

References

1. Saginov A.S., Daniyarov A.N., Akashev Z.T. The rudiments of projecting and counting of leaf-like canyon conveyor belts. — Almaty: Nauka, 1984. — P. 15–19.
2. Akashev Z.T. Methodic of refining and choosing of structure of mining factories' technological processes. — M.: Heavy machine building. — 2005. — № 12. — P. 17–19.
3. Akashev Z.T., Malybaev S.K., Akashev A.Z. Searching and making of scientific products in heavy industry and transport industry. — Karaganda: KSTU, 2006. — 197 p.

УДК 669.213:66.094.6

Воздействие взрыва на рудный штабель при кучном выщелачивании металлов

Explosion influence on an ore stacks at compact leaching of metals

Турсунбаева А.К., Портнов В.С., Камаров Р.К., Маусымбаева А.Д.

Каргандинский государственный технический университет (E-mail: umo@kstu.kz)

Жанама кернеулер өрістің құрылымы анықталған және үйімді сілтілеу қатардың кенді массасында бұрғылап жару ұңғыма моделі жасалған. Жылжымалы деформацияларының қарқынды функцияларының кейбір параметрлері болып табылған кенді массасының көлемді пластикалық деформация модулі үшін өрнек ұсынылған. Бұл өрнек кенді массаның қосыту процесін қамтып көрсетеді. Кенді қатарларға радиал жарылысты талқандайтын әсер моделіне ұсыныс берілген. Зарядтың қажетті қуатын және қиратушы толқынның параметрдерін есептеуге болатын резонанстық жиіліктің мәні алынды. Бұрғылау, жару жұмыстары кезінде үйімді сілтілеу қаттамасының рудалық массасының түрін өзгертудің алынған моделі бұрғылау, жару ұңғымаларының жоспарын онтайландыру және оқтау шамасын қолайлы таңдау мүмкіндігін береді.

In work the model of a chisel explosive chink in ore weight of a stack compact leaching is offered and the structure of a field of tangents of pressure is defined. Expression for the module of volume plastic deformation of the ore weight which parameters are some functions of intensity of deformations of shift is offered. This expression generally reflects process of loosening of ore weight. The model of radial explosive influence on an ore stack is offered. Value of resonant frequency is received, knowing which it is possible to calculate parameters of a shock wave and capacity of a necessary charge.

Введение

Одним из этапов рудоподготовки в процессе кучного выщелачивания являются буровзрывные работы по разрыхлению рудного штабеля. Внедрение взрывных методов в горное дело позволило достичь огромных возможностей горного производства. Развитие науки и технологии применения взрыва в горной промышленности зависит от решения целого комплекса проблем, связанных с представлениями о взрывных явлениях и физике взрывного разрушения горных пород.

Анализ последних исследований в области воздействия взрыва на горные породы показал, что на процессы взаимодействия взрывной волны и горных пород оказывают влияние большое число факторов, связанных со свойствами как взрывчатого вещества, так и горного массива.

Взрывчатые вещества (ВВ) как высококонцентрированный и экономичный источник энергии широко применяются в различных отраслях народного хозяйства. В настоящее время около 90 % объема руд цветных и черных металлов добывают взрывным способом. Массовые взрывы широко используются при вскрытии месторождения полезных ископаемых, а также при строительстве ирригационных сооружений, прокладке авто- и железнодорожных путей, при проходке тоннелей шахтных стволов и других горных выработок.

Широко применяют ВВ при взрывных способах обработки металлов в машиностроении, при штамповке, сварке, упрочнении деталей машин, резании металлов в металлургии, при уплотнении грунтов, тушении лесных пожаров, в гидромелиоративном строительстве и для других технических нужд.

В настоящее время ВВ применяют при образовании удлиненных выемок взрывами траншейных зарядов выброса, управлении направлением выброса за счет обваловки грунтом, который вынимают в проектном контуре профильного сечения выемки. Продолжаются поиск и исследования дальнейших путей управления энергией взрыва.

При ведении буровзрывных работ (БВР) на горных предприятиях выбор их основных параметров и методов управления взрывом в значительной степени зависит от свойств горных пород, трещиноватости массива и структурных особенностей его залегания. При составлении расчетов используются физические, механические, горно-технологические свойства горных пород.

Проблемы механизма взрывного дробления горных пород тесно связаны с физикой разрушения твердого тела (об этом мы подробно говорили в работе [1]) и физикой взрыва в сплошной среде. Большая библиография по буровзрывным работам представлена в работах [2–4].

Особенности действия взрывных нагрузок в рудном штабеле

Штабеля кучного выщелачивания представляют собой отвалы дробленой водонасыщенной руды. По своей сути они подобны несвязным рудным массам. Поэтому, рассматривая взрыв в рудном штабеле, мы будем пользоваться этой аналогией и терминологией. Это связано с тем, что взрывные процессы в рудной массе исследованы достаточно подробно [2–4].

В тех случаях, когда выступают особенности рудного штабеля и когда необходимо расчет довести до практического результата, мы будем пользоваться конкретной моделью рудного штабеля. При этом минералогический состав рудного штабеля принимается соответствующим составу Васильковского месторождения.

При взрывах волна детонации, выходя на поверхность заряда, преобразуется в интенсивную волну давления и расходящееся движение среды [3]. График изменения давления или напряжений в среде вблизи места взрыва имеет форму разрыва, за которым следует постепенное затухание давления, т.е. наблюдается скачкообразное возрастание напряжений и, как следствие этого, — возрастание плотности и скорости движения среды. Образующаяся вблизи от заряда взрывная волна с крутым фронтом называется ударной волной. В пределах действия ударной волны наряду с упругими деформациями наблюдаются интенсивное разрушение и значительные необратимые деформации рудной массы. На рисунке 1 показаны карты поля деформаций блока гранита [5].

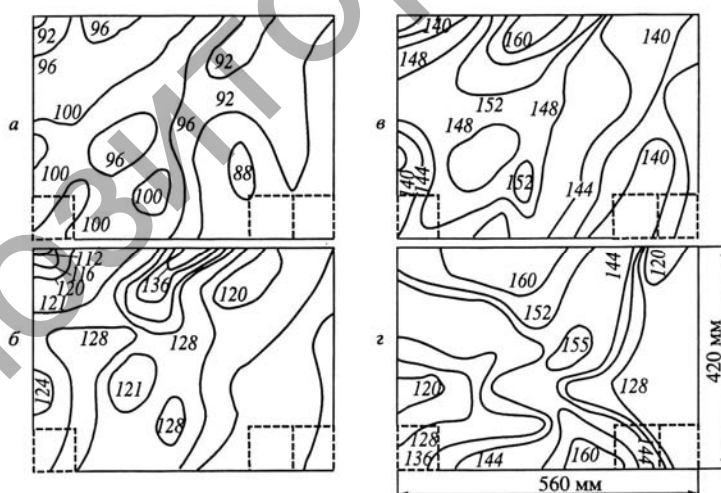


Рис. 1. Поле первого инварианта тензора плоской деформации $I = \varepsilon_{||} + \varepsilon_{\perp}$ грани блока гранита при нагрузках 85 (а), 113 (б), 134 МПа (в) на первом этапе нагружения и 130 МПа (г) на втором этапе нагружения [5]

Анализ этих карт позволяет выявить следующие особенности поля деформаций. Уже на ранних стадиях деформирования, при $\sigma < 30\%$ от разрушающего, в блоке появляются участки разной деформируемости. Не удалось выявить их соответствия имевшимся в блоке визуальным неоднородностям состава, например, прожилкам лейкократового или биотитового состава. Участки разной деформируемости сохраняют свое местоположение по мере увеличения нагрузки. Отметим, что размеры таких участков измеряются десятками сантиметров, что значительно превышает размер зерна гра-

нита. Можно полагать, что карта на рисунке 1 отражает структуру элементов разной жесткости блока, выявляемую при нагружении.

В рудном штабеле при кучном выщелачивании золота из руд, представленных кварцем и полевым шпатом (т.е. упорных руд), карта поля деформаций должна выглядеть примерно так же, как и на рисунке 1, вследствие близости физико-механических свойств гранитов и отмеченных выше упорных руд. При этом динамика локальных деформаций будет примерно такой, как это показано на рисунке 2.

С макроскопической точки зрения ударная волна представляет собой воображаемую поверхность, на которой термодинамические величины среды (которые, как правило, изменяются в пространстве непрерывно) испытывают устранимые особенности: конечные скачки. При переходе через фронт ударной волны меняются давление, температура, плотность вещества среды, а также скорость её движения относительно фронта ударной волны. Все эти величины изменяются не независимо, а связаны с одной (единственной) характеристикой ударной волны — числом Маха. Математическое уравнение, связывающее термодинамические величины до и после прохождения ударной волны, называется ударной адиабатой, или адиабатой Гюгонио [3].

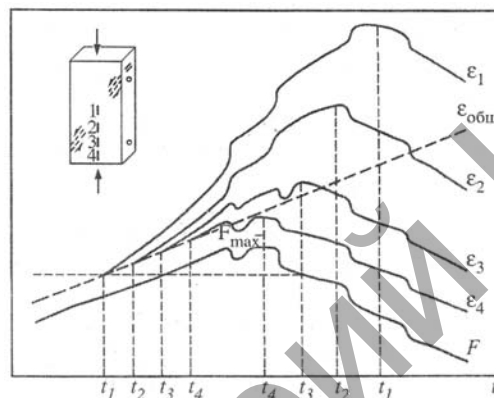


Рис. 2. Результаты регистрации локальных деформаций ε_i в сопоставлении с развитием макроразрыва [5]

Ударные волны не обладают свойством аддитивности в том смысле, что термодинамическое состояние среды, возникающее после прохождения одной ударной волны, нельзя получить последовательным пропусканием двух ударных волн меньшей интенсивности.

По мере распространения ударной волны величина скачка напряжений на ее фронте уменьшается, одновременно происходит расширение профиля волны и уменьшение крутизны фронта, т.е. превращение ее в непрерывную волну сжатия. Постепенно, по мере удаления от места взрыва, волна из ударной переходит в сейсмическую. В зоне действия сейсмических волн большая часть деформаций рудной массы носит упругий характер. В пределах зоны упругих деформаций среды сейсмические волны становятся звуковыми.

При разрушении рудной массы взрывами основное изменение структуры рудной массы происходит в зоне действия преимущественно ударных волн. Накоплен значительный экспериментальный материал по исследованию параметров взрывных волн в воде и водонасыщенных грунтах.

В работе [6] для проверки, вносит ли присутствие воды принципиальные отличия в поле напряжений и деформаций, были проведены эксперименты на мраморе и ракушечнике, имеющих разную прочность, размер зерен и фильтрационные свойства. Было показано, что в обоих случаях наличие воды приводит к асимметрии поля деформации в нижней части исследованных образцов.

Рудный штабель при кучном выщелачивании подвергается интенсивному орошению водным раствором цианидов, распределение которых описано нами в работе [7]. Ниже мы воспользуемся результатами этой работы и результатами работы [6].

Наиболее существенными параметрами взрывных волн являются максимальное давление, скорость распространения, время действия и импульс взрывной волны. Величина импульса взрывной волны

$$J = \int p(t)dt, \quad (1)$$

где $p(t)$ — изменяющееся во времени давление взрывной волны.

Зависимости для определения параметров ударных волн, полученные экспериментальным путем при взрыве сосредоточенных зарядов в воде, имеют вид

$$p_{\max} = 53,3(\sqrt[3]{\theta / R})^{1,13}; \quad J = 0,0059\sqrt[3]{\theta}(\sqrt[3]{\theta} / R)^{0,89}, \quad (2)$$

где p_{\max} — максимальное давление, МПа; θ — масса заряда, кг; R — расстояние от центра взрыва, м; J — импульс, МПа·с.

Показатели степени в (2) $D_1 = 1,13$ и $D_2 = 0,80$ соответствуют фрактальной структуре поверхности воды в период действия ударной волны. Скорость распространения ударных волн вблизи заряда превышает скорость звука. По мере удаления от места взрыва скорость ударной волны в воде весьма быстро падает до своего предельного значения, примерно равного скорости звука (порядка 1500 м/с).

В водонасыщенных рудных массах на параметры взрывных волн существенное влияние оказывает содержание газа. В общем случае водонасыщенная рудная масса представляет собой трехкомпонентную систему — твердые частицы, вода и газ. В водонасыщенных рудных массах газ может содержаться в виде адсорбированного минеральной частью, растворенного в воде и свободного. Количество адсорбированного газа в рудной массе невелико, вследствие чего он не оказывает заметного влияния на свойства рудной массы. Содержание растворенного газа сказывается на сжимаемости поровой воды.

Основными факторами, влияющими на формирование полей напряжений и деформаций под действием взрывных нагрузок, являются плотность, общая и свободная пористость, степень водонасыщенности и процент содержания газообразной фазы в водонасыщенной рудной массе.

В момент выхода детонационной волны на поверхность заряда, где окружающая среда находится в покое, на поверхности зарядной полости производится удар, в результате которого в рудной массе начинают распространяться волны напряжений. При распространении в рудной массе возмущений от взрывных нагрузок в виде волн напряжений образуются области, в которых среда находится в напряженно-деформированном состоянии, а частицы ее — в движении. При этом вначале идет процесс нагрузки, а затем разгрузки, которые, в свою очередь, характеризуются соответствующими параметрами напряжений и деформаций.

Энергия волны излучается в среду за очень короткий промежуток времени. Пополнение ее происходит за счет уменьшения энергии продуктов взрыва, связанного с увеличением их объема, что приводит к расширению полости, т.е. деформации массива. Большое влияние на процесс расширения полости оказывают свойства как водонасыщенного массива, так и взрывной нагрузки. Инерция среды, свойства продуктов взрыва и физико-механические характеристики рудной массы приводят к качественно различным процессам расширения полости или деформирования среды. Существенное влияние на прочностные показатели оказывает скорость деформирования. Медленное или быстрое деформирование изменяет соотношение процессов разрушения и восстановления естественной структуры рудной массы.

При прохождении взрывных волн наблюдается сжатие среды, зависящее от параметров взрывных волн, которые, в свою очередь, в значительной мере зависят от сжимаемости среды. Такое взаимное влияние определяет сложный характер воздействия взрывных волн на окружающую среду.

Сжимаемость воды относительно невелика, при обычных температурах (0–20 °С) и давлении до нескольких сот атмосфер ее модуль объемной сжимаемости составляет 2000 МПа. Взрывные волны в воде имеют ударный характер и вследствие ее малой сжимаемости слабо затухают с изменением расстояния. Благодаря большой однородности масс воды и незначительному изменению ее свойств при обычных температурах и давлениях параметры взрывных волн в воде не меняются при одинаковых относительных расстояниях от заряда. Они легко воспроизводимы в экспериментах и производственных условиях.

В отличие от воды рудная масса весьма неоднородна и разнообразна. Сжимаемость рудной массы меняется в весьма широких пределах, поэтому характер взрывных воздействий в ней также многообразен. Основной особенностью рудной массы является ее многокомпонентность. Все это обуславливает значительные трудности при экспериментальных исследованиях и, в особенности, при попытке оценить действие взрыва расчетным путем.

Приведенные выше сведения о действии взрыва в воде и почти полностью водонасыщенных несвязных рудных массах показывают, что характер взрывных волн в этих средах практически совпадает, а параметры волн близки по величине. Действие взрыва в неводонасыщенной рудной массе качественно отличается от действия в воде и водонасыщенных несвязных рудных массах, а интенсив-

ность динамических воздействий взрыва в воде и водонасыщенной рудной массе значительно больше, чем в неводонасыщенной. Все это приводит к тому, что характер разрушения структуры водонасыщенной несвязной рудной массы отличается от аналогичных процессов в неводонасыщенных рудных массах. С увеличением содержания в водонасыщенной рудной массе газовой составляющей это различие несколько уменьшается.

При встрече распространяющейся в воде или рудной массе взрывной волны с границей более плотной и менее сжимаемой среды, например с металлической пластиной (рис. 3), взрывная волна отражается в виде волны сжатия, причем в результате сложения падающей и отраженной волн давление увеличивается.

Таким образом, действие взрыва на рудную массу весьма многообразно и характеризуется сложным комплексом действующих одновременно или с некоторой последовательностью динамических силовых факторов. Эти факторы могут в определенных условиях вызывать разрушение структуры, которое сопровождается уплотнением рудной массы либо обуславливает разрыхление и даже нарушение их сплошности.

Рассмотрим теперь одну модель буровзрывной скважины в рудном штабеле, которую мы предлагаем для практического применения при рудоподготовке процесса кучного выщелачивания. Предлагаемая модель показана на рисунке 3.

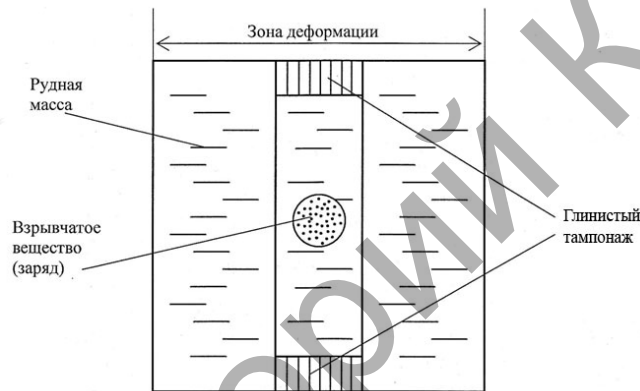


Рис. 3. Модель буровзрывной скважины в рудной массе штабеля кучного выщелачивания

После взрыва между пластинами глинистого тампонажа и в ближайшей зоне деформации возникают напряжения, которые можно описать формулами [5]

$$\sigma_x + \sigma_y = 4 \operatorname{Re} \Phi(z) + zp, \quad (3)$$

$$\delta_e - \delta_x + 2i\tau_{xy} = -4(\Phi(z) + iy\Phi'(z)) - 2qe^{-2i\alpha}, \quad (4)$$

где

$$\Phi(z) = \frac{iT_0}{2} \left(1 - \frac{P(z)}{\sqrt{R(z)}} \right),$$

$$p = \frac{\sigma_1^0 + \sigma_2^0}{2}, \quad q = \frac{\sigma_1^0 - \sigma_2^0}{2},$$

$$T_0 = q \sin 2\alpha - k(p - \cos 2\alpha),$$

$$P(z) = z^2 - 2az + b,$$

$$R(z) = (z - a_1) \cdot (z - a_2) \cdot (z - a_3) \cdot (z - a_4),$$

$$z = x + iy.$$

Здесь p — полусумма главных сжимающих напряжений; q — полуразность главных сжимающих напряжений; k — коэффициент трения. Коэффициенты a и b определяются из дополнительных условий убывания $\Phi(z)$ на бесконечности и однозначности смещения при обходе одной из трещин. Трещины задаются вдоль отрезков a_1, a_2, a_3, a_4 ; они ориентированы под углом α по отношению к главному сжимающему напряжению; берега трещин при сдвиге взаимодействуют по закону Кулона-Мора с постоянным коэффициентом трения.

Структура поля касательных напряжений, рассчитанная по формулам (3) и (4), представлена на рисунке 4. Она аналогична в первом приближении экспериментально полученной картине на рисунке 2.

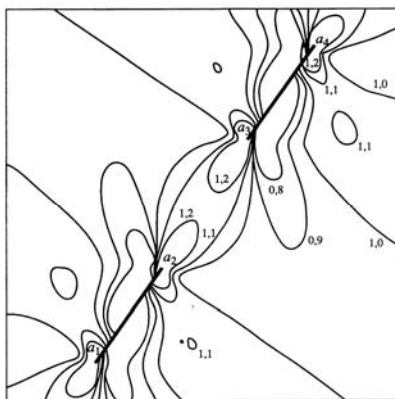


Рис. 4. Структура поля максимальных касательных напряжений между двумя коллинеарными трещинами

Конечно, представленная модель носит упрощенный характер, и поэтому ниже мы рассмотрим эту модель с других позиций. Однако общая структура модели при этом остается неизменной.

Упруго-вязкопластические деформации рудной массы при статических и динамических нагрузках

Рудная масса (отвальная руда) представляет собой трехкомпонентную среду, состоящую из твердых частиц, воды и воздуха. Твердые частицы образуют скелет рудной массы, а вода и воздух заполняют промежутки между зернами — поры рудной массы. При воздействии нагрузок вода и воздух выжимаются из пор рудной массы, вследствие чего меняются и механические свойства рудной массы. Большое влияние при этом имеет продолжительность воздействия нагрузок.

При длительных статических нагрузках вода и воздух почти полностью выжимаются из пор, вследствие чего состав рудной массы меняется; при кратковременных динамических нагрузках вода и воздух отжимаются из пор не полностью, в результате чего состав рудной массы меняется в меньшей степени.

При разработке методов расчета воздействия взрыва на рудную массу будем исходить из классических представлений. В основу упругой стадии воздействия положена линейная зависимость между напряжениями и деформациями. Для пластической стадии характерна нелинейная зависимость между напряжениями и деформациями, закон которой устанавливается на основании теоретических или экспериментальных данных. В ряде случаев нелинейную зависимость можно линеаризировать. Воздействие взрыва на рудную массу для обеих стадий рассматривается независимо от времени воздействия нагрузки. Подобные предпосылки достаточно удовлетворительно соответствуют состоянию рудной массы при воздействии длительных статических нагрузок.

Однако при динамических процессах, характеризующихся воздействием на рудную массу кратковременных и мгновенных сил, рассмотренные предпосылки обеспечивают удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных не всегда. Особенно значительно различие при сильных кратковременных динамических нагрузках (удары, взрывы, импульсы большой силы).

Рудную массу в условиях воздействия мгновенных и кратковременных сил целесообразно рассматривать как упруговязкую и пластическую среду. Наличие упругой и вязкой составляющей среды для такой модели позволяет рассмотреть развитие деформаций во времени с учетом реальных реологических свойств рудной массы.

Упруговязкие деформации характеризуются тем, что при разгрузке они полностью восстанавливаются. При этом мгновенно восстанавливающиеся деформации носят название упругомгновенных (истинно упругие), компоненты тензора которых обозначаются ε_{ij}^e . Деформации, восстанавливающиеся во времени, называются упруговязкими ε_{ij}^{ev} . Упругие деформации связаны с напряжением $\sigma_{шo}$ законом Гука:

$$\varepsilon_{ij}^e = c_{ij} \sigma_{ij}. \quad (5)$$

Остановимся на изотропном материале, характеризуемом всего двумя механическими константами:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij}^e + \delta_{ij}\lambda\varepsilon_{ij}^e, \quad (6)$$

где μ и λ — постоянные Ламе.

Между постоянными Ламе, модулем продольной упругости E , коэффициентом Пуассона ν , модулем сдвига G и модулем всестороннего сжатия K имеют место следующие соотношения:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}; \mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)}; K = \frac{E}{3(1-2\nu)}; -1 \leq \nu \leq 1/2. \quad (7)$$

Таким образом, упругое поведение изотропной рудной массы характеризуется двумя константами: G^e и K^e . Для определения модулей упругости рудной массы иногда используется статическая разгрузка образцов и по восстанавливающейся части деформации вычисляются статические модули упругости G_{00}^e и K_{00}^e .

Следует отметить, что в восстанавливающееся значение деформации входит и доля «запаздывающих» деформаций. Истинно мгновенные модули упругости следует определять по скоростям распространения в рудной массе упругих волн. Такие модули иногда называют динамическими модулями упругости G_0^e и K_0^e . Они, как правило, превышают статические модули упругости в 2–5 раз. Такая разница в значениях упругих констант объясняется тем, что на развитие упругих деформаций в рудной массе оказывает влияние внутреннее трение.

Наиболее простая формулировка соотношений, определяющих вязкие деформации рудной массы, следует из предположения, что скорость вязких деформаций пропорциональна разности между действующими напряжениями и деформациями, соответствующими упругим деформациям.

Суммарная скорость упруговязких деформаций складывается из скорости упругих деформаций и скорости запаздывающих деформаций

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{eo} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^g. \quad (8)$$

Статические модули упругости определяются по диаграммам $\sigma_i - \varepsilon_i$.

Динамические характеристики упругости рудной массы могут быть определены по скорости распространения упругих колебаний в рудной массе. Для упруговязкой среды, характеризуемой соотношениями (8), существует достаточно сложная зависимость между скоростью распространения колебаний, реологическими параметрами среды и длиной волны. Только при очень быстрых колебательных процессах реологические свойства не успевают сказаться на скорости распространения упругих волн. При этом существенным является тот факт, что рудная масса находится в условиях сложного статического напряженного состояния, которое, очевидно, значительным образом сказывается на упругих характеристиках рудной массы.

Скорость распространения упругих продольных волн в массиве рудной массы равна

$$g_s = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{g(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (9)$$

где ρ — плотность рудной массы; g — ускорение свободного падения.

Приведенные скорости распространения упругих волн являются основными механическими характеристиками динамических свойств рудной массы. С помощью формул (7) и (9) можно определить модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν рудной массы по экспериментально полученным скоростям распространения.

Деформирование рудной массы в процессе нагружения сопровождается накоплением пластических деформаций, которые при разгрузке не восстанавливаются. Закономерности развития пластических деформаций, изучение условий разгрузки рудной массы — все эти вопросы являются определяющими при формулировке математической модели рудного штабеля.

Модуль объемной пластической деформации рудной массы K^p определяется из выражения

$$K^p = \frac{a - b\sigma}{1 - c\sigma} + \frac{n}{1 - m\sigma}. \quad (10)$$

Параметры зависимости (10) являются некоторыми функциями интенсивности деформаций сдвига e_i . Функция вида (10) в общем случае отражает процесс разрыхления рудной массы. Развитие этого процесса, в свою очередь, зависит от значений σ и e_i .

Модель радиального взрывного воздействия на рудный штабель

В рамках модели на рисунке 3 выберем граничные условия в простейшей периодической форме. Задача для смещения имеет следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} U(r, z, t) \Big|_{t=0} &= \varphi(r, z), \\ U(r, z, t) \Big|_{r=R} &= \gamma(z, t) = U_0 \sin \omega t \sin kr, \\ U(r, z, t) \Big|_{z=0} &= \gamma_1(r, t) = U_1 \sin \omega t \sin kr = 0, \\ U(r, z, t) \Big|_{z=\beta(t)} &= \gamma_2(r, t) = U_2 \sin \omega t \sin kr = 0, \end{aligned} \tag{11}$$

где U_0, U_1, U_2 — компоненты ударной волны; ω, k — циклическая частота ударной волны и волновой вектор.

Общее решение такой задачи дано нами в работе [7]:

$$\begin{aligned} U(r, z, t) = \sum_{\kappa=0}^{\infty} J_0(\lambda_{\kappa} r) \left\{ e^{a^2 t} \left[\frac{1}{2a\sqrt{\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(z-\xi)^2}{4a^2(t-\tau)}} d\xi + \right. \right. \\ \left. \left. x \left(\int_0^{\ell} \varphi(r, \xi) I_0(\lambda_{\kappa} r) r dr \right) d\xi + \frac{R I_1(\lambda_{\kappa} R)}{2a\sqrt{\pi}} \int_0^t d\tau \int_0^{\ell} \frac{\gamma(\xi, \tau)}{\sqrt{t-\tau}} e^{-a^2 \tau} e^{-\frac{(z-\xi)^2}{4a^2(t-\tau)}} t \xi + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{z}{[a^2(t-\tau)]^{3/2}} e^{-\frac{z^2}{4a^2(t-\tau)}} K_1(\tau) d\tau + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{z-\beta(\tau)}{[a^2(t-\tau)]^{3/2}} e^{-\frac{[z-\beta(\tau)]^2}{4a^2(t-\tau)}} K_2(\tau) d\tau \right] \right\}. \end{aligned} \tag{12}$$

Ограничимся в (12) первым членом, причем ошибка составит 2–4 % из-за быстрого спада функции Бесселя. Решение задачи для всех $z = 0$ равно

$$\begin{aligned} U(r, t) = J_0(\lambda_0 r) \left\{ e^{a^2 t} \left[\frac{t}{2\sqrt{\pi}} \int_0^{\ell} \varphi(r) J_0(\lambda_0 r) r dr \right] + \right. \\ \left. + \frac{R J_1(\lambda_0 R)}{2a\sqrt{\pi}} \int_0^t d\tau \int_0^{\ell} \frac{U_0 \sin \omega t \sin kr}{\sqrt{t-\tau}} \cdot e^{-a^2 \tau} d\xi \right\} = \\ = J_0(\lambda_0 r) \frac{t e^{a^2 t}}{2\sqrt{\pi}} \int_0^{\ell} \varphi(r) J_0(\lambda_0 r) r dr + \frac{R J_1(\lambda_0 R)}{2a\sqrt{\pi}} \cdot e^{-a^2 t} \cdot \ell U_0 \sin \omega t \sin kr \int_0^t \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} = \\ = \frac{R J_1(\lambda_0 R) \sqrt{t}}{a\sqrt{\pi}} \cdot e^{-a^2 t} \cdot \sin \omega t. \end{aligned} \tag{13}$$

Резонансную частоту $\omega_{рез}$ определим из условия $\partial U / \partial t = 0$, имеем:

$$\omega_{рез} \approx a = \sqrt{\frac{\lambda}{c\rho}}, \tag{14}$$

где λ — теплопроводность; c — теплоемкость; ρ — плотность среды.

Зная резонансную частоту $\omega_{рез}$, можно рассчитать параметры ударной волны и мощность необходимого заряда.

Проведем теперь сравнение полученного нами решения (13) с имеющимися экспериментальными и теоретическими данными. В момент взрыва, когда время t мало, $\sin \omega t \approx \omega t$, $e^{-at} \approx 1$ и для смещения фронта ударной волны получим

$$U(r, t) \approx \frac{R J_1(\lambda_0 R)}{a\sqrt{\pi}} \cdot \omega t^{3/2}. \tag{15}$$

Из уравнения (15) следует степенная зависимость смещения частиц руды (грунта) от времени протекания начальной стадии процесса. Это согласуется как с экспериментальными данными [8], так и с результатами теоретических моделей [9]. При больших временах t из уравнения (13) следует экспоненциальное затухание ударной волны со временем, что также соответствует и экспериментальным данным, и теории [8, 9].

Возникает вопрос: для чего нужна еще одна модель радиального взрывного воздействия и вытекающая из нее формула (13)? Ответ вытекает из параметров, входящих в эту формулу. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Скорость движения фронта ударной волны согласно (13) равна

$$v(r,t) = \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{a\omega R J_1(\lambda_0 R)}{\sqrt{\pi t}} \cdot e^{-a^2 t} \cos \omega t. \quad (16)$$

При малых временах t и частоте $\omega \approx \omega_{рез}$ уравнение (16) преобразуется к виду

$$v(r,t) = \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{R J_1(\lambda_0 R)}{\sqrt{\pi t}}. \quad (17)$$

Уравнение (17) получено нами впервые. Какие практические выводы следуют из него?

Прежде всего, зависимость скорости ударной волны от свойств среды определяется коэффициентом теплопроводности λ . В работе [10] для коэффициента теплопроводности горных пород и минералов нами получено уравнение

$$\lambda = \frac{625\rho}{3C_2 G^0} \cdot T. \quad (18)$$

В уравнение (18) входит энергия Гиббса, которая экспериментально определена для большого количества минералов и представлена в справочниках. Для коэффициента мы получили значение $C_2 = 2,8 \cdot 10^{-2}$ (м²/кг с). В таблице 1 приводятся экспериментальные значения коэффициента теплопроводности некоторых минералов, вычисленные по формуле (18).

Т а б л и ц а 1

Сравнение экспериментальных и теоретических значений коэффициента теплопроводности некоторых минералов

Минерал	$\lambda_{\text{экс.}}$ Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	G^0 , Дж/моль	$\lambda_{\text{теор.}}$ Вт/(м·К)
Гипс	1,30	2,3	1795000	1,50
Магнетит	5,3	5,17	1014490	5,98
Лабрадор	1,5	2,70	3845180	1,57
Анортит	1,7	2,76	3994830	1,54
Олигоклаз	1,96	2,64	3750710	1,60
Шпинель	3,48	3,6	2188060	3,67
Альбит	2,31	2,61	3695040	2,00

Из таблицы 1 видно, что экспериментальные и теоретические значения хорошо согласуются друг с другом. Это, на наш взгляд, неплохой результат и подтверждает основные положения нашей модели.

Влияние давления на теплопроводность металлов и минералов с хорошей точностью выражается линейной зависимостью λ от p . Однако в области высоких давлений (в нашем случае в области ударной волны) линейность нарушается. Теоретически этот вопрос разработан недостаточно. Поскольку энергия Гиббса в области низких и средних значений слабо зависит от давления, то (18) дает линейную зависимость теплопроводности от давления, что соответствует экспериментальным данным. В области высоких и сверхвысоких давлений нужно учитывать эту зависимость. Это приводит к соотношению

$$\lambda = K \frac{P}{d + \vartheta P}, \quad K = const, \quad d = U - TS. \quad (19)$$

Схематически вид функции (19) показан на рисунке 5. Кривая имеет максимум, определяемый из условия

$$\frac{\partial \lambda}{\partial P} = 0, \quad \frac{\partial \lambda}{\partial P} = \frac{d}{(d + \vartheta P)^2} = 0, \quad d = 0, \quad U = TS.$$

Таким образом, для скорости ударной волны мы получаем следующее уравнение:

$$v(r,t) = 7,4 \cdot 10^3 \cdot \frac{T}{cG^0} \frac{R J_1(\lambda_0 R)}{\sqrt{\pi t}}. \quad (20)$$

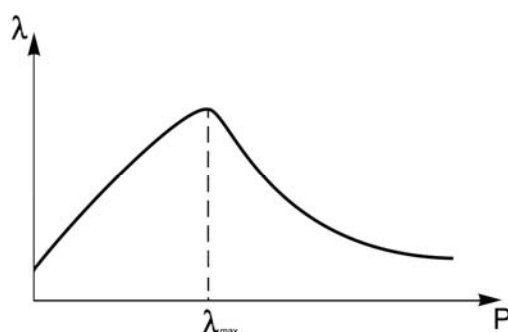


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности от давления

Уравнение (20) определяет непосредственную связь параметров взрыва со свойствами горных пород и минералов (через энергию Гиббса). Поскольку взрывное воздействие ВВ на горную массу пропорционально kv^2 , где k — кпд взрыва, то величину заряда нужно выбирать исходя из величины G^0 . Чем больше по абсолютной величине энергия Гиббса горных пород и минералов, тем большую мощность должно иметь взрывчатое вещество. Экономически это приводит к малой эффективности взрывных работ. В таблице 2 представлены данные по энергии Гиббса золотосодержащих минералов [11]. Здесь, без большой ошибки, принято $G^0 \approx |-\Delta G^0|$.

Т а б л и ц а 2

Энергия Гиббса основных золотосодержащих минералов месторождений Казахстана

Минерал	$-\Delta G^0$, кДж/моль	Минерал	$-\Delta G^0$, кДж/моль
Галенит	3132	Халькопирит	178490
Арсенопирит	109500	Сфалерит	203570
Висмутин	152900	Гематит	741700
Пирит	162000	Кварц	855690

В Казахстане объектами добычи являются месторождения Бакырчик, Васильковское, Большевик и др. Золото преимущественно связано с пиритом и арсенопиритом, в свободном состоянии отмечается редко. Комплексные золотосодержащие месторождения представлены массивными пирит-халькопиритовыми, пирит-халькопирит-сфалерит-галенитовыми рудами.

Золото — кварц — сульфидные месторождения Казахстана классифицируются как наиболее упорные руды. Для них характерны наиболее высокий коэффициент крепости, равный 23 (по шкале Протодьяконова), и низкая площадь трещинной пустотности — от 2 до 7,5 %.

Действительно, в соответствии с формулой (20) эффективность дробления золото — кварц сульфидных руд значительно ниже, чем перечисленных выше. В связи с этим большинство месторождений упорных руд (а их в Казахстане около 65 %) пока не разрабатывается.

Заключение

Суммируя результаты проведенных исследований, можно сделать следующие основные выводы:

- предложена модель буровзрывной скважины в рудной массе штабеля кучного выщелачивания и определена структура поля касательных напряжений;
- предложено выражение для модуля объемной пластической деформации рудной массы, параметры которого являются некоторыми функциями интенсивности деформаций сдвига. Это выражение в общем случае отражает процесс разрыхления рудной массы. Развитие этого процесса, в свою очередь, зависит от значений σ и e_i ;
- предложена модель радиального взрывного воздействия на рудный штабель. Получена связь параметров взрыва со свойствами горных пород и минералов.

References

1. *Tursunbaeva A.K., Portnov V.S. et al.* Thermodynamics of crushing of ore at compact leaching metals. Parts I-III // Bulletin ENU named after L.N.Gumilev. Naturally-engineering science. — 2010. — № 4 (77). — P. 49–80.
2. *Norov Yu. D., Chemetova P.A.* Chisel explosive works. — Tashkent: Fan, 2005. — 220 p.
3. *Selivanov V.V., Novikov S.A., Kobylkin I.F.* Explosive of technology. — M.: MGTU named after Bauman, 2008. — 648 p.
4. *Norov Yu. D., Turaev A.S., Kodirov F.A.* Physical and chemical methods of easing of durability of rocks. — Tashkent: Fan, 2007. — 224 p.
5. *Sobolev G.A., Ponamarev A.V.* Physics of earth quakes and harbingers. — M.: Nauka, 2003. — 270 p.
6. *Sobolev G.A.* Bases of the forecast of earth quakes. — M.: Nauka, 1993. — 313 p.
7. *Vorobev A.E., Portnov V.S. et al.* Infiltration the cyanic a solution through porous ore. I. The general consideration // The International magazine applied and basic researches. — 2010. — № 7. — P. 82–88.
8. *Kutuzov B.N.* Method of conducting explosive works. P. 1. Destruction of rocks by explosion. — M.: Mountain book, 2009. — 471 p.
9. *Kuznetsov V.M.* Mathematical models of explosive business. — Novosibirsk: Nauka, 1977. — 267 p.
10. *Portnov V.S., Tursunbaeva A.K., Puzeeva M.P. et al.* Thermodynamics and heat conductivity of minerals // Regional bulletin of the East. — 2009. — № 2. — P. 14–18.
11. *Bulah A.G., Bulah K.G.* Physical and chemical properties of minerals and components of hydrothermal solutions. — L.: Nedra, 1978. — 167 p.

УДК 622.34

К вопросу о методике оценки опасностей и аварийности технологических процессов

To the question about methodology of estimation of dangers and accident rate of technological processes

Харьковский В.С.¹, Плотников В.М.², Дрижд Н.А.¹, Шарипов Н.Х.¹,
Какенов К.С.², Комлева Е.В.¹, Харламова А.В.¹

¹Карагандинский государственный технический университет;

²Карагандинский экономический университет Казпотребсоюза (E-mail: sattu55@mail.ru)

Мақалада Қарағанды өңіріндегі шахталардың деректер негізінде тексерілген технологиялық үдерістердің апаттылығы мен қауіптерді бағалаудың авторлық әдістемесі ұсынылады. Онда апаттар санының серпіні мен олардың қайталанғыштығы косинусоида заңына бағынышты екендігі көрсетілген. Әр түрлі бастапқы деректер үшін есептелген тәуелділіктер мен қауіпті оқиғалардың нақты параметрлерін (көрсеткіштерін) талдау негізінде қауіпті ахуалдар мен қауіпті оқиғалардың жиілік шамалары арасындағы сызықсыз байланысының бар екендігі туралы қорытынды жасалған. Ұсынылған әдістеме инженерлік есептеулер мен болжамдар үшін пайдалы. Теориялық алғышарттардың дұрыстығы тәжірибелік зерттеулер нәтижелерімен дәлелденді.

The authorial methodology of estimation of dangers and accident rate of technological processes, tested on the basis of these mines of the Karaganda region, is offered in the article. It is shown that the dynamics of number of accidents and their repetition submit to the law of cosine. On the basis of analysis of calculation dependences and concrete calculations of parameters of hazardous occurrences for different basic data a conclusion is done about the presence of nonlinear connection between the sizes of frequencies of near-accidents and hazardous occurrences. The offered methodology is suitable for engineering calculations and prognosis. The rightness of the theoretical premises was confirmed by the experimental researches.

Безопасность труда в промышленности достигается путем осуществления комплекса мероприятий на основе технического перевооружения отрасли, широкого внедрения средств комплексной механизации и автоматизации производственных процессов, снижения трудоемкости работ, повышения уровня обученности работающих при ведении технологических процессов, что отвечает требованиям МОТ и национальной политике РК в области безопасности и охраны труда. Поскольку главным объ-