

УДК 622.831+622.2

**К ПРОБЛЕМЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ
ПОРОДНОГО МАССИВА В КАЧЕСТВЕ
ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ**

М. В. Рыльникова¹, Л. И. Маневич², В. А. Еременко¹, В. В. Смирнов²

¹Институт проблем комплексного освоения недр РАН, E-mail: eremenko@ngs.ru,
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия

²Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН,
ул. Косыгина, 4, 119991, г. Москва, Россия

Исследованы режимы и параметры горных работ для создания условий передачи кинетической энергии, формируемой в ходе реализации геотехнологических процессов, к генераторам электрического тока. Рассмотрены особенности применения устройств для съема энергии горного массива в условиях подземной разработки месторождений твердых полезных ископаемых. Для “захвата” энергии упругих колебаний породного массива разработана конструкция низкочастотной энергетической ловушки, работающей в широком спектре изменения амплитуды и частоты колебаний породного массива и состоящей из трех нелинейных осцилляторов заданной массы и упругих характеристик.

Энергия породного массива, энергетическая ловушка, колебания, резонанс, напряженно-деформированное состояние, сейсмическая энергия динамических явлений, блок, орт, вибродоставочные погрузочные установки (ВДПУ)

Современное состояние горного производства характеризуется истощением запасов богатых руд при ограниченном восполнении минерально-сырьевой базы за счет ввода новых перспективных месторождений. В таких условиях предприятиям приходится вовлекать в промышленную эксплуатацию запасы бедных и забалансовых руд, изыскивать способы снижения себестоимости добычи минерального сырья с учетом усложнения горно-геологических условий разработки и роста глубины ведения горных работ. Последний фактор ведет к непропорционально большому росту энергоемкости добычи руды [1], поэтому особую актуальность приобретают вопросы повышения эффективности энергоснабжения горных предприятий.

В связи с этим необходимо создание научного задела в области преобразования энергии, формируемой в ходе разработки месторождений полезных ископаемых, путем использования техногенных возобновляемых источников энергии для преобразования в электрическую. Термин “возобновляемый источник энергии” широко используется в научной литературе и применим не только к природным возобновляемым источникам энергии, но и к техногенным. Традиционно считается, что во всех решениях по получению электрической энергии из известных возобновляемых источников (вода, ветер, солнце, геотермальные воды, приливы и отливы) предпочтительным условием является непрерывность потока энергии, преобразуемой в элек-

трическую на конечных интервалах времени. Однако непрерывность только желательное, но не необходимое свойство возобновляемых источников энергии как природных, так и техногенных. Известно, что для солнечных, ветровых генераторов, а также традиционных гидроэлектростанций характерен непостоянный режим работы, вплоть до полных остановок. Именно поэтому важно аккумулировать энергию, чтобы потребитель мог расходовать ее по мере необходимости. На наш взгляд, одним из наиболее сложных для воспроизводства возобновляемых техногенных источников энергии, потенциально “неограниченной” величины, является горное давление. Традиционно этот фактор рассматривается как осложняющий при ведении горных работ [2]. Известно, что при проектировании и разработке месторождений полезных ископаемых технологические процессы по управлению горным давлением формируют значительную часть затрат на добычу руды и обеспечение безопасности горных работ. Такие затраты существенно растут с увеличением глубины горных работ. В данной статье рассмотрены решения по использованию энергии горного массива для преобразования в электрическую. Для “захвата” энергии упругих колебаний горного массива оценена перспектива использования энергетических ловушек, принцип работы которых основан на эффектах нелинейного резонанса [3–5]. Предлагаемые энергетические ловушки работают в широком диапазоне амплитудно-частотных характеристик колебаний массива горных пород.

О РЕЗУЛЬТАТАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

При проведении теоретических и экспериментальных исследований определены условия формирования зон концентрации упругой энергии породного массива в условиях применения различных классов и параметров систем разработки [6]. Так, после вскрытия горными выработками месторождения твердого полезного ископаемого техногенно измененный массив начинает активизироваться с выделением кинетической энергии в виде смещений, деформаций, разрушения с наведением техногенной трещиноватости (рис. 1). Наибольшее влияние на состояние массива горных пород оказывают взрывные работы, а также процессы разрушения налегающего массива над накопленными на рудниках технологическими подземными пустотами, что приводит к существенному изменению природного напряженного-деформированного состояния (НДС) горного массива.



Рис. 1. Зона нарушенности пород, выявленная в горизонтальной скважине № 1С диаметром 59 мм на расстоянии 5.5 м от устья скважины, рудник “Таштагольский”

Картирование керновой скважины, пробуренной в борту подготовительного орта 2 на гор. –210 м ($H=750$ м, ширина выработки 3.95 м, высота 3.72 м) на участке Восточный Таштагольского месторождения, проведенное с использованием разработанной в ИПКОН РАН методики оперативного мониторинга НДС массива горных пород, выявило наличие зон нарушенно-

сти пород (ЗНП), в которых в виде повышенной трещиноватости проявляются локальные формы дезинтеграции массива пород [7] и формируется зона концентрации сжимающих напряжений (см. рис. 1). Размеры зарегистрированной области влияния подготовительной выработки на состояние упругого-деформируемого породного массива в горизонтальной плоскости составили 1.2 ее ширины. Последующие измерения установили периодичный характер раскрытия и закрытия трещин в ЗНП, что связано с ведением взрывных и очистных работ на данном участке, а также вторичным воздействием тектонических сил, регистрируемых микросейсмическим методом контроля. Например, в районе расположения скважины (см. рис. 1) зафиксировано динамическое событие энергией 10^2 Дж, вызванное разгрузкой массива в виде мгновенного хрупкого разрушения и образования ЗНП.

Теоретически определено [6], что технические устройства для съема упругой энергии горного массива можно устанавливать в ЗНП на участках, где ведутся очистные, подготовительные и нарезные работы. При этом необходимо учитывать ориентацию рабочих поверхностей таких устройств относительно направления максимальных смещений (относительных деформаций) породного массива. Проведение исследований в данной области имеет свои особенности. Контролировать и оперативно управлять процессами деформирования породного массива в ходе подземной разработки месторождений полезных ископаемых на больших глубинах весьма сложно и ответственно. Учитывая регистрируемое на глубине около 1000 м горное давление до 100 МПа и более, технические устройства для преобразования упругой энергии породного массива должны обладать повышенной несущей способностью и прочностью.

При рассмотрении возможности применения устройств для съема упругой энергии горного массива в условиях подземной разработки месторождений твердых полезных ископаемых возникли вопросы эффективности управления процессами сбора, преобразования и аккумуляции энергии нетрадиционных возобновляемых источников, формирующихся в горнотехнических системах. Принципиально важно при этом знать, какой объем энергии от возобновляемых источников возможно при этом получить.

Упругие волновые процессы, возникающие в массиве горных пород при ведении горных работ и вызванные тектоническими явлениями [6], технологическими и массовыми взрывами [8, 9], оказывают существенное влияние на механическое состояние массива горных пород и не всегда имеют идентичный и циклично повторяющийся характер. Сейсмические характеристики динамических явлений (толчков) представлены на рис. 2 и 3 [8, 10].

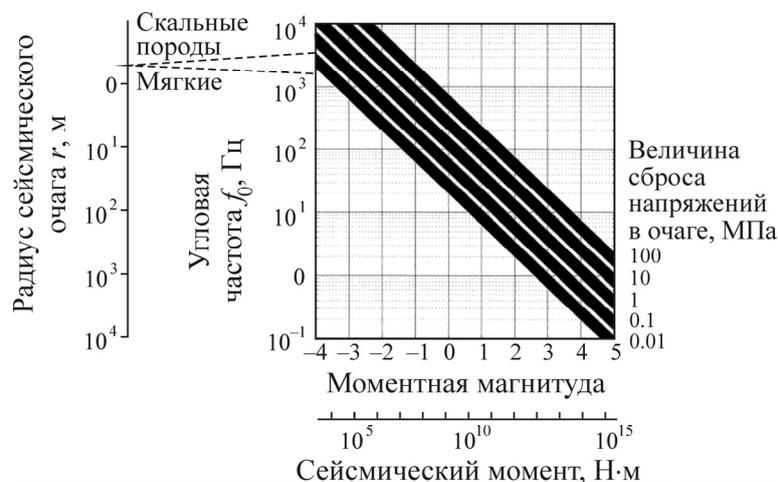


Рис. 2. Теоретическая зависимость радиуса сейсмического очага r и угловой частоты f_0 от сейсмического момента для различных величин сброса напряжений в очаге в районе взрыва [8, 10]

Так, при взрывании технологических блоков на Таштагольском месторождении выделение сейсмической энергии от взрывов и суммарной сейсмической энергии динамических явлений, произошедших после взрыва, вызвано соответствующей реакцией массива горных пород и зависит от геологических, геомеханических особенностей и структуры массива конкретного участка месторождения. В течение длительного времени регистрируются случаи разрушения массива горных пород от действия статических сил, связанных с проявлением горного давления, и динамического воздействия взрыва.

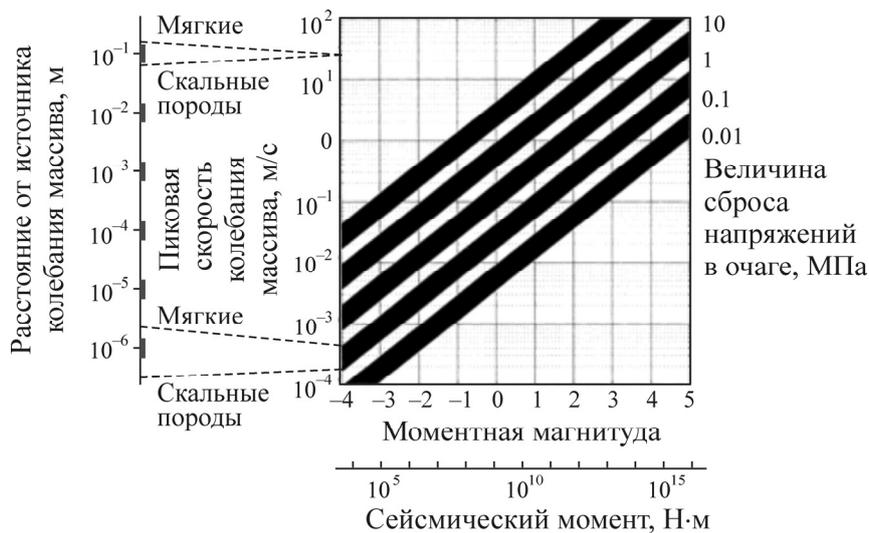


Рис. 3. Эмпирическая зависимость гипоцентрального расстояния от источника взрыва и пиковой скорости колебаний массива Rv_{max} от сейсмического момента для различных величин сброса напряжения в очаге [8, 10]

Следует отметить, что полная удельная работа, инициируемая взрывом заряда ВВ, примерно на три порядка выше, чем сейсмическая энергия самого взрыва. Пример сравнения параметров массового взрыва блока № 5 Таштагольского месторождения:

Дата	Этаж (глубина), м	Масса заряда ВВ, т	Сейсмическая энергия взрыва E_v , Дж	Суммарная сейсмическая энергия индуцированных динамических явлений E_c , Дж	Полная удельная работа A заряда ВВ (аммонит № 6 ЖВ), Дж
12.10.2014	-280 ÷ -210 (750)	167	$1.19 \cdot 10^8$	$1.73 \cdot 10^6$	$5.94 \cdot 10^{11}$

Анализ результатов проведенных исследований показал [6], что поскольку модуль упругости горного массива на 3 – 5 порядков выше действующих напряжений, величина упругих деформаций массива под действием статических напряжений измеряется долями миллиметров. Учитывая отсутствие цикличности в развитии упругих деформаций и их малую величину, сложно ожидать в этих условиях съема значительного объема энергии от работы статических сил для преобразования ее в электрическую.

Для более эффективного съема упругой энергии породного массива необходимы стабильные (желательно, циклично повторяющиеся с заданной амплитудой и частотой) колебания породного массива: например, вызванные работой вибродоставочных установок, которые эксплуатируются в подготовительных выработках оснований технологических блоков при ведении очистных работ.

Другим альтернативным источником извлечения кинетической энергии следует рассматривать поток взорванной рудной массы, которая поступает из технологического блока через подготовительные выработки его оснований и далее подается на вибродоставочные погрузочные установки (ВДПУ) и в вагонетки. В данном случае возникает возможность получения электрической энергии из нетрадиционных источников, если рассматривать падающий поток кусков породы, выпускаемой в течение некоторого интервала времени, как источник не только собственной энергии, но и энергии, передаваемой горному массиву в виде колебаний. Падающие куски отбитой рудной массы изначально обладают потенциальной энергией:

$$E = mgh,$$

где m — масса породных кусков, кг; g — ускорение свободного падения, 9.8 м/с^2 ; h — высота их падения, м.

На рис. 4 показана зависимость расчетной энергии падающего под действием силы тяжести куска руды, линейный размер которого (a) варьирует от 0.2 до 1.0 м (для условий применения системы этажного принудительного обрушения и отбойки руды на Таштагольском руднике), от высоты h , изменяющейся в диапазоне 0–10 м. При падении куска совершается трансформация работы силы тяжести в кинетическую энергию, которая может преобразовываться в механическую и электрическую энергию.

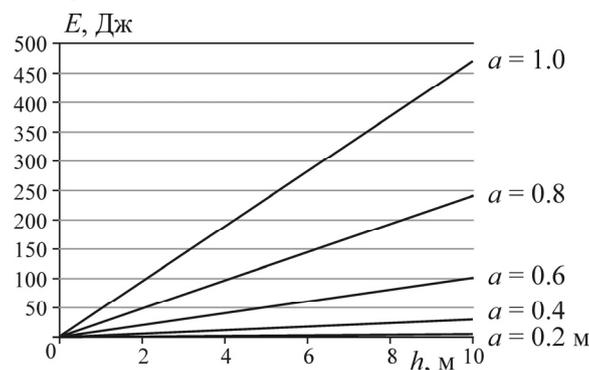


Рис. 4. Зависимость потенциальной, трансформируемой в кинетическую, энергии падающего куска размером $a = 0.2 \div 1.0$ м от высоты падения h

Исследование режима и параметров ведения горных работ для создания условий передачи кинетической энергии, формируемой в ходе реализации геотехнологических процессов, к генераторам электрического тока [6] направлено на обеспечение постоянства энергетических характеристик внутришахтных рудопотоков. Стабильные показатели технологических процессов, в ходе которых формируются, перемещаются по внутрирудничной сети и используются технологические потоки, достижимы при достаточно стабильных режимах и параметрах ведения горных работ. Для эффективного съема упругой энергии породного массива необходимо обосновать режимы каждой составляющей технологического процесса, а также оценить параметры, обеспечивающие наиболее благоприятные условия передачи кинетической энергии к генераторам электрического тока.

Для горно-геологических, геомеханических и горнотехнических условий разработки Таштагольского месторождения системой этажного принудительного обрушения выполнено обоснование технологических решений, способствующих реализации процессов преобразования энергии, возобновляемой при ведении горных работ. Это исследования, касающиеся применения энергоэффективных геотехнологий, связаны с организацией процессов горных работ в конкретных условиях горного производства.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РУДОПОТОКОВ НА ПРИМЕРЕ ОТРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БЛОКА ТАШТАГОЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Основной массив технологического блока № 4 на Таштагольском месторождении (восточный участок, гор. – 140 ÷ – 210 м) отбивается с помощью нисходящих, восходящих и горизонтальных пучков скважин на компенсационное пространство камеры эллипсовидной формы, а также на зажимающую среду соседнего блока № 5-6. Подсечка блока — плоская, высотой 2 м, образуется над всей площадью днища блока. Выпуск руды производится с использованием ВДПУ-4ТМ в количестве 13 шт. Железная руда [11] — магнетитовая с крепостью пород по шкале Протодяконова $f = 12$, трещиноватая (среднее расстояние между трещинами 0.65 м), плотность $\gamma = 4000$ кг/м³. Вмещающие породы — скарны, порфириты и сиениты ($f = 10–16$, среднее расстояние между трещинами 0.6–0.7 м, $\gamma = 2700–2800$ кг/м³). Блок обрабатывается на глубине 750 м от земной поверхности в условиях повышенного горного давления ($\sigma_1 = 60$ МПа, [11]), вызванного действием тектонических сил и техногенными изменениями горного массива.

Параметры блока № 4 Таштагольского месторождения:

Длина блока	68 м
Ширина блока	27 м
Высота блока	70 м
Высота отрезной щели	47 м
Высота плоской подсечки	2 м
Превышение уровня подсечки над отметкой откаточного горизонта	12 м
Количество ВДПУ-4ТМ	13 шт.

Технические показатели по блоку № 4 Таштагольского месторождения:

Объем взрываемого массива	82 066 м ³
Балансовые запасы блока	364 200 т
Сырая руда, подлежащая выпуску	456 590 т
Объемный вес руды	4.02 т/м ³
Средний объем рудной массы, извлекаемой через одну дучку	29 092 т
Общее количество ВВ на первичную отбойку	147 527 кг
Удельный расход ВВ на первичную отбойку	0.576 кг/т
Объем компенсационной камеры	8 091 м ³
Объем подсечного пространства	2 945 м ³
Объем выработок в зоне обрушения	2 074 м ³
Разрыхление руды при массовом взрыве	23 %
Разубоживание руды	27.71 %
Потери руды	9.37 %
Производительность блока сменная	420 т/см
Производительность блока месячная	31 500 т/мес

Применяется традиционная система разработки [12], для отработки мощных крутопадающих железорудных залежей — этажное принудительное обрушение (рис. 5). Отработка блока осуществляется в следующей последовательности: оформление подсечки; формирование компенсационных камер и отбойка руды массовым взрывом.

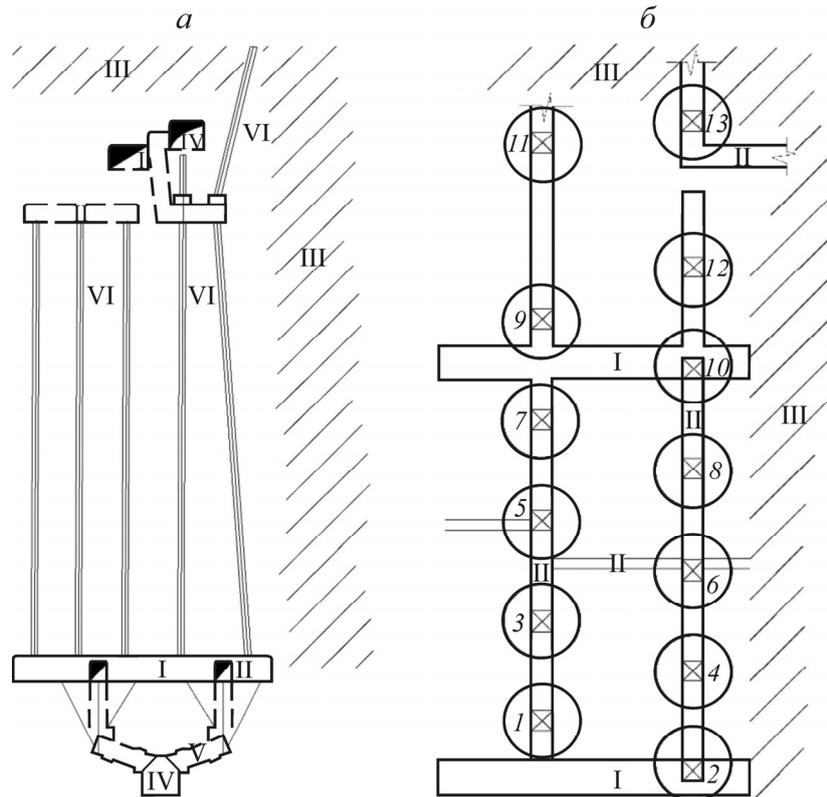


Рис. 5. Вертикальный разрез (а) и план горизонта подсечки (б) блока № 4 рудника “Таштагольский”: I — буровые камеры; II — буровые заходки; III — выработанное пространство соседних блоков; IV — доставочный орт; V — камера под ВДПУ; VI — пучки скважин диаметром 105 мм; 1 – 13 — ВДПУ, камеры, дучки и выпускные воронки

Выпуск руды из блока № 4 осуществляется на гор. –210 м с применением ВДПУ-4ТМ (рис. 6). Руда грузится в вагоны ВГ-4,5 и ВГ-9,5 в орте № 4 гор. –210 м, далее транспортируется до опрокидывателя комплекса подземного дробления, затем выдается скипами на поверхность. На ВДПУ используются асинхронные электродвигатели мощностью 30 кВт с частотой вращения 1500 об/мин. Оценка возможности применения технических устройств для съема энергии колебаний породного массива при ведении очистных работ показала, что предпочтительным местом для размещения “энергетических ловушек” являются площадки, расположенные под вагонетками напротив камер, где установлены ВДПУ. Извлечение механической энергии производится из потока взорванной рудной массы, которая поступает из блока через подготовительные выработки оснований блока на ВДПУ и в вагонетки.

Также оптимальным местом установки устройств для съема механической энергии являются площадки, расположенные под дучками в задней области камеры под ВДПУ и защищенные от падения обрушенной породы и внезапного обрушения рудной массы при выпуске (см. рис. 6). Кроме того, соответствующие устройства для съема механической энергии породного массива целесообразно размещать в стойках передвижной крепи, подверженных воздействию циклически повторяющихся нагрузок.

На примере блока № 4 выполнен расчет потенциальной энергии, перемещаемой в результате взрывного разрушения горной массы 465 590 т, которую можно дозированно извлекать при выпуске ее из блока через 13 ВДПУ, размещенных в днище. Высота падения кусков породы изменяется от 1,95 до 0,75 м по мере заполнения вагонов (см. рис. 6). Согласно расчетам, средняя высота составляет 1,35 м. Общая потенциальная энергия падения кусков рудной массы по

блоку равна в среднем 6.04 ГДж, что соответствует 464.66 МДж на одно ВДПУ. С учетом программы выпуска руды на один блок при применении 13 ВДПУ достаточно 4 демонтируемых устройств для съема механической энергии породного массива.

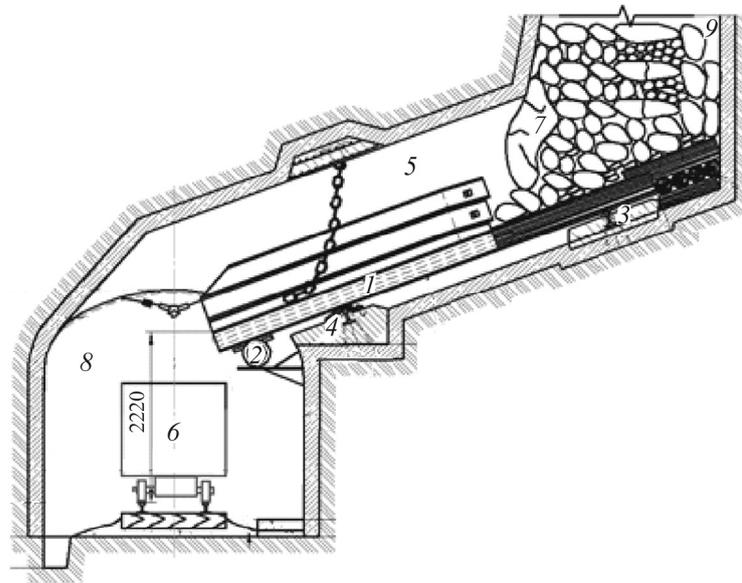


Рис. 6. Установка ВДПУ-4ТМ в откаточном орте: 1 — ВДПУ; 2 — электродвигатель; 3 — задняя опора; 4 — передняя опора; 5 — камера под ВДПУ; 6 — вагонетка; 7 — горная масса; 8 — орт; 9 — дучка

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЛОВУШКИ РЕЗОНАНСНОГО ТИПА

Проведение экспериментальных исследований на удароопасных месторождениях Горной Шории позволило определить наиболее благоприятные места установки энергетических ловушек вдоль подготовительных выработок в основаниях блоков. Это участки, расположенные в непосредственной близости от камер, в которых работают ВДПУ, где удобно крепить и работать с устройствами для съема энергии (рис. 7). На данные участки также оказывают воздействия другие источники упругих колебаний, которые с помощью микросейсмического метода регистрируются в шахте при ведении горных работ. Это динамические явления, взрывы, выпуск рудной массы из блока и пр. [11].

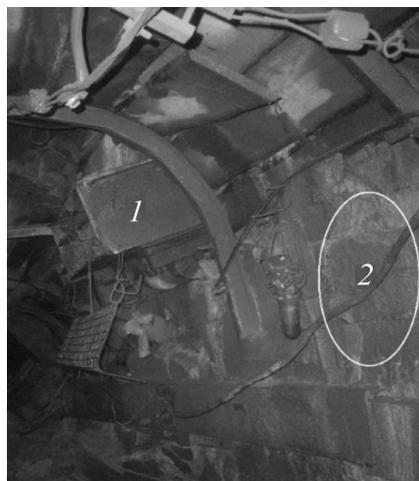


Рис. 7. Место установки энергетической ловушки (1) на борту орта вблизи ВДПУ (2)

В качестве энергетической ловушки используется элемент механической или физической системы, в котором удается сконцентрировать значительную часть механической энергии от внешнего динамического воздействия (рис. 8). Источниками такого механического воздействия на массив горных пород могут служить, например, динамические явления, массовые и технологические взрывы, вибрационные установки, собственно процесс выпуска горной массы из блока и др. Энергетические ловушки применяют, как правило, для поглощения упругой энергии (демпфер), снижения передаваемых усилий (амортизатор) либо ухода от резонанса (классический гаситель колебаний) [3–5, 13, 14].

Предлагаемый вариант эффективного преобразователя энергии колебаний горного массива в энергию колебаний осцилляторов основан на принципе нелинейного широкополосного резонанса и может быть использован как источник энергии для подзарядки аккумуляторных батарей слаботочной электроники, например сети распределенных датчиков. Процесс возбуждения осцилляторов преобразователя за счет колебаний поверхности горного массива может рассматриваться как захват энергии этих колебаний, поэтому термин “энергетическая ловушка” вполне оправдан. При этом процесс преобразования энергии колебаний осцилляторов в электрический ток может быть основан на различных принципах, самый известный из которых — электромагнитный, согласно которому движение осциллятора вызывает электродвижущую силу индукции в катушке и может быть преобразовано в электрический ток. Однако в данной работе описывается только процесс широкополосного захвата энергии колебаний массива в энергию колебаний осцилляторов ловушки.

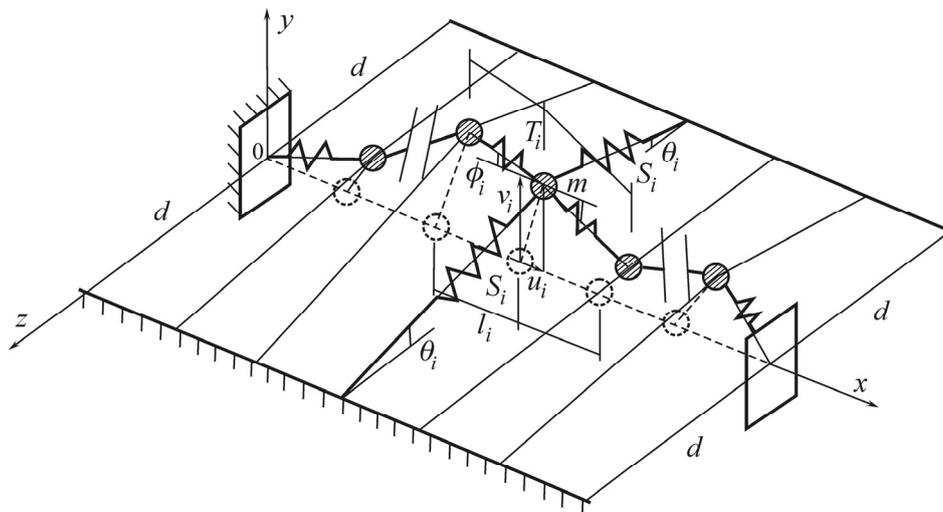


Рис. 8. Принципиальная схема многочастотной ловушки [5]: l_i, d — длины нерастянутых пружин; θ_i и ϕ_i — углы отклонения элементов заданной массы (осцилляторов); T_i и S_i — силы, действующие на осцилляторы в продольном (вдоль оси ловушки) и поперечном направлениях; m — заданная масса осцилляторов; u_i, v_i — смещения осцилляторов в горизонтальном и вертикальном направлениях

Необратимость процесса переноса энергии от горного массива к ловушке достигается за счет выхода ловушки из резонанса. В таком случае собственная частота ловушки не должна быть фиксированной, иначе обратный поток энергии неизбежен. Чтобы обеспечить целенаправленный “необратимый” перенос энергии, предложена схема энергетической ловушки. Ее частота не является внутренней динамической характеристикой, а определяется интенсивностью возбуждения.

Упругие колебания породного массива, генерируемые различными источниками, характеризуются достаточно широким спектром частот в диапазоне 5–60 Гц [8–10, 11], причем максимум интенсивности колебаний зависит от типа и расстояния до источника колебаний. Поэтому использование ловушек, основанных на принципе линейного резонанса, неэффективно, так как линейные осцилляторы имеют определенную резонансную частоту и характеризуются крайне слабым откликом на другие частоты [3–5]. В системах, основанных на нелинейных осцилляторах, но содержащих линейную составляющую, существует возможность подстраиваться под внешнее возбуждение. При малых амплитудах колебаний в этом случае доминирующей оказывается линейная компонента. Наиболее перспективно использование нелинейных систем, расчет параметров которых осуществляется решением уравнений нелинейной динамики.

Преимущество таких ловушек заключается в отсутствии собственной линейной резонансной частоты, а также в изменении резонансных частот от внешнего воздействия. Устройства данного типа могут быть основаны либо на ротаторах (по типу массивный волчок), либо на поперечных колебаниях осцилляторов на подвесках, не обладающих изгибной жесткостью. Последний вариант представляется предпочтительным, поскольку передача возбуждения от породного массива к осциллятору очевидна. Система нелинейных осцилляторов обладает внутренними резонансами, полоса которых зависит от числа осцилляторов и амплитуды внешнего возбуждения [3–5]. Ловушки, содержащие несколько осцилляторов, оказываются более эффективными. При определенных условиях в системе нелинейных осцилляторов могут наблюдаться явления локализации колебаний, позволяющие осуществлять “захват” упругой энергии колебаний породного массива некоторой группой осцилляторов. Происходит возрастание амплитуд колебаний данной группы осцилляторов по сравнению с другими. Таким образом, эффективность преобразования упругой энергии колебаний в электрическую энергию может оказаться заметно выше, чем при отсутствии “явлений локализации”. Теоретические основы локализации колебаний описаны в [3, 4].

Предлагаемый авторами вариант широкополосной энергетической ловушки основан на применении системы нелинейных осцилляторов с так называемым “акустическим вакуумом” [5]. Принципиальная схема многочастотной ловушки представлена на рис. 8.

В данном случае осцилляторы — шарообразные элементы заданной массы, закрепленные на пружинах и колеблющиеся в направлении, перпендикулярном плоскости расположения пружин. На рис. 8 показаны основные кинематические и динамические характеристики технической системы: длины упругих элементов, углы отклонения от положений равновесия, натяжение пружин. В системе осцилляторов существуют внутренние резонансы, ширина полосы которых зависит от характеристик колебательной системы и интенсивности внешнего силового возбуждения [5]. При определенных соотношениях жесткостей продольных и поперечных пружин в такой системе возможен переход к “захвату” энергии упругих колебаний некоторой группой осцилляторов.

Асимптотический анализ упругих колебаний системы осцилляторов позволил установить конструктивные параметры экспериментальной ловушки, показанной на рис. 8. Ловушка выполнена в виде системы из трех нелинейных осцилляторов (рис. 9). Такая система легко устанавливается непосредственно вблизи источника упругих колебаний, а ее характеристики подбираются под фактический спектр частот и амплитуд колебаний источника. Конструкция ловушки (рис. 9) состоит из жесткой рамки, закрепляемой на боку или на почве выработки. Элементы установленной массы соединяются с рамкой с помощью упругих связей — пружин или струн с нулевым натяжением.

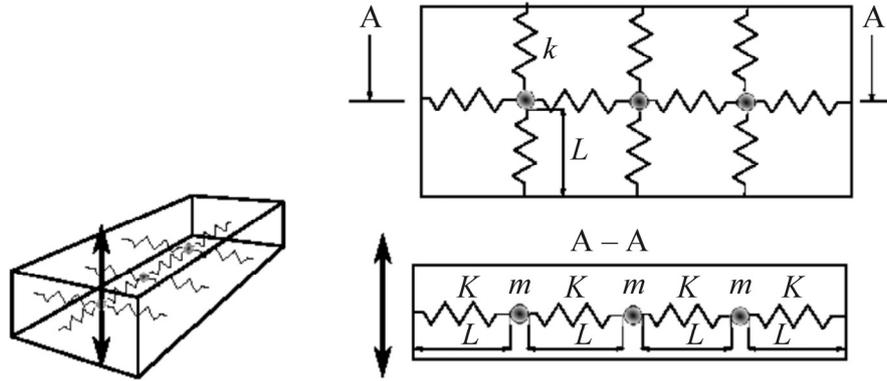


Рис. 9. Схема низкочастотной широкополосной энергетической ловушки для съема энергии упругих колебаний горного массива: m — масса осциллятора; K — жесткость продольной пружины; k — жесткость поперечной пружины; L — длина пружины. Жирной линией показано направление движения грузов

Потенциальная энергия системы осцилляторов записывается в виде уравнения:

$$\begin{aligned}
 E = & \frac{K}{2} \left\{ \left[\sqrt{\left(1 + \frac{U_1}{L}\right)^2 + \left(\frac{W_1}{L}\right)^2 + \left(\frac{V_1}{L}\right)^2} - 1 \right]^2 + \right. \\
 & + \sum_{n=2}^N \left[\sqrt{\left(1 + \frac{U_n - U_{n-1}}{L}\right)^2 + \left(\frac{W_n - W_{n-1}}{L}\right)^2 + \left(\frac{V_n - V_{n-1}}{L}\right)^2} - 1 \right]^2 + \\
 & \left. + \left[\sqrt{\left(1 - \frac{U_N}{L}\right)^2 + \left(\frac{W_N}{L}\right)^2 + \left(\frac{V_N}{L}\right)^2} - 1 \right]^2 \right\} + \\
 & + \frac{k}{2} \left\{ \sum_{n=1}^N \left[\left(\sqrt{\left(\frac{U_n}{L}\right)^2 + \left(1 + \frac{W_n}{L}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{L}\right)^2} - 1 \right)^2 + \left(\sqrt{\left(\frac{U_n}{L}\right)^2 + \left(1 - \frac{W_n}{L}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{L}\right)^2} - 1 \right)^2 \right] \right\},
 \end{aligned}$$

где U_n , V_n , W_n — смещения n -го элемента заданной массы от положения равновесия в продольном (x), вертикальном (y) и поперечном (z) направлениях (см. рис. 8); L — невозмущенные длины упругих элементов; K и k — жесткости продольных и поперечных упругих элементов; N — число осцилляторов (в условиях эксперимента принято $N = 3$).

Уравнения движения осцилляторов получаются из уравнений Гамильтона с учетом диссипативных сил и энергии возбуждения:

$$m \frac{d^2 R_n}{dt^2} + \frac{dE}{dR_n} + \delta \frac{dR_n}{dt} = ma_n,$$

где $R_n = \{U_n, V_n, W_n\}$ — вектор смещения n -го осциллятора от положения равновесия, м; δ — коэффициент диссипации; a_n — ускорение рамки, м/с²; m — масса осциллятора, кг. Влиянием гравитационной составляющей на параметры вектора движения осцилляторов в данных уравнениях пренебрегаем.

Диссипативная составляющая связана с преобразованием энергии колебаний осциллятора в электрическую. Ускорение рамки служит возбуждающей силой и определяется колебаниями породного массива.

Мощность ловушки можно оценить из условий стационарности колебаний при внешнем возбуждении и диссипации энергии колебаний. Изменение энергии системы складывается из двух компонентов — работы внешних сил (движение рамки) и работы диссипативных сил. Условие стационарности предполагает, что эти компоненты равны, а мощность, отбираемая диссипативным элементом, равна работе внешних сил. Таким образом, энергия колебаний в единицу времени — мощность, подлежащая преобразованию в электрическую, представляется в виде

$$P = m \sum a_n \frac{dR_n}{dt} = \delta \sum \frac{dR_n}{dt} = 2 \frac{\delta}{m} E_{kin} ,$$

или

$$P = m \sum a_n \frac{dR_n}{dt} = \delta \left(\frac{dR_n}{dt} \right)^2 = \frac{\delta}{m} E_{kin} ,$$

где E_{kin} — кинетическая энергия колебаний осцилляторов.

При моделировании работы “энергетической ловушки” необходимо учитывать диапазон частот возбуждения. Однако эти параметры зависят от конкретного источника и условий размещения ловушки. В частности, при моделировании анализировался отклик на внешнее механическое возбуждение породного массива с переменной полосой частот (1–100 Гц), внутри которой частоты были равномерно распределены с постоянным шагом ~ 0.5 Гц и одинаковыми амплитудами ускорений.

На рис. 10 показан результат такого моделирования для следующих параметров колебательной системы: $K = 40$ Дж, $k = 20$ Дж, $L = 0.04$ м, $a_n = 1.0$ м/с², $m = 0.03$ кг. Коэффициент диссипации $d = 0.05$ кг/с. Энергия возбуждения рассчитывалась как энергия колебаний элементов заданной массы с ускорениями, равными ускорению рамки.

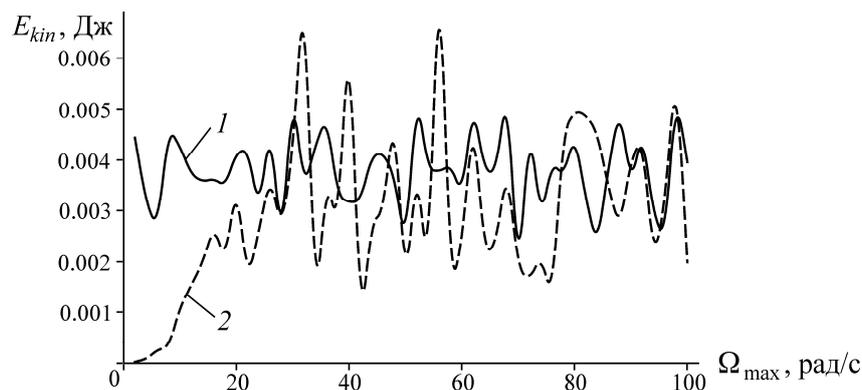


Рис. 10. Зависимость энергии колебаний рамки (1) и кинетической энергии колебаний осцилляторов (2) от ширины полосы частот возбуждения

Видно, что по мере расширения полосы частот возбуждений кинетическая энергия колебаний осцилляторов выходит на стационарный режим. При этом возможная снимаемая энергия оценивается в несколько миллиджоулей. Некоторые “колебания” в энергии возбуждения (кривая 1 на рис. 10) связаны с тем, что в спектр частот добавлена случайная компонента (частоты расположены со случайным шагом, не превышающим ± 0.5 Гц). Это может приводить к взаимному гашению различных частот возбуждения.

ВЫВОДЫ

Анализ результатов проведенных исследований показал, что поскольку модули упругости горных пород в массиве на 3–5 порядков выше уровня действующих напряжений, то величина абсолютных упругих деформаций массива под действием статических напряжений измеряется долями миллиметров. Учитывая отсутствие цикличности в развитии упругих деформаций и их малое значение, сложно ожидать съема значительного объема энергии от работы статических сил для преобразования ее в электрическую.

Для более эффективного съема упругой энергии массива горных пород необходимы достаточно стабильные, циклично возникающие источники колебаний (например, вызванные работой вибродоставочных установок, которые эксплуатируются в подготовительных выработках оснований блоков при ведении очистных работ системами разработки с массовым обрушением руды). Представляется возможным также извлечение кинетической энергии из потока взорванной рудной массы, которая поступает через подготовительные выработки оснований блока, далее — на вибродоставочные погрузочные установки и в вагонетки.

Для условий разработки месторождения системой этажного принудительного обрушения выполнено обоснование технологических решений, способствующих реализации процессов преобразования механической энергии, возобновляемой при ведении горных работ. Оценка возможности применения соответствующих устройств для съема кинетической энергии колебаний породного массива при ведении очистных работ показала, что предпочтительным местом для их установки являются площадки, расположенные под вагонетками — напротив камер, где установлены ВДПУ.

На примере отработки технологического блока № 4 Таштагольского месторождения осуществлен расчет потенциальной энергии, которой обладает разрушенная взрывом горная масса 465 590 т и которую можно дозированно выпускать из блока через 13 ВДПУ, расположенных в днище. Высота падения кусков породы изменяется от 1.95 до 0.75 м по мере заполнения вагонов. Средняя высота составляет 1.35 м. Общая потенциальная энергия падения кусков рудной массы по блоку равна в среднем 6.04 ГДж, что соответствует 464.66 МДж на одно ВДПУ.

Проведение экспериментальных исследований возможности использования упругой энергии породного массива позволило заключить, что в качестве источников возобновляемой энергии могут быть постоянно возобновляющиеся колебания породного массива. Наиболее благоприятными областями для установки “энергетических ловушек” являются места вблизи постоянных источников колебаний, например, находящиеся на контуре обнажений подготовительных выработок в основаниях блоков. Они расположены в непосредственной близости от камер, в которых работают ВДПУ, и в них возможно закрепить экспериментальные устройства для съема и оценки энергии породного массива. На данные участки оказывают воздействия и другие источники колебаний, в частности динамические явления, взрывы, выпуск рудной массы из блока и проч.

Рассмотренные схемы могут быть реализованы в виде широкополосной энергетической ловушки, работа которой основана на эффекте резонанса колебаний системы нелинейных осцилляторов с так называемым “акустическим вакуумом”. Такая система легко устанавливается непосредственно вблизи источника упругих колебаний, а ее технические характеристики подбираются под характерный спектр частот и амплитуд источника колебаний. Мощность ловушки оценивается из условий стационарности колебаний при внешнем возбуждении и диссипации энергии. Условия съема энергии системы определяются двумя компонентами — работой внешних сил (движение рамки) и работой диссипативных сил.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубецкой К. Н., Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В. и др. Условия устойчивого функционирования минерально-сырьевого комплекса России // ГИАБ. — 2015. — № 2.
2. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н. Проблема использования возобновляемых источников энергии в ходе разработки месторождений твердых полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2015. — № 1.
3. Manevitch L. I. New approach to beating phenomenon in coupled nonlinear oscillatory chains, Arch. Appl. Mech. 77(5), 2007.
4. Manevitch L. I., Smirnov V. V. Resonant energy exchange in nonlinear oscillatory chains and limiting phase trajectories: from small to large system, In Advanced Nonlinear Strategies for Vibration Mitigation and System Identification CISM Courses and Lectures, Vol. 518, Ed.: Alexander F. Vakakis, Springer, New York, 2010.
5. Кикоть И. П., Маневич Л. И. Связанные осцилляторы на упругой подложке в условиях акустического вакуума // Нелинейная динамика. — 2014. — Т. 10. — № 3.
6. Рыльникова М. В., Еременко В. А., Есина Е. Н. Условия формирования зон концентрации энергии горного массива // ГИАБ. Научная монография (специальный выпуск) — М.: Горная книга, 2014.
7. Шемякин Е. И., Фисенко Г. Л., Курленя М. В., Опарин В. Н., Рева В. Н., Глушихин Ф. П., Розенбаум М. А., Тропп Э. А. Зональная дезинтеграция горных пород вокруг подземных горных выработок. Ч. I // ФТПРПИ. — 1987. — № 1.
8. Mendecki A. J. Seismic monitoring in mines, London: Chapman and Hall, 1997.
9. Еременко В. А., Гахова Л. Н., Семенякин Е. Н. Формирование зон концентрации напряжений и динамических явлений при отработке рудных тел Таштагольского месторождения на больших глубинах // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.
10. Khalturin V. I., Rautian T. G., and Richards P.G. The seismic signal strength of chemical explosions, Bulletin of the Seismological Society of America, December 1998, Vol. 88, No. 6.
11. Указания по безопасному ведению работ на месторождениях Горной Шории, склонных и опасных по горным ударам / ИГД СО РАН, ОАО “Евразруда”. — Новосибирск; Новокузнецк, 2015.
12. Еременко А. А., Еременко В. А., Гайдин А. П. Совершенствование геотехнологии освоения железорудных удароопасных месторождений в условиях действия природных и техногенных факторов. — Новосибирск: Наука, 2008.
13. Leonid I. Manevich and Valeri V. Smirnov. Localized nonlinear excitations and interchain energy exchange in the case of weak coupling, In J. Awrejcewicz (ed.) Modeling, Simulation and Control of Nonlinear Engineering Dynamical Systems. Springer Science, 2009.
14. Valeri V. Smirnov, Denis S. Shepelev and Leonid I. Manevitch. Energy exchange and transition to localization in the asymmetric Fermi-Pasta-Ulam oscillatory chain, Eur. Phys. J. B (2013) 86: 10.

Поступила в редакцию 11/VI 2015