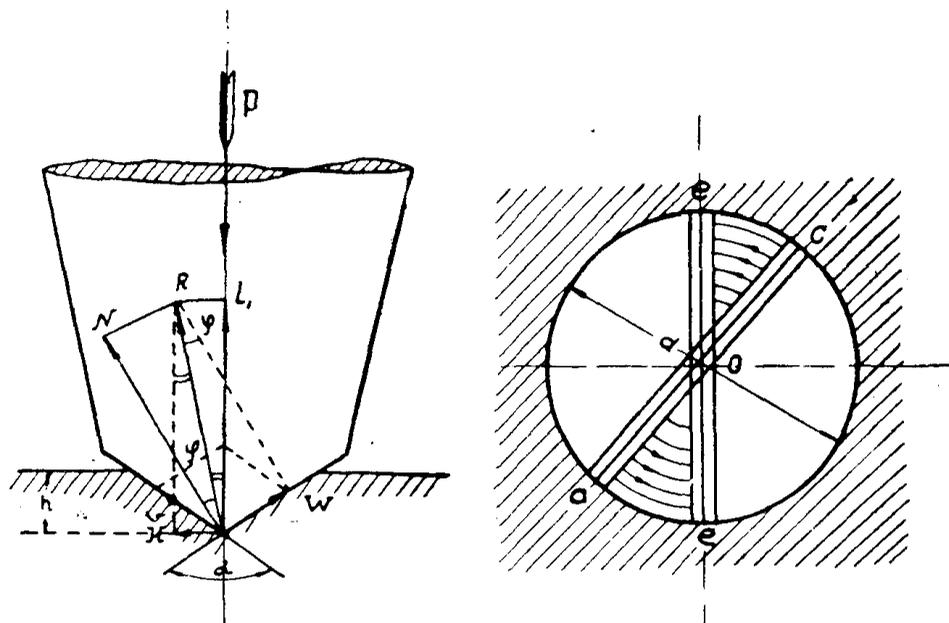


Для объяснения механизма разрушения горной породы при ударно-вращательном бурении наиболее часто пользуются теорией, данной Н. С. Успенским [12]; [13]. Согласно этой теории, долото бура в форме симметричного клина, фиг. 1, под действием силы P внедряется в породу, раздвигая и раздавливая ее частицы. Внедрение инструмента происходит до тех пор, пока вся живая сила долота не будет поглощена этой работой разрушения породы и преодоления попутных вредных сопротивлений" [13]. Разрушение горной породы при ударном внедрении долота Н. С. Успенский делит на



Фиг. 1

два периода: „за первый удар долото внедряется в породу, преодолевая сопротивление раздавливанию. После поворота на некоторый угол долото вновь внедряется, при этом оно уже действует как клин, скалывая часть породы в сторону углубления от предыдущего удара“ [13], фиг. 1.

Считая, что для внедрения долота в забой необходимо условие

$$\frac{P}{F} > \sigma_{сж},$$

где P — действующее усилие, кг;

F — площадь контакта, см²;

$\sigma_{сж}$ — сопротивление породы раздавливанию, кг/см². Н. С. Успенский на основе математического анализа сил, действующих при внедрении, фиг. 1, определяет глубину внедрения бура за один удар

$$h = \frac{P}{2d\sigma_{сж}} \cdot \frac{\cos \frac{\alpha}{2} \cos \varphi}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} + \varphi \right)}, \quad (1)$$

где h — глубина внедрения, см,

d — диаметр шпура (скважины), см,

α — угол приострения лезвия бура, град.

φ — угол трения бура о породу, град.

Из формулы (1) следует, что глубина внедрения бура за один удар пропорциональна силе удара P , обратно пропорциональна диаметру шпура, сопротивлению породы и возрастает с уменьшением угла приострения α .

Принимая, что сила P в момент удара изменяется от P до нуля, работа, затраченная на внедрение

$$A_{вн} = \frac{P \cdot h}{2} = \frac{P^2 \cos \frac{\alpha}{2} \cos \varphi}{4d \cdot \sin \left(\frac{\alpha}{2} + \varphi \right) \cdot \sigma_{ск}} \quad (2)$$

Под действием распорного усилия H происходит скалывание секторов породы aoc и dob , заключенных между углублениями от ударов, фиг. 1б. При этом Н. С. Успенский считал, что скалывание породы будет происходить только за задней гранью лезвия бура, в то время как на противоположной стороне его вторая сила H будет уничтожаться сопротивлением породы в ее сплошной массе.

Из чертежа фиг. 1 вытекает

$$H = \frac{P}{2} \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} + \varphi \right). \quad (3)$$

Таким образом скалывающее усилие H пропорционально силе удара P и возрастает с уменьшением угла α .

Исходя из скалывающего усилия H и сопротивления породы скалыванию — $\sigma_{ск}$, Н. С. Успенский обосновывает число ударов на один оборот бура

$$n = \pi \cdot d \left(\frac{d}{2} + 2h \right) \frac{\sigma_{ск}}{H}. \quad (4)$$

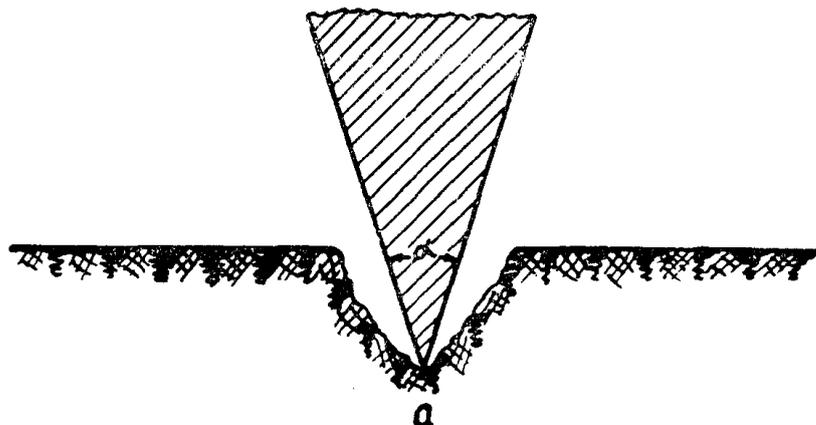
Несмотря на эти математические выводы, Н. С. Успенский указывает, что величину угла поворота чаще определяют опытным путем, а угол приострения лезвия бура α не берут менее 70° . С возрастанием твердости породы угол α увеличивают до $110-120^\circ$. Последнее объясняется созданием необходимой прочности лезвия долота.

Необходимо отметить, что в то время, когда Н. С. Успенским были сформулированы эти положения (1907—1908 гг.), ударным способом бурились шпуры и скважины не только в породах средней и высокой твердости, но и в породах невысокой крепости, обладающих значительными пластическими свойствами. Скорости вращения бура при бурении шпуров и скважин были настолько незначительны, что усилиями от их вращения можно было пренебречь. Поэтому-то картина механизма разрушения горных пород при ударном бурении, данная Н. С. Успенским, носила общий характер, не конкретизировалась для того или иного способа ударного бурения, а также той или иной категории крепости горной породы.

В результате дальнейших усовершенствований и исследований изменялись машины, а также и способы бурения. Вращательное бурение, как более производительное, полностью вытеснило ударное при бурении в породах малой и частично средней крепости. В настоящее время ударное бурение шпуров применяется для пород средней и высокой крепости. Значительно повысилась быстроходность ударных машин. Число ударов в современных перфораторах достигает 2000÷2200 ударов в минуту, а число оборотов бура 200÷300 в минуту. Таким образом, практика бурения и конструирования горных машин поставила перед горной наукой вопрос о более глубоком исследовании механизма разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении.

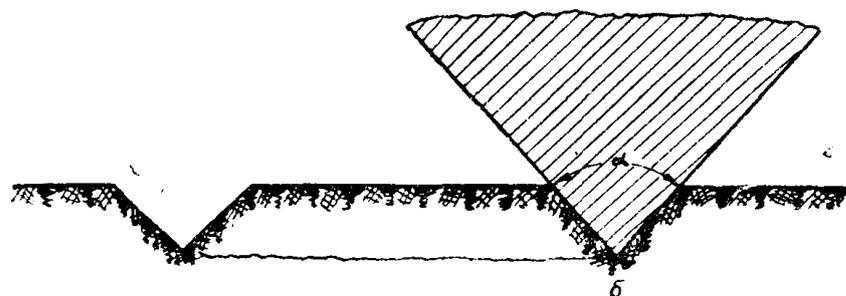
Поэтому понятен тот большой интерес, который вызван появлением в последние годы ряда работ [7; 8; 9; 10; 14 и др.], посвященных механизму разрушения горных пород и теории ударного бурения.

А. И. Медведко [7] считает, что внедрение бура в горную породу обуславливается, главным образом, за счет уплотнения пустот, имеющих в горной породе в виде пор и естественных трещин. При этом может происходить частичное выкалывание частиц горной породы по граням лезвия, фиг. 2. Случай внедрения с местным выкалыванием является случаем нежелательным, так как при этом, вследствие отсутствия расклинивающего дей-



Фиг. 2

ствия, не будет полностью использован эффект поворота бура, рассчитываемый на полное скалывание сектора породы, образованного между двумя ударами. Поэтому, с точки зрения эффективности бурения, по мнению А. И. Медведко [7], целесообразно выбирать угол приострения бура из условия обеспечения самозаклинивания выкалываемых при внедрении частиц, а угол поворота из условия полного скалывания всей призмы породы, расположенной между двумя углублениями по горизонтальной плоскости (фиг. 3). Пользуясь основными положениями теории упругости, А. И. Медведко находит



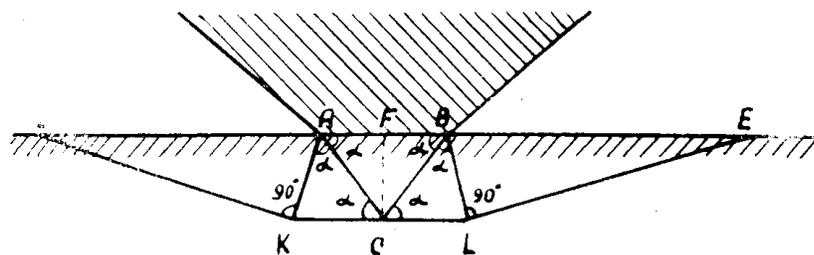
Фиг. 3

для описанного механизма разрушения зависимости между осевым давлением, временным сопротивлением породы сжатию, зоной разрушения и углом приострения бура. На основании этих зависимостей определяется угол поворота бура.

По мнению И. С. Покровского [9], теория разрушения горных пород при ударном бурении, данная Н. С. Успенским, не объясняет характера разрушения твердых горных пород. Основные предпосылки при этом у И. С. Покровского следующие: „Бур как твердое тело может „входить“ в жидкое тело, „вытесняя“ часть жидкости, может „внедряться“ в пластичное тело, как глина, воск и пр. и вытеснить часть его без разрыва сплошности,

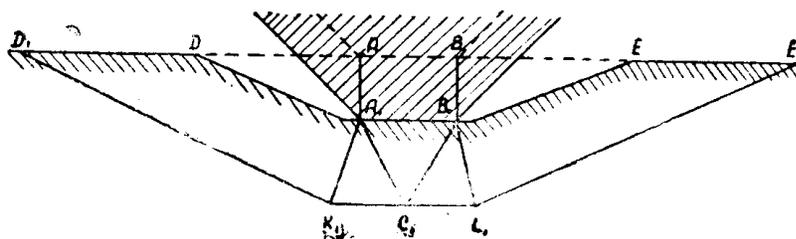
но бур не может „входить“ или „внедряться“ в твердую породу и вытеснить часть ее без разрыва ее сплошности. При ударе о твердую породу бур должен разрушить ее сплошность и только таким образом может сделать углубление в породу. Вторая стадия—скалывание породы при следующем ударе бура может осуществиться только при условии, если бур „внедрится“ в твердую породу, как в пластическую массу, и форма разрушения ее будет точным отпечатком лезвия бура, так как только при этом условии боковые плоскости лезвия бура будут давить на боковые стенки породы. В твердых породах такой процесс разрушения невозможен, так как лезвие бура не оставит точного отпечатка в породу без разрушения ее сплошности и его боковые плоскости не будут производить бокового давления на породу.“

С точки зрения И. С. Покровского, лезвие бура всегда имеет некоторую площадку притупления. При ударе бура о породу, фиг. 4, площадка породы AB , равная площадке лезвия бура, воспринимает давление, которое будет производить сжатие породы. В результате в породу образуется призма ABC максимальных сжатий по всей длине лезвия бура, которая выколется и будет действовать на остальную породу, как клин. Боковые плоскости



Фиг. 4

этого клина AC и BC после потери сплошности по ним, в свою очередь, будут давить на окружающую породу, причем произойдет выкалывание призм ACK и BCL и, наконец, откалывание породы по плоскости DK и LE . Таким образом, предполагается, что при разрушении пород вдавливанием получают сдвиги ее частей под некоторым углом α одна к другой. Значение этого угла для той или иной породы постоянно. Исходя из суммы



Фиг. 5

плоскостей скалывания призм ABC , ACK , KDA , BCL и BLE и сопротивления породы сдвигу— $\sigma_{ср}$, И. С. Покровский определяет суммарное сопротивление горной породы внедрению и необходимую „силу удара“— P

$$P = P_1 + P_2 + P_3,$$

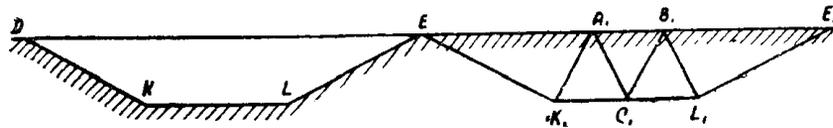
где P_1 , P_2 , P_3 — силы, необходимые для скалывания призм по граням скольжения. „Если сила удара окажется больше сопротивления породы“ [9], то лезвие, разрушив объем породы $DKLE$, перейдет на площадку KL , фиг. 5, и может произвести дальнейшее разрушение. Для более целесообразного

использования энергии удара И. С. Покровский считает необходимым поворачивать бур между ударами так, чтобы обеспечить двустороннее скалывание, фиг. 6.

Н. Е. Черкасов, К. Б. Шляпин [10] и А. И. Остроушко [8], развивая и уточняя основные положения, высказанные И. С. Покровским, считают некоторые выводы спорными и ошибочными.

По нашему мнению, большинство авторов [7, 9, 10] при рассмотрении механизма разрушения, в свою очередь, допускают ряд ошибок и неточностей:

а) Внедрение бура в горную породу и механизм разрушения последней рассматривают оторванно от условий, созданных предыдущими ударами, нарушившими уже целостность поверхности забоя шпура многочисленными



Фиг. 6

трещинами, которые значительно снижают сопротивляемость породы внедрению.

б) При рассмотрении взаимодействия коронки с породой силу, действующую на забой, принимают величиной постоянной, не зависящей от процесса взаимодействия двух тел. При этом не учитываются ни значительная скорость деформации, ни проявляющиеся при этом характерные механические свойства соударяемых тел. Расчетные формулы для определения сопротивления горных пород внедрению выражают через усилие в кг и сопротивление горной породы одноосному сжатию и срезу в кг/см². Так как при этом не приводятся способы определения энергии удара, необходимой для создания данного усилия, а величина сопротивления горных пород при сложных деформациях значительно отличается от сопротивления простым одноосным деформациям, то полученными на основании вышеизложенных теорий формулами очень трудно воспользоваться в практике для определения необходимой энергии единичного удара и угла поворота бура между ударами.

в) При рассмотрении механизма разрушения совершенно не учитывается энергия вращающегося бура, которая при очень кратковременной остановке бура, вызванной внедрением коронки, может создать дополнительные усилия.

В настоящее время нет единого мнения о выборе угла поворота бура между ударами. В противоположность И. С. Покровскому, Н. Е. Черкасов и К. Б. Шляпин считают более целесообразным угол поворота выбирать из условия одностороннего скалывания за задней гранью лезвия, так как при этом на скалывание, якобы, затрачивается меньше усилия и основная часть энергии идет на дальнейшее внедрение бура.

Отсутствие единой точки зрения на механизм разрушения горных пород при ударном бурении в значительной мере объясняется большим разнообразием горных пород, форм инструмента и способов создания усилия, необходимого для внедрения. Однако такое положение чрезвычайно затрудняет конструирование и совершенствование бурильных машин, определение наиболее целесообразных режимов бурения. С другой стороны, мы считаем, что вопросы теории ударного бурения могут быть в настоящее время значительно уточнены на основе работ русских и советских ученых по физике твердого тела, сопротивлению материалов и исследований механических свойств горных пород. Для этого в первую очередь необходимо:

1. Конкретизировать условия применения ударно-вращательного бурения

2. Выявить характер основных деформаций при ударно-вращательном бурении и основные механические свойства горных пород, проявляющиеся при этом.

3. Определить соотношения между энергией, затрачиваемой на ударно-вращательное бурение, и размером произведенной деформации.

Применение ударно-вращательного бурения

Под ударно-вращательным бурением понимают изготовление в горных породах цилиндрических отверстий—шпуров или скважин, при этом разрушение горной породы осуществляется инструментом в форме клина, внедряемым в поверхность забоя за счет энергии удара. В промежутке между двумя ударами инструмент поворачивается на некоторый угол. Вращение бура может быть непрерывным и прерывистым.

К ударно-вращательному бурению в настоящее время относят:

1. Бурение шпуров и скважин 30—80 мм бурильными молотками (перфораторами) в горных породах средней и высокой крепости, I—VIII класса, по единой классификации горных пород по буримости (кварциты, базальты, диабазы, граниты и т. п.) [11]. В этом случае энергия от бурильного молотка к инструменту передается через стальной стержень—штангу, диаметром 25—32 мм и длиной, в зависимости от глубины шпура, от 0,4 до 2,5—3 м при обычном бурении и до 35 м при бурении глубоких скважин [1].

Бурильные молотки обеспечивают число ударов от 1000 до 2500 при энергии одного удара 3—10 кг/м, и число оборотов бура от 100 до 300 в минуту.

2. Ударно-канатное бурение глубоких скважин. Сущность ударно-канатного бурения состоит в том, что буровой инструмент—долото вместе с буровым снарядом весом 500—1000 кг и более падает с определенной высоты на забой скважины, наносит удар по породе и раздробляет ее. Подъем бурового снаряда осуществляется при помощи каната. Число ударов 58—60 в минуту. Между двумя ударами снаряд поворачивается на некоторый угол.

Ударно-канатным способом бурятся скважины диаметром 150—250 мм в породах высокой и средней крепости с I по XI класс по единой классификации по буримости [3].

3. В разведочном деле для бурения скважин незначительной глубины в породах с невысокой твердостью применяют иногда ручное ударно-вращательное бурение [4]. Свое название последнее получило от применяемого для этой цели комплекта инструментов—„бурового комплекта“, обеспечивающего ведение как вращательного, так и ударного бурения породы.

Из перечисленного видно, что под ударно-вращательным бурением понимают несколько различных способов бурения, которые, несмотря на общий характер—внедрение инструмента в горную породу под действием удара, обладают рядом специфических особенностей. Эти особенности, несомненно, оказывают свое влияние и на механизм разрушения. В дальнейшем мы рассматриваем механизм разрушения только при ударно-вращательном бурении пород средней и высокой крепости бурильными молотками, хотя некоторые выводы могут быть распространены и на другие способы ударного бурения.

Механические свойства горных пород

Горные породы высокой крепости по минералогическому составу—структуре и текстуре, механическим характеристикам очень разнообразны и являются, как правило, анизотропными твердыми телами. Общими механическими свойствами большинства горных пород высокой крепости являются большая плотность (малая пористость) и значительная сопротивляемость

внедрению. Большинство горных пород и породообразующих минералов при испытаниях на простые виды деформации (сжатие, растяжение, изгиб) при „статическом“ приложении нагрузки деформируются в основном упруго, вплоть до хрупкого разрушения. Однако связь между напряжением и деформацией при этом носит более сложный характер, чем по закону Гука. При динамическом приложении внешних сил, как показывают некоторые экспериментальные данные, линейный закон Гука соблюдается для многих горных пород [15].

Наибольшее сопротивление горные породы оказывают внедрению и сжатию. При растяжении, сдвиге и изгибе прочность горных пород в 10—20 раз меньше, чем при сжатии. Значительная сопротивляемость горных пород внедрению, которое в 10—18 раз превышает сопротивление простому сжатию, объясняется объемно напряженным состоянием горной породы в месте контакта с инструментом.

Как показывает ряд исследований [15], при всестороннем сжатии прочность горных пород увеличивается. При высоком всестороннем сжатии—до 4000—10000 атм некоторые горные породы (мрамор, известняки) проявляют пластические свойства. Однако прочность горных пород в результате пластической деформации не только не увеличивается, а, наоборот, уменьшается. Механические характеристики горных пород при динамических нагрузках изучены пока еще очень слабо.

Хрупкое разрушение большинства горных пород при статической нагрузке, отсутствие упрочнения при пластических деформациях, которые могут возникнуть при сложном объемно-напряженном состоянии, дают основание предполагать, что прочность большинства горных пород средней и высокой крепости при значительных скоростях деформации (ударе) незначительно отличается от прочности при деформации статическими нагрузками.

Некоторые авторы считают [7], что так как скорость распространения деформаций является величиной конечной, то при уменьшении времени действия нагрузки (ударе) деформация, в том числе и разрушение, при ударном бурении распространяется на сравнительно небольшой объем, который уменьшается с увеличением скорости ударяемого тела. Как характерный пример, приводят наблюдаемое явление, когда пуля при выстреле из ружья пробивает в стекле лишь небольшое отверстие, та же пуля, брошенная рукой человека с гораздо меньшей скоростью, может разрушить все стекло. Этим объясняют незначительный коэффициент полезного действия ударно-вращательного бурения и ставится под сомнение целесообразность увеличения быстроходности бурильных машин ударного действия.

Однако эти выводы вряд ли правильны так, как при ударном бурении разрушению подвергается относительно небольшой объем горной породы, находящийся в непосредственном контакте с лезвием бура, поэтому увеличение скорости деформации при ударе по сравнению со статическим внедрением инструмента, едва ли вызывает уменьшение разрушаемого объема, а наоборот, может только уменьшить потери на упругую деформацию остальной части горной породы.

Таким образом:

- 1) Основной деформацией при ударном бурении является внедрение инструмента в горную породу с поверхности забоя шпура.
- 2) Сопротивление горной породы внедрению является наибольшим по сравнению с сопротивлением другими видами деформаций.
- 3) Хрупкое разрушение большинства горных пород даже при незначительных скоростях деформации, значительная скорость деформирования при ударе, относительно небольшой объем разрушаемой породы за один удар при ударном бурении указывают на то, что скорость соударения инструмента и горной породы при ударном бурении не должна оказывать значительного влияния на прочность горной породы и скорость бурения.

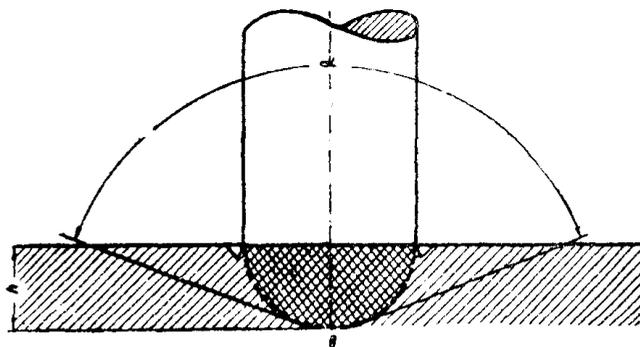
4) Упругая деформация большинства горных пород средней и высокой крепости вплоть до разрушения, небольшое отклонение от закона Гука при динамических нагрузках позволяют использовать некоторые выводы теории упругости [2; 5] для выявления общих закономерностей деформации горной породы при ударно-вращательном бурении. Конечно, таким образом можно выявить только качественные закономерности, характерные для горной породы как для твердого тела. Выявить количественные взаимосвязи ввиду большого разнообразия горных пород, их неоднородности и анизотропности возможно лишь на основе специальных экспериментов.

Применение положений теории упругости к рассмотрению механизма разрушения при внедрении

О распределении напряжений и предельном состоянии при ударном вдавливании одного упругого тела в поверхность другого дает ответ теория, разработанная Герцем, А. Н. Динником и Н. М. Беляевым [5; 2]. При этом допускается, что „упругое состояние тел вблизи поверхности удара во все время удара весьма близко к тому состоянию равновесия, которое возникло бы в обоих телах при медленном сжатии их“ [5].

Согласно этой теории наиболее вероятным с точки зрения начала разрушения при вдавливании являются: на поверхности давления ее контур, а в объеме тела точка, расположенная по оси симметрии на некотором расстоянии от поверхности давления $Z = (0,5-1,0)a$, где a —половина ширины полосы соприкосновения поверхностей. Максимальные касательные напряжения по оси симметрии, в зависимости от формы соприкасающихся поверхностей, в 1,5—2 раза превышают максимальные касательные напряжения на поверхности. Эти выводы были подтверждены многочисленными экспериментами, практикой машиностроения и строительного дела.

На основе этих положений Л. А. Шрейнер так описывает механизм разрушения упруго-хрупкого тела при вдавливании в его поверхность цилиндра с плоским основанием [15], фиг. 7.



Фиг. 7

В начале вдавливания давление по контуру выше, чем на остальной поверхности соприкосновения, поэтому касательные напряжения, возникшие в глубине тела по контуру давления, достигают предельных значений раньше, чем на оси симметрии. Это приводит у хрупких тел к скалыванию по контуру давления, в результате чего образуется клинообразное углубление, а у пластичных начинается пластическая деформация. Считают, что момент скалывания или начало пластического течения по контуру не сказывается на общем ходе деформации в объеме тела под основанием цилиндра. Начиная с этого момента, давление на плоскости контакта для хрупких тел скачком, а для пластичных постоянно делается равномерно распределенным. Равномерного давления можно достигнуть и с самого начала вдавливания,

если плоскости основания цилиндра придать некоторую кривизну. „Объем тела, ограниченный на поверхности основанием цилиндра, а в глубине тела — полусферой, большим кругом которого является основание цилиндра, находится в условиях более сильного всестороннего сжатия. Поэтому, когда на полюсе полусферы в точке „в“, фиг. 7, касательные напряжения достигнут предельного значения в плоскостях, расположенных под углом 45° к оси симметрии, они не могут превзойти сопротивления сдвигу тела по этим плоскостям до поверхности тела, так как эти плоскости проходят через область очень сильного всестороннего сжатия, где сопротивление тела сдвигу значительно выше, чем в точке „в“. С дальнейшим увеличением нагрузки касательные напряжения достигают предельных значений и в других плоскостях, расположенных к оси симметрии под углами больше 45° , пока по некоторой конической поверхности не выйдут на поверхность вне плоскости контакта. В этот момент напряженное состояние всестороннего сжатия переходит в одноосное сжатие, весь объем тела, ограниченный конической поверхностью, разрушается, причем его центральная часть превращается в тонкий порошок» [15].

В горных породах, вследствие анизотропии, образование плоскостей сдвига не может идти по всем направлениям одинаково и разрушение должно происходить по плоскостям с минимальным сопротивлением сдвигу. При разрушении горных пород инструментами различной формы, с различными углами заострения процесс разрушения является более сложным и своеобразным, однако есть все основания предполагать, что общий характер напряженного состояния и разрушения будет подобен тому, что и при вдавливании цилиндра.

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы:

1. Так как теория Н. С. Успенского предполагает внедрение лезвия долота только за счет смятия без хрупкого разрушения горной породы, а затем скалывание части породы только за счет расклинивающего действия клина — бура, то она применима для объяснения процесса внедрения и механизма разрушения только при бурении горных пород, обладающих значительной пластичностью и пористостью (мягких и вязких).

2. А. И. Медведко, рассматривая процесс внедрения инструмента только за счет пористости и трещиноватости, основывается в своих выводах в основном на картине разрушения, данной Н. С. Успенским. Поэтому работы А. И. Медведко являются дальнейшим развитием теории Успенского для пород небольшой крепости с большой трещиноватостью и пористостью. Несомненно, пористость и трещиноватость оказывают влияние на процесс внедрения бура в породы средней и высокой крепости, но не основное.

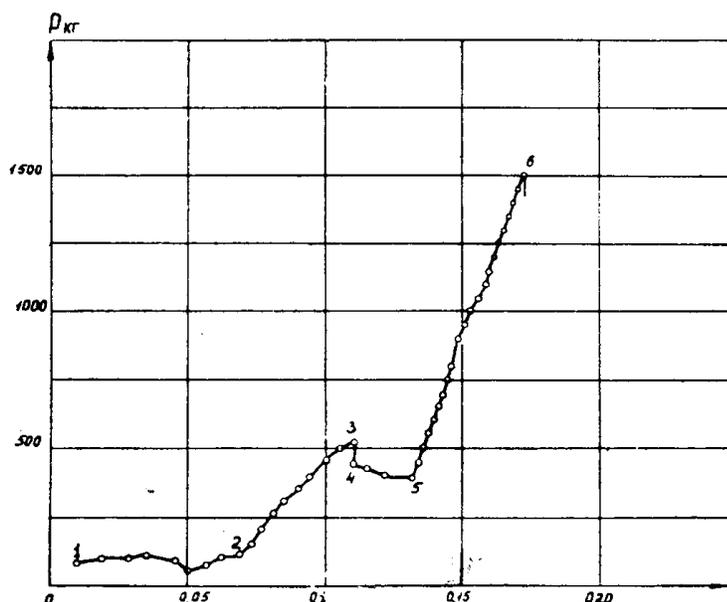
3. Работы И. С. Покровского [9], И. Е. Черкасова, К. Б. Шляпина [14], И. А. Остроушко [8] дают более правильную картину процесса разрушения при ударном бурении горных пород средней и высокой крепости. Последняя может быть уточнена на основании изложенных выше соображений и специальных экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования

Для проверки основных положений существующих теорий о механизме разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении и высказанных нами соображений был проведен ряд экспериментов. Эксперименты по ударному внедрению буровой коронки в горную породу и определению влияния скорости деформирования, на процесс разрушения проводились на построенном для этой цели копре. Значительная высота копра (18 м) обеспечивала получение различной энергии удара как по величине, так и по соотношению массы и скорости. „Статическое“ внедрение буровой коронки в горную породу производилось на прессе Гагарина, при этом снималась

диаграмма деформация—усилие. Влияние скорости вращения бура, а также влияние угла поворота бура между ударами на механизм разрушения горной породы и скорость ударно-вращательного бурения исследовались на стенде для испытания электропневматических бурильных молотков в лаборатории Томского политехнического института. Бурение проводилось по мрамору, граниту и диабазу. В качестве инструмента применялись буры со съёмными однодолотчатыми коронками, армированными пластинами твёрдого сплава ВК—15, диаметром 40—45 мм.

Как видно из диаграммы фиг. 8, при „статическом“ вдавливании коронки в мрамор вначале внедрение происходит при почти постоянной нагрузке (участок 1—2); в это время происходит уплотнение и вытеснение из-под лезвия коронки полуразрушенной с поверхности горной породы. На участке 2—3 происходит дальнейшее уплотнение поверхности горной породы и упругая деформация, в результате которой в точке 3 происходит скачкооб-

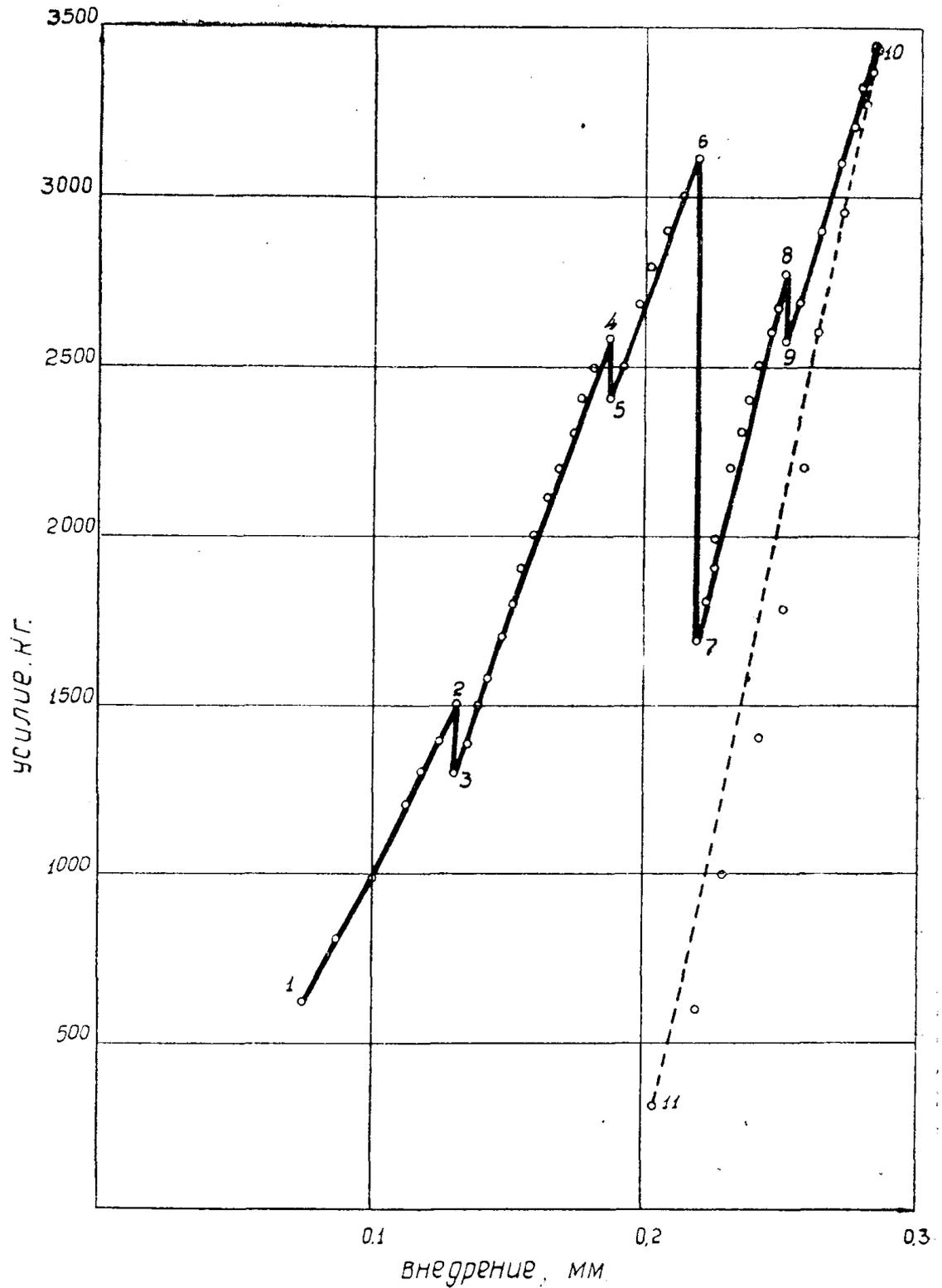


Фиг. 8

разное разрушение горной породы под лезвием бура. При этом на образце наблюдается выкалывание породы, симметричное лезвию буровой коронки, а на показателе нагрузки—резкое снижение давления (участок 3—4). На участке 4—5 вновь происходит вытеснение и уплотнение разрушенной под лезвием породы, а затем вновь упругая деформация (участок 5—6) вплоть до нового скола или раскалывания образца. Участки вытеснения и уплотнения разрушенной породы были тем меньше, чем меньше был угол заточки лезвия буровой коронки.

При вдавливании коронки в диабаз, фиг. 9, упругая деформация породы под лезвием коронки и хрупкое выкалывание происходило более наглядно, чем при разрушении мрамора. Выкалывание в этом случае сопровождалось резким звуком и отскоком из-под коронки разрушенных частиц породы. Вследствие того, что разрушенная порода быстро удалялась из-под лезвия, на диаграмме, фиг. 9, уже не наблюдается участка, связанного с уплотнением разрушенной породы, что было характерно при разрушении мрамора, а сразу после каждого разрушения (участки 2—3, 4—5; 6—7, 8—9) следует вновь упругая деформация (участки 3—4, 5—6, 7—8, 9—10), которая приводит к новому разрушению. Величина скачкообразного внедрения, как правило, была тем больше, чем больше была плоскость предыдущего контакта лезвия коронки с горной породой. Кривая разгрузки 6—7 показы-

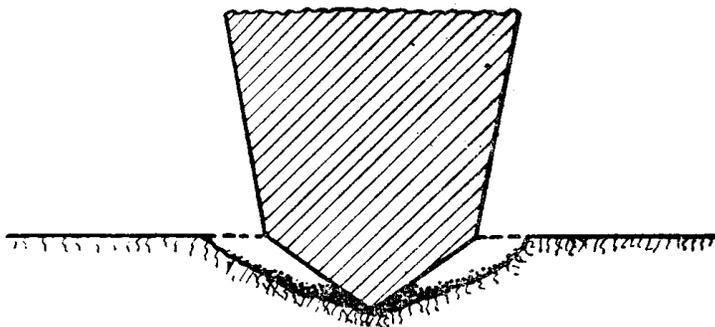
вает, что деформация горной породы, предшествующая выкалыванию, являлась в основном упругой с некоторой остаточной деформацией. Аналогичная зависимость была получена при внедрении лезвия коронки в гранит.



Фиг. 9

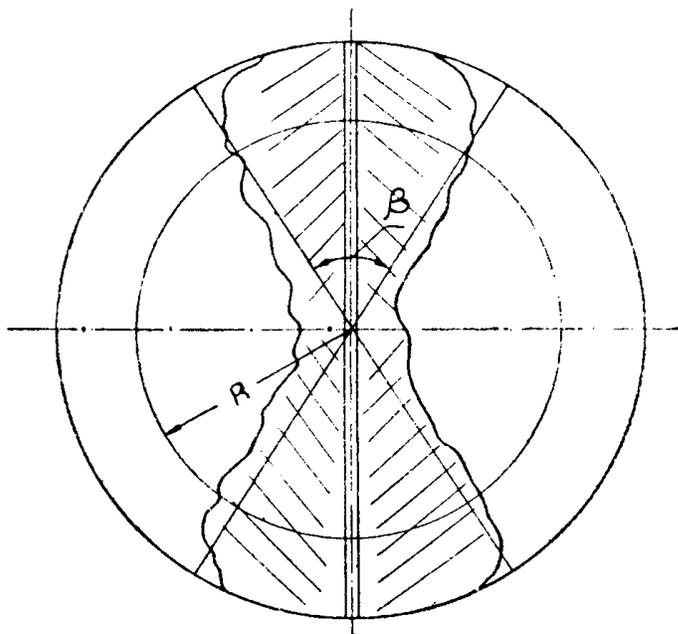
Таким образом, результаты опытов показывают, что разрушение горных пород средней и высокой крепости при статическом внедрении инструмента

происходит в основном вследствие упругой деформации скачкообразно. Характер самого разрушения и последующего удаления разрушенной породы из-под лезвия бура зависит от свойств горной породы и угла приострения лезвия бура.



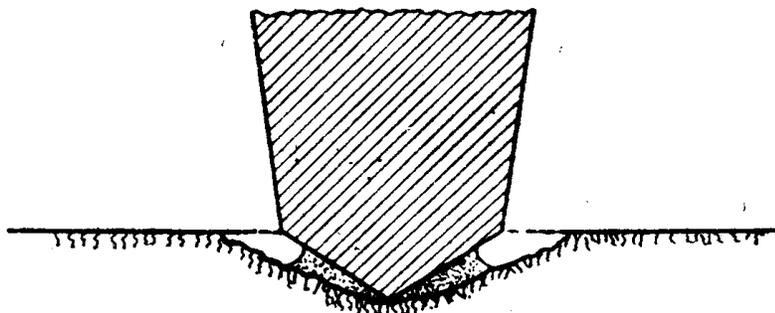
Фиг. 10

Разрушение при ударном внедрении симметричной коронки, так же как и при статическом внедрении, имеет вид симметричного скола с поверхности шпура относительно лезвия коронки и раздавливания части породы, находя-



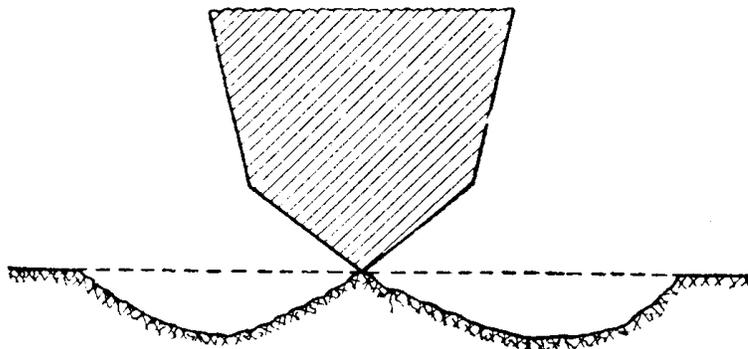
Фиг. 11

щейся под лезвием, фиг. 10 и 11 (изображение на фиг. 10, 12, 13 дано в развертке по окружности радиуса R , фиг. 11). Сколотая часть породы



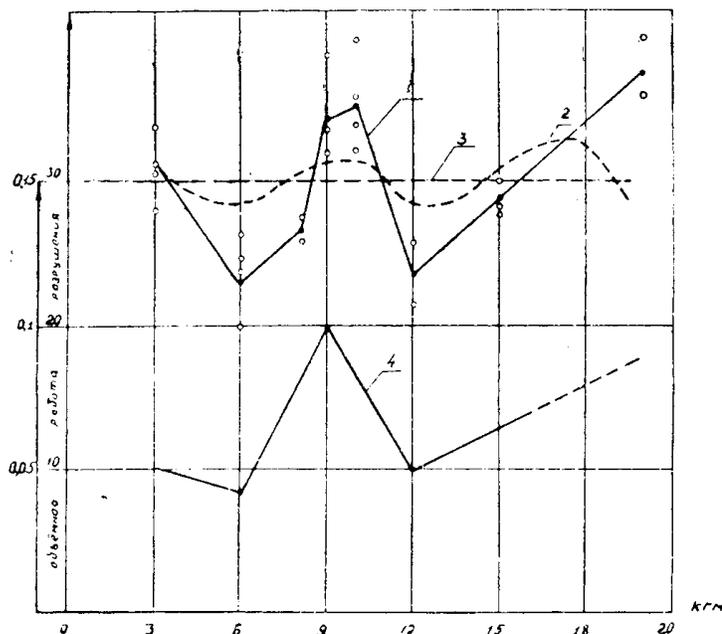
Фиг. 12

является мелко раздробленной, а часть породы, находящейся вблизи лезвия коронки, превращается в мелкий порошок, который при разрушении более твердых и сухих горных пород—гранита и диабаз, быстро вытесняется из-под лезвия, а при разрушении более мягких и влажных—„вязких“ горных пород, например, мрамора, не успевает вытесниться из-под лезвия коронки, вследствие этого сильно спрессовывается, создавая значительную площадь



Фиг. 13

контакта между коронкой и породой, фиг. 12. В случае наличия близких к лезвию коронки трещин и углублений от предыдущих ударов порода разрушается не симметрично с увеличением скола в сторону меньшего сопротивления. При этом наблюдается соскальзывание коронки по более прочной стороне забоя в сторону меньшего сопротивления, что приводит к некоторому скручиванию штанги.



Фиг. 14

Минимальная объемная работа разрушения (работа, затраченная на разрушение единицы объема) при одной и той же энергии удара, но разном угле поворота бура между ударами соответствует двустороннему сколу, т. е. такому случаю, когда два удара образуют углубления с симметричным скалыванием, а третий наносится по образовавшемуся выступу, фиг. 13. При увеличении энергии удара объемная работа разрушения изменяется периодически, фиг. 14.

Величина амплитуды и периода колебания кривых объемной работы разрушения зависит от свойств горной породы, величины, формы и степени затупленности инструмента. Как видно из фиг. 14, изменение значений объемной работы при разрушении притупленной коронки—1 значительно больше, чем при разрушении острозаточенной—2. При некоторых значениях энергии удара объемная работа разрушения горной породы при бурении затупленной коронкой меньше, чем при разрушении острой. Среднее значение объемной работы разрушения—3 при бурении острозаточенной коронкой для данной горной породы в большинстве случаев было почти постоянным при увеличении энергии удара от 2,5 до 20—25 *кж*.

Значение максимальных и минимальных объемных работ разрушения и соответствующих им энергий удара при разрушении горных пород однодотчатой коронкой, диаметром 43 мм приведено в таблице.

Таблица

Название породы	Мин. объемная работа разрушения		Макс. объемная работа разрушения	
	энергия удара		энергия удара	
	$\frac{\text{кж}}{\text{см}^3}$	$\frac{\text{кж}}{\text{см}^3}$	$\frac{\text{кж}}{\text{см}^3}$	$\frac{\text{кж}}{\text{см}^3}$
Мрамор	$\frac{15}{6}$; $\frac{15,3}{6}$	$\frac{33}{2}$; $\frac{30,5}{8}$		
Диабаз	$\frac{17}{4}$; $\frac{21,5}{10}$	$\frac{32}{7}$; $\frac{36}{15}$		
Гранит	$\frac{23}{6}$; $\frac{24}{12}$	$\frac{36}{10}$; $\frac{38}{20}$		

Периодическое изменение объемной работы разрушения в зависимости от энергии удара может быть объяснено тем, что процесс разрушения при динамическом внедрении инструмента в хрупкие горные породы происходит так же скачкообразно, как и при статическом. Однако в отличие от статического внедрения область распространения деформаций, в виде остаточных трещин, при динамическом воздействии меньше, чем при статическом. Последнее может быть объяснено значительным влиянием сил инерции разрушаемых частиц горной породы, что приводит к значительно меньшим областям деформирования, локализации разрушения на поверхности в непосредственной близости к лезвию буровой коронки.

Величина зоны скалывания породы от одного удара оценивалась сектором скалывания β , фиг. 11. При этом было обнаружено, что с увеличением энергии удара зона скалывания увеличивается. Увеличение зоны происходит скачкообразно и соответствует областям минимальной работы разрушения.

При одной и той же энергии удара, но при изменении скорости бояка перед ударом с 4,4 до 18,8 *м/сек*, т. е. больше, чем в 4 раза, увеличение объемной работы разрушения не было обнаружено.

После удара боек, как правило, отскакивал от бура, а бур—от забоя. Величина отскока бойка от бура и бура от забоя не являлась величиной постоянной для данной горной породы, материала и масс соударяющихся частей и в основном зависела от положения бура перед ударом, величины начального контакта коронки с забоем и характера разрушения породы. Так, например, для гранита при сбрасывании бойка весом $Q_1 = 970$ г с высоты $H = 4$ метра на бур длиной $l = 370$ мм, имеющий вес $Q_2 = 1370$ г, величина отскока бойка изменялась от $h = 2$ до 220 мм (25, 50, 62, 2, 8, 15,

105, 220, 36, 10, 218, 12, 30, 20, 30, 10, 20, 28, 12, 20), что соответствовало

изменению коэффициента восстановления $K = \sqrt{\frac{h}{H}}$ от 0,0022 до 0,234, то есть более чем в десять раз.

Наибольший отскок соответствовал большей плоскости первоначального контакта коронки с породой, что получалось в результате удара по буру, коронка которого упиралась в углубление от предыдущего удара фиг. 10, 12. Меньший отскок соответствовал большему разрушению породы и происходил при положении коронки на выступе между двумя углублениями от предыдущих углов, фиг. 13. Большей объемной работе разрушения соответствовал и больший относительный отскок бойка—4, фиг. 14. Таким образом, величина коэффициента восстановления может служить в некоторой мере оценкой целесообразности данной энергии удара для данного условия разрушения горной породы. Величина отскока бойка значительно уменьшалась при увеличении длины бура.

Величина отскока бура от горной породы в зависимости от энергии удара изменялась периодически, причем максимумы и минимумы значений соответствовали также максимальной и минимальной работе разрушения.

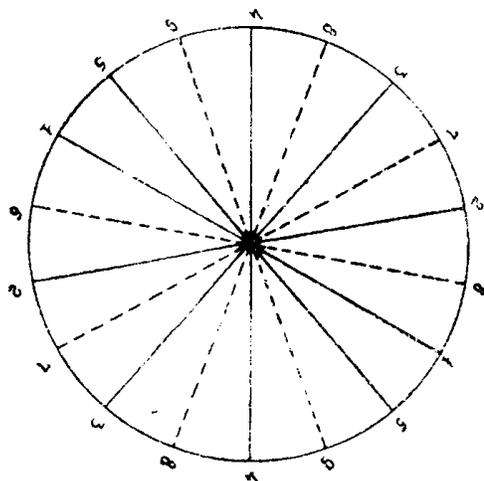
При проведении опытов по ударному внедрению бура в горную породу, когда бур перед ударом имел различную скорость вращения (равную скорости вращения бура в современных бурильных молотках), выяснилось, что разрушения в этом случае также носят характер двустороннего выкола с некоторым увеличением разрушенного объема перед передней гранью лезвия буровой коронки.

Ввиду того, что минимальная работа разрушения при одной и той же энергии удара, как правило, соответствовала случаю, когда два удара производили двустороннее выкалывание, а третий разрушал оставшийся выступ на поверхности шпура, фиг. 13, было предположено, что наиболее целесообразно угол поворота бура между ударами выбирать из условия двустороннего скалывания с учетом зависимости величины сектора выкалываемой породы от энергии удара. Так, например, при энергии удара 5—6 кгм в случае бурения гранита крепостью по шкале проф. Протодьяконова $f = 14—18$, сектор сколотой породы за один удар при диаметре шпура 40—45 мм составлял 30—40°. Исходя из этого, можно предполагать, что наиболее целесообразный угол поворота бура при бурении однодолотчатой коронкой должен быть 32,7 или 40°.

Действительно, при повороте бура между ударами на 40° удары 1—5, фиг. 15, при двустороннем сколе породы углубляют коронку в поверхность забоя. После этого каждый последующий удар—с 6-го по 9-й—наносится в зонах между двумя углублениями от предыдущих ударов, что обеспечивает эффективное скалывание оставшейся части породы и уменьшает объемную работу разрушения в процессе бурения. Аналогичные выводы могут быть сделаны и для других соотношений энергии удара, сектора выкалываемой породы и угла поворота бура. Наиболее целесообразными, с этой точки зрения при бурении буром с однодолотчатой буровой коронкой могут быть углы поворота бура между ударами: 31,5°; 40°; 32,7°; 27,8°; 24°; 21,2°; 19°; 17,2°; 15,65° и др.

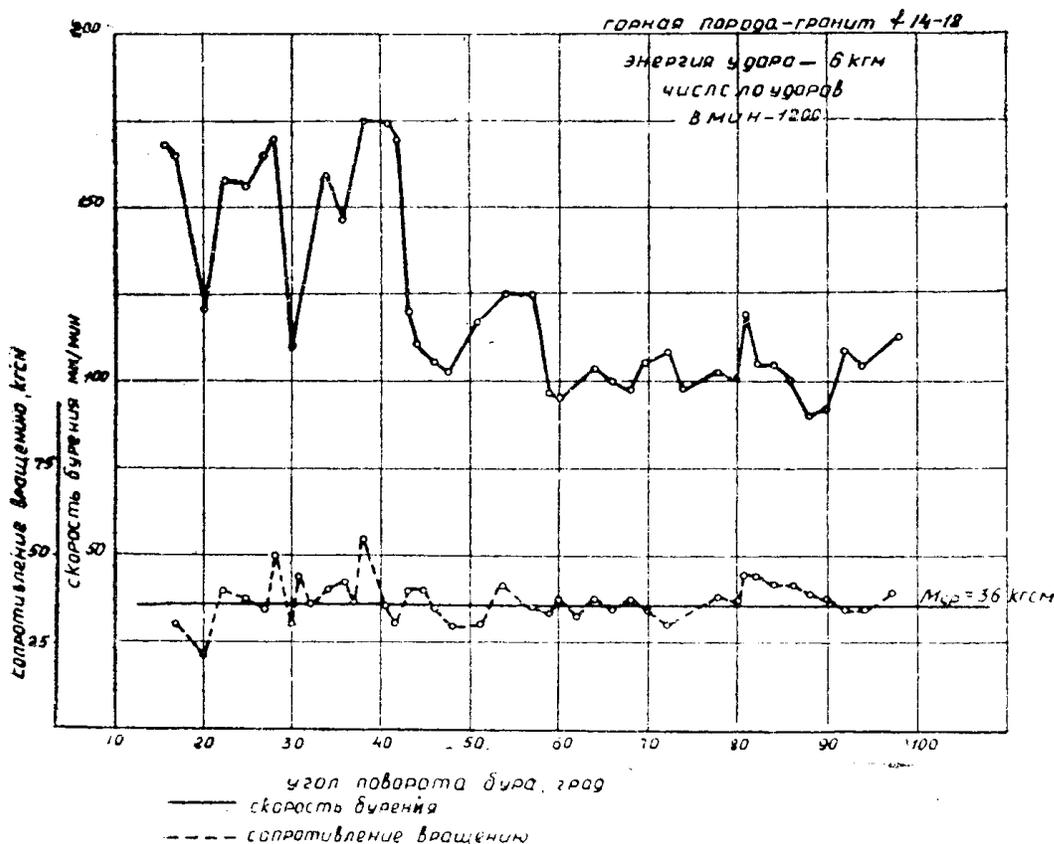
Для проверки этих соображений были проведены опыты на специально сконструированной бурильной установке, конструкция которой позволяла при одной и той же энергии удара и усилии подачи изменять угол поворота бура между ударами. Как видно из фиг. 16, величина угла поворота бура между ударами оказывает существенное влияние на скорость бурения. Так, например, при одной и той же энергии удара $A = 6$ кгм и числе ударов в минуту $n = 1200$ скорость бурения гранита $f = 14—18$ изменялась от 175 до 90 мм, т. е. почти в 2 раза, фиг. 16. Наибольшие колебания скорости

бурения и вместе с тем и наибольшие ее абсолютные значения наблюдались при изменении угла поворота бура между ударами от 17 до 42°—при бурении пород высокой и средней крепости (гранита и диабаз) и до 54—56° при бурении горной породы малой крепости (мрамора). Максимальные скорости бурения, как правило, соответствовали углам поворота бура, обеспе-



Фиг. 15

чивающим эффективное разрушение горной породы при двустороннем выколе, т. е. углом $\alpha = 24^\circ; 27,8^\circ; 32,7^\circ; 40^\circ$ или близким к ним. Значение угла поворота увеличивалось с увеличением энергии удара и уменьшением крепости породы. Увеличение угла поворота бура более 43—56° во всех случаях приводило к снижению скорости бурения.



Фиг. 16

При проведении этих опытов было также установлено:

а) Сопротивление вращению бура при ударно-вращательном бурении с непрерывным поворотом бура в 1,5—2 раза меньше, чем при вращении бура с тем же усилием подачи, но без ударов.

б) При изменении скорости вращения бура при одном и том же усилии подачи, числе и энергии ударов, момент сопротивления вращению бура остается почти постоянным, фиг. 16, незначительно увеличиваясь или уменьшаясь при некоторых соотношениях числа ударов и оборотов бура.

в) Усилие подачи машины не оказывает непосредственного влияния на процесс разрушения горной породы при ударно-вращательном бурении, а лишь обеспечивает работу бурильного молотка на том или ином режиме. Оптимальное, с точки зрения скорости бурения, усилие подачи соответствует такому случаю, когда в процессе бурения обеспечивается некоторый отход корпуса бурильного молотка от ограничительного буртика бура. Вследствие этого, а также в результате всегда имеющегося отскока бура от горной породы удар бойка по буру происходит, когда между лезвием бура и горной породой имеется некоторый зазор—1—5 мм. В этом случае после соударения боек и бур как бы обмениваются кинетической энергией. Боек останавливается, а бур движется к горной породе и разрушает ее. При бурении горизонтальных шпуров, как правило, не наблюдается отскока бойка после удара по буру.

Аналогичные зависимости были получены нами и при исследовании двух пневматических бурильных молотков—ПР—30к и ПМ—508.

Выводы

Основываясь на физике твердых тел [6; 15], материалах о механических свойствах и разрушении горных пород [12; 13; 7; 9; 8; 14], основных положениях теории упругости [2; 5] и проведенных нами опытах, мы пришли к следующим выводам о механизме разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении.

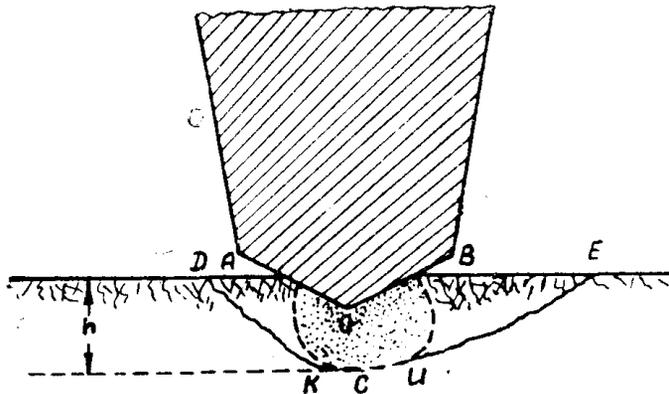
1. При ударно-вращательном бурении шпуров в горных породах средней и высокой крепости площадь забоя шпура перед каждым ударом представляет неровную поверхность, целостность которой нарушена многочисленными трещинами, возникшими в результате предыдущих ударов.

Коронка бура перед ударом вследствие предыдущего отскока штанги находится не в соприкосновении с забоем, а на некотором расстоянии от него 1—5 мм, в зависимости от усилия подачи. После удара бойком по штанге последней сообщается определенная энергия и она начинает двигаться к забою с некоторой скоростью. Часть энергии при этом теряется на преодоление сопротивлений движению бура в шпуре. При встрече коронки с забоем шпура лезвие коронки деформирует поверхность забоя раздвигая и уплотняя частицы породы. Этому способствует ранее возникшая трещиноватость и пористость породы.

Величина усилия между коронкой и породой нарастает постепенно по мере уплотнения породы, а также с увеличением площади контакта между коронкой и породой. Движение штанги и коронки приостанавливается, когда вся полученная от бойка энергия движения преобразуется в энергию разрушения и энергию упругого сжатия горной породы и стержня бура. При этом возможны следующие случаи:

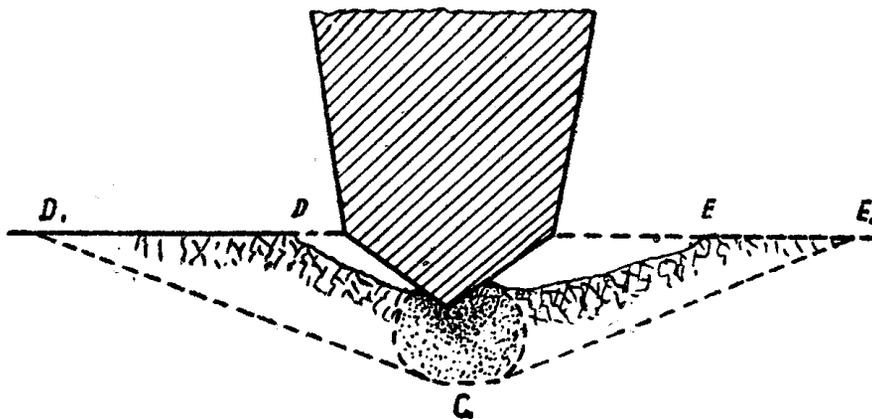
а) Энергия, полученная буром, больше, чем необходимо для преодоления вредных сопротивлений и уплотнения породы в месте контакта. Тогда избыток энергии идет на упругие деформации породы и бура. Коронка бура, соприкасаясь с горной породой по поверхности АОВ, фиг. 17, создает в объеме породы неравномерное объемно-напряженное состояние. Неравномерность объемно-напряженного состояния усиливается за счет сопротивле-

ния вращению штанги, возникшем в результате внедрения. Максимальные касательные напряжения в деформируемом объеме горной породы возникают вначале на некотором расстоянии от острия коронки— h . Это расстояние зависит от формы лезвия бура и площади соприкосновения бура с породой после уплотнения. По мере увеличения нагрузки касательные напряжения достигают предельного значения для данного материала и в других точках объема пока по некоторым наклонным плоскостям выйдут скачком



Фиг. 17

на поверхность вне плоскости контакта. В результате этого часть объема AKD и BUE скалывается, другая $ABUCK$ превращается в тонкий порошок, который в более твердых и хрупких горных породах—граниты, диабаз и др. легко вытесняется из-под лезвия коронки.



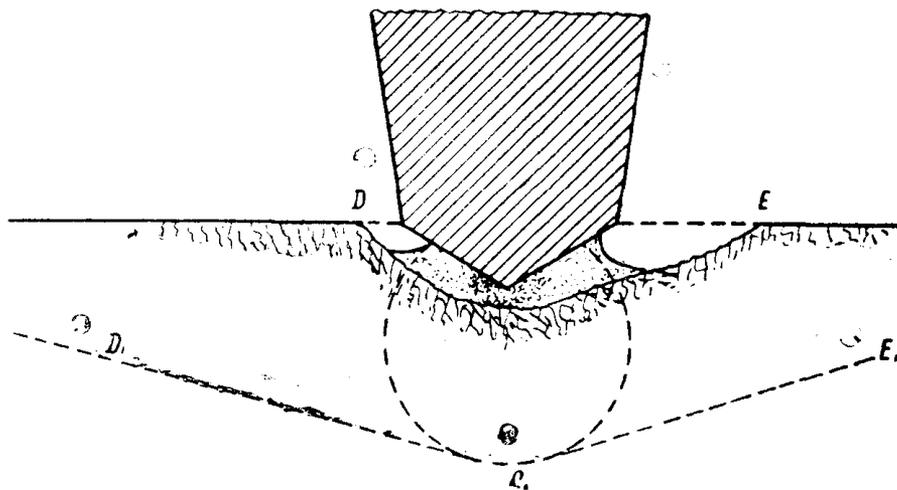
Фиг. 18

Если на первое разрушение затрачена не вся кинетическая энергия и поступательное движение бура продолжается, то лезвие коронки начинает деформировать вновь образованную поверхность, фиг. 18. Однако для вторичного скалывания по плоскости C_1D_1 и C_1E_1 , а также каждого последующего скалывания требуется уже большее усилие. Если оставшаяся после первого скола энергия бура недостаточна для создания таковых, то часть энергии, затраченная на упругую деформацию бура и горной породы, восстанавливается и бур отскакивает от забоя.

При разрушении более мягких и вязких горных пород, например, мрамора, частицы разрушенного объема $ABUCK$ вследствие значительного трения между частицами, коронкой и забоем не успевают вытесняться из-под лезвия коронки. Коронка при вторичном внедрении уплотняет уже разру-

шенную часть породы, создавая значительную плоскость контакта, фиг. 19, что, как правило, исключает полное использование энергии бура на вторичные скалывания. Этим в некоторой степени можно объяснить то, что при ударном бурении более мягких горных пород, например, мрамора, скорость бурения мало отличается от скорости бурения более крепких, но хрупких горных пород.

б) При большом количестве неудаленных из шпура частиц породы и небольшой энергии удара значительная часть энергии расходуется на преодоление сопротивления движению бура и уплотнение разрушенной породы. В конце движения и упругой деформации бура и горной породы коронка



Фиг. 19

соприкасается с забоем по некоторой поверхности, однако возникшее при этом усилие не создает предельного напряжения в плоскостях скольжения. Разрушение в этом случае носит характер поверхностного смятия, скорость бурения незначительна.

2. С точки зрения механизма разрушения горных пород скорость бурения шпуров в породах средней и высокой крепости может быть значительно увеличена за счет увеличения энергии единичного удара. Так, например, для шпуров диаметром до 45 мм возможно увеличение энергии удара до 25—30 кгм, то есть почти в 5 раз по сравнению с энергией удара большинства современных бурильных молотков. При этом увеличение энергии удара возможно как за счет увеличения массы, так и за счет увеличения скорости ударяющего тела, по крайней мере до 18—20 м/сек против 6—8 м/сек у современных бурильных молотков.

Для окончательного решения вопроса о выборе энергии удара для той или иной машины необходимо разработать вопрос о передаче энергии удара от ударника машины инструменту и о прочности соударяемых деталей.

3. Применять в бурильных молотках энергию удара менее 2,5 кгм не целесообразно, так как в этом случае наиболее значительная часть энергии каждого удара затрачивается на трение и вторичное измельчение уже разрушенной горной породы. Для уменьшения потерь энергии на трение целесообразно использовать большую часть энергии бура за счет первых скачков разрушения при внедрении. Для этого при увеличении энергии удара необходимо увеличение площади первоначального контакта между коронкой и горной породой. Вследствие этого увеличение энергии удара бурильного молотка должно снизить влияние на скорость бурения находящейся в шпуре буровой мелочи и значительно увеличить время работы буровой коронки между переточками.

4. Угол поворота бура между двумя ударами наиболее целесообразно выбирать из условия двустороннего скалывания породы относительно лезвия буровой коронки. В качестве оптимальных углов поворота для случая бурения различных горных пород однодолотчатой буровой коронкой диаметром 40—45 мм могут быть рекомендованы углы поворота $\alpha = 24^\circ$; $27,8^\circ$; $32,7^\circ$; 40° .

ЛИТЕРАТУРА

1. Барон Л. И. Применение глубоких скважин для подземной добычи руд. Металлургиздат, М., 1951.
 2. Беляев Н. М. Местные напряжения при сжатии упругих тел. Изд. „Путь“, Л., 1924.
 3. Бучиев В. К. Буро-взрывные работы. Углетехиздат, М., 1950.
 4. Володченко К. Г. и Марамзин А. В. Руководство по бурению скважин ударно-вращательными комплектами. Госгеолыздат, М., 1951.
 5. Динник А. Удар и сжатие упругих тел. Киев, 1909.
 6. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. т. V, Томск, 1949.
 7. Медведко А. И. О механизме разрушения горных пород при бурении. Горный журнал, № 12, 1947.
 8. Остроушко И. А. О теории бурения И. С. Покровского. Горный журнал № 7, стр. 16, 1950.
 9. Покровский И. С. Теория ударного бурения. Горный журнал, № 12, стр. 10, 1949.
 10. Таранов П. Я. О статье А. И. Медведко „Формула бурения“. Горный журнал, № 4, 1949.
 11. Татров Г. В. Горные машины. Metallurgizdat, M., 1952.
 12. Успенский Н. С. К вопросу о сопротивлении горных пород при ударном бурении шпуров. 1908.
 13. Успенский Н. С. Курс глубокого бурения ударным способом. Изд. Совета нефт. пром., М.—Л., 1924.
 14. Черкасов И. Е. и Шляпин К. В. К вопросу о теории ударного бурения. Горный журнал, № 7, стр. 11, 1950.
 15. Шрейнер Л. А. Физические основы механики горных пород. Гостоптехиздат, 1950.
-