

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД И МАССИВОВ ПРИ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВАХ

В. В. Адушкин, А. А. Спивак

Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, spivak@idg.chph.ras.ru

Экспериментально определены механические характеристики массивов и слагающих их горных пород в зонах влияния подземных ядерных взрывов. Выделены зоны, различающиеся поствзрывной структурой массива и изменением свойств горных пород.

Ключевые слова: ядерный взрыв, горные породы, механические свойства.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование механических свойств горных пород и массивов является важной фундаментальной задачей. Особый интерес представляет изучение поведения горных пород при интенсивных крупномасштабных нагрузках. Результаты таких исследований позволяют не только решать хозяйственные задачи, связанные с освоением подземного пространства, добычей минерального сырья и строительством, но также реконструировать закономерности поведения внутренних геосфер Земли и описывать особенности поведения природных структур земной коры (движение тектонических плит и т. п.).

Проведение подземных ядерных испытаний позволило накопить весьма ценный материал, связанный с поведением горных пород и массивов в условиях интенсивного динамического нагружения. Основную роль в организации и выполнении экспериментальных исследований, связанных с установлением закономерностей разрушения среды сложного блочно-иерархического строения при подземных ядерных взрывах, сыграл научный руководитель Семипалатинского испытательного полигона академик М. А. Садовский. Результаты выполненных под его руководством работ позволили получить неопенимый фактический материал, который и в дальнейшем будет востребован при фундаментальных исследованиях поведения земной коры в условиях внешних возмущений естественного и техногенного происхождения, а также при решении широкого круга прикладных задач.

Необратимое поведение среды является одним из наиболее значимых эффектов подземного ядерного взрыва. Изменение структуры и прочностных характеристик горных пород

и массива определяет не только снижение их несущих свойств и наличие приповерхностных эффектов в окрестности взрыва, но также приводит к нарушению естественных режимов энерго- и массообмена в значительной по объему области. При этом весьма существенно влияние крупномасштабного взрыва на режим подземных вод.

В последнее время отмечается значительное повышение интереса к анализу механических эффектов подземных ядерных взрывов, что связано с необходимостью оценки и переосмысления геоэкологических последствий подземных ядерных испытаний и подземных ядерных взрывов, проведенных в мирных целях.

Разрушение твердой среды под действием взрывной нагрузки рассматривается, в первую очередь, как нарушение сплошности, а следовательно, связности отдельных ее структурных элементов между собой, что определяет в итоге блочно-иерархический состав разрушенной среды [1–4]. Здесь уместно отметить, что расчленение горной породы в результате взрыва на отдельные слабосвязанные между собой структурные элементы не всегда приводит к их беспрепятственному разделению по вновь образовавшимся поверхностям. При камуфлетных ядерных взрывах в отсутствие поверхностей и зон разгрузки большие деформации, сопутствующие взрывному движению, а также остаточные напряжения часто приводят к достаточно плотной упаковке отдельных кусков горной породы разрушенного в целом массива. Об этом свидетельствуют эксперименты по выпуску горной породы, разрушенной подземным ядерным взрывом [5]. Вместе с тем нарушение связности горного массива отчетливо проявляется в изменении свойств горных пород и самого массива.

В настоящей работе представлены результаты исследований основных характеристик горных пород и массива в ближней зоне подземных ядерных взрывов, проведенных в штольнях горного массива Дегелен и скважинах горного массива Балапан Семипалатинского испытательного полигона.

При анализе механического состояния массива горных пород после взрывного воздействия в настоящей работе использовался подход, основанный на делении среды на области (зоны), отличающиеся структурными и механическими характеристиками. При этом важно вычленять зоны, характеризующиеся сильной структурной нарушенностью в результате взрыва, и зоны, в которых среда допускает блочную структуру.

С точки зрения дифференциальных блоковых движений наибольший интерес представляют зоны, в которых сформировавшаяся в результате взрыва структура представляет собой набор блоков разного размера. Такими зонами являются: зона интенсивной трещиноватости, в которой роль блоков играют «отдельности», размер которых определяется системами образовавшихся трещин; зона блоковых трещин, в которой взрывное воздействие практически не изменило размеры присутствующих в массиве блоков, но существенно изменило условия на контактах блоков; зона квазиупругого поведения среды, в которой наблюдаются ярко выраженные локальные проявления взрывного воздействия, отличающиеся по амплитуде от средних характеристик.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗОН НЕОБРАТИМОГО ПОВЕДЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗРЫВАХ В ШТОЛЬНЯХ

Характер интегрального действия взрыва на горный массив удобно продемонстрировать с помощью результатов сейсмодослеживания массива, проведенного после взрыва мощностью 12,5 кт [6] (рис. 1). Вблизи эпицентра взрыва расположена камуфлетная полость со столбом обрушения, относительный радиус полости $R_c/q^{1/3}$ примерно 7 м/кт^{1/3} (q — мощность взрыва в килотоннах ТНТ). Область радиусом ≈ 35 м/кт^{1/3} образует зону интенсивных разрушений, скорость распространения продольных волн в которой составляет $C_p = 1,1 \div 1,4$ км/с.

Далее по мере удаления от эпицентра сле-

дуют зоны различной степени нарушенности (3, 4 на рис. 1). На относительных расстояниях $r/g^{1/3} \approx 120$ м/кт^{1/3} значения скорости распространения продольных волн, по данным сейсмодослеживания, приближаются к средним значениям для ненарушенного массива. В ряде экспериментов изменение C_p в массиве прослеживалось на более далеких расстояниях, вплоть до 300 м/кт^{1/3}. Подчеркнем, что значения интервальных скоростей (скоростей, принадлежащих интервалу, характерному для конкретной зоны) на больших расстояниях менялись преимущественно в зонах тектонических нарушений.

Рассмотрим подробнее результаты некоторых экспериментов. В непосредственной близости от заряда, в области где формируется камуфлетная полость, напряжения столь велики, что традиционно полагали, что среда на первой стадии расширения полости ведет себя подобно жидкости [7]. Однако, несмотря на весьма высокие интенсивности воздействия даже вблизи заряда, механическое действие взрыва в значительной степени определяется структурой массива.

По результатам инженерно-геологических и геофизических работ, проведенных с целью изучения влияния штольневых взрывов на массив горных пород, выделяются следующие зоны.

Полость обычно имеет асимметричную относительно центра эллипсоидную форму со средним относительным размером $7 \div 10$ м/кт^{1/3} в зависимости от прочностных свойств горных пород (длинная ось эллипсоида идет вдоль напластования горных пород либо вдоль направления преимущественного развития наиболее крупных тектонических нарушений).

Зона смятия горных пород примыкает непосредственно к полости и располагается на расстояниях $12 \div 14$ м/кт^{1/3} от центра взрыва. Породы в этой зоне измененные, легко превращаются в материал типа песка при незначительном механическом воздействии. Гранит имеет осветленный цвет, зерна минералов в породе раздроблены многочисленными микротрещинами, некоторые минералы потеряли естественные свойства и форму. Резко снижаются прочностные и упругие свойства породы. Прочность породы резко повышается.

Зона неупругих деформаций горных по-

род прослеживается на расстояниях до $35 \div 40$ м/кт^{1/3}. Здесь помимо относительных перемещений структурных блоков породы наблюдается достаточно интенсивное дробление собственно горной породы (образование новых трещин). В пределах этой зоны выделяются подзона дробления (на расстоянии до $20 \div 25$ м/кт^{1/3}) и подзона новых трещин.

В *подзоне дробления* массив раздроблен новыми и подновленными естественными трещинами. Гранит осветленного беловатого цвета к периферии зоны переходит в естественный розовый. Массив имеет вид бутовой кладки с нарушенными швами. В начале зоны гранит раздроблен до мелкого щебня, а к периферии — до кусков размером десятки сантиметров в поперечнике. Количество трещин увеличивается в $4 \div 40$ раз по отношению к естественному. В целом массив связанный, на периферии проходка требует частичного применения буровзрывных работ. Общая пористость массива достигает 10,5 %.

В *подзоне новых трещин* (на расстояниях до $35 \div 40$ м/кт^{1/3}) цвет породы естественный. Суммарное количество трещин увеличивается в $2 \div 4$ раза. Массив приобретает ярко выраженное блочное строение. Размер кусков определяется в основном естественной трещиноватостью. Размер блоков уменьшается к центру от $1,0 \div 3,0$ до $0,2 \div 0,8$ м. Наибольшую раскрытость имеют пологие трещины. По крутым трещинам происходят срывы, сколы и смещения. Прочность породы от центра взрыва к периферии постепенно возрастает, упругие свойства также становятся близкими к естественным. По сейсмическим данным зона интенсивного развития подновленных трещин имеет граничную скорость упругих волн около 4200 м/с.

Далее можно выделить *зону неупругих деформаций массива* (на расстояниях до $120 \div 130$ м/кт^{1/3}, а в отдельных направлениях — до 150 м/кт^{1/3}). Здесь образование новых трещин практически не происходит. Встречаются лишь единичные новые трещины. Ширина раскрытия трещин $2 \div 10$ мм, в наиболее ослабленных зонах — $10 \div 50$ мм. Порода в куске имеет естественный цвет и естественные свойства. Скорость продольных волн в массиве меньше первоначальной на $5 \div 10$ %. Проницаемость близка к естественной. Условия бурения не отличаются от обычных. Наблюдается ин-

тенсивное смещение отдельных блоков породы, раскрытие существующих трещин, проявление «скрытой» трещиноватости, изменение упругих характеристик массива, обусловленное раскрытием трещин первичных отдельностей.

В области, примыкающей к внешней границе зоны необратимого поведения горных пород, повсеместно выделяется *подзона подновленных трещин* ($50 \div 60$ м/кт^{1/3}).

Инструментально фиксируются *зона локальных неупругих деформаций* находится на расстояниях $200 \div 220$ м/кт^{1/3}. В ней неупругие деформации на структурных нарушениях. Визуально поствзрывные нарушения наблюдаются, как правило, лишь в виде вывалов из кровли выработки, в основном в зонах влияния тектонических нарушений. Возможно подновление тектонических зон и просачивание по ним газообразных продуктов взрыва.

Результаты исследований свидетельствуют, что механическое действие взрыва в массиве в значительной степени определяется структурой среды. Например, наличие вблизи точки взрыва тектонических нарушений сплошности IV, V порядков определяет асимметрию камуфлетной полости. По мере удаления от эпицентра структурные неоднородности оказывают все более заметное влияние на механическое действие взрыва. Более того, характер разрушения существенно зависит от локальных геологических условий.

Выделенные инженерно-геологические зоны, образовавшиеся в результате воздействия взрыва на горный массив, имеют ассиметричную форму, максимальные изменения ориентированы в направлении оси выработки и свободной (дневной) поверхности. На конфигурацию зон, степень трещиноватости и проникновение вторичных продуктов влияют не только анизотропные свойства массива (характер трещиноватости, неоднородность пород, наличие тектонических нарушений), но и искусственно созданные ослабленные зоны (существующие горные выработки).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗОН НЕОБРАТИМОГО ПОВЕДЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗРЫВАХ В ГЛУБОКИХ СКВАЖИНАХ

В результате инженерно-геологических и геофизических исследований, проведенных в места ядерных взрывов в скважинах площадки Балапан, выделены следующие зоны (рис. 2).

В месте проведения взрыва формируется *камуфлетная полость* с относительным радиусом $10 \div 13,6 \text{ м/кт}^{1/3}$. Полость частично или полностью заполнена обломками горной породы размером от пылевых фракций до $3 \div 5 \text{ см}$. Ниже центра взрыва в породах распределен застывший расплав, который на дне полости формирует сплошное зеркало. Общая пористость горной массы составляет $20 \div 25 \%$, коэффициент фильтрации достигает $25 \div 30 \text{ м/сут}$.

По мере удаления от центра взрыва следует *зона смятия горных пород* относительной мощностью до $3 \div 4 \text{ м/кт}^{1/3}$. Горные породы на этих расстояниях превращены в рыхлый пылевой материал с включением обломков измененных пород размером не более $3 \div 4 \text{ см}$. При водонасыщении измененные породы превращаются в глиноподобную массу. Коэффициент проницаемости среды составляет $0,4 \div 1,13 \text{ Д}^*$. Общая пористость в $2 \div 6$ раз превышает начальную.

На относительных расстояниях до $24 \div 34 \text{ м/кт}^{1/3}$ находится *зона дробления горных пород*, представляющая собой разрушенную горную массу с размером кусков от $2 \div 3$ до $5 \div 7 \text{ см}$. Как правило, зона имеет асимметричную форму, определяемую структурно-тектоническим строением среды (наибольшие размеры зоны дробления наблюдаются в направлении распространения естественной трещиноватости). Первичная ориентировка тектонических элементов и прожилков не сохраняется. Пористость массива горных пород увеличивается в $2-3$ раза по сравнению с первоначальной. Коэффициент фильтрации массива по данным опытных откачек составляет в среднем $0,250,2 \text{ м/сут}$.

Далее наблюдается *зона интенсивной трещиноватости*, распространяющаяся до относительных расстояний $50 \div 55 \text{ м/кт}^{1/3}$. Зона характеризуется появлением новых трещин по естественным микротрещинам, текстурным элементам горных пород и зонам механических ослаблений. Особенно интенсивно трещиноватость пород проявляется вдоль плоскостей тектонических трещин, совпадающих с радиальными и тангенциальными направлениями относительно центра взрыва. По радиальным направлениям образуются сколы, по концентрическим — разрывы. Прочностные свойства пород снижены на $20 \div 30 \%$, акустические — на

$10 \div 25 \%$. Коэффициент проницаемости среды увеличивается до 1000 раз, причем наибольшее увеличение отмечается по простиранию пород.

Образование вторичных трещин в этой зоне происходит по направлению ослабленных тектонических зон и связано с раскрытием первичных макро- и микротрещин, а также с образованием новых по текстурным элементам пород. Наиболее интенсивно разрушение происходит по простиранию. С увеличением радиальных расстояний от центра взрыва степень разрушения снижается. Кроме того, на общем фоне разрушений выделяются участки интенсивного разрушения. Количество трещин, оцененное по керну, изменяется от $4 \div 6$ на 1 п.м , до бесчисленного множества. Объясняется такая неравномерность неоднородностью пород по физико-механическим свойствам и факторам откольного разрушения на плоскостях трещин. Водопроницаемость горных пород значительна: $0,001 \div 10 \text{ м/сут}$. При этом по простиранию пород коэффициент фильтрации $1 \div 10 \text{ м/сут}$, вкрест простиранию — $0,01 \div 1 \text{ м/сут}$, ниже полости взрыва — $0,01 \div 0,03 \text{ м/сут}$. Общая пористость массива, по данным геофизических исследований, $10 \div 25 \%$.

Зона блоковой трещиноватости (зона подновленных трещин) имеет симметричную форму, в основных чертах повторяющую зону интенсивной трещиноватости. Радиус зоны в плане достигает $65 \div 70 \text{ м/кт}^{1/3}$. Наибольшую мощность зона имеет по простиранию и восстанию пород, наименьшую — ниже полости и по падению пород. Конфигурация зоны существенно изменяется в сторону увеличения размеров при пересечении с тектоническими нарушениями. Новообразованные трещины в пределах зоны не наблюдаются, разрушенность массива обусловлена раскрытием существующих трещин. Отдельные участки зоны отличаются большей трещиноватостью пород, что связано с откольным явлением при прохождении волн через породы с резкой сменой прочностных свойств (зоны расланцевания и приконтактные участки). Мощность интенсивно разрушенной породы составляет в этом случае $1,5 \div 2 \text{ м}$. Прочностные свойства пород в зоне снижены на $10 \div 15 \%$, акустические — на $5 \div 15 \%$. Коэффициент проницаемости среды $0,05 \div 10 \text{ Д}$, причем наибольшие значения водопроницаемости порода имеет ближе к центру взрыва.

В результате обрушения разрушенной по-

* $1 = 10^{-12} \text{ м}$

роды, размещенной над местом камуфлетного взрыва, в среде формируется *столб обрушения*, характеризующийся разуплотненной горной массой с размером отдельности, близким к наблюдаемому в основных зонах необратимого деформирования среды. При наклонном залегании слоев пород верхний контур столба обрушения асимметричен и наклонен в сторону восстания пород. Высота столба обрушения $40 \div 110$ м. Размер обломочного материала — от глинистых частиц в нижней части до $10 \div 15$ см и более на внешней границе. Коэффициент проницаемости горной массы в столбе обрушения достигает 200 Д. Пористость обломочного материала в столбе обрушения достигает 25 %. Пластовые скорости составляют 2270 м/с.

Купол (свод) устойчивого равновесия обрузуется при камуфлетных взрывах и характеризуется коренным залеганием пород выше пустоты над столбом обрушения. Определяется главным образом по провалу бурового снаряда на глубину $2,8 \div 8,5$ м.

Зоны откольного разрушения образуются при всех видах подземных взрывов на поверхности раздела сред с различной акустической жесткостью. На свободной поверхности откольные разрушения наблюдаются на относительных эпицентральных расстояниях $100 \div 200$ м/кт^{1/3} (в отдельных случаях до 1000 м/кт^{1/3}). Глубина откольных разрушений определяется конкретным строением массива горных пород в месте проведения взрыва (наличие тектонических нарушений и границ между породами различного вещественного состава) и составляет $10 \div 32$ м/кт^{1/3}.

Зона деформирования свободной поверхности, как правило, представлена образованием остаточных трещин в массиве горных пород. В ряде экспериментов эта зона характеризуется вспучиванием массива горных пород, часто с образованием провальной воронки в центральной части. Относительный радиус зоны вспучивания горных пород $60 \div 140$ м/кт^{1/3}. Высота холма вспучивания $0,7 \div 2$ м/кт^{1/3}.

ЗОНА ЛОКАЛЬНЫХ НЕОБРАТИМЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ

Помимо рассмотренных выше зон разрушения, характеризующихся объемными эффектами и концентрирующихся в месте проведения взрыва, при подземных ядерных взрывах наблюдаются эффекты необратимого деформи-

рования среды на достаточно больших эпицентральных расстояниях, превышающих радиус максимальной центральной зоны необратимых нарушений среды (порядка 100 м/кт^{1/3}). Определение размеров *зоны локальных необратимых проявлений* представляет особый интерес с точки зрения оценки безопасных расстояний, на которых обеспечивается целостность сооружений и объектов, а также возможна миграция радионуклидов.

Не исключено, что в этом случае при установлении размера зоны разрушения массива горных пород необходимо ориентироваться на максимально возможные расстояния, на которых взрывное воздействие вызывает необратимые проявления, трактуемые как разрушение: аномально большие необратимые подвижки горной породы, раскрытие тектонических трещин и разломов и т. п.

Если говорить о дальнодействии взрыва, то в настоящее время накоплено значительное количество экспериментальных данных, свидетельствующих о наличии необратимых проявлений на расстояниях, существенно превышающих 100 м/кт^{1/3}. При этом масштаб указанных необратимых эффектов в отдельных случаях может оказаться весьма значительным. К подобным проявлениям подземного ядерного взрыва прежде всего следует отнести ярко выраженные остаточные деформации горного массива в виде зияющих трещин (шириной до 10 мм), аномально больших (до 20 мм) локальных подвижек и угловых деформаций, сбросов, деформаций рельсовых путей, а также в виде значительных по объему вывалов горной породы в подземных выработках [1, 2]. Следует отметить также изменение гидрогеологической обстановки на значительном удалении от подземного ядерного взрыва [8].

Необходимо обратить внимание на одну важную особенность механического дальнодействия подземного ядерного взрыва: при проведении повторных взрывов в пределах одной геофизической площадки необратимые локальные проявления в среде могут возникать при меньших по сравнению с предшествующими взрывами параметрах воздействия. Так, например, при повторном взрыве мощностью 0,5 кт в слабонарушенных массивах диабазовых порфириров отмечались вывалы горной породы в подземной выработке на расстоянии 750 м/кт^{1/3}, в то время как при основном взрыве той же мощности вывалы породы наблюдались на рас-

стояниях до $470 \text{ м/кт}^{1/3}$ [2]. В других экспериментах повторные взрывные воздействия вызывали значительную деформацию рельсовых путей на приустьевых участках соседних выработок.

Усиление механического эффекта в дальней области при повторных взрывах вероятнее всего обусловлено накоплением остаточных напряжений либо необратимых деформаций от предшествующих воздействий на механически ослабленных участках горного массива. В этом случае повторные взрывы могут вызвать значительные остаточные проявления даже на тех участках массива горных пород, на которых указанные проявления (с учетом амплитуды воздействия) не прогнозируются. Последнее существенно усложняет анализ устойчивости сооружений и горных массивов при интенсивных динамических нагрузках.

В объемах, значительно превышающих объем центральной зоны разрушения среды при взрыве, отмечается существенно неравновесное состояние среды, проявляющееся в виде остаточных сейсмических явлений (афтершоков). Радиус зоны аномального режима релаксации среды составляет $650 \div 1400 \text{ м/кт}^{1/3}$ данным [9, 10].

Тектоническая нарушенность массива горных пород может привести к значительному увеличению масштаба локальных необратимых проявлений взрывного воздействия. Так, при проведении подземного ядерного взрыва *Milrow* (США) были зарегистрированы значительные остаточные смещения среды по существующим тектоническим разломам. Наблюдаемые на дневной поверхности смещения берегов разломов достигали $1 \div 1,2 \text{ м}$ в вертикальном направлении и до $0,15 \text{ м}$ вдоль разломов. Протяженность обновившихся разломов составила $0,3 \div 8 \text{ км}$. Разрывы вдоль тектонических разломов на расстояниях до 6 км от эпицентра взрыва отмечались в эксперименте *Benham* (США). Аналогичные результаты получены при взрывах на Семипалатинском испытательном полигоне [1, 11].

Многочисленные наблюдения, проведенные при крупномасштабных подземных взрывах, позволяют установить характерные размеры приповерхностной зоны откольных явлений. В частности, для взрывов с приведенной глубиной $80 \div 120 \text{ м/кт}^{1/3}$ радиус зоны откольных проявлений по естественным нарушениям среды в среднем равен $\approx 800 \text{ м/кт}^{1/3}$. Харак-

терно, что на этих расстояниях максимальная массовая скорость в волне сжатия составляет $0,15 \div 0,2 \text{ м/с}$, эти значения являются граничными для видимых механических проявлений сейсмозрывного эффекта.

Возникновение необратимых локальных проявлений в среде на значительных расстояниях от места проведения подземного ядерного взрыва обусловлено блочным строением реального массива горных пород. В этом случае пространственно средняя деформация среды складывается из деформации собственно горной породы (блоков) и деформации существенно более слабого по сравнению с горной породой материала-заполнителя промежутков. В результате блочная среда деформируется преимущественно по поверхностям и зонам ослабления прочности, в окрестности которых по этой причине и происходит локализация необратимых проявлений. В зависимости от конкретной иерархической структуры горного массива и прочности межблоковых связей локальные разрушения могут наблюдаться на расстоянии вплоть до $10^3 \text{ м/кт}^{1/3}$ [12].

Известные масштабы структурных неоднородностей свидетельствуют о том, что в природе не существует массивов горных пород, лишенных иерархически соподчиненной структуры. Например, реальный горный массив, не содержащий тектонических разломов, имеет ослабления прочности на более высоком иерархическом уровне. При этом естественно, что масштаб необратимых локальных проявлений полностью соответствует масштабному уровню разрушаемой структуры.

В любом случае при оценке возможных разрушений в массиве горных пород в результате действия подземного ядерного взрыва необходимо иметь в виду вероятность возникновения локальных разрушений в области радиусом до $10^3 \text{ м/кт}^{1/3}$.

Сказанное вызывает необходимость совершенствования наших представлений о характере взрывного воздействия в реальных массивах горных пород и, в первую очередь, выделения области локальных необратимых проявлений в качестве самостоятельной.

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В РЕЗУЛЬТАТЕ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

Одним из наиболее важных эффектов под-

земного взрыва является изменение фильтрационных свойств массива горных пород. При этом изменение проницаемости среды определяется не только разрушением горной породы (возникновением новых каналов фильтрации жидкости и газа), но и изменением проницаемости изначально имеющих в среде структурных нарушений в виде трещин разного масштаба за счет изменения их геометрических характеристик (например, величины раскрытия и перекрытия), установления гидравлической связи между отдельными пустотами, а также необратимого разуплотнения заполнителя трещин, характеризующегося низкой (по сравнению с горной породой) прочностью.

Наиболее подробное исследование влияния подземного ядерного взрыва на фильтрационные характеристики массива горных пород проведено в эксперименте *Днепр-1* [13] (04.09.1972, мощность взрыва $q = 2,1$ кт, глубина $h = 110$ м [14, 15]). Фильтрационные свойства массива и слагающих его горных пород определялись с помощью специально разработанной методики [16, 17], в которой в качестве рабочего тела использовался воздух, нагнетаемый в изолированные участки глубоких скважин. Обработка данных фильтрационных испытаний массива и слагающих его пород проводилась на основе двучленного уравнения фильтрации

$$\|\text{grad}P\| = -\mu u/k_1 - \rho u^2/k_2, \quad (1)$$

(1) где u — скорость фильтрации; P — давление воздуха в изолированном участке экспериментальной скважины; ρ и μ — соответственно плотность и вязкость используемого в эксперименте рабочего тела; k_1 и k_2 — соответственно первый (*ламинарный*) и второй (*турбулентный*) коэффициенты проницаемости, характеризующие фильтрационные характеристики проницаемой среды вне зависимости от используемого рабочего тела.

Полученные в результате обработки экспериментальных данных значения коэффициентов k_1 и k_2 в зависимости от относительно расстояния до центра взрыва $r/q^{1/3}$ показаны на рис. 3. Зависимости $k_1(r)$, $k_2(r)$ можно представить в виде (для $25 \text{ м} < r < 100 \text{ м}$) $k_1 = 1,45 \cdot 10^{-7} r^{-2,7} \text{ м}^2$, $k_2 = 1,6 \cdot 10^{-3} r \text{ м}$, где r — расстояние от места взрыва, м.

Начальная проницаемость исследуемого массива горных пород характеризуется следующими значениями параметров: $k_1 = (1,7 \div$

$3,7) \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$, $k_2 = (1,1 \div 2,3) \cdot 10^{-11} \text{ м}$.

На рис. 3.a приведены для сравнения результаты измерений, проведенных при подземных ядерных взрывах *Hardhat* [3] и *Hoggar* [18]. Параметр k_2 в этих экспериментах не определялся.

Данные рис. 3 указывают на значительное повышение проницаемости горного массива в результате взрывного воздействия, причем по мере удаления от места взрыва проницаемость нарушенной среды падает, что соответствует падению интенсивности производимого взрывом разрушения с расстоянием.

Соотношение измеренных в массиве горных пород параметров k_1 k_2 представляет особый интерес. Трещиноватый массив, характеризующийся относительно большим просветом проницаемых каналов, существенно отличается от пористых сред регулярной структуры значением параметра k_2 (при равных значениях параметра k_1). Это хорошо видно из рис. 4, на котором представлены результаты исследований трещиноватого горного массива и классических пористых сред регулярной структуры. Наблюдаемое отличие зависимостей $k_1(k_2)$ для реального горного массива и пористых сред объясняется большим вкладом турбулентной составляющей потока (второй член в правой части уравнения (1)) в общее гидравлическое сопротивление при течении рабочего тела в трещинах по сравнению с фильтрацией в пористых средах. Это может происходить вследствие сильного различия чисел Рейнольдса: течение рабочего тела при одинаковых физических скоростях движения частиц осуществляется по каналам различной ширины и конфигурации.

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД И МАССИВА В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЗРЫВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Изменение свойств скальной породы можно проследить с помощью результатов физико-механических испытаний образцов, отобранных на различных расстояниях от центра взрыва. Как правило, измерялись скорость продольных волн в образце (C_0), прочность на одноосное сжатие (σ_*), пористость (m), реже — прочность на растяжение (σ_p) и на сдвиг (σ_T).

подавляющее большинство данных касается диапазона приведенных расстояний, пре-

Физико-механические свойства образцов горных пород
на разных относительных расстояниях от центра взрыва

Расстояние, м/кт ^{1/3}	Количество образцов	σ_* МПа	C_0 , м/с	m , %	β , %
13,2	11	18	1 900	15,41	7,25
14,6	11	19,5	2 100	10,22	5,27
15,9	11	38,5	2 750	7,16	3,73
17,3	11	52,5	3 100	7,47	4,39
26,9	8	82	4 200	6,84	2,35
45	8	156	4 700	4,01	1,01
49	8	205	5 220	2,9	0,59
До опыта	224	202	5 300	3,1	0,5

Примечание. Приведены средние значения параметров σ_* , C_0 , m , β (β — водопоглощение).

вышающих 100 м/кт^{1/3}, однако по некоторым опытам имеются результаты измерений в широком диапазоне эпицентральных расстояний — вплоть до камуфлетной полости. В таблице приведены некоторые результаты измерений при взрыве в штольне 148/5.

Прочность на одноосное сжатие горных пород. Этот параметр, даже для ненарушенного массива, характеризуется, пожалуй, наибольшим разбросом значений, поскольку величина σ_* более чувствительна как к наличию локальных дефектов в образце, так и к используемому оборудованию. Тем не менее, осреднение результатов измерений по значительному количеству образцов, отобранных на одном расстоянии, позволяет дать количественные оценки изменения прочности на одноосное сжатие от расстояния до центра взрыва.

На рис. 5,а приведены отношения измеренного значения прочности образца после взрыва (σ_*) к первоначальному (σ_0) в зависимости от приведенного расстояния. Видно, что на приведенных расстояниях свыше 35 ÷ 40 м/кт^{1/3} прочность породы в образце на одноосное сжатие приближается к соответствующим значениям для ненарушенного массива.

Скорость распространения продольных волн в образцах горных пород. Как известно, для прочных горных пород этот параметр неплохо коррелирует с прочностью на одноосное сжатие, но более стабилен в пределах серии измерений. Поэтому можно ожидать, что изменения скорости продольных волн в материале будут существенными лишь в зонах смятия и неупругого деформирования материала.

На рис. 5,б показаны результаты измерения отношения скорости продольных волн в образце после взрыва (C_p) к соответствующему значению в ненарушенном массиве (C_0).

Пористость образцов горных пород. Начальная пористость гранитов и кварцевых порфиров Дегелена составляет $m_0 = 1,5 \div 3,5$ %. Необходимо отметить, что эта величина представляет собой отношение разницы между плотностями образца и его минеральной части к плотности образца, т. е. характеризует в основном так называемую «закрытую пористость» и напрямую не характеризует фильтрационные свойства породы. Об этом свидетельствуют и относительно низкие значения коэффициента водопоглощения образцов ($\beta = 0,2 \div 0,6$ %), которые примерно на порядок ниже значений m_0 .

Результаты измерения пористости образцов приведены на рис. 6. К сожалению, данных по изменению коэффициента водопоглощения в ближней зоне недостаточно для получения надежных расчетных зависимостей. Судя по имеющимся данным (см., например, таблицу), значение β в несколько раз ниже значения пористости.

Изменение проницаемости горной породы в результате взрыва. В целях получения более подробных данных о нарушении горной породы в зоне необратимого деформирования массива изучались образцы горной породы, отобранные в массиве на разных расстояниях от места проведения подземного взрыва в эксперименте Днепр-1.

Результаты фильтрационных испытаний образцов приведены на рис. 7. Проницаемость

собственно горной породы заметно изменяется вследствие мощного взрывного воздействия. По мере удаления от места взрыва проницаемость горной породы падает, и только начиная с относительных расстояний $40 \div 60 \text{ м/кт}^{1/3}$ ее фильтрационные характеристики совпадают с первоначальными.

Следует отметить, что соотношение между параметрами k_1 и k_2 горной породы соответствуют результатам исследований проницаемости пористых сред регулярной структуры (см. рис. 4), что, в свою очередь, указывает на преимущественно ламинарный режим фильтрации в поровом и микротрещинном пространствах горной породы.

Характеристика свойств массива. Если свойства собственно горной породы на приведенных расстояниях свыше $40 \text{ м/кт}^{1/3}$ остаются практически неизменными, то некоторые характеристики массива *in situ*, такие как скорость распространения продольных волн в массиве C_p и проницаемость массива, изменяются в результате воздействия взрыва на значительно больших расстояниях. Это происходит из-за раскрытия трещин и других межблоковых промежутков в результате относительного перемещения блоков горной породы за фронтом волны сжатия.

Степень трещиноватости массива. Во многих экспериментах проводились измерения плотности трещин на стенке выработки (среднее количество трещин на единицу длины) до и после взрыва. На рис. 8 приведены результаты таких измерений для четырех взрывов на площадке Дегелен Семипалатинского испытательного полигона и одного взрыва (*Днепр-1*) в массиве апатито-нефелиновой породы. Как видно, количество трещин в ближней зоне многократно превышает исходные значения, постепенно снижаясь по мере удаления от точки взрыва. Можно отметить значительный разброс результатов, возрастающий с увеличением приведенного расстояния. Это, очевидно, связано как с разной исходной трещиноватостью массивов (Дегелен и апатито-нефелиновый массив), так и с локальными неоднородностями внутри конкретного массива (исходная трещинная плотность на Дегелене меняется от $2 \div 6$ до $10 \div 30 \text{ м}^{-1}$ в каждой штольне).

Скорость распространения продольных волн в массиве. В некоторых опытах проводилось исследование свойств пород в условиях естественного залегания сейсмическими

методами. Сейсмопрофилирование вдоль стенки штольни, а в ряде случаев и сейсмопросвечивание как в вертикальном (штольня-поверхность), так и в горизонтальном (между выработками) направлении проводились до и после взрыва. Результаты, полученные в нескольких экспериментах, представлены на рис. 9 в виде зависимости от приведенного расстояния степени изменения скорости распространения продольных волн в массиве C в результате действия взрыва. Хорошо видно, что на расстояниях $35 \div 40 \text{ м/кт}^{1/3}$, где свойства материала и количество трещин приближаются к исходным значениям, свойства массива кардинально изменяются (значения C снижаются на $50 \div 70 \%$ по сравнению с начальным значением).

Таким образом, можно заключить, что если исключить из рассмотрения зону сверхвысоких интенсивностей воздействия (напряжения на фронте волны сжатия $\sigma_n > 300 \div 400 \text{ МПа}$), то изменение характеристик массива происходит, прежде всего, за счет движения блоков. То есть деформации локализуются на нарушениях сплошности, а процесс дробления играет второстепенную роль.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адушкин В. В., Спивак А. А. Геомеханика крупномасштабных взрывов. М.: Недра, 1993.
2. Adushkin V. V., Spivak A. A. Geologic characterization and mechanics of underground nuclear explosions // Defense Nuclear Agency, Alexandria, VA, 1994.
3. Proc. Symp. on Engineering with Nuclear Explosions, Las Vegas, Nev., Jan. 14–16, 1970. Springfield, VA, 1970.
4. Stability and Hydrology Issues Related to Underground Nuclear Testing in French Polynesia, V. II. Technical Analyses. Report of the Intern. Geomech. Commission (additor Ch.Fairhurst) 1995.
5. Гуцин В. В., Антоненко В. А., Розенталь А. К., Годунов А. С. Особенности выпуска руды из блока, подготовленного ядерным взрывом // Труды ГИГХС. М.: ГОСИНТИ. 1975. Вып. 36. С. 48–57.
6. Kocharyan G. G. Experimental investigations on the dynamic deformation of underground excavations in rock // Proc. of the 2nd North Amer. Rock Mech. Symp. NARMS'96, Balkema. Rotterdam, 1996. P. 1559–1566.
7. Механический эффект подземного взрыва / В. Н. Родионов, В. В. Адушкин, В. Н. Костюченко и др. М.: Недра, 1971.

8. Горбунова Э. М., Спивак А. А. Изменение режима подземных вод при воздействии подземного ядерного взрыва // Геоэкология. 1997. № 6. С. 29–37.
9. Спивак А. А. Афтершоки мощного подземного взрыва в неоднородной среде // Докл. АН. 1993. Т. 329, № 4. С. 435–437.
10. Adushkin V. V., Spivak A. A. Characterization of the aftershocks emission caused by underground nuclear explosions // J. Earthquake Prediction Res. 1996. V. 5. P. 443–469.
11. Спивак А. А. Дифференциальные движения блочных структур при внешних воздействиях // Геоэкология. 1999. № 1. С. 78–91.
12. Садовский М. А., Адушкин В. В., Спивак А. А. О размере зон необратимого деформирования при взрыве в блочной среде // Физика Земли. 1989. № 9. С. 9–15.
13. Ядерные испытания СССР. Т. 1: Цели, общие характеристики, организация ядерных испытаний. Саров: ВНИИЭФ, 1997.
14. Rodionov V. N., Spivak A. A., Tzvetkov V. M. Investigation of the filtration properties of a rock massif // Peaceful Nuclear Explosions-V. Vienna: IAEA, 1978. P. 45–54.
15. Спивак А. А. Поведение среды при подземном взрыве // Физ.-техн. проблемы разработки полезн. ископ. 1980. № 4. С. 48–55.
16. Спивак А. А. Оценка нарушенности горного массива по результатам фильтрационных испытаний // Горн. журн. 1980. № 5. С. 29–35.
17. Спивак А. А., Свинцов И. С. Устройство для определения проницаемости массива горных пород // Взрывное дело № 83/40: Методики измерения и аппаратура для исследования действия взрыва. М.: Недра, 1982. С. 71–88.
18. Duncan J. M., Witherspoon P. A., Mitchell J. K. Seepage and Groundwater Effects with Explosive Cratering. Berkley: Depart. Civil. Eng. Inst. Univ. of California, 1972.

Поступила в редакцию 23/1 2004 г.