2.- 350с.
16. Шашенко О.М., Тулуб С.Б., Сдвижкова О.О. Некоторые задачи статистической геомеханики. – К.: Универ. изд.-во «Пульсар», 2002. -304с.
17. Рязанцев Н.А., Рязанцева Н.А. Современные представления о напряженном состоянии горного массива. В сб. матер. наук.-практ.конф. «Проблеми гірничої технології», Красноармійськ: КП ДонНТУ, 2010.- С.54-61.
18. Гликман А.Г. Планета Земля как совокупность колебательных систем и техногенные и природные землетрясения как следствие их. Санкт-Петербург, НТФ «Геофизика», 2010.- 16с.
19. Рязанцев Н.А., Носач О.К. Физика горных пород и процессов в вопросах и ответах. Красноармійськ, КФ ДонГТУ, 1999.- 174 с.
20. Шамонин В.А. Концентрации напряжений на границах рудных зерен и во вмещающей среде при взрывном нагружении. //Разработка и обогащение твердых полезных ископаемых.- М.: Недра, 1981.- С.108-113.