Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLI, вып. 1, 1959 г.

РАЗРУШЕНИЕ УГЛЕЙ УДАРОМ [1]

В. С. Берсенев

Значительная величина возникающих при ударе усилий, превышающих вес ударяющего тела в сотни и тысячи раз, открывает широкие возможности для упрощения современных выемочных машин за счет увеличения их быстроходности и аккумулирования энергии ударными элементами. С другой стороны, изучение явления удара может облегчить исследование закономерностей, имеющих место при разрушении горных пород струей воды высокого давления. Все это указывает на актуальность изучения закономерностей разрушения горных пород и, в частности, углей ударом.

Разрушение горных пород ударом и особенно непосредственно в массиве изучено очень слабо. Настоящая работа посвящена изучению некоторых зависимостей, имеющих место при разрушении угля непосредственно в массиве. В числе исследуемых параметров, изменение которых существенно влияет на характер разрушения твердого тела, вошли работы удара, скорость приложения ударной нагрузки, частота ударов, форма инструмента.

Существующие ударные инструменты не позволяют производить исследования на достаточно широком диапазоне значений параметров, поэтому были сконструированы специальные приборы, позволяющие проводить исследования непосредственно в забое и в достаточно широких пределах значений изучаемых параметров.

Первым из созданных приборов был роторный вариатор частоты и работы удара (рис. 1). Основная его деталь — ротор *1* приводится во вращение посредством клиноременной передачи электросверлом ЭР-5. При вращении ротора свободно подвешенные к нему молотки *2* под действием центробежной силы занимают радиальное положение и в нижней части корпуса вариатора *3* наносят удар по затылку пики *4*, которая и передает его на забой.

Величина ударов, наносимых молотками в период разгона ротора, меньше расчетной и может вносить искажения в результаты исследований. Поэтому в период разгона включается отклоняющий молотки

[1] Исследованиям разрушения угля струей воды предшествовало изучение процесса разрушения как статической, так и ударной нагрузкой. Подробно см. в настоящем сборнике статью В. И. Геронтьева и Северина Л. П. «Разрушение углей и горных пород струей воды» (*Ред.*).

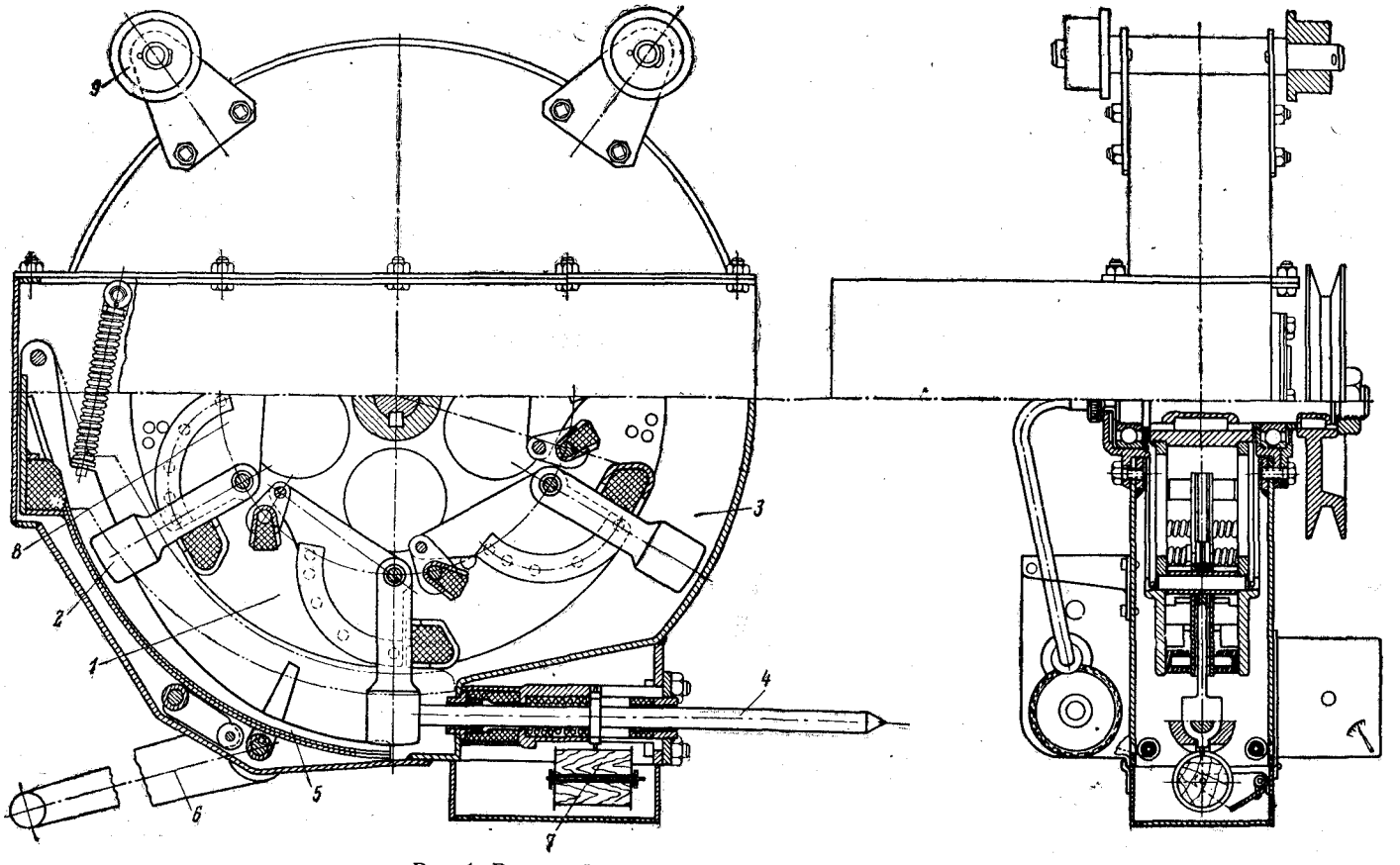


Рис. 1. Роторный вариатор частоты и работы удара:
1 — ротор; *2* — молоток; *3* — корпус; *4* — пика; *5* — отклоняющий сектор; *6* — рычаг сектора; *7* — пишущий механизм; *8* — гаситель колебаний молотка; *9* — ролики вариатора

сектор *5*, исключающий передачу ударов на забой. Выключение сектора после разгона ротора производится рычагом *6*. Регистрация числа ударов, необходимых для разрушения очередного объема угля, осуществляется пишущим механизмом *7*. После удара по пике молоток должен совершать колебательные движения между передним и задним буферами, что существенно может влиять на величину параметров удара. Это явление на вариаторе было полностью устранено, при помощи фрикционных гасителей колебаний молотка *8*, представляющих собой два сектора, прижимаемых пружинами к тяге молотка. Число и жесткость пружин подбирались экспериментально и обеспечивали поглощение энергии колебательных движений молотков за половину оборота ротора.

Подача вариатора на забой осуществлялась на роликах *9* по направляющим специальной рамы под воздействием груза весом 10 *кг*.

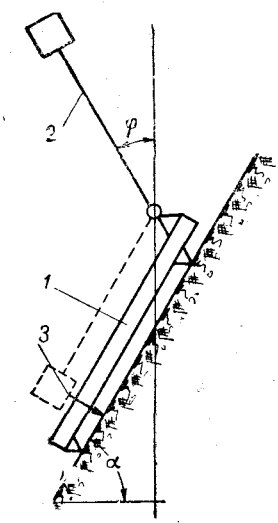


Рис. 2. Маятниковый копер:
1 — корпус; *2* — маятник; *3* — пика

В зависимости от условий эксперимента на роторе может быть установлено от одного до шести молотков, что обеспечивает при $n = 500$ *об/мин*, следующий ряд частот 500, 1000, 1500, 2000, 2500 и 3000 ударов в 1 *мин*. Изменение работы удара осуществлялось установкой на вариаторе молотков соответствующего веса, которые обеспечивали следующий ряд работ удара 0,1 : 0,204; 0,304; 0,5 и 0,76 *кгм*.

Во время каждого эксперимента работа удара A молотка находится в квадратичной зависимости от числа оборотов ротора, которое может меняться в зависимости от нагрузки и параметров электрической сети. Для сопоставимости данные каждого эксперимента приводились к расчетному числу оборотов ротора

$$A = \frac{A_{\text{п}} \left(\frac{n}{100}\right)^2}{25},$$

где $A_{\text{п}}$ — работа удара данного молотка при 500 оборотах ротора, *мин*;
n — действительное число оборотов ротора, *мин*.

Если роторный вариатор предназначен для нанесения по забою серии ударов, то второй прибор—маятниковый копер (рис. 2)—использовался при экспериментах, требующих воздействия на забой одиночного удара. Маятниковый копер состоит из корпуса *1*, маятника *2* и пики *3*, передающей удар на забой. Маятник копра имеет сменные ударники весом 0,98; 1,76; 2,61 и 3,54 *кг*. Работа удара для каждого из них

$$A = k_0(\sin\alpha + \cos\varphi),$$

где k_0 — переводной коэффициент соответственно для принятых гирь 0,6; 1,02; 1,45 и 1,92 *кгм*;
α — угол между плоскостью забоя и горизонталью;
φ — угол между вертикалью и осью маятника.

Скорость точки удара маятника в момент удара может быть с достаточной степенью точности определена по формуле

$$v = \sqrt{2gl(\sin\alpha + \cos\varphi)},$$

где l — длина маятника.

Методика исследований. Как известно, разрушение углей путем скола происходит с меньшими затратами энергии, чем при других способах воздействия на забой. Поэтому методика исследований была разработана применительно именно к этому виду разрушения.

Состояние угля, находящегося в массиве, резко отличается от состояния угля в лабораторных образцах. Кроме того, процесс выемки образцов из массива определяет фактически отборку наиболее прочных его элементов, имеющих обычно совершенно иные характеристики, чем весь массив в целом. Поэтому исследование закономерностей разрушения угля проводилось непосредственно на массиве, т. е. в естественных условиях.

Напряженное состояние массива также существенно влияет на процесс разрушения угля. Подавляющее большинство машин производит разрушение элементов массива, находящихся в одноосном напряженном состоянии. Вообще, трудно представить высокопроизводительную выемочную машину, которая воздействовала бы на элементы массива, находящиеся в двухосном напряженном состоянии. Исполнительные органы горных машин воздействуют обычно на уступ той или иной формы. Поэтому следующим направлением методики явилось проведение исследований на массиве, находящемся в одноосном напряженном состоянии. Все исследования проведены на уступе массива, образованном двумя взаимноперпендикулярными поверхностями — вертикальной, перпендикулярной напластованию и горизонтальной.

Чистота поверхности разрушаемого уступа значительно влияет на характер разрушения. Для большей достоверности результатов экспериментов целесообразно было выполнять уступы с постоянной степенью чистоты поверхности, поэтому процесс ее обработки был полностью механизирован. Специально изготовленная зарубная дисковая машина обеспечила достаточную и постоянную чистоту поверхности.

Как известно, данные экспериментов, проведенных на образцах горных пород, значительно разбросаны и обработка их целесообразна только при достаточном числе экспериментов. При разработке методики было принято, что каждую точку графических зависимостей следует определять на основании двадцати экспериментов. Исключение составляют некоторые из предварительных исследований, когда определялись основные направления шахтных экспериментальных работ.

Порядок проведения шахтных экспериментов. Шахтные исследования зависимостей, определяющих закономерности разрушения горных пород, были проведены в два этапа на шахте «Тырганские уклоны» (Кузбасс), на первом этапе — предварительном — были выяснены основные направления и определен объем и содержание исследований основного — второго этапа.

Пробные исследования 1952 г., проведенные на пласте Спорном с использованием заходки глубиной 2 *м* (рис. 3, *а*), обнаружили непригодность экспериментального забоя по размерам. Поэтому для экспериментальных работ был использован орт в пласте Мощном, вскрывающий крепкую пачку угля мощностью 2 *м* возле кровли пласта (рис. 3, *б*).

Кроме зарубной машины, изготовленной в соответствии с требованиями методики и значительно сокращающей время подготовки уступа к экспериментам, перед вторым этапом были изготовлены различные приспособления, позволяющие значительно сократить затраты времени на проведение каждого эксперимента. Так, копер и вариатор подвешивались на специальных направляющих, которые ориентировались на груди забоя относительно уступа и при подготовке к последующему эксперименту позволяли резко упростить и ускорить установку приборов

в новом исходном положении. Отбитый уголь полностью улавливается специальными углесборниками и после взвешивания и регистрации данных эксперимента складывался в пакеты и выдавался на поверхность для ситового анализа.

Результаты шахтных исследований. Обработка данных основной части экспериментов проводилась на основании: 1) учета затрат энергии на единицу веса отбитого угля; 2) затрат энергии на единицу вновь образовавшейся поверхности.

Для первого случая удельная работа разрушения определялась по формуле

$$E = \frac{\sum A}{\sum P};\ кгм/кг,$$

где $\sum A$ — суммарный расход энергии при проведении серии экспериментов с постоянными параметрами;

$\sum P$ — суммарный вес отбитого угля при тех же экспериментах.

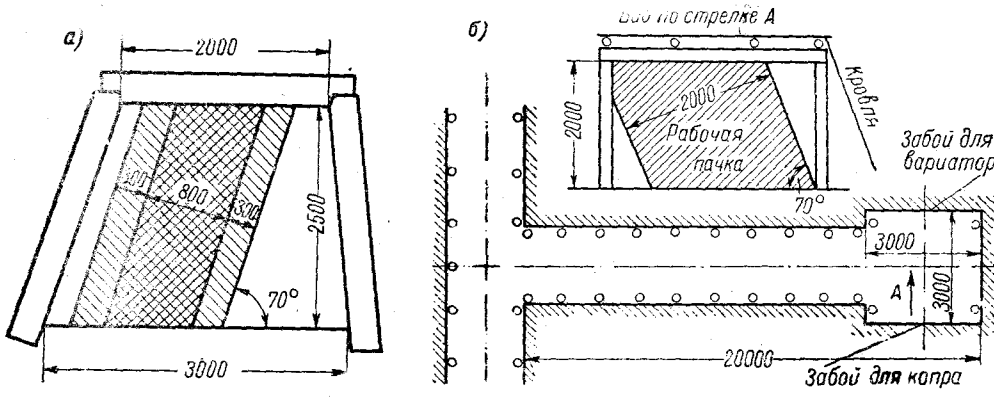


Рис. 3. Схема забоя на пластах:
а — Спорном; *б* — Мощном

Для второго случая удельный расход энергии

$$E' = \frac{\sum A}{\sum F_i},\ кгм/м^2,$$

где $\sum F_i$ — суммарная поверхность зерен, определяемая по их средним размерам.

Ситовой анализ проводился на ситах с размерами отверстий: 40; 15; 12; 10; 7; 6,2; 5; 4; 3; 1; 0,8; 0,2 и 0,187 *мм*.

Влияние работы удара на энергоемкость разрушения. Изменение плеча удара l при неизменной работе отдельного удара приводит к резкому изменению веса отбитого угля. Зависимости $E = f(l)$, полученные при предварительных исследованиях на пласте Спорном (рис. 4), при $A = \text{const}$, носят параболический характер с минимумом при вполне определенном значении плеча удара. Как следует из анализа этих зависимостей, затраты энергии, необходимые для разрушения единицы веса отбитого угля, будут наименьшими при вполне определенном оптимальном плече удара. Рост работы удара влечет за собой и увеличение оптимального значения плеча удара. Кривая зависимости $E = f(A)$ при $l_{опт}$ показывает, что после определенного значения работы удара даль-

нейшее его увеличение не приводит к практически ощутимому снижению энергоемкости разрушения. Ординату горизонтали, к которой кривая $E = f(A)$ приближается как асимптота, можно характеризовать как показатель энергоемкости разрушения угля данного пласта (рис. 5). Эти закономерности сохраняются и при повторных ударах. По данным исследований, на пласте Мощном построены графические зависимости

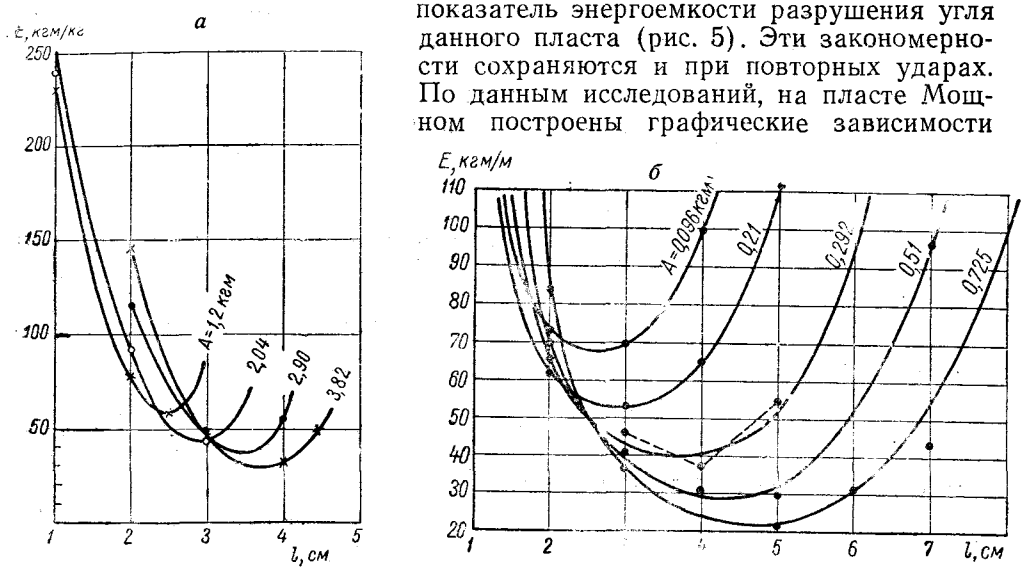


Рис. 4. Зависимость $E = f(l)$:
а — при одиночных ударах; *б* — при повторных ударах (500 ударов в 1 *мин*)

$E = f(A)$ (рис. 4) и $l_{опт} = f(A)$ (рис. 5), полностью подтвердившие сделанные выше выводы.

При обработке данных исследований на основании ситового анализа для каждой серии экспериментов, наряду с графическими зависимостями от параметра, строились аналогичные зависимости выхода вновь образовавшейся поверхности ω на единицу веса отбитого угля.

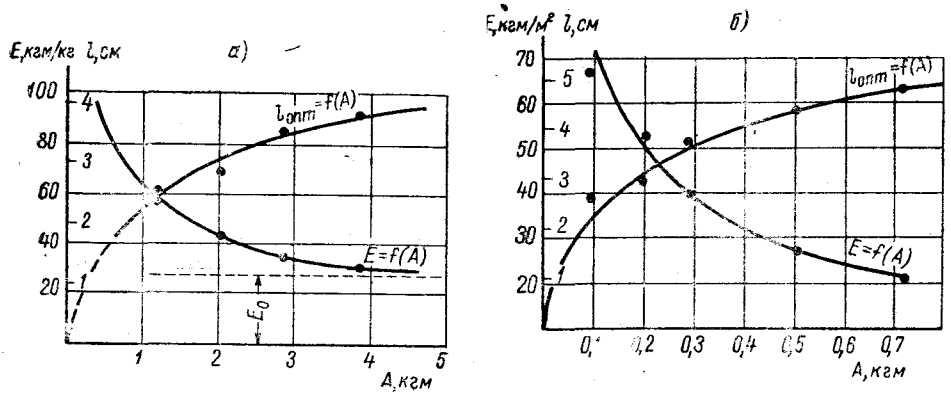


Рис. 5. Зависимость удельной энергоемкости разрушения от работы (при оптимальных значениях плеча удара):
а — одиночного удара; *б* — повторных ударов — 500 ударов в 1 *мин*

Зависимости $E' = f(l)$ и $\omega = f(l)$ носят также параболический характер с ясно выраженным минимумом. Параметры, соответствующие точкам минимума, были использованы для построения (рис. 6) зависимостей $E' = f(A)$ и $\omega = f(A)$. Если кривая зависимости $\omega = f(A)$ совершенно аналогична зависимости $E = f(A)$, то кривая $E' = f(A)$

имеет несколько иной характер, что, очевидно, является следствием влияния на процесс разрушения увеличения прочности зерен с уменьшением их размеров.

Учитывая связь между исследуемыми параметрами $\omega E' = E$, можно ожидать, что при неограниченном возрастании величины работы удара будем иметь

$$\lim_{A \to \infty} \omega = \text{const},$$

а также

$$\lim_{A \to \infty} E' = \text{const},$$

т. е. разрушение будет происходить в соответствии с законом Кирпичева.

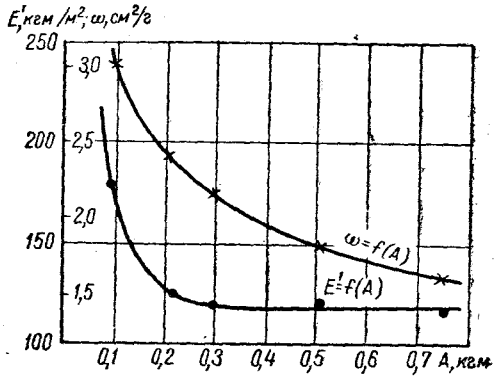


Рис. 6. Зависимости $\omega = f(A)$ и $E' = f(A)$ при оптимальных значениях плеча удара

Влияние скорости приложения ударной нагрузки. Скорость приложения нагрузки существенно влияет на характер удара. При уменьшении скорости приложения сил напряженное состояние изменяется по законам, все более и более близким к условиям статики. Наоборот, рост этой скорости приводит к более резкому выражению динамичности явления и увеличению вероятности хрупкого разрушения элементов массива, которые в обычных условиях разрушаются пластично. Замена пластичного разрушения хрупким за счет увеличения скорости приложения нагрузки может привести к снижению энергоемкости разрушения, но динамика процесса обусловливает значительные потери энергии

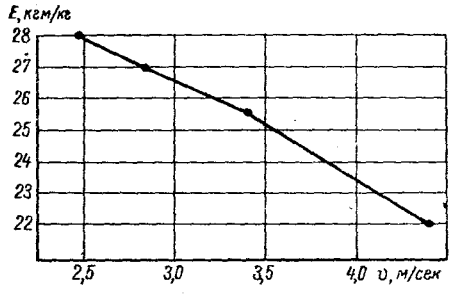


Рис. 7. Зависимость удельной работы разрушения от скорости приложения ударной нагрузки

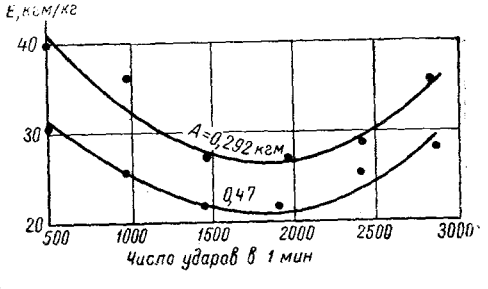


Рис. 8. Влияние частоты ударов на энергоемкость разрушения

на образование волновых явлений в массиве, сообщение кинетической энергии отдельными кусками после разрушения и т. п.

Взаимодействие указанных явлений носит крайне сложный характер, совершенно не поддается теоретическому анализу и может быть проверено только экспериментально.

Для исследования влияния скорости приложения ударной нагрузки на энергоемкость процесса разрушения в забое пласта Мощного при скоростях удара от 2,47 до 4,4 *м/сек* была проведена серия экспериментов, данные которых использованы при построении зависимости $E = f(\upsilon)$ (рис. 7). Ограниченное число точек, полученных для построения

этой зависимости, и крайне узкий диапазон скоростей удара позволяют предполагать, что с увеличением скорости приложения ударной нагрузки эффективность разрушения углей должна возрастать. Однако эта зависимость должна быть проверена при большом диапазоне и большем числе значений скоростей приложения ударной нагрузки.

Влияние частоты ударов на энергоемкость разрушения. Исполнительный орган выемочных и, в частности, ударных машин воздействует на забой с определенной частотой, зависящей от конструкции и параметров машины. Частота ударов или вообще частота приложения нагрузки оказывает существенное влияние на процессы разрушения массива. Зависимости между энергоемкостью разрушения и частотой ударов на пласте Мощном устанавливалась при двух значениях работы удара $A_1 = 0{,}292$ *кгм* и $A_2 = 0{,}47$ *кгм* и в диапазоне изменения частот от 500

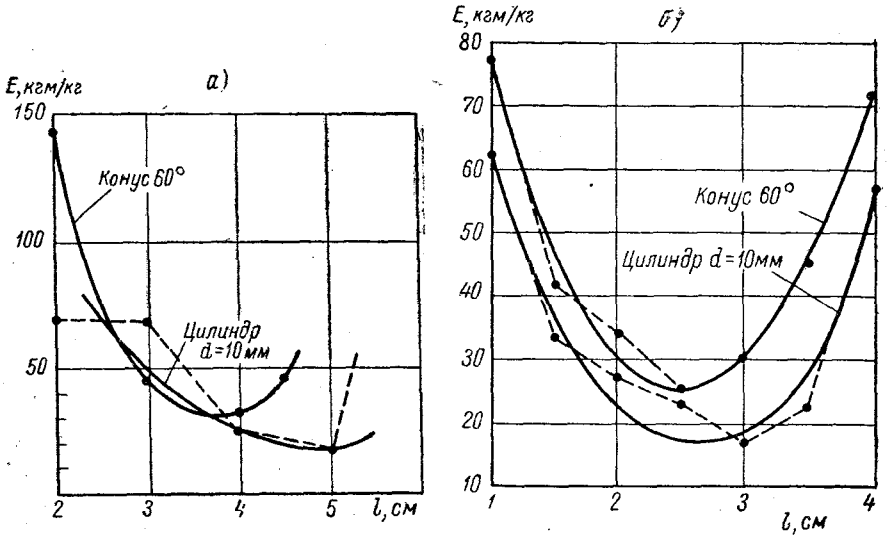


Рис. 9. Влияние формы ударного инструмента на энергоемкость разрушения:
а — пласт Спорный, *б* — Мощный (A=1,2 *кгм*)

до 3000 ударов в 1 *мин*. Наиболее эффективным оказалось разрушение 1800—2000 ударов в 1 *мин* (рис. 8). Это обстоятельство доказывает необходимость правильного подбора частоты приложения нагрузки при проектировании выемочных машин.

Влияние формы ударного инструмента на энергоемкость ударного разрушения угля. Основной формой конца ударного инструмента был принят конус. Совершенно очевидно, что форма ударника имеет существенное влияние на энергоемкость разрушения. Поэтому были использованы пики не только с коническим, но и цилиндрическим концом. Эксперименты, проведенные на пластах Спорном и Мощном, позволили установить, что эффективность разрушения угля цилиндрической пикой диаметром 10 *мм* при работе удара от 1,2 до 3,82 *кгм* в полтора раза выше эффективности разрушения угля в тех же условиях, но конической пикой с углом конусности 60° (рис. 9). Повышенную энергоемкость разрушения угля пикой с коническим конусом можно объяснить тем, что при внедрении в массив клина или конуса на их поверхности развиваются силы трения, на преодоление которых расходуется определенная часть энергии, необходимая для скола уступа. При внедрении в массив цилиндра величина сил трения меньше, что и обусловливает увеличение эффективности разрушения. Основным параметром цилиндрического

ударника следует считать диаметр поверхности контакта между массивом и цилиндром, величина которой, несомненно, должна существенно влиять на процесс разрушения.

Для выяснения характера влияния площади контакта S между цилиндрической частью пики и грудью забоя на эффективность разрушения угля на пласте Мощном была проведена серия экспериментов при следующих параметрах: а) работа удара 1,2 *кгм*; б) скорость приложения ударной нагрузки 3,39 *м/сек*; в) диаметры цилиндрических концов пик 5, 6, 7, 8, 10 и 11 *мм*; г) плечо удара соответствовало $l_{опт} = 3$ *см* для цилиндрической пики с диаметром конца $d = 10$ *мм*. Зависимость $E = f(S)$ (рис. 10), построенная по данным экспериментов, позволяет заключить, что для каждой работы удара имеет место вполне определенная площадь контакта, при которой разрушение происходит с наименьшими затратами энергии. Увеличение или уменьшение площади контакта влечет снижение эффективности разрушения. В этом отношении ударники с коническим концом обладают высокой степенью приспособляемости. Внедрение конуса происходит до тех пор, пока площадь основания внедрившегося конуса не достигнет необходимой для разрушения величины. Благодаря этому ударники с острым концом (конус, пирамида, клин), несмотря на повышенные затраты энергии, до сих пор являются основным типом ударных и режущих инструментов.

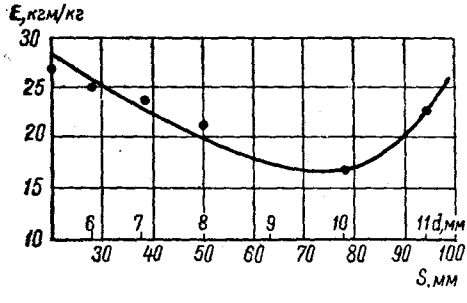


Рис. 10. Зависимость энергоемкости разрушения от площадей контакта между цилиндрической пикой и массивом

Успешное использование ударников с плоским концом связано также с правильным конструктивным выполнением ударника. Если при работе ударника с коническим концом наибольшие напряжения возникают только во внедрившейся части конуса, где напряженное состояние можно считать объемным, а следовательно, менее опасным для материала ударника, то в цилиндрическом конце наибольшие напряжения действуют во всей части ударника, имеющей цилиндрическую форму. Напряженное состояние в этой части ударника имеет некоторое сходство с линейным. При указанном напряженном состоянии особое значение приобретают вопросы продольного изгиба и внецентренного приложения нагрузки, когда появляются особенно опасные для закаленного ударника напряжения изгиба. Все это приводит к необходимости производить расчет цилиндрических ударных инструментов с достаточно большим коэффициентом запаса, который может быть определен только экспериментально.

Необходимость значительного коэффициента запаса прочности размеров ударника при строго определенной площади контакта S предопределяет определенные ограничения при использовании его для разрушения крепких горных пород.

Увеличение стойкости плоских ударников может быть достигнуто за счет профиля (крестообразного или звездообразного), обладающего большим моментом инерции сечения, а также формы ударника, обладающей одновременно наиболее ценными качествами цилиндрических и конических ударников. В качестве таких ударников могут быть рекомендованы пики с концом в виде усеченного конуса или обычного конуса с большим углом между образующими. Такие ударники, естест-

венно, будут обладать несколько повышенной энергоемкостью разрушения по сравнению с цилиндрическими ударниками, но это будет оправдано увеличением их стойкости.

Выводы

1. Для каждого значения работы удара существует вполне определенная величина плеча удара (расстояние от края уступа до точки удара), соответствующая наибольшей эффективности разрушения угля в данных условиях.

2. С ростом работы удара до определенной величины, определяемой физическими свойствами угля, происходит увеличение эффективности разрушения. Для пласта Спорного $A = 4$ *кгм*, а для пласта Мощного $A = 3$ *кгм*. Дальнейшее увеличение работы удара практически не обеспечивает ощутимой эффективности разрушения. В этих условиях разрушение происходит в соответствии с законом Кирпичева. Значение удельной работы разрушения E_0, соответствующее ординате прямой, к которой как к асимптоте приближается нижняя ветвь кривой $E = f(A)$, можно считать показателем разрушаемости угля данного пласта (для пласта Спорного $E_0 \approx 26$ *кгм/кг*).

3. Можно ожидать, что рост скорости приложения ударной нагрузки при правильном подборе остальных параметров удара может обеспечить увеличение эффективности разрушения.

4. При создании новых машин необходимо учитывать наиболее выгодную частоту ударов, обеспечивающую наименьшую энергоемкость разрушения в данных условиях.

5. Форма ударного инструмента имеет существенное влияние на эффективность разрушения. Так, например, цилиндрический ударник по сравнению с коническим обеспечивает уменьшение затрат энергии в полтора раза.

Важным вопросом в использовании ударников с плоским концом является создание конструкции, обеспечивающей их высокую прочность.