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

РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СТРУЕЙ ВОДЫ

В. Д. Колчанов, Л. П. Северин

При конструировании добычных и проходческих горных машин, работающих на принципе гидроотбойки, важно знать зависимость производительности и энергоемкости разрушения твердых тел струей воды от скорости перемещения оси струи относительно забоя, от давления воды перед насадком, а также от других параметров (радиуса

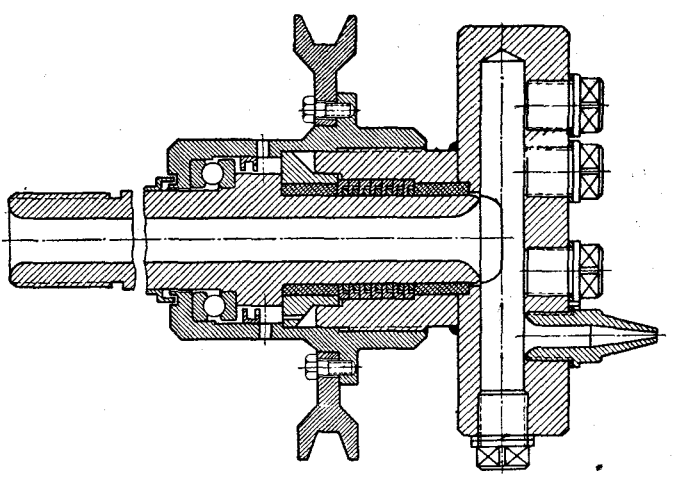


Рис. 1. Схема механизма для получения вращающейся струи

вращения насадка, расстояния от насадка до разрушаемого тела и т. д.).

Решением некоторых из этих вопросов занималась лаборатория гидроотбойки Ленинградского горного института в 1958 г. Специально сконструированный (В. С. Берсеневым и др.) механизм (рис. 1) обеспечивал вращательное движение водяной струи. Съемные насадки к механизму имели диаметры выходного отверстия 2,6; 2,9; 3,4 и 3,7 *мм*. Наличие нескольких сменных приводных шкивов и четырех отверстий под на-

садки, расположенных на расстоянии 15, 30, 45 и 60 *мм* от оси вращения механизма, позволяли изменять в широких пределах окружные скорости перемещения струи по образцу из разрушаемого материала. Одновременное опускание с заданной скоростью рабочего стола испытательного стенда, на котором закреплялся испытуемый образец, давало возможность получать циклоидальный вруб. Насосный агрегат ГБ-354 позволял проводить эксперименты при давлении воды перед насадком до 200 *ати*.

Первые же опыты показали, что конструкция механизма для получения вращающихся струй, в котором струя делала два поворота по 90° каждый, не обладает совершенством. Распыление струи получалось значительно большим, чем при простом коническом насадке, установленном по оси нагнетающей трубы. Качество и эффективность струи без вращения неодинаковы для различных радиусов установки насадка при равных прочих условиях. Это следует учитывать при конструировании исполнительных органов гидродобычных горных машин. В наших опытах наилучшие результаты достигались при установке сменного насадка на радиусе 15 или 60 *мм*. При радиусе 45 *мм* эффективность струи без вращения оказалась примерно в 1,7 раза, а при радиусе 30 *мм* почти в 3 раза ниже, чем при 15 и 60 *мм*.

Для большинства опытов в качестве разрушаемого материала применялась цементно-песчаная смесь, из которой делались кубы размером $20\times20\times20$ *см*. Образцы с прочностью на раздавливание от 40 до 150 *кг/см*^{2} изготовлялись смешиванием глиноземистого цемента марки 400 и песка в пропорции от 1 : 12 до 1 : 5. Механическая растворомешалка, использованная для приготовления смеси, позволяла достичь большой однородности кубов. Серии контрольных образцов размером $7\times7\times7$ *см*, которые брались из каждой партии кубов, давали при раздавливании на прессе довольно устойчивые показатели прочности.

Как установлено экспериментами, разрушение образцов вращающимися струями происходит более эффективно и с меньшей удельной затратой энергии, чем невращающимися. Решающее влияние на энергоемкость процесса разрушения оказывает скорость перемещения образца относительно оси вращения струи. При увеличении этой скорости энергоемкость разрушения приближается асимптотически к своему минимуму (рис. 2). Для образцов с прочностью на раздавливание от 60 до 140 *кг/см*^{2} расход энергии на разрушение единицы объема материала становится близким к минимальному при скорости перемещения образца от 0,1 до 0,4 *м/сек*. В описываемых опытах окружная скорость струи $\left(u = \frac{\pi Rn}{30}\right.$, где n — число оборотов в 1 *мин* насадка; R — радиус вращения оси насадка) менялась от 0,4 *м/сек* и выше, т. е. все время была в области, близкой к минимальной энергоемкости. Увеличение эффективности струи при вращении объясняется, по-видимому, появлением в этом случае второй обнаженной плоскости. Струя, вращающаяся с некоторой окружной скоростью, например 0,4 *м/сек*, при одновременной подаче вдоль образца производит за одно и то же время воздействия большее разрушение, чем струя, которая имеет относительно образца только поступательное движение с той же абсолютной скоростью 0,4 *м/сек*.

Таким образом, с точки зрения производительности гидроотбойки вращающейся струе следует отдавать предпочтение перед двигающейся лишь поступательно. Движение насадка по циклоиде, т. е. вращение его при непрерывной поступательной подаче вдоль забоя, позволяет

простейшим образом обеспечить обработку разрушающей струей всей обнаженной поверхности полезного ископаемого или породы в забое.

Как видно из рис. 2,при уменьшении скорости подачи ниже 0,1—0,05 *м/сек* энергоемкость процесса разрушения резко возрастает. Это объясняется, очевидно, тем, что при малых скоростях подачи значительная часть сечения вращающихся и невращающихся струй попадает на наклонную поверхность образующегося по ходу струи уступа. Это снижает эффективность разрушения. При малых скоростях получается более глубокая выемка, где создается значительная водяная подушка, которая также снижает разрушающее действие струи. Следовало бы ожидать, что существует оптимальная скорость подачи на один оборот

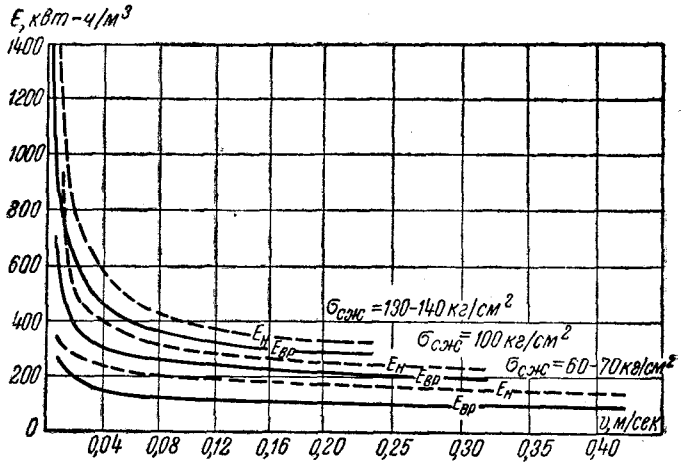


Рис. 2. Зависимость удельной энергоемкости разрушения вращающейся $E_{вр}$ и невращающейся $E_{н}$ струями от скорости перемещения образца при постоянной окружной скорости вращения:

p=200 *атм*, d_0=2,9 *мм*; R=15 *мм*; u=0,39 *м/сек*; l=1 *м*

струи, при которой энергия на разрушение единицы объема материала данной прочности оказывается минимальной. Однако из-за большого разброса данных эксперимента при высоких скоростях перемещения образца численно определить оптимальную скорость подачи пока не удалось.

Таким образом, при окружных скоростях вращения струи свыше 0,4 *м/сек* решающее влияние на производительность отбойки оказывает величина подачи, которая должна выбираться такой, чтобы глубина выемки, производимой за один проход исполнительного органа, была по возможности малой.

Опыты по разрушению образцов двумя струями, получаемыми при одновременном вращении параллельных насадков, показали, что эффективность отбойки в этом случае в значительной степени зависит от взаимного расположения насадков. Наибольшая производительность разрушения в наших опытах достигалась при установке обоих насадков по одну сторону от оси вращения с расстоянием 30 *мм* друг от друга. Естественно, что наивыгоднейшая комбинация расположения насадков должна определяться для параметров каждой проектируемой машины особо.

Расход энергии на разрушение водяной струей единицы объема неодинаков для материалов различной прочности. С целью установления характера зависимости

$$E = f(\sigma_{сж}),$$

где E — удельная энергоемкость разрушения;

$\sigma_{сж}$ — предел прочности на сжатие материала,

брались партии образцов с временным сопротивлением $\sigma_{сж} = 40$; 80; 105; 120 и 150 *кг/см²*. Разрушение производилось при давлении $p = 200$ *атм*, насадке диаметром $d_0 = 2{,}9$ *мм*, расстоянии от насадка до образца $l = 1$ *м* при неподвижной оси струи. Скорость опускания рабочего стола стенда с образцами бралась различной, но до 0,77 *м/сек*. Время опускания рабочего стола стенда, по которому вычислялась скорость подачи образца, определялось электрическим секундомером. Разрушенный объем, как и в предыдущих опытах, измерялся засыпкой образовавшейся выемки сухим песком из мензурки.

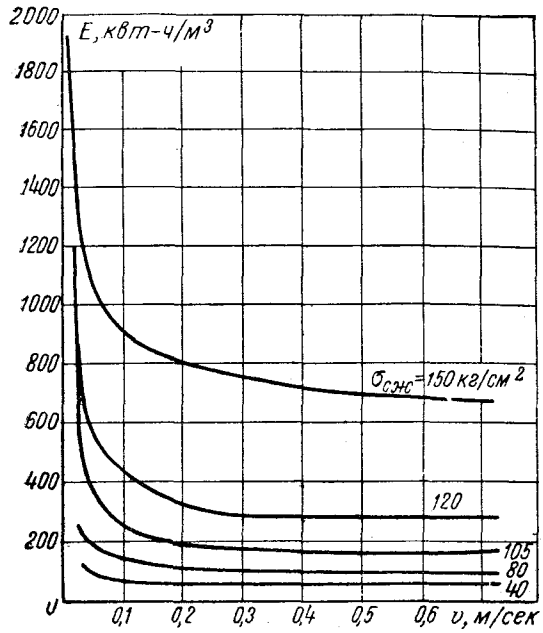


Рис. 3. Зависимость удельной энергоемкости разрушения цементно-песчаных образцов различной прочности от скорости относительного перемещения водяной струи:

$d_0 = 2{,}9$ *мм*, $p = 200$ *атм* = const; $l = 1$ *м*; $v_{ст}$ — скорость опускания рабочего стола стенда

По результатам экспериментов были построены кривые $E = f(v)$ для образцов различной прочности (см. рис. 3). На каждом образце делалось 12 резов, что давало 12 точек на графике. Каждая кривая строилась по результатам испытаний целой партии образцов данной прочности. Полученные кривые показывают, что при скоростях подачи выше 0,1—0,2 *м/сек* для образцов малой прочности и выше 0,3—0,4 *м/сек* для образцов большой прочности энергоемкость разрушения остается почти постоянной и близкой к минимальной. Уменьшение скорости приводит к резкому снижению эффективности разрушения, т. е. к увеличению удельной энергоемкости процесса. Для образцов с пределом прочности 40—90 *кг/см²* скорости ниже 0,03—0,02 *м/сек* оказались невыполнимыми, так как при этом струя прорезает разрушаемый кубик насквозь. Наоборот, при прочности 120 и 150 *кг/см²* исследования на больших скоростях затруднены тем, что объемы разрушения получаются малыми, а это сильно увеличивает погрешности измерений и разброс точек на графике.

На основании кривых $E = f(v)$ построены (рис. 4) графики $E = F(\sigma_{сж})$ для разных скоростей перемещения образца относительно струи. Удельная энергоемкость разрушения, как видно из рисунка, связана с прочностью материала некоторой криволинейной зависимостью.

Чем выше прочность, тем быстрее возрастает энергоемкость. При постоянных параметрах струи, начиная с некоторой величины прочности, энергоемкость будет бесконечно большой, т. е. разрушения не происходит. По характеру кривых рис. 4 можно заключить, что с уменьшением прочности до нуля кривые энергоемкости не придут в начало координат, а пересекут ось ординат в некоторой точке выше нуля. Можно предположить, что это будет энергия, необходимая для выноса отделяемых частиц, которые обычно отлетают от образца с большой скоростью.

Весьма важным для теории и практики гидроотбойки является вопрос о рациональном использовании мощности струи, т. е. об оптимальном соотношении между расходом струи и ее напором перед выходом

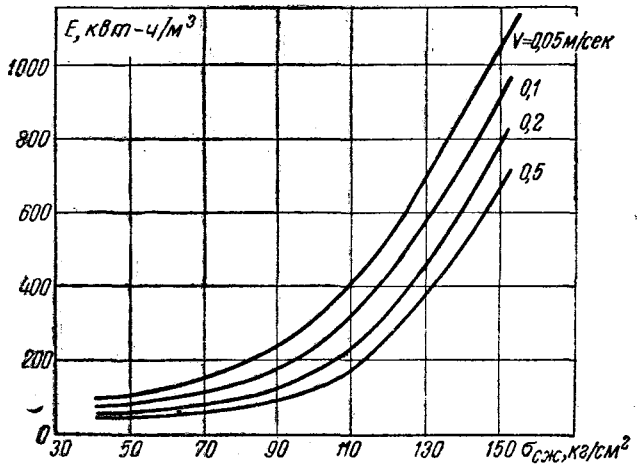


Рис. 4. Зависимость удельной энергоемкости разрушения от прочности образцов при разных скоростях их опускания относительно оси струи:
d_0=2,9 *мм*; p=200 *ати*; l=1 *м*

из насадка. Всегда ли, например, целесообразно стремиться к увеличению давления воды перед насадком или иногда выгоднее за счет той же потребляемой мощности повысить расход струи при неизменном давлении? Чтобы проверить правильность постановки такого вопроса, в лаборатории гидроотбойки ЛГИ была произведена первая серия экспериментов с водяными струями, вылетающими из конических насадков, имеющих угол конусности 13° и диаметры выходных отверстий, равные 2,6; 2,9; 3,4 и 3,7 *мм* при неизменной мощности струи N.

Переменными параметрами струи в данной серии опытов, помимо диаметров насадков, являлись давления и расходы. Разрушению последовательно подвергались образцы с пределом прочности на раздавливание 100, 80 и 50 *кг/см²* при полезной мощности струи 9,7; 16 и 17,6 *квт*. Образцы перемещались вертикально относительно струи, на расстоянии от насадка 1,2 *м*, с одинаковой во всех случаях скоростью 0,2 *м/сек*. Для уменьшения ошибки на каждой грани образца производилось по два-три реза с одинаковыми параметрами струи. Давление для каждого из насадков при $N = \text{const}$ определялось на основании следующих соображений.

Полезную мощность водяной струи можно приближенно выразить формулой

$$N = \frac{10QP}{102}, \ квт,$$

где P — давление перед насадком, $кг/см^2$;
Q — расход струи, $л/сек$;

$$Q = v\frac{\pi d_0^2}{4},$$

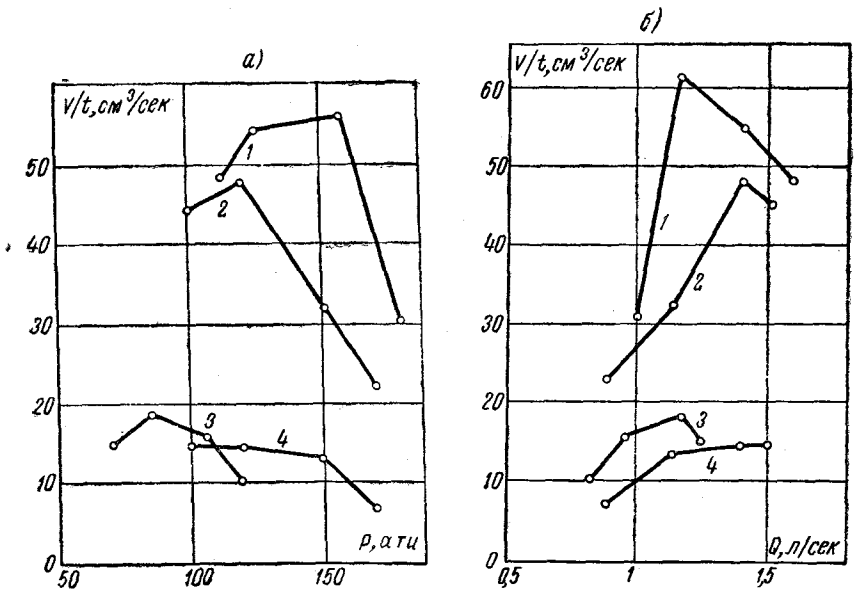


Рис. 5. Зависимость производительности разрушения:
а — от давления струи; *б* — от расхода струи; *1* — N=17,5 *квт*, $\sigma_{сж}$=50 *кг/см²*; *2* — N=16 *квт*, $\sigma_{сж}$=50 *кг/см²*; *3* — N=9,7 *квт*, $\sigma_{сж}$=80 *кг/см²*; *4* — N=16 *квт*, $\sigma_{сж}$=100 *кг/см²*

где v — скорость струи на выходе из насадка;

$$v = \sqrt{20pg}, \ м/сек.$$

Совместное решение трех приведенных уравнений при $N = \text{const}$ дает следующую зависимость, которой удобно пользоваться для определения необходимого давления при известном значении d_0

$$p = \frac{K}{\frac{4}{d_0^3}}, \ атм,$$

где K — постоянная величина;

$$K = \left(\frac{400 \cdot 102N}{\pi\sqrt{20g}}\right)^{\frac{2}{3}}.$$

При $N = 17{,}5$ *квт* величина $K = 645$. Указанная здесь мощность была выбрана, исходя из возможной производительности насоса ($Q =$

$= 1{,}6$ *л/сек*), которой обеспечивается при максимальном диаметре испытуемого насадка ($d_0 = 3{,}7$ *мм*) давление 112 *ати*.

При $K = 645$ и $N = 17{,}5$ *квт* были получены:

$p = 180$ *ати* для $d_0 = 2{,}6$ *мм*
$p = 157$ „ „ $d_0 = 2{,}9$ „
$p = 125$ „ „ $d_0 = 3{,}4$ „
$p = 112$ „ „ $d_0 = 3{,}7$ „

Аналогичным образом были подсчитаны значения давлений перед насадками указанных размеров при мощности струи 9,7 и 16 *квт*.

Результаты этой серии опытов, представленные графиками рис. 5, *а*, показывают, что при $N = \text{const}$ для разрушаемых образцов с определенными механическими свойствами максимуму производительности гидроотбойки отвечает вполне определенное давление.

Результаты этих же опытов, представленные на рис. 5, *б* в виде зависимостей $\frac{V}{t}$ в функции расхода струи Q при неизменной ее мощности, свидетельствуют о том, что разрушаемым материалам различной крепости отвечают вполне определенные оптимальные расходы и что возрастание последних при постоянной мощности струи в ряде случаев может привести лишь к повышению удельной затраты энергии.

Дальнейшие исследования, проведенные для более широкого диапазона параметров напорной водяной струи и прочности материала, должны выявить общую закономерность рационального расходования мощности напорных водяных струй и дать возможность заранее определять оптимальные параметры гидромониторной установки.