

## ЧТО ДОЛЖЕН ЗНАТЬ И УМЕТЬ ГОРНЫЙ ИНЖЕНЕР ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ «ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА»

ГОНЧАРОВ С. А.

*В статье на примере цепочки технологических процессов добычи и переработки руды предприятий железорудной промышленности изложено описание задач, которые должен уметь решать инженер по специальности «Физические процессы горного производства». Обосновано, почему необходимо изучать физические процессы в горном производстве – геомеханические, термодинамические, гидро- и газодинамические, электромагнитные, а также физическую сущность технологических процессов добычи и переработки полезных ископаемых с учетом фактора энергозатрат по всей цепочке технологических процессов горного производства. Обосновано мнение, что сущность технологических процессов добычи и переработки полезных ископаемых сводится к двум процессам: разрушение горных пород и перемещение горной массы. Сформулированы актуальные задачи, которые необходимо решать специалистам, получившим образование по специальности «Физические процессы горного производства».*

**Ключевые слова:** инженер; подготовка; образование; технологические процессы; энергоемкость.

Подготовка горных инженеров по специальности «Физические процессы горного производства» была начата в 1962 г. Инициатором и организатором подготовки инженеров по этой специальности был академик, ректор Московского горного института (МГИ) Владимир Васильевич Ржевский. Автор данной статьи был одним из студентов группы ГФ-1-61, сформированной из лучших студентов горных специальностей приема 1961 г.

По аналогии с МГИ в Московском институте нефтехимической и газовой промышленности была организована подготовка специалистов по специальности «Физические процессы нефтегазового производства». Впоследствии Министерство высшего и среднего специального образования СССР объединило специальности «Физические процессы горного производства» и «Физические процессы нефтегазового производства» в одну специальность «Физические процессы горного и нефтегазового производства» (ФПГиНГП).

По версии академика В. В. Ржевского, горный инженер по специальности «Физические процессы горного производства» (ФПГП) должен знать технологию горного производства при добыче и переработке полезных ископаемых, физические и технологические свойства объекта труда (горной породы и горного массива), а также как изменяются эти свойства под действием различных физических полей (механических, тепловых, гидро- и газодинамических, электромагнитных). И самое главное – он должен знать физическую сущность всех техноло-

гических процессов добычи и переработки полезных ископаемых. Только при наличии указанных знаний, по версии академика В. В. Ржевского, горный инженер по специальности ФППП может управлять параметрами технологических процессов добычи и переработки полезных ископаемых.

Физическая сущность всех технологических процессов добычи и переработки полезных ископаемых, по мнению автора данной статьи, сводится к двум процессам: разрушение горных пород и перемещение горной массы.

В подтверждение указанного мнения рассмотрим цепочку технологических процессов добычи и переработки руды на примере предприятий железорудной промышленности.

На горно-обогатительных комбинатах (ГОКах) с открытым способом разработки рудных месторождений первый технологический процесс – это бурение скважин. Рассмотрим этот процесс на примере бурения скважин на железорудном ГОКе шарошечным станком СБШ-250 МН. Установленная мощность двигателей на этом станке 322 кВт, в том числе мощность двигателя компрессора  $M_k$  – 200 кВт, двигателя вращения буровой штанги  $M_b$  – 75 кВт, двигателя гидродомкратов  $M_r$  – 25 кВт, двигателя хода  $M_x$  – 22 кВт.

Мощность двигателя вращения буровой штанги и мощность двигателя гидродомкратов расходуется при бурении на разрушение породы по пятну забоя скважины. При этом энергоёмкость процесса разрушения породы при бурении скважин станком СБШ-250 МН

$$\mathcal{E}_p = \frac{M_b + M_r}{abV_6\rho} = 0,126,$$

где  $a$  и  $b$  – сетка скважин 6 × 6 м;  $V_6$  – средняя скорость бурения скважин станком СБШ-250 МН в железистых кварцитах 6,3 м/ч;  $\rho$  – средняя плотность железистых кварцитов 3,5 т/м<sup>3</sup>.

Мощность двигателя компрессора на станке СБШ-250 МН расходуется на вынос продуктов разрушения породы из скважины. Физическая сущность технологического процесса выноса продуктов разрушения из скважины есть с физической точки зрения не что иное, как перемещение горной массы. При этом производительность компрессора должна обеспечивать скорость восходящего потока воздуха в скважине несколько больше, чем скорость витания самых крупных частиц продуктов разрушения породы. Скоростью витания называется скорость равномерного падения твердых частиц в спокойном воздухе. Скорость витания зависит от размера частицы породы и ее плотности.

Энергоёмкость процесса выноса продуктов разрушения железистых кварцитов из скважины (энергоёмкость перемещения горной массы при бурении скважин)

$$\mathcal{E}_n = \frac{M_k}{abV_6\rho} = 0,252.$$

Таким образом, при бурении скважин энергоёмкость процесса перемещения горной массы в два раза больше, чем энергоёмкость собственно разрушения горной породы.

Вторым по очередности технологическим процессом добычи руды на ГОКах является взрывание. Технологический процесс взрывания с физической точки зрения – это собственно разрушение массива горных пород и перемещение раз-

рушенной горной массы. Энергоемкость взрывания, кВт·ч/т, можно рассчитать по формуле:

$$\mathcal{E}_в = \frac{G_{\text{ВВ}} T_{\text{в}}}{\rho}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{ВВ}}$  – удельный расход ВВ, кг/м<sup>3</sup>;  $T_{\text{в}}$  – теплота взрыва (энергия, выделяющаяся при инициировании 1кг ВВ: Алюмотол,  $T_{\text{в}} = 1,463$ ; Гранулотол,  $T_{\text{в}} = 1,012$ ; Граммонит 50/50,  $T_{\text{в}} = 1,022$ ; Гранулит С-БМ,  $T_{\text{в}} = 1,07$ ), кВт·ч/кг;  $\rho$  – плотность пород взрываваемого массива, т/м<sup>3</sup>.

Энергоемкость  $\mathcal{E}_в$  складывается из двух составляющих:

$$\mathcal{E}_в = \mathcal{E}_р + \mathcal{E}_п, \quad (2)$$

где  $\mathcal{E}_р$  – энергоемкость собственно разрушения массива при взрыве, кВт·ч/т;  $\mathcal{E}_п$  – энергоемкость взрывного перемещения взорванной горной массы, кВт·ч/т.

На ГОКах по добыче железистых кварцитов на карьерах величина  $\mathcal{E}_в$  колеблется в пределах 0,5–0,7 кВт·ч/т.

Величину  $\mathcal{E}_р$  можно определить, зная грансостав взорванной горной массы и удельную поверхностную энергию породы (энергию, необходимую для образования единицы новой поверхности разрушаемой породы).

Согласно (1), зная  $\mathcal{E}_в$  и рассчитав  $\mathcal{E}_р$ , можно в соответствии с формулой (2) определить величину энергии  $\mathcal{E}_п$ , которая пошла на взрывное перемещение единицы взорванной горной массы.

Следующим технологическим процессом добычи руды открытым способом является ее погрузка экскаваторами в автосамосвалы. С физической точки зрения этот технологический процесс есть не что иное, как перемещение горной массы. Энергоемкость процесса экскаваторной погрузки руды  $\mathcal{E}_з$  можно рассчитать по формуле:

$$\mathcal{E}_з = \frac{M_з}{\Pi_з},$$

где  $M_з$  – мощность двигателя черпания экскаватора, кВт;  $\Pi_з$  – производительность погрузки руды экскаватором в самосвалы, т/ч.

На ГОКах по добыче железистых кварцитов при открытой разработке величина  $\mathcal{E}_з = 0,5–0,6$  кВт·ч/т руды.

После экскаваторной погрузки в автосамосвалы руда транспортируется на усреднительный склад. Энергоемкость транспортирования руды автосамосвалами на усреднительный склад  $\mathcal{E}_т$  можно рассчитать по формуле:

$$\mathcal{E}_т = \frac{M_а}{\Pi_а},$$

где  $M_а$  – мощность двигателя автосамосвала, кВт;  $\Pi_а$  – производительность автосамосвала, т/ч.

На ГОКах при открытой добыче железистых кварцитов  $\mathcal{E}_т = 3–3,5$  кВт·ч/т руды.

При разгрузке самосвалов происходит усреднение руды за счет того, что руда, добываемая в различных забоях, не одинакова по качеству (содержанию полезного минерала). Разгрузка автосамосвалов на усреднительном складе с физической точки зрения – это тоже перемещение горной массы.

Усреднение руды осуществляют, поскольку на обогатительной фабрике, куда руду доставляют, параметры всех процессов обогатительного передела руды настроены на строго конкретное содержание полезного минерала и его размеры.

Аналогично формулам для определения  $\Theta_3$  и  $\Theta_T$  можно рассчитать энергоёмкость всех последующих технологических процессов переработки руды:

$$\Theta = \frac{M}{\Pi}, \quad (3)$$

где  $M$  – мощность технологического оборудования данной технологической операции, кВт;  $\Pi$  – производительность данного технологического оборудования, т/ч.

Усредненную на складе руду с помощью экскаваторов погружают в думкары. С физической точки зрения это также процесс перемещения горной массы.

Думкарами руду транспортируют на дробильную фабрику. Это тоже процесс перемещения горной массы. На дробильной фабрике исходную руду размером кусков 0–1,2 м дробят в конусных или щековых дробилках в три стадии до размера примерно 0–25 мм.

Дробление руды в конусных или щековых дробилках с физической точки зрения – это разрушение горных пород. Здесь мощность двигателя дробилки расходуеться только на разрушение кусков руды. Энергоёмкость трехстадийного дробления железистых кварцитов от размера 0–1,2 м до размера 0–25 мм равна 3–3,5 кВт ч/т руды.

Дробленная до нужного размера руда подается конвейерами на обогатительную фабрику для трехстадийного измельчения в шаровых или стержневых мельницах, где она измельчается до размеров готового класса для обогащения.

На первой стадии руда измельчается с 0–25 мм до 0–1,2 мм, на второй стадии – с 0–1,2 мм до 0–100 мкм, на третьей – с 0–100 мкм до 0– $d_{гк}$  (где  $d_{гк}$  – диаметр частиц руды готового класса). Величина  $d_{гк}$  зависит от размера в руде частиц извлекаемого минерала. На Михайловском ГОКе КМА  $d_{гк} = 44$  мкм, а на Лебединском и Стойленском ГОКах КМА  $d_{гк} = 70$  мкм.

Измельчение железистых кварцитов в мельницах до готового класса является самым энергоёмким процессом в технологической цепочке *добыча–переработка* руды. Энергоёмкость трехстадийного измельчения железистых кварцитов до размера готового класса колеблется в пределах 24–29 кВт·ч/т руды.

С физической точки зрения технологический процесс измельчения руды в мельницах – это перемещение горной массы и собственно ее разрушение. Энергия двигателя, вращающего мельницу, полностью затрачивается на перемещение шаров (стержней) и кусков руды за счет центробежной силы по внутренней поверхности мельницы. Приобретенная при этом потенциальная энергия шаров расходуеться (в процессе падения за счет сил гравитации) на разрушение руды, находящейся практически на нижней внутренней поверхности мельницы.

Центробежная сила при вращении твердых тел, как известно, рассчитывается по формуле

$$F_{ц} = \frac{mv^2}{r},$$

где  $m$  – масса твердого тела, кг;  $V$  – линейная скорость твердого тела при вращении, м/с;  $r$  – внутренний радиус поверхности мельницы, м.

Так как масса измельчающих шаров примерно в 100 раз больше массы кусков руды, то  $F_{ц}$  для шаров будет во столько же раз больше.

Скорость вращения мельницы  $V$  подбирают такой величины, чтобы шары по внутренней поверхности мельницы за счет центробежной силы достигали почти максимальной высоты. При этой же центробежной силе куски руды будут достигать уровня в 100 раз меньше.

При падении шаров с почти максимальной высоты внутренней поверхности мельницы за счет силы гравитации разрушаются кусочки руды, находящиеся на внутренней нижней поверхности мельницы.

Отделение готового класса руды от неготового в мельнице каждой стадии измельчения осуществляется за счет подбора угла наклона мельницы в сторону ее разгрузки и расхода воды, подаваемой в мельницу. При заданном угле наклона мельницы расход воды устанавливают такой, чтобы ее скорость в сторону разгрузки по внутренней поверхности мельницы была чуть больше гидравлической крупности частиц руды готового класса. Гидравлической крупностью твердых частиц называется скорость их равномерного падения в спокойной жидкости. Численное значение гидравлической крупности частиц зависит от их крупности и плотности.

Энергоемкость измельчения руды в мельницах, а также всех последующих технологических процессов переработки руды (дешламация, внутрифабричная перекачка пульпы, классификация, мокрая магнитная сепарация, фильтрация, перекачка хвостов обогатительной фабрики и обратное водоснабжение) можно рассчитать по формуле (3). Все эти технологические процессы с физической точки зрения – это перемещение горной массы.

Энергоемкость указанных технологических процессов на железорудных ГОКах РФ (Гончаров С. А. *Физико-технические основы ресурсосбережения при разрушении горных пород*. М.: МГТУ, 2007, 211 с.) следующая:

дешламация – 0,2–0,25 кВт·ч/т;

внутрифабричная перекачка пульпы и классификация – 4,8–5,2 кВт·ч/т;

мокрая магнитная сепарация – 0,7–0,8 кВт·ч/т;

фильтрация – 1,1–1,3 кВт·ч/т;

перекачка хвостов и обратное водоснабжение – 9–10 кВт·ч/т.

Итого энергоемкость технологических процессов при добыче на железорудных ГОКах РФ равна 6,4–8,3 кВт·ч/т. При этом на разрушение руды затрачивается 0,37–0,47 кВт·ч/т, а на перемещение горной массы 5,75–7,75 кВт·ч/т (*Физико-технические основы...*). Таким образом, при добыче руды энергоемкость процессов ее перемещения в 15–16 раз больше энергоемкости ее разрушения.

Энергоемкость при дроблении руды полностью расходуется на ее разрушение и равна на железорудных ГОКах РФ 3–3,5 кВт·ч/т.

Энергоемкость всех технологических процессов на обогатительных фабриках железорудных ГОКов РФ равна 37–47 кВт·ч/т (*Физико-технические основы...*). Вся эта энергия затрачивается на процессы перемещения горной массы в технологических процессах обогащения железистых кварцитов.

Таким образом, энергоемкость процессов разрушения в технологической цепочке добычи и переработки железистых кварцитов на ГОКах РФ равна 3,37–3,97 кВт·ч/т, а энергоемкость процессов перемещения в этой же цепочке равна 42,75–54,75 кВт·ч/т (*Физико-технические основы...*).

Таким образом, в процентном отношении на разрушение железистых кварцитов в технологической цепочке *добыча–переработка* затрачивается примерно 8 %, а на перемещение горной массы – 92 %.

Известно, что энергоемкость разрушения упругих твердых тел (скальные руды, в частности железистые кварциты, можно считать упругими твердыми телами) может быть определена по формуле:

$$\Theta = \frac{\sigma^2}{2E\rho}, \quad (4)$$

где  $\sigma$  – предел прочности при разрушении скальной породы (это может быть предел прочности на сжатие при разрушении сжатием; на растяжение при разрушении растяжением; на сдвиг при разрушении сдвигом), Н/м<sup>2</sup>;  $E$  – модуль упругости скальной породы, Н/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность скальной породы, т/м<sup>3</sup>.

Так как предел прочности скальной породы на сжатие примерно в 6–7 раз больше предела прочности на сдвиг и примерно в 8–10 раз больше предела прочности на растяжение, то энергоемкость разрушения скальной породы сжатием будет, согласно формуле (4), примерно в 40 раз больше, чем при разрушении сдвигом, и примерно в 90 раз больше, чем при разрушении растяжением.

Таким образом, совершенствовать технику и технологию разрушения скальных пород необходимо исходя из принципа: разрушение должно осуществляться в максимально возможной степени за счет создания в породе растягивающих или сдвиговых, а не сжимающих напряжений. Эти решения рассмотрены в монографии (*Физико-технические основы...*).

*Резюме.* Согласно идеологии академика В. В. Ржевского при подготовке горных инженеров по специальности ФППП необходимо изучать физические процессы в горном производстве – геомеханические, термодинамические, гидро- и газодинамические, электромагнитные, а также физическую сущность технологических процессов добычи и переработки полезных ископаемых. Физическая сущность технологических процессов добычи и переработки полезных ископаемых, как было показано ранее, сводится к двум процессам: разрушение горных пород и перемещение горной массы.

С учетом фактора энергозатрат по цепочке технологических процессов горного производства при подготовке горных инженеров в МГИ по специальности ФППП необходимо скорректировать объем читаемых дисциплин.

Так как себестоимость конечного продукта ГОКов (концентрата) главным образом зависит от энергоемкости технологических процессов добычи и переработки руды, то горные инженеры специальности ФППП должны уметь рассчитывать энергозатраты этих процессов и, зная физическую сущность этих процессов, уметь управлять ими с целью снижения их энергоемкости.

Себестоимость одной тонны конечного продукта (концентрата) на железорудных ГОКах РФ 3–4 года назад составляла 30–35 дол. США/т, в том числе доля энергозатрат составляла 15–20 дол. США/т (*Физико-технические основы...*). Таким образом, на долю энергозатрат приходится примерно 50 % себестоимости концентрата.

Исходя из этого, студентов специальности ФППП необходимо на основе знаний технологии добычи и переработки руды и знаний о физической сущности технологических процессов научить, какими способами можно снижать энергоемкость, особенно таких энергоемких процессов, как измельчение руды в мельницах; внутрифабричная перекачка пульпы; перекачка хвостов обогатительной фабрики и обратное водоснабжение.

## WHAT SHOULD A MINING ENGINEER WITH A DEGREE IN “PHYSICAL PROCESSES OF MINING” KNOW AND BE ABLE TO DO

**Goncharov S. A.** – National University of Science and Technology (MISiS), Moscow, the Russian Federation.  
E-mail: [cigt@mail.ru](mailto:cigt@mail.ru)

By the example of ore production and processing technological processes chain at the enterprises of iron ore industry, the article introduces the description of problems which a mining engineer with a degree in “Physical processes of mining” should be able to solve. The article justifies why it is necessary to study physical processes in mining, such as, geomechanical, thermo-magnetic, hydrodynamic and gasdynamic, electro-magnetic processes as well as the physical essence of technological processes of mineral production and processing, with the account of energy consumption factor along the whole chain of technological processes of mining. The idea is substantiated, that the essence of mineral production and processing technological processes reduces to the two processes: rock destruction and rock mass displacement. Crucial tasks are formulated, which should be solved by the specialists, who got a degree in “Physical processes of mining”.

**Key words:** engineer; training; education; technological processes; energy intensity.

---