

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.27.32: 620.311.21

ПРОБЛЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ХОДЕ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Д. Р. Каплунов, М. В. Рыльникова, Д. Н. Радченко

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

Обсуждается актуальная для горнодобывающего комплекса России и мира проблема повышения энергоэффективности горного производства. Отмечены мировые тенденции в направлениях поиска новых нетрадиционных возобновляемых энергетических источников и их внедрения в ресурсосберегающие технологии по замкнутому циклу. В качестве таких источников рассматриваются: горное давление и упругие колебания горного массива, кинетическая энергия “падающих” закладочных смесей и жидкостей в процессах закладки выработанных пространств, водоотлива, потенциальная энергия силы тяжести большегрузного горнотранспортного оборудования, энергия отработанных воздушных струй системы вентиляции рудников, а также ее рекуперации и др. Авторы полагают, что преобразование этих видов энергии в электрическую в ходе реализации геотехнологических процессов разработки месторождений твердых полезных ископаемых, помимо решения экологических проблем, позволит развивать смежные направления в “малой энергетике”, в том числе для существенного сокращения внешнего энергопотребления рудника.

Энергоэффективность, разработка месторождений твердых полезных ископаемых, нетрадиционные возобновляемые источники энергии, преобразование

В мировой практике развития энергоэффективных технологических процессов различных производств прослеживаются тенденции, связанные с переходом на возобновляемые источники энергии, изысканием новых нетрадиционных энергетических источников, активным внедрением ресурсосберегающих технологий [1–5]. Так как стоимость всех используемых энергоресурсов имеет устойчивую тенденцию к росту, проблема повышения энергоэффективности горного производства рассматривается в качестве приоритетной совместно с вопросами технической модернизации и инновационного технологического развития.

Решение вопросов энергоэффективности и ресурсосбережения особенно актуально при создании современных технологий освоения месторождений твердых полезных ископаемых, поскольку потребности крупного горного предприятия в электроэнергии нередко превышают потребности об-

служивающей его городской инфраструктуры. Вместе с тем в проектах создания и развития горных предприятий обычно не учитываются потенциальные возможности энергосбережения и воспроизводства электроэнергии за счет использования энергетических ресурсов, формируемых непосредственно в ходе разработки месторождений полезных ископаемых. Речь идет о потенциальных возобновляемых источниках энергии, которые не встречаются вне горнотехнических систем.

В первую очередь, это потенциальная (упругая) энергия массива, приводящая к развитию квазистатических деформаций под действием горного давления, и энергия собственных и наведенных упругих колебаний горного массива. Несмотря на то что исследователями разных стран признается мощный энергетический потенциал этого источника, возможности преобразования данного вида энергии в электрическую до настоящего времени не раскрыты. Однако следует отметить, что роль горного давления общеизвестна не только в процессах разрушения массивов горных пород механическими или взрывными способами, но и в процессах повышения устойчивости подземных выработок и инженерных сооружений, обеспечивающих горнотехнологический процесс в целом. В этом аспекте на возможность и необходимость полезного использования сил горного давления при разработке угольных месторождений Кузбасса еще в 1940-х годах указывал чл.-корр. АН СССР Н. А. Чинакал, воплотивший эту идею в знаменитой в те годы “щитовой системе разработки мощных крутопадающих пластов угля” [6].

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Горное давление “традиционно” рассматривается как фактор, осложняющий ведение горных работ. При проектировании и разработке месторождений полезных ископаемых технологические процессы по управлению горным давлением формируют существенную часть затрат на добычу руды, которые значимо растут с увеличением глубины разработки. Известно [7], что напряжения, возникающие в горном массиве в зонах концентрации горного давления, многократно превышают силу тяжести налегающих пород и выше их прочности, что приводит к динамическому разрушению выработок и крепи, существенному материальному ущербу и человеческим жертвам.

Преобразованная в электрическую посредством установки специальных датчиков (рис. 1) энергия деформирования горного массива под действием горного давления может быть направлена в общерудничную сеть и использована для реализации технологических процессов горного производства. Актуальность данной проблемы тем более значима, чем больше глубина ведения горных работ. Богатые месторождения основных видов полезных ископаемых, расположенные в относительно простых горно-геологических условиях, в настоящее время в основном отработаны. В мировой практике прослеживается тенденция перехода на разработку месторождений в отдаленных районах и на глубинах 4000 м и более [7]. В таких условиях процессы управления напряженно-деформированным состоянием массива горных пород могут включать принципиально новые технологические операции, связанные с преобразованием энергии горного давления в иной вид энергии, пригодной для реализации технологических процессов добычи и переработки руд.

Для безопасного ведения горных работ проблема эффективного преобразования потенциальной энергии горного давления в другие виды энергии, в первую очередь в электрическую, остается пока не решенной. Хотя известно [8], что учет энергии горного давления при обосновании параметров разрушения горного массива позволяет сократить расход взрывчатых веществ на отбойку руды. В настоящее время это направление исследований является приоритетным в области формирования и использования энергии горного давления при проектировании и разработке рудных месторождений.

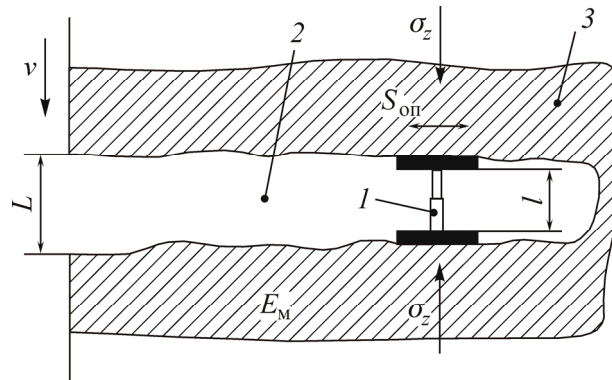


Рис. 1. Схема для съема энергии деформирования горного массива с помощью устройства (1), размещенного в специально сформированной щели (2) в опорном целике (3); σ_z — нормальные напряжения, МПа; l — раскрытие щели, мм

В ходе реализации геотехнологических процессов на горном предприятии формируются различные дополнительные источники возобновляемой энергии, которые наряду с энергией горного давления могут и должны быть освоены в целях повышения энергоэффективности производства. Преобразованию подлежат потенциальная и кинетическая энергии, формирующиеся при работе машин и механизмов; от давления большегрузной техники (рис. 2), воды и иных техногенных рудничных потоков; движущихся твердых, жидких масс и воздушной струи; энергии тепла недр Земли.

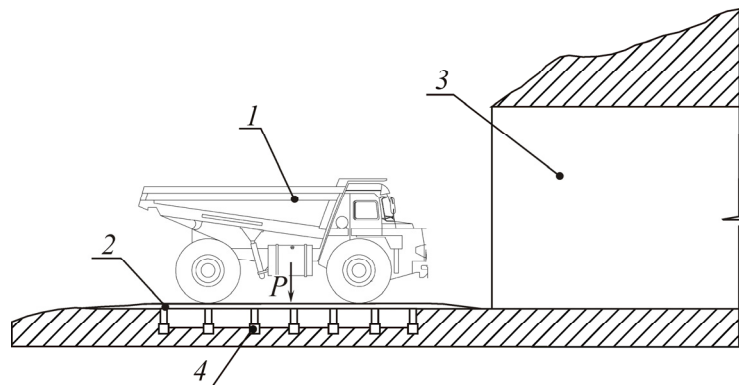


Рис. 2. Принцип преобразования энергии силы тяжести большегрузного транспорта в электрическую: 1 — подземный автосамосвал; 2 — платформа; 3 — устье портала штольни; 4 — устройство для преобразования энергии

В масштабах рудника разница высотных отметок, в пределах которых перепускаются твердые, жидкие и газообразные рудничные потоки, может составлять 1000 м и более, скорость потока воздушной струи может превышать 15 м/с, протяженность воздушного пути — десятки километров. По аналогии с природной, часть этой энергии является возобновляемой (рис. 3), а часть носит невозобновляемый характер.

Действительно, в ходе добычи и переработки руд в пределах горно-обогатительных предприятий перемещаются многомиллионные объемы горной массы, жидкости, пульпы, обладающие потенциальной и кинетической энергией, эквивалентной десяткам мегаватт-часов в год. Например, закладочная смесь, подаваемая с поверхности Земли в выработанное пространство рудника на глубину 250 м в количестве 4.5 млн т/год, имеет потенциальную энергию, эквивалентную 2.5 млн кВт·ч [9].

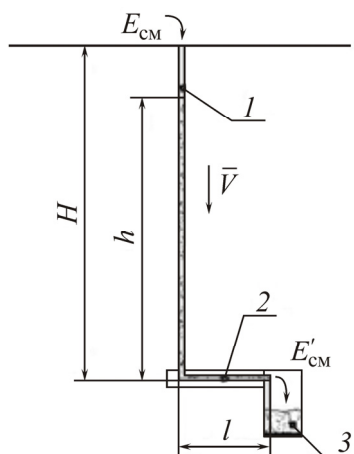


Рис. 3. Схема к расчету избытка энергии закладочной смеси, подаваемой по вертикальному стволу: 1 — вертикальная закладочная скважина; 2 — горизонтальный участок трубопровода; 3 — закладываемая камера; H — глубина скважины, м; h — высота вертикального става, заполненного закладочной смесью, м; l — длина горизонтального участка закладочного трубопровода, м; \bar{V} — вектор скорости движения закладочной смеси, м/с

Весьма перспективным является направление, связанное с утилизацией отходов обогащения в выработанном пространстве карьеров и шахт с попутным преобразованием энергии падающих масс в электрическую (рис. 4). Для этого сгущенные хвосты обогащения руд подаются в выработанное пространство карьера или подземного рудника, где с помощью специальных устройств происходит улавливание и преобразование энергии падающих масс в электрическую, используемую для покрытия собственных нужд горного предприятия. Количество получаемой энергии пропорционально перепаду высотных отметок и массе, подаваемой в выработанное пространство пульпы. С ростом глубины горных работ энергоэффективность таких технологий повышается.

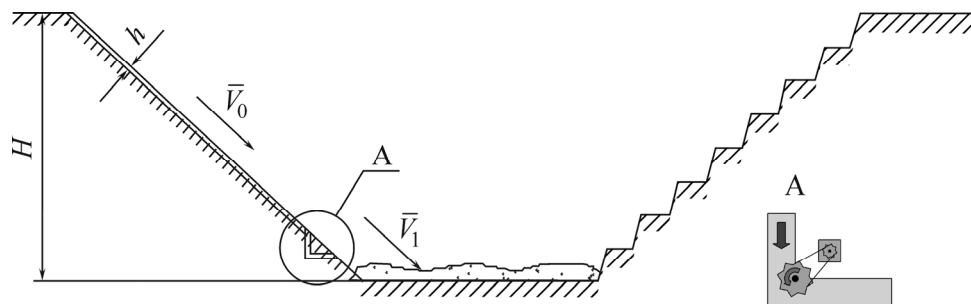


Рис. 4. Принцип преобразования в электроэнергию посредством генератора роторного типа (вид А) энергии подаваемой в карьер сгущенной пульпы: H — высота откоса борта карьера, м; h — глубина траншеи, м; \bar{V}_0 , \bar{V}_1 — соответственно вектор скорости движения смеси до подачи в турбину и на выходе из нее, м/с

Учитывая тенденции складирования твердых и жидких отходов производства в выработанном пространстве недр, получение при реализации этого процесса нового источника энергии будет являться дополнительным стимулирующим фактором развития безотходного горного производства.

Кроме того, на горных предприятиях имеются широкие возможности внедрения эффективных систем рекуперации энергии (в клетевых и скиповых стволах, на погрузочно-доставочном и транспортном оборудовании и др.). Эти системы получили широкое распространение в мире [10].

В данном направлении уже работает ряд известных российских компаний, использующих системы рекуперации на стационарных подъемных машинах (например, Казский филиал ОАО «Евразруда», Приморский ГОК, ОАО «Воркутауголь», шахта «Осинниковская» ОАО «Юж-кузбассуголь»). Ими обоснованы перспективные пути снижения энергозатрат на спуск-подъем и транспортировку грузов за счет воспроизводства электроэнергии подъемником либо транспортным устройством. Разработаны решения, которые позволяют при определенных условиях эксплуатации лифтовых подъемников не только вырабатывать энергию для спуска-подъема грузов, но и возвращать ее обратно в энергосеть для использования на другие нужды [11]. Известно, что при движении груженого подъемника вниз, а порожнего вверх в системе возникают излишки энергии. Для ее концентрации разработаны и широко используются регенеративные приводы, подключаемые к обычному частотно-регулируемому приводу. Данные устройства заменяют тепловые резисторы и обеспечивают возврат энергии потребителю. Экономия энергии составляет до 75 % по сравнению с обычным двухскоростным подъемником [11].

Следует ожидать, что из сферы промышленного и гражданского строительства такие энергосберегающие технологии со временем придут и в горное дело. Они весьма актуальны для отечественной горнодобывающей промышленности и очевидно, что их внедрение напрямую связано с созданием фундаментальной научной базы проектирования горнотехнических систем и внедрением новых энергоэффективных технологий в практику ведения горных работ.

Примером перспективного направления использования возобновляемой энергии является строительство подземных гидроэлектростанций при ликвидации шахт [12], находящихся в гидравлически связанных с действующими шахтами шахтных полях (рис. 5).



Рис. 5. Схема расположения подземной гидроэлектростанции между шахтными полями действующей и ликвидированных шахт

Для установления закономерностей процессов преобразования энергии горного давления, рудничных потоков и горнотранспортного оборудования требуется решение ряда задач, перечень которых охватывает:

— установление закономерностей напряженно-деформированного состояния массивов горных пород с целью выявления «энергетических центров» — источников получения электроэнергии в зависимости от параметров различных горнотехнических систем. Так, в условиях по-

вышенного горного давления, когда необходимо использовать капитальные или механизированные крепи, в ряде случаев последние могут одновременно выполнять и функцию “трансформаторов” упругой энергии от смещения поверхностей подземных выработок в электрическую энергию. Разработка необходимых для этого механоэлектрических первичных преобразователей должна составить одно из важнейших направлений перспективных исследований и разработок, касающихся горной электротехники;

— изучение основных принципов и законов преобразования различных видов тепловой, кинетической, химической и прочих видов энергии в электрическую (эффекты Зеебека, Пельтье, нелинейной динамики малых конечномерных систем — модельные квазиодномерные решетки Ферми–Паста–Улама, Клейна–Гордона и Френкеля–Конторовой, прямой и обратный пьезоэффекты и др.). В этом направлении развивается система создания и эксплуатации энергетических ловушек (harvesting energy). Выявлены наиболее перспективные пути для преобразования динамических проявлений горного давления в электрическую энергию, связанные с созданием энергетических ловушек нового типа, принцип работы которых основан на эффектах нелинейного резонанса;

— оценку энергетических характеристик техногенных источников возобновляемой энергии — статического давления столба закладочной или гидравлической смеси, жидкости; динамического давления падающей жидкости, закладочной или иной техногенной смеси; энергии динамического потока выдаваемой из рудника отработанной воздушной струи; статической энергии силы тяжести большегрузного горнотранспортного оборудования;

— исследование процессов передачи нетрадиционных видов энергии к генераторам электрического тока;

— обоснование технологических решений и режимов горных работ для создания условий передачи энергии, формируемой в ходе геотехнологических процессов, к генераторам электрического тока;

— создание конструкций и обоснование рациональных параметров функционирования устройств для улавливания и преобразования энергии, формируемой в ходе геотехнологических процессов.

Для решения поставленных задач сформулирована общая концепция электровоспроизводства и энергосбережения при проектировании и эксплуатации горных предприятий, которая предусматривает:

(1) *использование потенциала наиболее мощного источника энергии — горного давления и упругих колебаний горного массива.* Для этого необходимо по-новому подойти к вопросам управления напряженно-деформированным состоянием горных массивов, рассматривая комплекс технологических операций управления состоянием массива с геомеханическим обоснованием порядка, режима и параметров отработки запасов полезных ископаемых не только с позиций обеспечения безопасности ведения горных работ, но и с целью преобразования энергии горного массива в электрическую;

(2) *использование силы тяжести столба закладочной или гидравлической смеси, иных жидких технологических потоков* не только для их перемещения по рудничной сети, но и для улавливания и преобразования избытка аккумулируемой энергии с направлением ее в электросеть рудника;

(3) *“улавливание” и преобразование в электрическую кинетической энергии падающей жидкости, пульпы, сыпучих материалов,* размещаемых в выработанном пространстве карьеров и шахт, а также выдаваемой из рудника отработанной вентиляционной струи и других внутрирудничных потоков (так, чтобы эффективность проветривания не снижалась);

(4) *использование давления тяжелого погрузочно-доставочного шахтного оборудования в качестве источника электрической энергии.* Для этого в шахте рядом с погрузочно-разгрузочными пунктами, порталами, вентиляционными дверями и другими пунктами остановки транс-

порта следует устанавливать специальные платформы, на которые заезжает самоходная техника. Под действием силы тяжести и с помощью соответствующих систем преобразования потенциальная энергия большегрузного шахтного оборудования преобразовывается в электрическую. Создание и практическое внедрение подобного рода систем также рассматривается как весьма актуальное направление;

(5) *использование подземного горнотранспортного оборудования с электрическим приводом и тормозными системами с рекуперацией энергии.* Это позволит повысить эффективность его эксплуатации для горнопроходческих, очистных и транспортных работ и снизить энергетические затраты рудника по предварительной оценке на 2–4 % [10];

(6) *оснащение приводов стационарных подъемных машин системами рекуперации энергии и соответствующей автоматикой.* Это позволит сократить энергопотребление на процессах спуска-подъема до 40 % [11];

(7) *совершенствование и внедрение автоматизированных систем планирования расхода электроэнергии и предупреждение пиковых нагрузок на электросеть.*

С позициями (1)–(7) очевидным образом связаны также:

(8) *переход на применение на больших глубинах мобильных закладочных комплексов,* располагаемых в непосредственной близости от очистных забоев, оборудование которых размещается вертикально с целью подачи материальных потоков под действием собственной силы тяжести. Это обеспечит снижение затрат на перемещение потоков горной массы на 15–25 % [13];

(9) *расположение обогатительных фабрик в выработанном пространстве рудника на нижних (концентрационных) горизонтах* с преимущественным размещением основного технологического оборудования в вертикальной плоскости. Это позволит снизить затраты на подъем и транспорт руды на 20–25 % [14]. При этом обогащение руд на подземной обогатительной фабрике целесообразно проводить по высотной схеме размещения основного технологического оборудования, что обеспечит самотечное транспортирование сырья и пульпы. Отходы обогащения не выдаются на поверхность, а размещаются в выработанном пространстве подземных камер;

(10) *использование на концентрационных горизонтах сепарационных установок для предварительного рудничного обогащения.* Это также позволит снизить объем выдаваемой на поверхность руды, нагрузку на подъемные машины, затраты на дезинтеграцию и переработку рудной массы. Отходы сепарации без выдачи на поверхность могут быть использованы для приготовления твердеющих закладочных смесей на поверхностных передвижных закладочных комплексах. Применение отходов добычи и переработки руд в составе закладочных смесей позволит сократить длину их транспортировки на 30–50 % и снизить затраты на закладку на 15–20 % [15];

(11) *аккумуляция тепла горных пород с помощью теплообменников и теплоносителей.* В настоящее время разработано несколько проектов в Челядзье (Czeladz, Польша), Хирлене (Heerlen, Нидерланды), Мидлотиане (Midlothian, Шотландия) и в Еллоукнифе (Yellowknife, Канада), предусматривающих использование тепла горного массива для обогрева промышленных и жилых помещений [16].

Реализация концепции эффективного использования нетрадиционных источников энергии основывается на создании фундаментальной базы проектирования горнотехнических систем с учетом специфики энергосбережения и энергоспроизводства, свойственной укладу исключительно горного производства.

По масштабам ресурсопроизводства энергоэффективные горнотехнические системы с собственными возобновляемыми в ходе реализации геотехнологических процессов источниками энергии будут альтернативны известным природным возобновляемым источникам энергии, опыт создания и применение которых в мире достаточно широк. Это солнечная, ветровая, гидротер-

мальная и гидравлическая энергии, энергия приливной волны. Использование техногенных возобновляемых в ходе разработки месторождений полезных ископаемых источников энергии особенно актуально для российских условий, где 2/3 месторождений расположены в неосвоенных регионах, не обеспеченных собственными источниками электроэнергии. Создание фундаментального задела для энергоэффективных геотехнологий и раскрытие принципов проектирования таких горнотехнических систем обеспечит в будущем существенное повышение эффективности освоения месторождений твердых полезных ископаемых, особенно на больших глубинах.

Для России, являющейся горнодобывающей страной, научная и практическая значимость решения данной проблемы особенно высока. Известно [2], что в нераспределенном фонде недр России доля месторождений, где не решен вопрос обеспечения электроэнергией, превышает 70 %, что препятствует их вовлечению в промышленную эксплуатацию. Решение указанной проблемы позволит, с одной стороны, по-новому подойти к вопросам управления напряженно-деформированным состоянием горных массивов при разработке месторождений полезных ископаемых, с другой — повысить энергоэффективность одного из самых энергозатратных технологических производств — горно-обогатительных предприятий с комплексным решением поставленных задач.

ВЫВОДЫ

Проблема повышения энергоэффективности горного производства признана как наиболее значимая исследователями многих стран. В мировой практике прослеживаются тенденции, связанные с изысканием новых нетрадиционных энергетических источников, внедрением ресурсосберегающих технологий, развитием энергоэффективных технологических процессов различных производств с переходом на возобновляемые источники энергии.

Энергоэффективные технологии позволяют не только сократить расходы потребителей, но и уменьшить вредное воздействие на окружающую среду. Вместе с тем в области создания новых и развития существующих технологий добычи твердых полезных ископаемых, их внедрения в горные проекты, фундаментальный базис активной реализации энергоэффективных технологий развивается низкими темпами. В проектах на разработку месторождений обычно не учитываются широкие возможности энергосбережения и не предусматривается воспроизводство электроэнергии за счет использования ресурсов, сформированных в результате деятельности по освоению земных недр.

Для изменения сложившейся ситуации в реализуемом авторами проекте Российского научного фонда сформулирована проблема использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии в ходе разработки месторождений твердых полезных ископаемых. Установлен высокий потенциал энергоэффективных технологий, которым обладает горное предприятие, особенно при разработке месторождений на больших глубинах. Вовлечение нетрадиционных источников энергии природного и техногенного происхождения в ходе горных работ предусмотрено на базе поиска условий полезного использования: энергии горного давления; кинетической энергии падающей жидкости, потока утилизируемых в выработанных пространствах отходов обогащения руд, закладочной смеси, выдаваемой из рудника отработанной воздушной струи; статической энергии давящего столба закладочной или гидравлической смеси, жидкости; потенциальной энергии силы тяжести большегрузного горнотранспортного оборудования, систем рекуперации энергии.

Решение этих вопросов базируется на создании новых технических и технологических решений по преобразованию различных видов энергии, получаемой в ходе реализации геотехнологических процессов, в электрическую, ее аккумулировании и использовании на внутреннее энергопотребление рудника. Раскрыты перспективы реализации новых технологических идей по обеспечению передачи энергии, формируемой в ходе реализации геотехнологических процессов, к генераторам электрического тока.

Реализация указанных идей возможна только в ходе техногенного преобразования недр с решением вопросом их комплексного освоения и сохранения. Реализация проекта будет способствовать вовлечению в эксплуатацию месторождений в отдаленных и труднодоступных районах, развитию смежных направлений исследований в малой энергетике для существенного сокращения внешнего энергопотребления и в целом повышения энергоэффективности освоения недр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Энергоэффективные технологии** [Электронный ресурс]. — режим доступа: http://alvip.ru/proektirovanie/jenergojefektivnye_tehnologii/
2. **Министерство** энергетики РФ. Энергосбережение и энергоэффективность [Электронный ресурс]. — режим доступа: <http://minenergo.gov.ru/activity/energoeffektivnost/>
3. **Энергоэффективность** сегодня или коллапс завтра. Фолькмар Деннер [Электронный ресурс]. — режим доступа: http://www.bosch.ru/ru/newsroom_1/topics_1/energy_efficiency/energy_efficiency_now.html
4. **The Guardian**, Q&A: Energyefficiency [Электронный ресурс] — режим доступа: <http://www.guardian.co.uk/environment/2009/jul/16/energy-efficiency>
5. **Ильковский К. К., Тимофеев Д. И.** Взгляд на энергетику будущего // Горн. журн. — 2012. — № 12.
6. **Чинакал Н. А.** Система разработки со щитовым креплением (руководство для инженеров, техников, студентов). — М.; Л.: Гостоптехиздат, 1943.
7. **Бронников Д. М., Замесов Н. Ф., Богданов Г. И.** Разработка руд на больших глубинах. — М.: Недра, 1982.
8. **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.
9. **Каплунов Д. Р., Лейзерович С. Г., Томаев В. К.** Энерговоспроизводство при подземных закладочных работах // Горн. журн. — 2013. — № 4.
10. **SINAMICS** — for every application, power rating and performance level. [Электронный ресурс] — режим доступа: <https://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/electric-drives/Documents/DRV-SINAMICS-family-brochure.pdf> (Дата обращения 10.10.2014 г.)
11. **Иванцов В. В.** Повышение энергоэффективности и производительности клетевой шахтной подъемной установки с использованием роторного частотного электропривода “ЭРАТОН-ФР” [Электронный ресурс] — режим доступа: <http://erasib.ru/articles/hoist-eratonfr-efficiency> (Дата обращения 10.10.2014 г.)
12. **Рыльникова М. В., Туркин И. С.** О перспективах строительства подземной гидроэлектростанции в районе ликвидируемых шахт // Маркшейдерский вестн. — 2014. — № 5.
13. **Kaplunov D. R., Rylnikova M. V., and Eks V. V.** Usage of modular backfill preparation plant in underground ore mining, 11-th International Symposium on Mining with Backfill, Perth., 2014.
14. [Электронный ресурс] — режим доступа: <http://gekkos.com/documents/043TheModularPythonProcessingPlantDesignedForUndergroundPreConcentration.pdf> (Дата обращения 10.10.2014 г.)
15. **Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н., Корнеев Ю. В.** Передвижные закладочные комплексы в системах разработки рудных месторождений с закладкой выработанных пространств // Горн. журн. — 2013. — № 2.
16. **Rodríguez R., Díaz M. B.** Analysis of the utilization of mine galleries as geothermal heat exchangers by means of a semi-empirical prediction method, Renew. Energy, 2009, Vol. 34, No. 7.

Поступила в редакцию 10/XI 2014