

УДК 622.233.4

А. А. Игнатов

ГВУЗ «Национальный горный университет», Днепропетровск, Украина

## Забойные процессы при работе снаряда с эффектом механического разрушения

Рассмотрены особенности конструкции и принцип действия усовершенствованного снаряда для гидромеханического бурения. Проанализированы основные вопросы механики разрушения горных пород на забое скважины при использовании усовершенствованного снаряда.

Ключевые слова: струйный аппарат, гидромеханический способ бурения, шары, забой скважины, рейс, механизм разрушения.

### Введение

Эффективность любого из физических способов разрушения заключается в величине скорости приложения разрушающей нагрузки. Очевидно, что повышение производительности буровых работ может быть достигнуто и путем совершенствования других факторов, сопровождающих процессы разрушения пород при использовании физических способов [1 – 2].

Как известно, величина и скорость приложения нагрузок являются решающими аспектами в акте разрушения; они не могут быть произвольными; в рационально организованных процессах они должны быть увязаны со свойствами обрабатываемого материала. Как малые, так и большие внешние нагрузки могут быть вредными. В первом случае они могут быть недостаточными для преодоления сопротивления материала разрушению, во втором – оказаться больше допустимых. Для того чтобы правильно подбирать их величину, необходимо учитывать всю сумму факторов, участвующих в процессах разрушения в комплексном действии.

Наличие тесной связи между всеми отмеченными выше обстоятельствами, определяющими эффективность процессов разрушения пород, делает невозможным дальнейшее усовершенствование технологии бурения без достаточно полного и последовательного изучения всех явлений, происходящих на забое.

### Цель работы

Изучение отдельных аспектов процесса формирования периферийной части забоя усовершенствованным гидромеханическим (шароструйным) снарядом.

### Основной материал

Основные закономерности разрушения горной породы, а впоследствии и их технологические аспекты, характеризующие забойные процессы при работе кольца шароструйного снаряда с эффектом механического разрушения [3–4], возможно установить, изучая элементарный акт механизма разрушения одним шариком, в последовательности, рассмотренной в работе [5].

Первая стадия разрушения горной породы, происходящая в пределах упругих свойств, с достаточной степенью точности описывается теорией о распределении усилий и напряжений при сжатии соприкасающихся тел (задачи Буссинеска и Герца о действии сосредоточенной силы на упругую плоскость и о сжатии двух соприкасающихся тел по криволинейной поверхности соответственно) [6–9].

Теоретические закономерности, полученные Буссинеском и Герцем вполне приложимы к взаимодействию в паре «шарик – горная порода».

Вторая стадия разрушения горной породы наступает при нагрузке, достигающей временного сопротивления горной породы дезинтеграции в зоне объемных напряжений. Незначительное отличие предела упругости от временного сопротивления породы разрушению (для твердых горных пород), позволяет считать, что сжатие в зоне контакта наступает при нагрузках близких к пределу упругости каждой конкретной породы [6–7].

Величина нагрузки сминающей или разрушающей горную породу определится из условия

$$p = \sigma_e F, \quad (1)$$

где  $\sigma_g$  – расчетное разрушающее напряжение горной породы;  $F$  – площадь зоны соприкосновения шарика с горной породой в момент разрушения последней.

В качестве значений параметра  $\sigma_g$  могут быть без больших погрешностей взяты величины статической твердости горной породы  $\sigma_{60}$ , определенные методом Л. А. Шрейнера [7] с учетом коэффициента динамичности, то есть

$$\sigma_g = \frac{\sigma_{60}}{\beta}, \quad (2)$$

где  $\beta$  – коэффициент динамичности нагрузки, зависящий от характера ее приложения. Для условий работы породоразрушающего кольца с шариками величина  $\beta$  колеблется в пределах 2.

В данном случае важным обстоятельством является то, что значения  $\sigma_{60}$  были получены при вдавливании цилиндрического пуансона в образец породы, а, как известно характер и последовательность механизма деформации под пуансоном и сферой различны. Это в свою очередь накладывает определенный отпечаток на величины  $\sigma_{60}$ , заключающиеся в так называемом масштабном факторе. Иными словами, значения статической твердости, полученные для каждой конкретной величины площадки соприкосновения под цилиндрическим штампом будут несколько завышены для тех же величин площадок под сферическим штампом. Особое значение данное высказывание приобретает в случае работы модернизированного шароструйного снаряда вследствие наличия как статических, так и динамических нагрузок.

Площадь соприкосновения шарика с горной породой, в случае его правильной округлой формы, естественно будет близки к площади круга, диаметр которого, в наиболее общем случае, определяется формулами Герца. При достаточно большом различии в свойствах истирающих материалов и самой горной породы, что имеет место в случае шароструйного способа бурения, наиболее адекватна следующая формула Герца

$$d = 1,1443 \sqrt[3]{4Pr \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}, \quad (3)$$

где  $P$  – нагрузка на один породоразрушающий шарик;  $r$  – радиус шарика;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – коэффициенты Пуассона для материала шарика и горной породы соответственно;  $E_1$  и  $E_2$  – модули упругости материала породоразрушающего шарика и породы в массиве.

Приведенная формула (3) справедлива для определения площади соприкосновения шарика с плоскостью, в то время как практически забой скважины имеет в той или иной мере «волнистую» форму. Однако это обстоятельство не является препятствием для трактовки взаимоотношений в паре «шарик – горная порода», что доказано некоторыми теоретическими и экспериментальными исследованиями, которыми наглядно проиллюстрировано следующее обстоятельство – криволинейная поверхность тела может быть приравнена к плоскости при определении размеров площади соприкосновения, если радиус кривизны поверхности тела в семь раз и более превышает радиус шарика [8 – 9]. Многочисленные замеры «кривизны» забойной зоны скважины шароструйного способа бурения вполне ложатся в обозначение предельные размеры [10].

Третья стадия разрушения горной породы шариком, характеризующиеся отделением конуса скалывания наступает только после образования конуса смятия, при этом снова подчеркнем, что скалывание горной породы происходит под действием касательных усилий, возникающих вследствие развивающегося на поверхности конуса смятия давления.

Расчетная схема для определения нагрузки на шарик, обеспечивающей скалывание горной породы, может быть получена при рассмотрении выделенного на поверхности конуса смятия элементарного кубика (рис. 1).

Две грани этого кубика параллельные поверхности конуса смятия. Перпендикулярно этим граням по оси  $n_1 - n_1$  действуют нормальные сжимающие напряжения  $\sigma_1$ . По оси кубика  $n_2 - n_2$ , перпендикулярной плоскости сечения, действуют сжимающие напряжения  $\sigma_2$ . По оси кубика  $n_3 - n_3$ , параллельной поверхности конуса смятия, напряжения равны нулю, так как поверхность горной породы вокруг площадки соприкосновения не нагружена, и перемещение в этом направлении линии не стеснено.

Следовательно, зону вокруг конуса смятия вполне оправдано можно считать подверженной плоскому напряженному состоянию на глубину, соответствующую высоте конуса смятия. Касательные напряжения на гранях выделенного элементарного кубика отсутствуют, так как скольжение сжатой горной породы по поверхности конуса деформированной породы практически нет. Поэтому грани выделенного кубика можно считать главными [5].

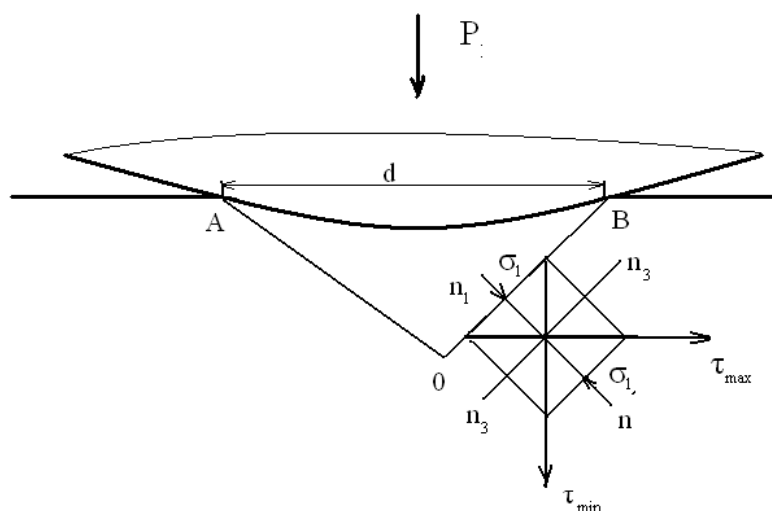


Рис. 1. Расчетная схема для определения нагрузки на шарик, обеспечивающей скалывание горной породы

Рассматривая плоское сечение зоны, прилегающей к плоскости соприкосновения шариков с горной породой несложно увидеть, что по оси  $n_1 - n_3$  действуют нормальные сжимающие напряжения  $\sigma_1$ , и, как результат последних – касательные напряжения  $\tau$ , величину которых в любой площади, направленной под углом  $\theta$  к главным площадкам можно отыскать как

$$\tau = \frac{\sigma_1}{2} \sin 2\theta \quad (4)$$

Данные рис. 1 и основные закономерности теоретической механики и сопротивления материалов позволяют утверждать следующее: наибольшими являются касательные напряжения под углом  $45^\circ$  к поверхности конуса смятия во взаимно перпендикулярных направлениях; причем наибольшее касательное напряжение  $\tau_{max}$  направлено к поверхности забоя, а наименьшее  $\tau_{min}$  уходит вглубь, что обусловлено направлением  $\sigma_1$ . Следовательно, скалывание произойдет в направлении наибольшего касательного напряжения  $\tau_{max}$ , при его достижении разрушающего значения.

Совершенно очевидно, что за меру сопротивления горной породы касательным напряжениям следует принимать сопротивление скалыванию  $\tau_{скал}$ . Исходя из этого, можно записать условие наступления третьей стадии разрушения

$$\tau_{max} \geq \tau_{скал} \quad (5)$$

иначе говоря, скалывание произойдет тогда, когда  $\tau_{скал}$  превысит сопротивление горной породы в том месте, где оно минимально.

Довольно многочисленные экспериментальные исследования характера скалывания горной породы вокруг площадки соприкосновения и величина углов наклона образующих конусов смятия и скалывания к основанию вполне подтверждают сказанное [5–9]. Различные местные ослабления горной породы также приводят к частичным выколам. Некоторое сжатие горной породы непосредственно шариком, прилегающим к точкам  $A$  и  $B$  (рис. 1) ведет к увеличению сопротивления горной породы скалыванию в данной области, а кроме того в вершине конуса смятия происходит концентрация напряжения. Это подтверждается тем, что вершина конуса скалывания приближается к вершине конуса смятия, причем площадь зоны скалывания естественно увеличивается. Величина нагрузки, обеспечивающей скалывание горной породы, может быть найдена из соотношения нормальных и касательных напряжений, имеющих место на поверхности конуса смятия, при этом необходимо условно принять, что напряжения  $\sigma_1$  равны по абсолютной величине удельному давлению на основании конуса смятия, т. е.

$$\sigma_1 = \sigma_K = \frac{P_2}{F} \quad (6)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_K$  – нормальные напряжения на поверхности конуса смятия и его основании в момент скалывания соответственно;  $P_2$  – нагрузка на шарик в момент скалывания;  $F$  – площадь основания конуса, соответствующая площади соприкосновения шарика с горной породой в момент смятия.

Перепишав последнее уравнение в другом виде, мы можем получить выражение для определения скалывающей нагрузки.

$$P_2 = \sigma_1 F = 2\tau_{\text{скал}} F \quad (7)$$

## Выводы

1. Выбор в качестве органа формирования периферийной зоны забоя породоразрушающего кольца является оправданным, как с точки зрения механизма разрушения, так и эффективности работы проектируемого шароструйного снаряда.
2. Сама технологическая схема работы породоразрушающего кольца позволяет в широком диапазоне регулировать выходные характеристики процесса взаимодействия в паре «шарик – горная порода».

## Библиографический список

1. Разведочное бурение / [А. Г. Калинин, О. В. Ошкордин, В. М. Питерский и др.]. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 748 с.
2. Новые способы бурения скважин: Обзорн. информ. – Техн. и технол. геол.-развед. работ, орг. пр-ва / В.И. Максимов, А.М. Цехмистренко, М.М. Розин и др. // ВНИИ эконом. минер. сырья и геологоразвед. работ: ВИЭМС. – М., 1971. – 55 с.
3. Игнатов А. А. Особенности конструкции и механики работы нового гидродинамического снаряда / А. А. Игнатов, С. С. Вяткин // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент-техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – 2011. – Вып. 14. – С. 58 – 61.
4. Кулькоструминный прилад: Патент 67845 Україна, МПК Е 21 В 7/18. / А. О. Ігнатов, С. С. Вяткин. - № u201108906; Заявл. 15.07.2011; Опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5.
5. Саламатов М.А. Механизм разрушения горных пород дробью и его теоретические основы / М.А. Саламатов // Тр. Свердловского горного ин-та. Матер. по геологии и разведке полезных ископаемых Урала. – 1960. – Вып. № XXXVII. – С. 213 – 224.
6. Эпштейн Е.Ф. Теория бурения – резания горных пород твердыми сплавами / Е.Ф. Эпштейн. – М. – Л.: ГОНТИ, 1939. – 179 с.
7. Шрейнер Л.А. Физические основы механики горных пород / Л.А. Шрейнер. – М. – Л.: Гостоптехиздат, 1950. – 212 с.
8. Кацауров И.Н. Механика горных пород / И.Н. Кацауров. – М.: Недра, 1981. – 166 с.
9. Остроушко И. А. Бурение твердых горных пород / И. А. Остроушко. – М.: Недра, 1966. – 291 с.
10. Уваков А. Б. Шароструйное бурение / А. Б. Уваков. – М.: Недра, 1969. – 207 с.

Надійшла до редакції 14.12.2012

О. О. Ігнатов

*ДВНЗ «Національний гірничий університет», Дніпропетровськ, Україна*

### Вибірні процеси під час роботи снаряду з ефектом механічного руйнування

Розглянуті особливості конструкції і принцип дії вдосконаленого приладу для гідромеханічного буріння. Проаналізовані основні питання механіки руйнування гірських порід на забой свердловини при використанні вдосконаленого приладу.

Ключові слова: струминний апарат, гідромеханічний спосіб буріння, кульки, забій свердловини, рейс, механізм руйнування.

A. Ignatov

*National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine*

### Downhole Processes When Working with a Tool with Mechanical Destruction Effect

The paper considers the design and operation of an improved device for hydraulic mechanical drilling. We analyze basic principles of the mechanics of rock destruction when using the improved device.

Key words: jet apparatus, hydromechanical method of drilling, balls, well face of a bore hole, trip, mechanism of destruction.