



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**РЕДАКЦИОННЫЙ
С О В Е Т**

**Председатель
Л.А. ПУЧКОВ**

**Зам. председателя
Л.Х. ГИТИС**

**Члены редсовета
И.В. ДЕМЕНТЬЕВ**

А.Н. ДМИТРИЕВ

Б.А. КАРТОЗИЯ

В.В. КУРЕХИН

М.В. КУРЛЕНЯ

В.И. ОСИПОВ

Э.М. СОКОЛОВ

К.Н. ТРУБЕЦКОЙ

В.В. ХРОНИН

В.А. ЧАНТУРИЯ

Е.И. ШЕМЯКИН

**ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**ректор МГГУ,
чл.-корр. РАН**

**директор
Издательства МГГУ**

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАН

академик РАН

академик МАН ВШ

академик РАН

профессор

академик РАН

академик РАН

ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

А.С. ВОЗНЕСЕНСКИЙ

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ГЕО- МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Издание 2-е, стереотипное

Рекомендовано Учебно-методической комиссией Московского государственного горного университета в качестве учебного пособия для студентов МГГУ, обучающихся по специальности 070600.01 «Физические процессы горного производства»

МОСКВА

**ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

2 0 0 2



Вознесенский А.С.

В 64 **Системы контроля геомеханических процессов: Учеб. пособ. — 2-е изд., стер. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. — 152 с.**
ISBN 5-7418-0008-4

Изложены вопросы одного из современных направлений науки и техники, интенсивно развиваемого в последние десятилетия, — системам контроля геомеханических процессов, возникающих при разработке месторождений полезных ископаемых. Рассмотрены вопросы проектирования таких систем на основании требований объекта контроля — массива горных пород, элементы, из которых строятся сложные современные системы. Описаны деформационные, сейсмоакустические, другие системы и аппаратура для прогнозирования горных ударов, обрушений кровли, разрушения целиков и других проявлений горного давления.

Для студентов, обучающихся по специальности «Физические процессы горного производства», а также слушателей специального факультета.

УДК 622.831.325

ISBN 5-7418-0008-4

© А.С. Вознесенский, 1994, 2002

© Издательство МГГУ, 1994, 2002

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
----------------------	----------

1. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ОСНОВЫ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1.1. Информационные эффективность и необходимость контро- ля.....	10
1.2. Влияние погрешности измерения на информационную эф- фективность контроля.....	13
1.3. Информационная эффективность параметров, характери- зующих напряженное состояние горных пород.....	16
1.4. Необходимость контроля массива пород вокруг цилиндри- ческой горизонтальной выработки.....	20
1.5. Необходимость контроля напряженного состояния кровли выработки прямоугольного сечения.....	23
1.6. Контроль напряженного состояния массива пород вокруг лавы перед посадкой кровли.....	24

2. ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ЕЕ УЗЛЫ И БЛОКИ

2.1. Обобщенная схема аппаратуры контроля геомеханических процессов.....	26
2.2. Блоки усиления и фильтрации.....	28

2.2.1. Предварительный усилитель аппаратуры контроля.....	28
2.2.2. Входной усилитель радиоприемника автоматизированного комплекса контроля выработанного пространства.....	30
2.3. ЧМ-модуляторы и демодуляторы.....	33
2.4. Радиопередатчики и радиоприемники.....	36
2.5. Аналого-цифровые преобразователи.....	37
2.6. Аналоговый мультимплексор и устройство выборки-хранения.....	37
2.7. Разделение каналов при передаче информации и линии связи.....	38
2.8. Коды и интерфейсы.....	41
2.9. Регистрирующие устройства.....	44

3. СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

3.1. Общая характеристика.....	48
3.2. Система информационного контроля состояния горных выработок и пород на руднике «Каула - Котсельваара».....	49
3.3. Телеметрическая система деформационных наблюдений французского научного центра Ссршар (Cerchar).....	56
3.4. Система локального деформационного контроля «Syaleb» фирмы SAMIFER (Франция).....	61

4. СЕЙСМИЧЕСКИЕ, СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ И АКУСТОЭМИССИОННЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ

4.1. Физические основы прогнозирования разрушения материалов и метод акустической эмиссии.....	68
4.2. Общая характеристика систем контроля, основанных на регистрации АЭ.....	73
4.3. Звукоулавливающая аппаратура ЗУА - 4 и ЗУА - 6.....	75
4.4. Сейсмоакустический комплекс «Гроза - 16».....	79
4.5. Сейсмическая система на руднике Lucky Friday (США).....	82
4.6. Система регионального контроля удароопасности «Регион».....	84
4.7. Измерительно-вычислительный сейсмоакустический комплекс «Очаг».....	94
4.8. Система непрерывного контроля сейсмичности на базе стандарта КАМАК.....	96
4.9. Система «MESAS» для контроля сейсмичности на угольных шахтах Германии.....	100

5. СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ПОКАЗАНИЙ

5.1. Общая характеристика систем с беспроводной передачей показаний.....	103
5.2. Система деформационного контроля с беспроводной передачей показаний «Массив».....	106

5.3. Системы для беспроводной передачи показаний при шахтных измерениях.....	119
--	-----

5.4. Комплекс аппаратуры для исследования динамических процессов в массивах горных пород на основе акустической эмиссии.....	122
--	-----

5.5. Система с беспроводной передачей показаний для контроля напряжений в массиве горных пород.....	124
---	-----

6. СИСТЕМЫ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

6.1. Микропроцессорная система контроля разрушения МСКР.....	128
--	-----

7. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД

7.1. Общие сведения.....	134
--------------------------	-----

7.2. Измерительная система с транскриптором для испытания образцов пород при их нагружении.....	136
---	-----

7.3. Многоцелевая система для лабораторных исследований и испытаний.....	139
--	-----

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	144
------------------------	-----

ВВЕДЕНИЕ

Высокий уровень развития радиоэлектроники и измерительной техники позволил им внедриться в горное дело – область, ведение работ в которой традиционно базировалось на накопленных экспериментальных знаниях и профессиональном опыте специалистов. Измерительная аппаратура расширяет возможности горняков и позволяет им следить за проявлениями горного давления не только визуально, когда опасную ситуацию уже невозможно остановить, но и на гораздо более ранних стадиях развития нежелательных геомеханических явлений. К таким нежелательным и зачастую опасным явлениям относятся горные удары, которые стали сопровождать подземные работы при переходе на глубокие горизонты (глубже 400-600 м), выбросы угля, газа, обрушения кровли, разрушения целиков, стреляния, шелушения стенок, неустойчивость бортов карьеров и другие. Эти явления могут быть различными как по своим масштабам, так и по последствиям. Среди несчастных случаев на предприятиях определенная часть связана с последствиями горного давления (например, несчастные случаи от обрушения кровли). Обрушения кровли или выброс породы в результате горного удара могут разубоживать руду, что приводит к снижению извлечения полезных компонентов на обогатительной фабрике. Несвоевременное обнаружение увеличения величины горного давления влечет за собой запоздалое применение разгрузочных мероприятий и как следствие – повышенные затраты на их осуществление.

Все эти причины заставили в последние годы разработать целую гамму технических средств от простейших устройств до сложных систем, использующих последние достижения техники передачи информации и современные компьютерные технологии. Простейшие устройства контроля достаточно дешевы, но возможности их ограничены. Сложные системы охватывают большие объемы массива горных пород, но их цена и стоимость эксплуатации достаточно велики, и поэтому применение должно быть обосновано.

Системы контроля разрабатывались в СССР (теперь в России), США, Франции, ФРГ, Польше, ЮАР. Однако с сокращением добычи

полезных ископаемых в промышленно развитых странах и компенсации за счет импорта сырья (как, например, в ФРГ, где добыча угля снижается), география развития и использования систем контроля геомеханических процессов при разработке полезных ископаемых, может измениться.

В то же время интерес к системам контроля таких геомеханических процессов, как природные или техногенные землетрясения (вызванные, например, заполнением искусственных водохранилищ), останется неизменным и в будущем.

Автор выражает благодарность академику ИА РФ, проф. *В.С. Ямщикову* за обсуждение материалов, вошедших в пособие, и доброжелательную критику. Экспериментальные результаты, приведенные в разделе 1.3 получены совместно с к.т.н. *В.А. Робсманом* и к.т.н. *А.В. Колесниковым* в ЦНИИС. Материал разделов 4.4, 4.6, 4.7 подготовлен совместно с *В.В. Ливнем*. Материалы раздела 7.2 подготовлены по результатам работ, проведенных в МГТУ автором совместно с к.т.н. *В.Д. Христюбовым* и *Д. Фарбером* (Германия). Система, описанная в разделе 7.3, разработана в МГТУ совместно с *М.Д. Вигдорчиком* и *В.Н. Филатовым*. Экспериментальные результаты, приведенные в разделе 5.2 получены автором совместно с к.т.н. *А.В. Корном* и *В.С. Потаповым*. Автор благодарит также *Д. Фарбера* и *Е.Н. Мойжес* за помощь при подборе материала для пособия.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ОСНОВЫ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Процессы контроля напряженного состояния породных массивов, прогнозирования горных ударов, предупреждения обрушений кровли и разрушения целиков в подземных выработках являются по существу процессами получения информации о состоянии геомеханического объекта, недостающей для получения достаточно надежных рекомендаций по ведению горных работ, охране окружающей среды и промышленных или гражданских сооружений. За последние годы накоплен значительный опыт создания методов и аппаратуры контроля геомеханических процессов, который показал сложность решения этой проблемы ввиду сложности и непредсказуемости объекта - массива горных пород. Осуществление контроля может быть связано со значительными материальными затратами, в то время как конечный результат - знание состояния массива пород и его прогнозирование на будущий период - может восполнить эти затраты лишь в малой степени. Поэтому разработку методов и технических средств контроля геомеханических процессов следует вести оптимальным образом.

При этом необходимо получить ответ на вопрос: каким требованиям должны отвечать методы и аппаратура контроля напряженного состояния массива пород, чтобы с достаточной уверенностью можно было бы прогнозировать в условиях помех природного и техногенного характера геомеханические процессы при разработке месторождений полезных ископаемых. Специфика подходов при анализе геомеханических процессов и при создании аппаратуры и систем для их контроля требует некоего «мостика», связывающего на первый взгляд далеко отстоящие друг от друга области. Это даст возможность осмыслить накопленные результаты с общих позиций, увидеть причины, сдерживающие дальнейшее продвижение вперед, найти наиболее эффективные пути для решения возникающих проблем.

Роль такого связующего мостика может сыграть теория информации [1, 2]. Информация является такой же общей характеристикой, как и энергия, что дает основания для этого утверждения.

1.1. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И НЕОБХОДИМОСТЬ КОНТРОЛЯ

До проведения операции контроля неопределенность состояния массива характеризуется априорной безусловной энтропией $H(\omega)$, где ω означает состояние объекта контроля. После проведения операции контроля путем измерения значений одного или нескольких параметров x неопределенность состояния будет характеризоваться усредненной величиной - полной условной энтропией $\bar{H}(\omega|x)$. Разность этих величин:

$$I = H(\omega) - \bar{H}(\omega|x)$$

представляет собой количество информации, полученной в результате операции контроля и может характеризовать качество системы контроля. Однако эта величина зависит от априорных вероятностей состояния объекта, основания логарифма при вычислении этой величины. Поэтому более предпочтительной является относительная величина:

$$\mathfrak{E} = \frac{H(\omega) - \bar{H}(\omega|x)}{H(\omega)}$$

характеризующая информационную эффективность параметров контроля и системы в целом безотносительно к основанию логарифма. Кроме этого зависимость величины $\mathfrak{E}$ от априорных вероятностей хоть и существует, но она не очень велика, и в определенных пределах изменения расчетных величин с ней можно не считаться.

Здесь:

$$H(\omega) = -\sum_{i=1}^k P(\omega_i) \log_n P(\omega_i)$$

где $P(\omega)$ - априорные вероятности состояний;

k - количество состояний;

n - основание логарифма; $n = 2$.

В случае двух состояний (ω_y и ω_n) энтропия вычисляется как:

$$H(\omega) = -P(\omega_n) \log[P(\omega_n)] - [1 - P(\omega_n)] \log[1 - P(\omega_n)]$$

Полная условная энтропия $\overline{H(\omega|x)}$ определяется как:

$$\overline{H(\omega|x)} = \int_x p(x) \cdot H(\omega|x) dx = - \int_x (P(\omega_y) \cdot p(x|\omega_y) \times \\ \times \log_2 \left[\frac{P(\omega_y) \cdot p(x|\omega_y)}{p(x)} \right] + P(\omega_n) \cdot p(x|\omega_n) \cdot \log_2 \left[\frac{P(\omega_n) \cdot p(x|\omega_n)}{p(x)} \right]) dx$$

где $P(\omega_i)$ - априорные вероятности состояний ω_i ;

$p(x|\omega_i)$ - условные вероятности параметра контроля (одного или нескольких) в состоянии ω_i ;

$p(x)$ - плотность вероятности параметра (параметров) контроля x ;

$$p(x) = \sum_{i=1}^k P(\omega_i) p(x|\omega_i)$$

$H(\omega|x)$ - частная условная энтропия.

Свойства объекта характеризуются необходимостью контроля, которая оценивается относительным недостатком информации, требуемой для надежного принятия решений. Возможны два подхода при расчете необходимости.

В первом случае необходимость контроля N рассчитывается как

$$N = \frac{H(\omega) - H_0}{H(\omega)}$$

где H_0 - допустимое значение энтропии.

H_0 вычисляется через допустимые вероятности состояний.

В случае двух состояний объекта (устойчивое ω_u и неустойчивое ω_n) допустимая вероятность неустойчивого состояния может быть принята равной $P_0(\omega_n)=0,00135$ из условия граничного значения, равного трем среднеквадратичным отклонениям. В этом случае $H_0=0,0148$ бит при измерении энтропии в двоичных единицах информации.

Возможен и другой подход. Понятие энтропии, используемой в теории информации, существует и в термодинамике, которая может описывать интересующие нас геомеханические процессы. В то же время, как это было показано в 1950-е годы американским физиком Л.Бриллюэном, существует прямая зависимость между термодинамической энтропией объекта и количеством информации (т.е. инфор-

мационной энтропией), необходимой для описания состояния этого объекта. При допущении прямопропорциональной зависимости между ними расчеты информационных характеристик можно производить методами термодинамики.

Необходимость контроля с учетом сделанных допущений оцениваем следующим образом:

$$N = \frac{H(\omega) - H_0}{H(\omega)} = \frac{S_2 - S_1}{S_2}$$

где $H(\omega)$, H_0 - информационная энтропия массива с выработкой и допустимая из условий безопасности;
 S_1 , S_2 - термодинамическая энтропия напряженного состояния нетронутого массива (принятого за безопасное) и массива после проведения выработки.

Термодинамическая энтропия S напряженно-деформированного состояния определяется выражением [3]:

$$S = E \cdot \alpha \cdot \varepsilon + c \cdot \ln \frac{T}{T_0}$$

где E - модуль упругости;

ε - деформация;

α - коэффициент температурного расширения;

c - теплоемкость при постоянной деформации;

T_0 , T - температура до и после деформирования.

При безграничном массиве пород можно принять $T=T_0$ откуда

$$S = E \cdot \varepsilon \cdot \alpha \quad \text{и}$$

$$N = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_2} = \frac{K - 1}{K} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

где $\sigma_i = E \cdot \varepsilon_i$ - величины напряжений;

K - коэффициент концентрации напряжений по отношению к нетронутому массиву пород.

ε_1 , ε_2 - величины деформаций нетронутого массива и массива с выработкой.

При проектировании системы контроля напряженного состояния массива пород следует учитывать две характеристики: необходимость контроля N (характеристика состояния объекта - массива