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

# РАЗРУШЕНИЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА СТРУЕЙ ВОДЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ [1]

*В. С. Берсенев*

С целью изучения некоторых закономерностей, определяющих энергоемкость процесса разрушения твердого тела струей воды высокого давления (до 200 *ати*) был проведен комплекс исследований в лаборатории рудничного транспорта Ленинградского горного института.

Эксперименты проводились с помощью трехплунжерного насоса ГБ-354 производительностью 100 *л/мин* и наибольшим рабочим давле-

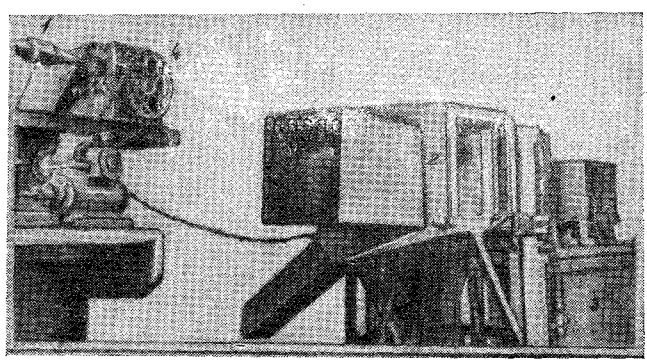


Рис. 1. Установка для исследования процессов разрушения твердого тела струей воды высокого давления

нием 200 *ати*. В качестве гидромонитора использовались конические насадки *1* (рис. 1) с углом конусности 13° и диаметром выходного отверстия порядка 3 *мм*. Регулировка давления в системе трубопроводов насадка осуществлялась игольчатым краном, позволяющим изменять размер относительного отверстия, направляя на сброс часть подаваемой насосом воды. Разрушаемый образец устанавливался на стенде *2*, для перемещения которого вдоль оси струи использовалась вагонетка *3*. Стол стенда был оборудован гидравлическим подъемом, позволявшим устанавливать образец в любом положении по высоте и перемещать его

[1] В исследованиях приняли участие В. Д. Зиневич, В. И. Морозов, В. С. Мухачев, Е. П. Капралов, В. Д. Колчанов, А. В. Богданов, И. И. Обухович, А. И. Острожинский, М. И. Хромов и А. А. Сивочуб.

во время воздействия струи. Площадка с закрепленным образцом перемещалась в горизонтальной плоскости перпендикулярно оси струи с помощью направляющих и ходового винта.

Для управления струей во время эксперимента и устранения влияния на периоды разгона и остановки насоса был спроектирован и изготовлен отсекатель *4*, позволявший или совершенно перекрывать струю (функция затвора) или пропускать ее на образец в течение заданного промежутка времени.

Исследование проводилось на песчано-цементных образцах, имеющих временное сопротивление на сжатие 40—60 *кг/см*$^2$. Попытки использовать угольные образцы не дали положительных результатов, так как их физические свойства крайне непостоянны и резко отличны от параметров угля в массиве.

Расстояние между срезом насадка и поверхностью образца было принято для всех экспериментов 2 *м*, что соответствовало наибольшей эффективности разрушения. С целью ослабления влияния различия физических свойств материала образцов на результаты исследований, при получении каждой из зависимостей эксперименты проводились только на одном образце. За критерий разрушаемости образца был принят расход энергии в килограммо-метрах на 1 *кг* разрушенного объема, т. е.

$$E = \frac{A}{P},$$

где $E$ — удельная энергоемкость разрушения, *кгм/кг*;

$A$ — работа струи за время ее воздействия на образец, *кгм*;

$P$ — вес вымытого материала, *кг*.

Величина $P$ определялась замером вымытого объема сухим песком методом расхода из мензурки.

Чтобы устранить влияние возможной слоистости образца на результаты экспериментов, удары струи в неподвижную точку, резы и другие виды воздействия струи ориентировались по вертикали при установке образца в положении формовки.

Исследовались зависимости, имеющие место при ударе неподвижной струи и струи с тем или иным характером перемещения точки удара по поверхности образца.

**Закономерности разрушения при неподвижной точке удара струи.** Удар неподвижной струи нельзя признать целесообразным при отделении от массива большого количества горных пород. Но закономерности разрушения твердого тела неподвижной струей, имеющие много общего с другими способами воздействия струи, представляют определенную ценность для изучения физической картины рассматриваемых процессов.

**Зависимость удельной работы разрушения от давления $E = f(p)$.** При экспериментах каждый удар струи наносился в новую точку на образце. Исследования были разделены на три серии по продолжительности импульса: 1,85; 3,03 и 5,65 *сек*. В каждой серии все параметры, кроме давления в системе насадка, оставались неизменными. Полученные графические зависимости $E = f(p)$ (рис. 2) свидетельствуют о том, что при малых давлениях струя не в состоянии сколько-нибудь заметно разрушить поверхность образца. Разрушение совершенно отсутствует или протекает крайне медленно. Этим объясняется крутой подъем кривой $E = f(p)$ вверх, асимптотически приближающийся к оси ординат. Увеличение давления вызывает рост эффективности разрушения, но до определенного предела. При давлении 20—40 *ати* и указанных выше продолжительностях импульсов эффективность оказывается наиболь-

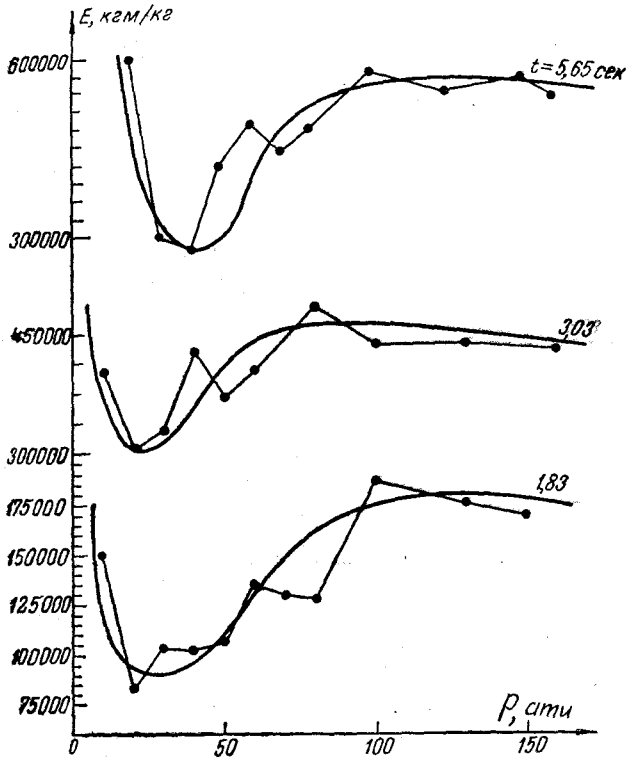



Рис. 2. Зависимость эффективности разрушения от давления в системе гидромонитора при неподвижной точке удара струи

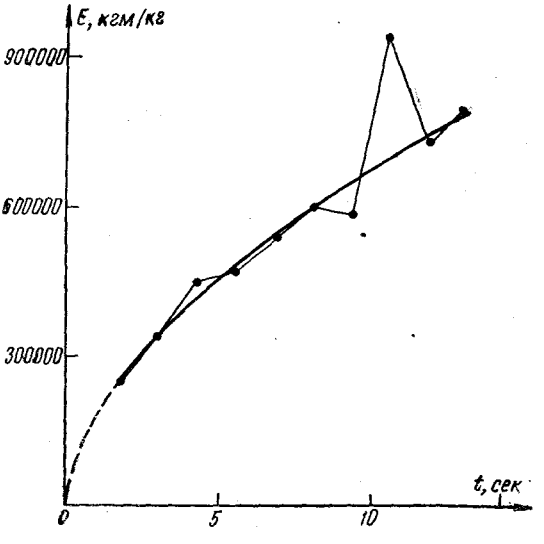



Рис. 3. Зависимость эффективности разрушения от продолжительности импульса одиночного удара при $p = \text{const} = 75$ *атм*

шей. Затем относительная глубина лунки становится настолько большой, что в ней образуется жидкостный буфер, защищающий материал образца от разрушения. С увеличением давления в лунку подается большее количество воды и, следовательно, увеличивается жидкостный буфер и возрастает энергоемкость разрушения. Кривая $E=f(p)$ резко поднимается вверх. При давлении в системе насадка 100 *ати* статическое давление жидкости в лунке становится близким к временному сопротивлению материала образца, что ведет к стабилизации расхода энергии. Кривая $E=f(p)$ занимает горизонтальное положение, т. е. затраты энергии становятся пропорциональными вымытому объему. Но энергоемкость разрушения для этого участка кривой вследствие влияния жидкостного буфера продолжает оставаться относительно высокой.

**Зависимость удельной работы разрушения от продолжительности импульса $E=f(t)$.** Процесс образования лунки, несомненно, протекает во времени и тесно связан с созданием в ней жидкостного буфера. Как показали исследования, с сокращением продолжительности импульса (рис. 3) влияние жидкостного буфера на процесс разрушения ослабевает. При относительно небольшой глубине лунки, когда ее стенки расположены под углом, определяющим сравнительно беспрепятственное удаление жидкости, буфер не успевает образоваться и разрушение происходит более эффективно. С ростом продолжительности импульса увеличивается и глубина вымываемой струей лунки. При этом из-за значительного угла наклона стенок удаление жидкости весьма затруднено, что приводит к усилению жидкостного буфера, защищающего материал образца от разрушения и являющегося причиной снижения эффективности разрушения.

## Закономерности разрушения твердого тела при перемещении точки удара по поверхности образца

Эффективность разрушения может быть увеличена созданием условий, способствующих ликвидации или ослаблению влияния жидкостного буфера. Такие условия имеют место при передвижении точки удара струи по поверхности образца. В этом случае одна сторона полости, вымываемой струей, всегда открыта, куда и может быть удалена жидкость, образующая буфер. Кроме того, перемещение точки удара по поверхности забоя соответствует наиболее прогрессивному способу использования струи. Выемка больших объемов горных пород невозможна без образования резов, соответствующим образом расположенных на поверхности массива полезного ископаемого.

**Влияние скорости перемещения точки удара по поверхности образца на эффективность разрушения $E=f(v)$.** С уменьшением скорости передвижения точки удара струи по поверхности образца условия разрушения приближаются к случаю неподвижной струи, т. е. при $v=0$ и $t=\infty$ образуется лунка таких размеров, при которых гидравлический буфер полностью защищает образец от разрушения. Этим и объясняется асимптотическое приближение правой ветви кривой $E=f(v)$ к оси ординат (рис. 4).

Увеличение скорости перемещения точки удара по поверхности образца до 1 *м/мин* вызывает резкое увеличение эффективности разрушения, но затем кривая все больше и больше выполаживается и при скорости передвижения 3 *м/мин* занимает почти горизонтальное положение. Физически это можно объяснить влиянием гидравлического буфера, который при малых скоростях создается благодаря резкому из-

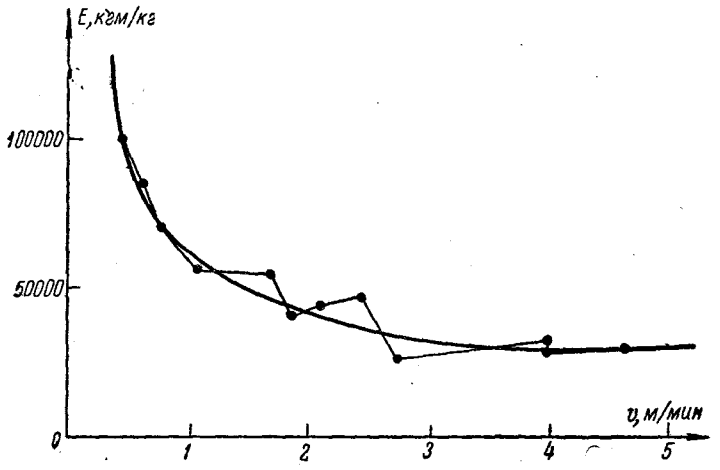



Рис. 4. Зависимость эффективности разрушения от скорости перемещения точки удара струи по поверхности образца при $p = 75$ *ати*

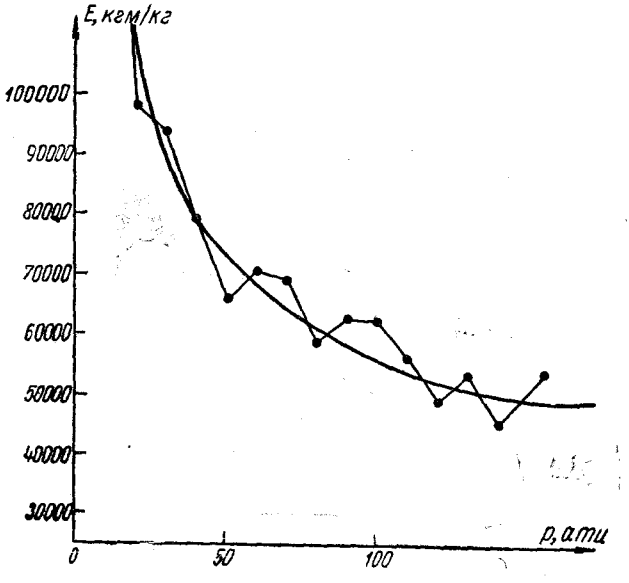



Рис. 5. Зависимость эффективности разрушения от давления при подвижной струе $v = \text{const} \cong 3{,}50$—3,78 *м/сек*

менению направления движения жидкости в щели. С увеличением скорости перемещения точки удара передняя сторона прорезаемой щели из положения, близкого к параллельному с осью струи, наклоняется вперед по ходу струи. Благодаря этому создаются условия для ликвидации «застойных» зон. При скорости передвижения 3 *м/мин* влияние жидкостного буфера ослабевает настолько, что при дальнейшем увеличении скорости перемещения точки удара струи объем вымытого материала прямо пропорционален затраченной энергии. Поэтому правая ветвь кривой $E = f(v)$ проходит параллельно оси абсцисс.

**Влияние давления в системе гидромонитора на эффективность разрушения при подвижной струе** $E = f(p)$. Для получения зависимости $E = f(p)$ было принято такое значение скорости передвижения точки удара по поверхности образца, при котором кривая $E = f(v)$ проходила почти параллельно оси абсцисс. В этих условиях возможные отклонения в скорости передвижения струи не внесут погрешностей в результаты исследований.

Как следует из анализа зависимости $E = f(p)$, для каждого случая сочетания конкретных условий разрушения твердого тела струей воды имеет место критическое давление (в данном случае 100 *ати*), выше которого начинается область наиболее эффективного разрушения (рис. 5).

Выбор рабочего давления для промышленных гидромониторов должен производиться на основании анализа экономической целесообразности назначения тех или иных параметров, так как с ростом давления увеличиваются прочные размеры, вес и стоимость установки. Пока можно сказать только то, что это давление наиболее целесообразно назначать не менее критического для данных условий.

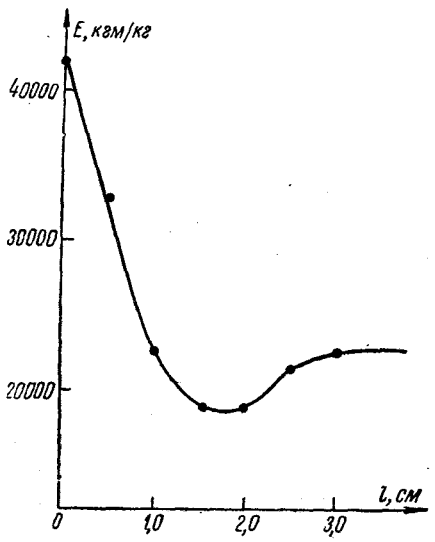


Рис. 6. Влияние расстояния между параллельными резами на эффективность разрушения

**Влияние расстояния между параллельными резами на эффективность разрушения** $E = f(l)$. В процессе выемки горных пород из массива струя воды осуществляет резы, взаимное расположение которых должно оказывать существенное влияние на эффективность разрушения. Очевидно, наиболее целесообразно последовательные резы располагать параллельно друг другу с тем, чтобы наличие второй обнаженной поверхности (поверхности реза) способствовало образованию явления скола.

Для исследования влияния относительного расположения параллельных резов на эффективность разрушения на образце были сделаны первичные резы при постоянных параметрах установки. После замера объема первичных резов образец был вновь установлен на стенде и подвергся воздействию струи со смещением осей вторичных относительно осей первичных резов на величины, равные 0, 5, 10, 15, 20, 25 и 30 *мм*. По замерам прироста объема семи двойных резов была построена графическая зависимость $E = f(l)$, имеющая в данных условиях резко выраженный минимум при $l \approx 1{,}8$ *см* (рис. 6).

Таким образом, в каждых конкретных условиях последовательные резы должны располагаться на оптимальном расстоянии друг от друга, соответствующем минимуму кривой $E = f(l)$. Величина $l_{опт}$, очевидно, будет изменяться в широких пределах в зависимости от мощности струи, давления в системе гидромонитора и физических свойств разрушаемого материала.

### Некоторые способы повышения эффективности водяных струй

Если продолжительность импульса имеет существенное влияние на эффективность разрушения, то при использовании пульсирующих струй, когда жидкостный буфер во время паузы будет значительно ослаблен или совершенно ликвидирован, можно достичь некоторого снижения энергоемкости разрушения. Для проверки влияния пульсаций на процесс был спроектирован и изготовлен механический прерыватель (рис. 7).

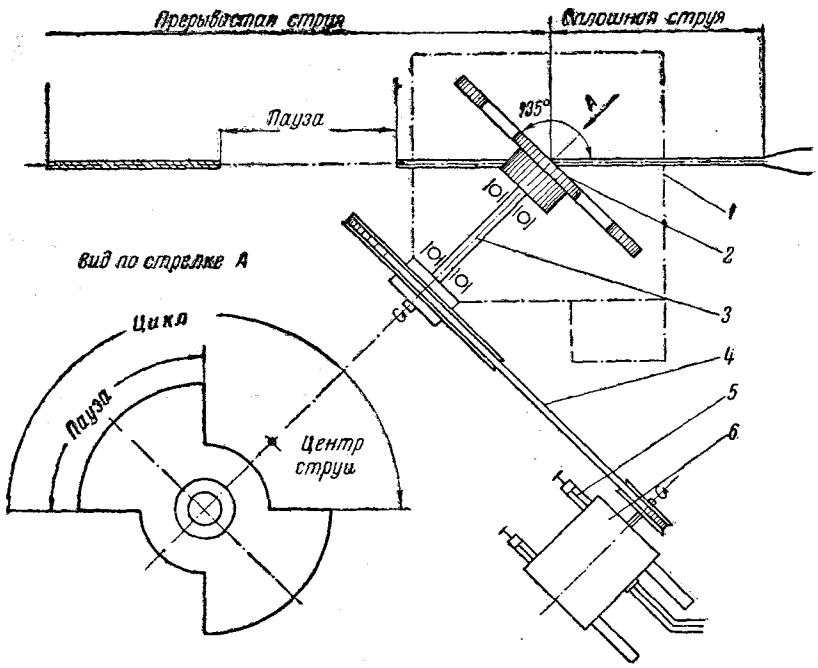



Рис. 7. Принципиальная схема прерывателя:
*1* — кожух; *2* — диск с вырезами; *3* — шпиндель; *4* — клиноременная передача; *5* — салазки; *6* — электродвигатель

Как установлено экспериментами, пульсирующая струя обладает несколько повышенной эффективностью разрушения (рис. 8). Правда, к результатам данных исследований следует подходить с некоторой осторожностью, так как при отдельных экспериментах увеличение эффективности находилось в пределах разброса данных. Поэтому, учитывая относительную сложность существующих импульсных устройств, следует высказать сомнение о целесообразности практического использования пульсирующих струй.

Взаимная ориентировка последовательных резов имеет существенное влияние на эффективность разрушения. Для автоматизации процесса ориентировки резов было создано устройство, обеспечивающее

круговое перемещение оси струи в пространстве. Круговое движение струи в сочетании с поступательным перемещением образца обеспечило использование в процессе разрушения явлений скола и увеличение эффективности разрушения примерно на 30%.

Условия формирования струи в конических насадках всегда связаны с наличием сил трения между материалом стенок и жидкостью. Силы трения, направленные противоположно перемещению жидкости, вызы-

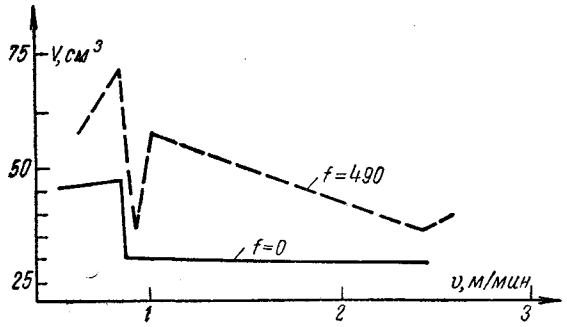



Рис. 8. Влияние пульсаций струй на эффективность разрушения при $p = 50$ *ати*

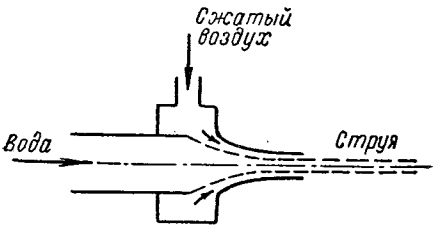



Рис. 9. Схема гидропневматического насадка

вают образование в струе кольцевых вихрей, существенно влияющих на компактность струи, а следовательно, и на дальность ее действия.

Вредное действие сил трения можно ослабить введением между потоком жидкости и стенками насадка сжатого воздуха. Для этого был конструктивно разработан гидропневматический насадок (рис. 9), испытанный при давлении воды 90 *ати* и сжатого воздуха до 6 *ати*. Исследования показали, что при оптимальном давлении воздуха (0,5—1,0 *ати*) эффективность разрушения песчано-цементных образцов увеличивается на 5—15%.

Приведенные выше результаты предварительных экспериментов свидетельствуют о целесообразности дальнейших изысканий в совершенствовании гидропневматических насадков.

## Выводы

1. Разрушение твердого тела при помощи удара струи в неподвижную точку всегда сопровождается образованием жидкостного буфера, резко снижающего эффективность разрушения.

2. Перемещение точки удара по поверхности забоя обусловливает снижение защитной роли жидкостного буфера.

3. Для каждых конкретных условий имеет место оптимальная скорость перемещения точки удара струи по поверхности забоя, при более высоких ее значениях наступает область наиболее эффективного разрушения.

4. Разрушение горных пород подвижной струей воды следует проводить при давлении в системе гидромонитора не меньшем оптимального значения, ниже которого возрастают непроизводительные затраты энергии.

5. Последовательные резы, образуемые подвижной струей, с целью использования явления скола, должны быть соответствующим образом ориентированы.

6. Эффективность водяных струй может быть повышена использованием устройств с вращающимся насадком и гидропневматических насадков (рис. 9).