

Д-р техн. наук В. П. Куринной
(ГБУЗ «НГУ»),
канд. техн. наук В. А. Никифорова
(ИГТМ НАН Украины)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ К ИССЛЕДОВАНИЮ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Проаналізовано різні теоретичні моделі для дослідження процесів руйнування гірських порід вибухом.

THEORETICAL MODELS TO RESEARCH EXPLOSIVE DESTRUCTION OF MINING ROCKS

Different theoretical models for research of processes of destruction of mining rocks by the explosion are analysed.

Взрывное разрушение – быстропротекающий процесс разделения твердой среды на отдельные под действием взрыва. В результате взрывного разрушения за счет высокой скорости приложения нагрузки и деформирования среды образуется множество трещин, в отличие от статического разрушения, для которого характерно образование единичных трещин [1].

Действие взрыва в твердых телах представляет собой весьма сложное явление, включающее в себя разнообразные физические процессы, такие, как детонация взрывчатых веществ, распространение ударных волн, разрушение и неустановившееся движение среды. Для изучения этих процессов привлекаются достижения математики, физики и механики сплошных сред. Однако для взрывного дела, как раздела техники, требуются инженерные расчеты максимальной простоты, допускающие в то же время возможность достаточно широких эмпирических вариаций [2].

При построении моделей взрывного разрушения необходимо на основании качественного анализа рассматриваемого явления сложный процесс расчленить на отдельные предельно простые «блоки», учитывающие только основные черты явления. Неосновные черты явления можно учитывать как поправки к полученным решениям на основе опытных данных.

Общеизвестно, что неоднородность структуры присуща практически всем горным породам. Это вызвано, прежде всего, многокомпонентностью горных пород, а также наличием дефектов в структуре, максимальный размер которых сравним с размерами исследуемого образца горной породы. М. А. Садовский со своими сотрудниками в работах [3–5] убедительно доказывают, что неоднородность, присущая горным породам, упорядоченная, что во всех структурных отдельностях, существующих в горных породах, а также в гранулометрическом составе разрушенных горных пород наблюдается группирование отдельностей определенных размеров вокруг отдельностей с преимущественными размерами. В результате выполненных исследований авторами сделан вывод, что всем твердым материалам присуще общее свойство, состоящее в том, что при разделении их на части, а также при объединении отдельных частиц, распределение

отдельных кусков по размерам представляет собой иерархическую последовательность преимущественных размеров, в первом приближении не зависящую от физико-химических свойств исследуемого материала. Деформируемый твердый материал рассматривается М. А. Садовским как открытая система элементов, каждый из которых находится в своем энергетическом состоянии, которое, в свою очередь, может изменяться от стабильного до неустойчивого [4, 6]. Если к рассматриваемой системе извне подводится энергия, то наблюдается взаимодействие отдельных элементов, при этом изменяются как их свойства, так и свойства всей системы в целом. Кроме того, если предположить, что характер изменения свойств, приводящий систему в неустойчивое состояние, сохраняется подобным для всех масштабных уровней, можно считать, что возникновение дискретной иерархии размеров можно объяснить существованием вышеописанного подобия. В процессе деформирования твердых тел образуется иерархическая дискретность преимущественных размеров отдельных элементов, образование которых сопровождается возникновением дискретных промежутков времени, в течение которых при деформировании материала происходит переход системы из неустойчивого состояния в устойчивое. М.В. Касьян при изучении спектров электромагнитной и акустической эмиссий при нагружении образцов горных пород показал, что особенности, обнаруженные в спектрах излучений, являются безусловным подтверждением иерархичности свойств горных пород на микроуровне [7]. Им показано, что изменение частотных и амплитудных спектров сигналов электромагнитной и акустической эмиссий, регистрируемых при разрушении горных пород, происходит скачкообразно.

По моментам изменения параметров частотных спектров излучений и законам распределения сигналов по уровням излучений можно определять границы, разделяющий различные стадии разрушения. В скачкообразном и прерывистом характере разрушения и закономерностях появления их предвестников проявляется блочная иерархическая структура горных пород. М. И. Беркман [8] показал также, что при анализе и изучении спектров сигналов, используемых в исследованиях состояния горных пород, необходимо учитывать их начальную трещиноватость, так как из-за ее влияния происходит смещение спектра в область более низких частот.

Многие математические модели взрывного дела достаточно хорошо апробированы и дают хорошее совпадение с экспериментами. Например, модель несжимаемой невязкой жидкости хорошо описывает явление кумуляции.

Применение той или иной модели для описания конкретного взрывного процесса должно быть основано на тщательном анализе экспериментальных данных. Важнейшее значение имеют сведения о величине напряжений, возникающих в сплошной среде при взрыве, и о прочностных свойствах самой среды. Если взрывные нагрузки в исследуемом процессе существенно превышают все прочностные характеристики среды, то допустимо применение модели идеальной жидкости. Если же и сжимаемость среды незначительна для рассматриваемого процесса, то применима модель идеальной несжимаемой жидкости.

Разрушение прочных горных пород целесообразно исследовать в рамках

теории упругости. Для описания взрыва в грунтах предпочтительной является модель упруго-пластичного или пластичного тела.

Главное свойство, отличающее твердое тело от жидкости, заключается в его сопротивлении формоизменению. При воздействии внешних сил в твердом теле возникают внутренние напряжения, которые препятствуют изменению формы.

По тому, как физические модели твердого тела учитывают необратимость деформации или как разграничивают механические и тепловые процессы в работе [9], они классифицированы следующим образом:

Деформации в **упругой модели** полностью обратимы, так что механическая энергия сохраняется. Эта модель не учитывает способность тела поглощать поток механической энергии, превращая её в тепло. Даже для изолированного твердого тела механическая энергия может считаться неизменной только в течение некоторого интервала времени. С увеличением времени воздействия потока энергии поглощение энергии становится существенным свойством твердого тела и возникает необходимость усовершенствования модели.

В **упруго-пластичной модели** твердого тела обратимые деформации ограничены по величине. За этим пределом все деформации сдвига – необратимы. Закон сохранения механической энергии выполняется, пока внешние силы производят обратимое формоизменение тела. Как только появляется необратимость, вся энергия деформирования диссипирует, превращаясь в тепло. При этом скорость деформации пропорциональна силе или даже произвольна. Упруго-пластический подход не дает удовлетворительного ответа на вопрос о переходе механической энергии в тепловую.

Модель Дебая предполагает объемную деформацию неискаженной решетки твердого тела и сохранение полной энергии (энергии теплового движения плюс энергия сжатия холодной решетки). Однако эта модель не обладает определяющим свойством твердого тела – сопротивлением формоизменению.

В **модели Максвелла** искажения решетки со временем самопроизвольно исчезают. Уравнение, определяющее поведение твердого тела, имеет вид

$$\frac{d\sigma}{dt} = \rho C_p^2 \varepsilon - \frac{\sigma}{\tau},$$

где C_p – скорость продольных волн; σ – напряжение (пропорционально деформации искажения решетки); ε – скорость деформации; τ – время релаксации.

Модель Максвелла хорошо описывает реальное твердое тело только в узком диапазоне изменения деформационного процесса T . Для $T \gg \tau$ тело не обладает упругостью, для $T \ll \tau$ отсутствует релаксация. Таким образом, существует необоснованное различие при переходе механической энергии в тепло для колебаний разной частоты.

В **модели К. Е. Губкина** [10] решается проблема учета диссипации энергии в твердом теле. Согласно этой модели, наряду с упругими напряжениями в твердом теле имеются неупругие, которые определяются историей деформирования твердого тела, они пропорциональны скорости деформации и непрерыв-

но релаксируют. К. Е. Губкину удается при конструировании своей модели избежать логических противоречий, показав, каким образом удовлетворяются условия причинности в линейных процессах. Эта модель построена в рамках однородной сплошной среды. Диссипируемая энергия превращается в тепло.

Характерной видимой особенностью горных пород является их неоднородность. Она определяется, с одной стороны, их многокомпонентностью, а с другой – наличием различных дефектов строения.

В связи с тем, что математический аппарат механики сплошных однородных сред оказался неприемлемым для описания процессов деформирования и разрушения структурно-неоднородных твердых сред при динамическом воздействии, в последние годы разработаны новые нетрадиционные приемы и модели, описывающие эти процессы.

Трещиной называют плоский разрыв сплошности среды, величина которого на порядок и более превосходит межатомное расстояние в кристаллической решетке (т.е. более 10^{-9} м) [11]. Трещины могут быть классифицированы по многим признакам, одним из которых является их длина.

Наличие трещин в горных породах способствует резкому перераспределению действующих в них напряжений и вызываемых ими деформаций. Так, развитие трещин при действии напряжений сжатия с нарушением сплошности среды сразу же переводит ее из напряженного состояния сжатия в напряженное состояние растяжения, определяя в дальнейшем лишь отрывной характер разрушения по плоскости данной трещины.

При классификации трещин по размерам, связанной с разбиением всех существующих в природе трещин на интервалы, исследователи сходятся в вопросе о количестве таких интервалов. Их должно быть пять [12, 13].

В работе [13] эти интервалы названы классами. Трещинами первого класса считаются дефекты кристаллической решетки, вызванные условиями возникновения и развития в породе отдельных кристаллов. Их размеры 10^{-9} – 10^{-5} м. Межкристаллические трещины с размерами 10^{-5} – 10^{-3} м отнесены ко второму классу. Они возникают как следствие дефектов межкристаллического цемента и оказывают влияние на сопротивление пород при бурении, разрушении и измельчении в дробилках. Трещины третьего класса – макротрещины – являются следствием метаморфизма пород. Трещины третьего класса имеют протяженность от 10^{-2} до 10^2 м. Они могут быть открытыми или заполнены другими породами, продуктами метаморфизма или выветривания. Они оказывают наибольшее влияние на процессы разрушения массивов горных пород при их выемке и рыхлении. Трещины четвертого класса – разрывы – являются следствием глубинных подвижек массивов горных пород в процессе формирования земной коры. Эти трещины имеют протяженность 10^{-2} – 10^3 м. Трещины пятого класса – крупные тектонические разрывы, являющиеся следствием региональных тектонических процессов, могут иметь протяженность от 10^3 до 10^5 м.

В работе [14] в зависимости от размеров дефектов минералов, пород и участков земной коры выделено также пять уровней дефектности. В этой классификации принято, что чем меньше размер трещины, тем выше уровень де-

фектности породы [12]:

IV. Дефекты кристаллической решетки минералов, составляющих породу: вакансии, межузельные атомы, дислокации т.п. Вообще говоря, эти дефекты не вполне отвечают определению трещины.

III. Микротрещины, разбивающие отдельные кристаллы и небольшие участки горной породы. Размер их условно ограничен величинами 10^{-2} – 10 м.

II. Макротрещины, видимые в обнажении и изучаемые в ряде отраслей геологии, их линейные размеры условно ограничены интервалом 10 – 10^2 м.

I. Разломы, разбивающие массивы горных пород. Их линейные размеры условно ограничиваются интервалом 10^{-2} – 10^4 м.

0. Крупные тектонические разрывы, связанные с региональными полями тектонических напряжений и разбивающие участки земной коры.

Существует также условная классификация микродефектов по размерам [15]. В ней самому высокому уровню дефектности соответствуют дефекты размером менее 1 мкм (10^{-6} м). Следующий более низкий уровень дефектности охватывает интервал линейных размеров 1–10 мкм. Эти дефекты представляют собой дислокационные образования, появившиеся при пересечении полос скольжения в межзеренном пространстве. Затем следуют дефекты, сопоставимые с размерами зерен и межзеренных границ. Интервал их линейных размеров 10–100 мкм. Дефекты с размерами более 100 мкм связаны с крупными зернами и мономинеральными агрегатами.

Все вышеприведенные классификации свидетельствуют об абсолютной условности деления на интервалы размеров трещин, не учитывающего иерархичность строения горных пород.

В работе [16] предлагается описывать процесс деформирования неоднородной среды при крупномасштабном взрыве на основе представления её в виде некоторой совокупности элементов разного масштаба, промежутки между которыми представляют собой протяженные области, заполненные слабо связанным по сравнению с горной породой материалом. На каждом этапе деформирования преимущественный вклад в макродвижение вносят структурные элементы одного масштаба. Этот масштаб определяется иерархией структурных уровней и характером взрывного воздействия. Процесс деформирования такой среды описывается следующим образом. Взрыв заряда мощностью Q производится в среде, характеризующейся микроструктурой и наличием сети поверхностей ослабления в виде нескольких систем, ориентированных в пространстве трещин, каждая из которых определяет соответствующий размер структурного элемента. При достижении на одной или нескольких поверхностях ослабления предельного напряженного состояния материала заполнителя происходит лавинообразное разделение первоначально-сплошной среды на структурные элементы. Структурно неоднородный массив рассматривается в качестве существенно неравновесной системы, допускающей образование диссипативных структур, линейный размер которых соответствует размеру естественного породного блока в массиве и определяется пространственным масштабом и интенсивностью накладываемого на среду взрывного воздействия.

При рассмотрении механической модели твердого тела В.Н. Родионовым и И. А. Сизовым вводится параметр, характеризующий диссипацию механической энергии. Для этого к обычным пространственным координатам добавляется четвертая – линейный размер неоднородности, на которой при деформировании тела возникают избыточные напряжения сдвига, релаксирующие со временем [17]. Если для упругого тела, не содержащего неоднородностей, напряжение определяется только деформацией, то введение в рассмотрение неоднородностей приводит к тому, что возникающее в твердом теле напряжение становится зависящим от скорости деформирования.

Распределение неоднородностей в твердом теле таково, что все они равноправны. Объемы неоднородностей каждого размера пропорциональны размеру самой неоднородности и составляют малую долю объема твердого тела. Однако в сумме они могут его превышать, так как неоднородности разного размера могут быть «вложенными» друг в друга, вмещаясь в одно и то же физическое пространство.

Иерархичность структуры горных пород и её поведение при разрушении обуславливает применение в качестве аналитических моделей образования трещин марковских процессов [10, 16]. Так, в работах [8, 18] предлагается описывать образование трещин одного размера (дефектов одной энергии) однородным марковским процессом. При этом предполагается, что процесс начинается с появления начального дефекта, а дальнейшее развитие разрушения определяется тем, что каждый дефект обладает теми же свойствами генерировать подобные, как и первоначальный. Модель построена таким образом, чтобы она включала в себя наряду с кинетикой конечного числа дефектов и качественный скачок, который интерпретируется в модели как образование «бесконечного» числа трещин за конечный промежуток времени. Предполагается, что развитие процесса на каждой из стадий разрушения имеет подобный характер и представляется как последовательный переход «взрыва» со ступени на ступень. Появление нового дефекта на второй стадии становится возможным при достижении состояния «взрыва» на первой.

Е. И. Шемякин считает, что выбор модели взрывного разрушения должен быть связан с целями прикладных задач [19]. Однако при этом должны учитываться особенности механизма действия взрыва на окружающую среду: Во-первых, то, что преломление детонационной волны в прочные горные породы для ВВ с энергией порядка 4000 кДж/кг вызывает образование волн напряжений с амплитудой

$$\sigma_{p \max} = \rho V_{\max} C_p,$$

где ρ – плотность породы, кг/м³; C_p – скорость продольных волн, м/с;

$V_{\max} = \frac{1000}{r^n}$ – скорость смещения частиц, м/с; $n \approx 1,8-2,0$.

Во-вторых, развитие полости с продуктами взрыва приводит к формированию напряженного состояния в окрестности заряда, которое отвечает за разру-

шение горной породы. Расширение полости не приводит к существенным изменениям плотности, а основные затраты энергии расширяющихся продуктов взрыва связаны с преодолением сопротивления сдвигам. Развитие полости совершается с начальными скоростями, оставленными волной напряжений. Очень важно иметь в виду, что в те времена, когда волна напряжений далеко распространилась от места взрыва, распределение радиальных и тангенциальных напряжений в окрестности заряда отличается от таковых в волне напряжений.

Кроме того, важно учитывать неупругое поведение породы в ближней зоне взрыва. Однако близость скорости распространения волн напряжений к скорости продольных волн, формирование растягивающих напряжений, тесная аналогия формирования волновой картины при отражении от свободной и других гранитных поверхностей свидетельствуют о большом подобии рассматриваемых процессов упругим на расстояниях, удаленных от заряда.

При изучении сравнительных особенностей поведения упругой среды и сред с различными неупругими компонентами необходимо опираться на экспериментально установленные и общепринятые данные о параметрах волн напряжений в ближней зоне взрыва. Они заключаются в том, что, во-первых, при взрыве промышленных ВВ волны напряжений в прочной горной породе являются слабыми, в том смысле, что деформации, производимые волной, малы (не превосходят 10^{-3} м). Отношение максимальных напряжений в волне σ_{\max} к модулю объемного сжатия K есть величина малая

$$\frac{\sigma_{\max}}{K} \approx 10^{-2} \div 10^{-3}.$$

Волна напряжений определяет возможность передачи энергии взрыва окружающей среде.

Во-вторых, волна напряжений в ближней зоне взрыва является короткой, почти ударной. Нарастание максимальной амплитуды скорости частиц происходит значительно быстрее, чем её спад. Вблизи заряда волна напряжений подобна ударной волне, на больших расстояниях от заряда время нарастания увеличивается. С механической точки зрения, это эквивалентно тому, что зона нарастания сжатия в волне напряжений $\Delta r_{сж}$ много меньше размера зоны сжатия в окрестности заряда

$$\frac{\Delta r_{сж}}{r_{сж}} \ll 1.$$

В-третьих, для прочных горных пород характерно, что «вся» волна напряжений (включая время прихода, наступление максимума на данном расстоянии) распространяется со скоростью, близкой к скорости распространения продольной волны C_p , хотя и наблюдается увеличение запаздывания с расстоянием от заряда и некоторое увеличение длительности положительной фазы.

На основе вышеизложенных представлений в работе [19] проведены оценки

поведения горных пород в волне напряжений при взрыве для моделей упругой среды и среды с внутренним трением. Принятый закон внутреннего трения устанавливает связь двух главных напряжений в волне с деформациями, превосходящими некоторые предельные упругие деформации. В среде с внутренним трением происходит дополнительное, по сравнению с упругим, затухание волн напряжений, так как их энергия затрачивается на дополнительное разрушение породы. Если при распространении цилиндрической волны напряжений в упругой среде расчетная амплитуда убывает с расстоянием r по закону $r^{-0,5}$, то для среды с трением – $r^{-(0,8\div 0,9)}$. Физический подход к разрушению горных пород взрывом предложен в цикле работ Н. А. Родина (ВНИПИИстройсырье) [20–22]. Согласно этому подходу, твердое тело позволяет возникнуть и распространяться волне напряжений, которая переносит энергию по мощности не выше предельно допустимого уровня. При разрушении неоднородного твердого тела, каковыми являются горные породы, при прохождении волны напряжений будет происходить разрушение в местах повышенного размера дефектов и трещин с приростом их размеров. После воздействия ударной волны на стенки скважины весь избыток энергии, который не восприняла упругая деформация горной породы, перешедшая в волну напряжений, будет аккумулирован в камере взрыва. Избыток энергии взрыва будет вызывать возрастание давления в камере, превышая предельно допустимое напряжение на сжатие для данной горной породы. Чем больше будет подведено избыточной энергии к разрушаемому объекту, тем больше объем переизмельченного продукта.

Предложенная В. Н. Бовенко автоколебательная модель предразрушающего состояния твердых тел [23] позволяет описывать разрушение их на микроуровне с учетом наблюдаемого при взрывном разрушении горных пород электромагнитного излучения [24]. Идеей этой модели является дискретная и волновая природа физических процессов, протекающих в твердых телах. Автор [25] исходит из того, что любая динамическая перестройка материала твердого тела, сопровождаемая генерацией дефектов кристаллической решетки, акустическим и электромагнитным излучением, является результатом взаимодействия волн и частиц. Такой постановке вопроса более всего соответствует модель твердого тела Дебая. По своей сути модель Дебая является автоколебательной, работающей в мягком режиме возбуждения, потому что колебания атомов около положения равновесия, поддерживаемые за счет того или иного источника, возникают самопроизвольно. Введение в такую модель дефектов кристаллической решетки (точечных, линейных, поверхностных и объемных) превращает её в автоколебательную модель с жестким режимом возбуждения – релаксационный генератор с двумя характерными масштабами времени: продолжительностью медленных и быстрых процессов релаксации. Каждый из элементарных объемов вблизи дефектов решетки представляет собой открытую термодинамическую систему, диссипирующую часть энергии, которая поступает от внешнего источника. Согласно этой модели, когда скорость частиц твердого тела достигает граничной скорости атомов в волне, возникает неустойчивость по отношению к релаксационным колебаниям и происходит нарастание акустиче-

ских флуктуаций, которые получили название автоакустических возбуждений.

Волны акустической эмиссии характеризуют напряженное состояние среды вблизи дефектов структуры и кинетику её разрушения при внешних воздействиях. При обмене энергией и веществом с окружающей средой кристалл с дефектами подвержен действию периодических импульсов, возникающих в результате автоколебательного движения дефектов. Разрушение наступает в результате авторезонанса, то есть резонанса под действием силы, порождаемой движением самих дефектов, и завершается потерей колебательной устойчивости. Такой подход позволяет объяснить разрушение минералов, находящихся за пределами зоны прямого разрушающего действия взрыва, а также интенсивное измельчение минералов с высокой плотностью дефектов [26, 27].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российская угольная энциклопедия. Т. 1. – М.-С.-П.: Изд-во С.-П. картографической фабрики ВСЕГЕН, 2004. – С. 224–225.
2. Кузнецов В.М. Математические модели взрывного дела / В.М. Кузнецов. – Новосибирск: Наука, 1977. – 263 с.
3. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы / М.А. Садовский // Докл. АН СССР. – 1979. – 247. – №4. – С. 829–831.
4. Садовский М.А. О распределении размеров твердых отдельностей / М.А. Садовский // Докл. АН СССР. – 1983. – 269. – №1. – С. 69–72.
5. Садовский М.А. От сейсмологии к геомеханике. О модели геофизической среды / М.А. Садовский, В.Ф. Писаренко, В.Н. Родионов // Вестник АН СССР. – 1985. – №1. – С. 82–88.
6. Куринной В.П. Современные представления о механизме разрушения разупрочнения горных пород при взрыве / В.П. Куринной, И.П. Гаркуша, В.А. Никифорова // Сб. научн. трудов Национального горного университета. – Днепропетровск: НГУ. – 2003. – Т.1, №17. – С. 364–371.
7. Касьян М.В. Изменения спектров эмиссионных сигналов при развитии трещин и разрушения горных пород / М.В. Касьян, В.Н. Робсман, Г.Н. Никогосян // Докл. АН СССР. – 1989. – 306. – №4. – С. 826–830.
8. Беркман М.И. Последовательность стадий разрушений горных пород в модели множественного образования трещин / М.И. Беркман, В.А. Попов / Изв. вузов. Горный журнал. – 1993. – №8. – С. 13–17.
9. Родионов В.Н. Основы геомеханики / В.Н. Родионов, И.А. Сизов, В.Н. Цветков. – М.: Недра, 1986. – 302 с.
10. Губкин К.Е. О поглощении упругих волн в твердой среде / К.Е. Губкин // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1984. – № 3. – С. 26–34.
11. Ржевский В.В. Основы физики горных пород / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик. – М.: Недра, 1984. – 360 с.
12. Ржевский В.В. Физико-механические параметры горных пород / В.В. Ржевский. – М.: Недра, 1975. – 212 с.
13. Мосинец В.Н. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород / В.Н. Мосинец, А.В. Абрамов. – М.: Недра, 1982. – 248 с.
14. Рац М.В. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород / М.В. Рац, С.Н. Чернышев. – М.: Недра, 1970. – 164 с.
15. Дмитриев А.П. Физическая природа управления технологическими параметрами горных пород / А.П. Дмитриев, М.Г. Зальбершмидт // Проблемы комплексного освоения месторождений твердых полезных ископаемых. – М.: Недра, 1989. – С. 45–53.
16. Адушкин В.В. Расчетная модель взрывного деформирования твердой среды со структурой / В.В. Адушкин, А.А. Спивак // Действие взрыва в неоднородной среде. Взрывное дело № 90/47. – М.: Недра, 1990. – С. 17–25.
17. Родионов В.Н. О неупругих напряжениях в твердом теле с неоднородностями / В.Н. Родионов, И.А. Сизов // Действие взрыва в неоднородной среде. Взрывное дело № 90/47. – М.: Недра, 1990. – С. 5–17.
18. Yingling J.C. Liberation model for multicomponent ores / J.C. Yingling // Mineral and Met. Progress. – 1991. – №8. – №2. – С. 65–72.
19. Шемякин Е.И. Волны напряжений при взрыве скважинного заряда / Е.И. Шемякин, А.Н. Кочанов // Взрывное дело № 91/43. – М.: МВК по ВД, 1998. – С. 12–21.
20. Родин Р.А. Физическая сущность процесса разрушения хрупких горных пород / Р.А. Родин // Изв. вузов. Горн. журн. – 1991. – № 11. – С. 12–20.
21. Родин Р.А. О правомерности рассмотрения процесса разрушения горных пород на основе теории прочности / Р.А. Родин // Изв.вузов. Горн. журн. – 1992. – №5. – С. 10–15.
22. Родин Р.А. Физическая сущность разрушения горной породы при сверхвысоких мощности и скорости воздействия / Р.А. Родин // Изв. вузов. Горн.журн. – 1994. – № 2. – С. 1–4.

23. Бовенко В.Н. Основные положения автоколебательной модели предразрушающего состояния твердых тел / В.Н. Бовенко // ДАН СССР. – 1986. – Т.286, №5. – С. 1097–1101.
24. Электромагнитное излучение горной породы в условиях взрывного нагружения / [М.Б. Гохберг, И.Л. Гуфельд, О.В. Козырева и др.] // ДАН СССР. – 1987. – Т.295, № 2. – С. 321–325.
25. Бовенко В.Н. Связь автоакустической эмиссии с предразрушающим состоянием кристалла / В.Н. Бовенко // ДАН СССР. – 1983. – Т.271, №5. – С. 1086–1090.
26. Исаков А.Л. О механизме разрушения кристаллов при взрывном воздействии / А.Л. Исаков, В.Н. Белобородов // Физ.-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 1991. – № 5. – С. 47–56.
27. Ефремов Э.И. О механизме измельчения взрывом многокомпонентных твердых сред с включениями зерен минералов / Э.И. Ефремов, В.А. Никифорова, А.И. Сердюк // Высокоэнергетическая обработка материалов. – Днепропетровск: ГГАУ, 1995. – С. 74–79.

УДК 622.648.24 – 192:622.7.06

Д-р техн. наук Е.В. Семененко,
канд. техн. наук О.А. Медведева
(ИГТМ НАН Украины)

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Гідротехнічні системи технологій збагачення мінеральної сировини проаналізовано як об'єкт теорії надійності, виділено рівні формування надійності, сформульовано критерії надійності, вказано характерні періоди оцінки надійності, а також запропоновано метод розрахунку показників надійності систем, що розглядаються, на розрахунковий період.

ELABORATION OF METHODS OF RELIABILITY EVALUATION OF HYDROENGINEERING SYSTEMS FOR MINERAL CONCENTRATION TECHNOLOGIES

Hydroengineering systems of mineral concentration technologies were analyzed as an object of reliability theory, levels of reliability formation were marked out, reliability criteria were formulated, specific periods of reliability evaluation were indicated, method of calculation of reliability indexes of systems under consideration for projected period was offered.

В настоящий момент надежность технологических систем и технических средств представляет отдельную отрасль научных знаний, для которой существуют характерные методы и приемы, определены понятия и принципы, сформулированы критерии и теоремы, признанные классическими и имеющие универсальный характер [4 – 10].

Именно поэтому при рассмотрении вопросов надежности конкретного объекта всегда является первостепенным и наиболее важным следующее: определение места этого объекта в сложившейся системе понятий и принципов теории надежности; характеристика его как объекта теории надежности; обоснование показателей и уровней надежности; описание методов расчета и оценки показателей надежности; выбор в жизненном цикле объекта этапов оценки, формирования и обеспечения надежности.

Объект исследования – эффективность и надежность гидротехнических систем технологий обогащения минерального сырья.

Цель работы – разработка методов оценки надежности гидротехнических си-