Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XXXIV, вып. 1, 1957 г.

НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ УГЛЕЙ СТРУЕЙ ВОДЫ

В. И. Геронтьев

Применение гидромеханизации при разработке угольных месторождений подземными работами, предложенное В. С. Мучником, поставило перед горной наукой ряд новых задач. Одной из крупнейших задач в этой области является изучение факторов, определяющих эффективность воздействия водяной струи на массив угля или породы, так как только в результате такого изучения возможно как совершенствование процесса гидравлического разрушения угля и породы (гидравлической отбойки), так и расширение области рационального применения гидромеханизации. Немаловажное значение имеет и вопрос об энергоемкости процесса разрушения углей струей воды. Часть этих работ выполнялась в лабораториях Ленинградского горного института.

Сложность изучаемых вопросов привела к необходимости разделить выполняемую работу на ряд последовательных стадий, что, впрочем, частично вызывалось и техническими возможностями лабораторий. Как следует из литературных источников, вопросы ударного разрушения углей нельзя считать достаточно изученными, и на основании отрывочных данных, найденных в результате изучения частных случаев разрушения, нельзя даже составить предварительных представлений о механизме разрушения и сформулировать такую научную гипотезу, которая могла бы служить путеводной нитью хотя бы на первом этапе исследований. Поэтому необходимо было вначале выявить характер ударного разрушения углей и горных пород, чтобы наметить в общих чертах гипотезу механизма ударной разрушаемости.

В первую очередь исследовался процесс статического и ударного разрушения образцов угля некоторых пластов Кузнецкого бассейна и образцов, изготовленных или из структурно более простых горных пород (глинистый и тальковый сланец, гипс, соль и др.), или из искусственных материалов (стекло, алебастр, цемент, материалы с искусственно созданной слоистостью). Целью этих исследований, имеющих вспомогательное значение, было изучение сущности процесса разрушения и разработка гипотезы разрушения горных пород ударом, а также установление основных зависимостей между затрачиваемой и используемой при разрушении энергией и общих представлений об энергоемкости ударного разрушения горных пород [2].

Было установлено качественное подобие процессов разрушения образцов статической (на прессах) и ударной (на копрах) нагрузкой при

резком различии течения процесса во времени. Разрушение ударом протекает весьма бурно: средняя продолжительность разрушения около 1/380 сек. Наблюдается ряд последовательных, закономерно сменяющих друг друга фаз.

На первой фазе ударного разрушения происходит погружение ударника в уголь в среднем на 2 *мм* (при высоте образца 70 *мм*) без появления видимых трещин на поверхности образца. Замеренная при экспериментах скорость внедрения ударника в уголь изменяется от 1,5 *м/сек* в начальный период внедрения до 0,9—3,2 *м/сек* в конечный (т. е. в разных условиях происходит или ускорение или замедление внедрения). Наибольшие скорости отмечены при направлении удара вдоль напластования и под углом к кливажу. Общая продолжительность первой фазы в среднем 1/1200 сек.

Во второй фазе разрушения возникают и развиваются трещины — от ударника к граням образца и от грани, по которой нанесен удар, к основанию. Первичная трещина развивается в направлении удара. Скорость ее развития в начальный момент в среднем около 170 *м/сек*, затем постепенно уменьшаясь, в конечный момент составляет в среднем около 35 *м/сек*. Вторичные трещины секут образец в направлении к местным нарушениям и по плоскостям отдельности. Скорость их развития всегда меньше, чем у первичных: в начальный момент около 115 *м/сек* и в конечный — около 20 *м/сек*. Наибольшие скорости развития трещин наблюдаются при клиновидном ударнике или при большой скорости удара и большой его энергии при направлении удара вдоль напластования. Длительность второй фазы в среднем 1/640 сек.

В третьей фазе разрушения происходит распад образца (отход кусков). После раскрытия трещин из зоны контакта ударника с образцом начинается интенсивный поток мелких частиц угля, выбрасываемых в направлении главных трещин. Характер разлета и сползания мельчайших частиц позволяет считать, что в зоне под ударником при свободном падении бабы некоторое количество угля разрушается полностью.

Сопоставление данных исследований, полученных путем визуальных наблюдений и скоростной киносъемки, позволило представить процесс разрушения в следующем виде. При внедрении ударника первоначально происходит смятие материала и образование под ударником уплотненного ядра. При этом не весь материал в ядре дробится до мелочи, часть его сохраняет свою первоначальную структуру. В дальнейшем происходит постепенное нарастание деформаций уплотненного ядра, что приводит к образованию трещин внутри образца — под ядром. Эти первые трещины обходят уплотненное ядро и в процессе своего развития выходят на поверхность образца. Появление трещин изменяет состояние ядра и образца в целом, так как напряженное состояние различных частей становится неодинаковым. Части ядра, находящиеся против трещин, получают возможность деформироваться в стороны от направления удара и выделяются в форме оперений клина, получающегося под ударником при разрушении образца. Эти оперения по форме напоминают оперения аэростата (рис. 1 и 2).

Первоначальное наше предположение о том, что процесс разрушения может быть объяснен гипотезой гидростатически действующего уплотненного ядра, как показали дальнейшие исследования, не отражает действительного механизма разрушения образца. Наличие в ядре выпадающих при разрушении твердых клинообразных частиц свидетельствует о том, что ядро в процессе разрушения остается твердым и не может действовать на соприкасающиеся с ним части образца подобно идеальной жидкости. Едва ли можно считать, что образец разрушается за счет

клиновидного действия ядра; вернее, клин является не причиной, а только формой разрушения. Вместе с тем роль ядра остается весьма существенной, но и более сложной; основное значение приобретают деформации ядра. Поэтому в настоящее время, может быть не вполне точно, наша рабочая гипотеза называется «гипотезой предельных деформаций уплотненного ядра». Ряд специально поставленных исследований

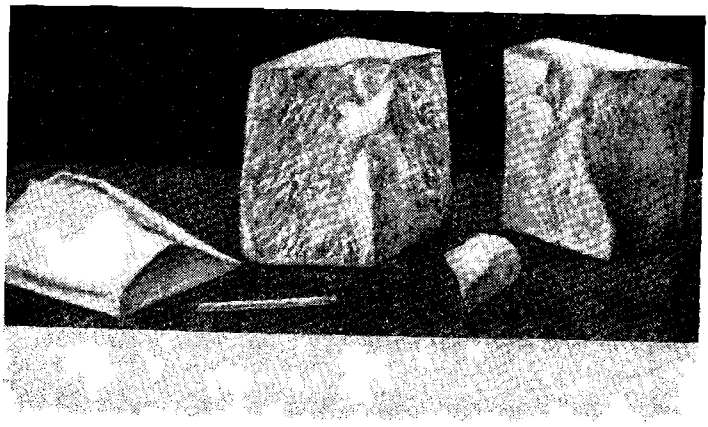


Рис. 1. Разрушение ударом образца из алебастра. Клин с оперением

показал, что не может быть принята и высказываемая некоторыми исследователями гипотеза ударной волны.

Лабораторные определения количественных характеристик процесса разрушения показали, что коэффициент технического использования

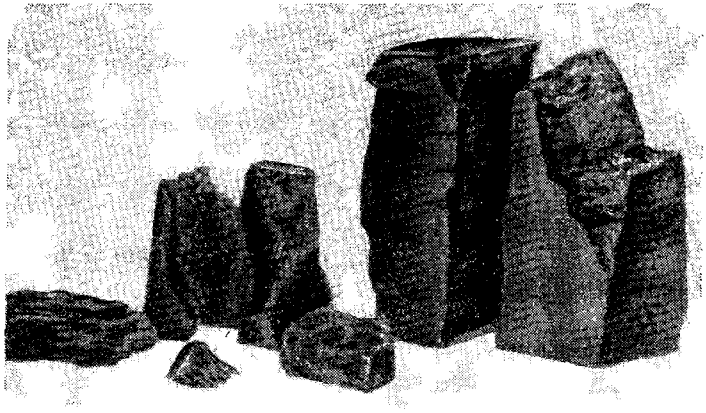


Рис. 2. Разрушение ударом угольных образцов

энергии удара при разрушении является величиной переменной. Его значение меняется в зависимости от величины энергии, скорости ударяющего тела и размеров образца. По мере возрастания этих факторов коэффициент технического использования энергии удара снижается вначале резко, а затем более постепенно и, вероятно, стремится к некоторому пределу. Энергоемкость процесса разрушения образцов также является переменной величиной, зависящей, при прочих равных условиях, от

скорости приложения нагрузки и энергии ударяющего тела. Это может быть объяснено повышением сопротивляемости материала при повышении до определенных пределов скорости нагружения и энергии. Дальнейшее повышение этих величин приводит к снижению коэффициента технического использования энергии вследствие непропорциональности возрастания сопротивления образца и повышения скорости и энергии ударяющего тела.

Энергоемкость разрушения угольных образцов статической нагрузкой в 1,3—6 раз ниже разрушения ударной нагрузкой (в зависимости от типа ударника и направления действия нагрузки). Это уменьшение не может быть объяснено меньшей степенью дробления, так как сравнение производилось при одинаковом, примерно, характере разрушения в обоих случаях. Однако длительность процесса разрушения при ударной нагрузке в тысячи раз меньше, чем при статической, что является решающим фактором. Энергоемкость при разрушении образцов угля ударной нагрузкой поперек слоистости выше, чем при разрушении вдоль слоистости. Это увеличение невелико и при минимальных значениях энергии разрушения обычно не превышает 1,3.

На втором этапе работ исследования производились на шахтах Кузнецкого бассейна. Основной задачей этих работ было исследование процесса разрушения угля в массиве и установление тех зависимостей, выявление которых при лабораторных опытах было невозможным. Необходимо подчеркнуть, что при шахтных исследованиях не ставилось цели получения исходных данных для конструирования механизмов ударного действия. Сконструированные и изготовленные у нас приборы были маломощными, в сущности говоря лабораторными, лишь приспособленными для работы в шахте, поэтому и результаты исследований, если их относить к задачам конструирования ударных механизмов, были недостаточно представительными [3].

Результаты экспериментов этой группы во многом подтвердили правильность выводов о механизме образования уплотненного ядра и развития его деформаций, полученных при лабораторных исследованиях процесса разрушения образцов горных пород и углей.

Исследование энергоемкости разрушения углей Кузнецкого бассейна ударной нагрузкой показало, что величина удельной энергоемкости колеблется в широких пределах и зависит от значительного числа факторов. Важнейшим и решающим из них является «плечо удара» (расстояние от точки приложения ударной нагрузки до второй обнаженной плоскости), от величины которого в наибольшей степени зависит также и эффективность разрушения. В результате обработки данных более чем 200 экспериментов на пластах Спорном и Мощном, проведенных при скорости приложения ударной нагрузки 4,4 *м/сек,* были построены кривые зависимости $E = f(l)$ для каждого значения работы удара и получено семейство кривых параболического характера (рис. 3). По этим кривым видно, что для каждого значения работы удара (данного инструмента) существует некоторое оптимальное значение плеча l, при котором удельная работа разрушения является минимальной. По мере увеличения работы удара значение $l_{опт}$ возрастает, но, очевидно, только до некоторого предела (рис. 4, кривая *1*). Для сравнения эффективности разрушения угля при различных параметрах ударной нагрузки могут быть использованы только те значения удельной работы разрушения, которые соответствуют минимуму кривой $E = f(l)$. Верхняя ветвь кривой $E = f(A)$ асимптотически приближается к оси ординат. Нижняя ветвь, очевидно, будет асимптотически приближаться к некоторой прямой, параллельной оси абсцисс. Как следует из анализа зависимости $E = f(A)$,

существует некоторое предельное значение работы удара, определяемое физико-механическими свойствами данного угля, с которого начинается область наименее энергоемкого разрушения. Эту величину можно принимать в качестве показателя (характеристики) разрушаемости углей в условиях массива. На рис. 5 приведены кривые, построенные на основании данных исследований на пласте Спорном (кривая *1*) и Мощном (кривая *2*). Из сопоставления минимумов кривых видно, что энергоемкость разрушения угля пласта

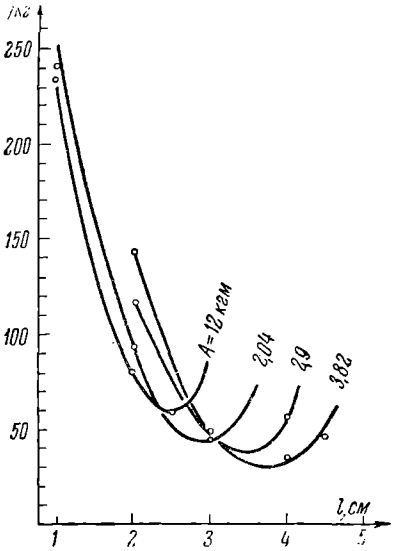


Рис. 3. Зависимость $E = f(l)$

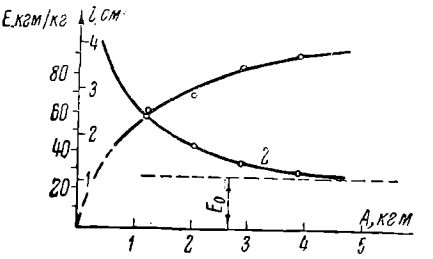


Рис. 4. Зависимость величины удельной работы разрушения от работы отдельного удара: $1 - l_{опт} = f(A)$; $2 - E = f(A)$

Мощного примерно в два раза меньше угля пласта Спорного.

Для исследования зависимости между величиной работы повторных ударов и энергоемкостью разрушения было произведено свыше 400 экспериментов при частоте 500 ударов в минуту и работе отдельных ударов от 0,096 до 0,725 *кгм*. И при этом получено семейство кривых $E = f(l)$ параболического характера (рис. 6), причем с увеличением работы отдельного удара минимум кривых понижается и, следовательно, увеличивается значение $l_{опт}$. Сопоставление количественных показателей процессов разрушения угля одиночными и повторными ударами позволяет сделать вывод, что для второго случая требуется значительно меньшая работа отдельного удара, удельная же работа разрушения в обоих случаях остается примерно одинаковой.

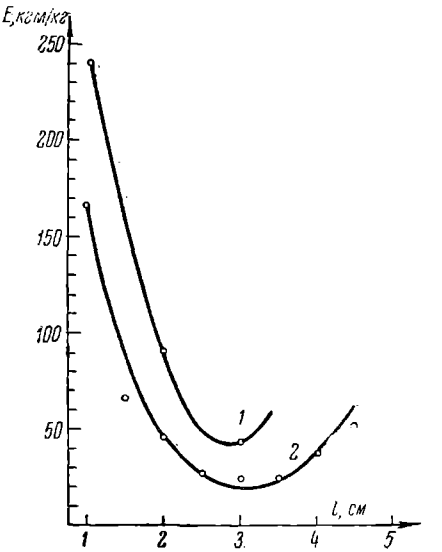


Рис. 5. Энергоемкость разрушения по данным исследования на пластах Спорный (*1*) и Мощный (*2*), $A_y = 2{,}04$ *кгм*

При изучении влияния скорости приложения ударной нагрузки на энергоемкость разрушения проведено около 500 испытаний при значениях v, равных 2,47; 2,82; 3,39 и 4,4 *м/сек*. Построенные по данным этих испытаний графики (рис. 7) показывают, что основные закономерности

изменения функции $E = f(l)$ сохраняются при исследованных скоростях приложения ударной нагрузки. Повидимому, по мере увеличения скорости приложения ударной нагрузки увеличивается (вероятно, в некоторых пределах) и эффективность разрушения. Исследования влияния частоты приложения ударной нагрузки на энергоемкость разрушения показали, что для угля пласта Мощный оптимальная частота составляет 1600—1800 ударов в минуту. Дальнейшее увеличение частоты ударов приводит

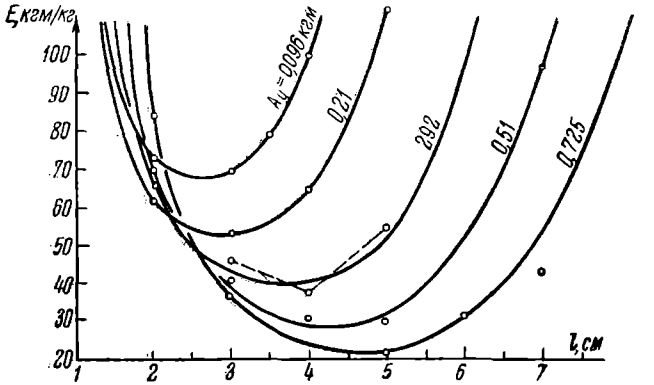


Рис. 6. Зависимость $E = f(l)$ при пяти значениях работы удара. Частота ударов — 500 в 1 мин.

к увеличению удельной энергоемкости (рис. 8). Это, повидимому, является следствием образования впереди ударника своеобразного буфера (подушки) в виде массы измельченного угля, представляющей собой продукт распада уплотненного ядра.

Исследования процесса и энергоемкости разрушения углей и горных пород при механическом ударном воздействии позволили, с одной стороны, выявить ряд закономерностей, имеющих и теоретическое и практическое значение, а с другой — более обоснованно и с большей подготовкой подойти к работам на наиболее для нас сложном третьем этапе — к исследованию процесса и энергоемкости разрушения горных пород и углей струей воды. Априорно можно утверждать, что эффективность и энергоемкость процесса разрушения в данном случае зависит: 1) от физико-механических характеристик разрушаемого тела, т. е., углей и горных пород; 2) от гидравлических свойств струи и, в частности, от ее структуры, кинематики и динамики; 3) от способа приложения нагрузки и характера воздействия струи воды на массив горной породы.

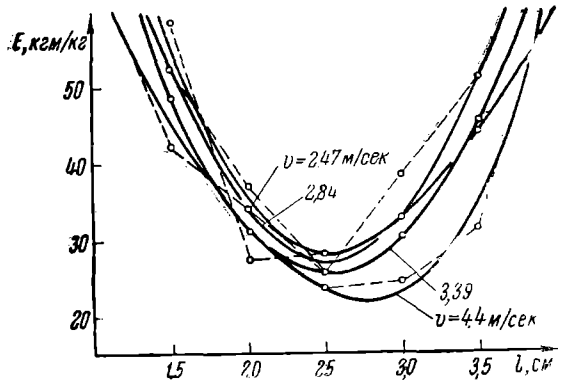


Рис. 7. Зависимость $E = f(l)$ при различных скоростях приложения ударной нагрузки

Физико-механические характеристики горных пород вообще и ископаемых углей в частности весьма разнообразны. Изучение этих характеристик ведется широким фронтом, но и в настоящее время еще нельзя считать его полностью законченным. Как показали наши исследования,

такой сводный показатель, каким можно считать энергоемкость разрушения, для двух смежных пластов на одной и той же шахте (пласты Спорный и Мощный) резко различны. Многочисленные примеры из практики горного дела свидетельствуют о том, что физико-механические характеристики угля одного и того же пласта резко меняются по падению и простиранию и, более того, могут быть совершенно различными даже в одном и том же разрезе по мощности пласта. Следовательно, для обеспечения хорошей эффективности разрушения углей при гидромеханизации выемки необходимо детально изучить и гидравлические свойства струи, и способы воздействия струи на уголь, чтобы соответствующим образом комбинируя факторы, определяющие эти параметры, находить для каждого частного случая наилучшие решения. Вполне понятно, что изучение этих параметров в первую очередь необходимо было производить только в лабораторных условиях. В соответствии с этим основными направлениями наших исследований были: 1) изучение структуры, кинематики и динамики незатопленных струй относительно высокого давления; 2) изучение энергоемкости разрушения твердых тел и, в частности, крепких углей струей воды в целях выявления наиболее рациональных характеристик струи и способов приложения разрушающей нагрузки к угольному или породному массиву.

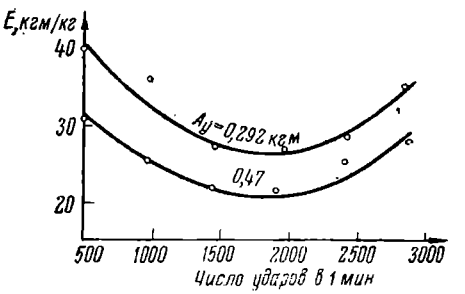


Рис. 8. Зависимость удельной энергоемкости от числа ударов в минуту

Кроме того, необходимо было произвести и теоретические исследования процесса разрушения углей струей воды, хотя бы основанные на некоторых допущениях и предположениях. Эти исследования должны были не только обобщить материалы наших экспериментальных работ и работ, выполненных научными сотрудниками отдела гидродобычи КузНИУИ, но и проложить некоторые вехи к постановке дальнейших опытов. Этим определялось третье направление наших исследований — теоретическое обобщение материалов лабораторных исследований.

В начале работы [1] по изучению структуры струи и энергоемкости процесса разрушения углей производились с недостаточно совершенным и не всегда соответствующим целям исследования оборудованием. Так, в лаборатории гидромеханизации был установлен насос М 100/30 производительностью 100 *л/мин* при номинальном рабочем давлении 30 *атм.* Правда, это давление соответствовало тому напору, при котором производится разрушение струей воды угля на гидрошахтах, но оно было совершенно недостаточно для определения наиболее рационального напора.

Для установки приборов и образцов был изготовлен простейший конструкции стенд с ручной установкой стола и применен также простейшей конструкции отсекатель с ручным управлением. Это не обеспечивало необходимой степени точности определения длительности периода воздействия струи воды на образец и позволяло только приближенно находить значения энергоемкости процесса разрушения. Для изучения структуры струи производилась скоростная киносъемка камерой СКС-1 с частотою до 4000 кадров в секунду. Такая частота съемки оказалась недостаточной для выявления структуры струи, так как не было получено

[1] В этот период ответственным исполнителем работ по теме был Я. Б. Кальницкий, исполнителями — К. Г. Асатур, В. С. Берсенев и др.

достаточно четких кадров. Измерение силы струи определялось при помощи пружинного динамометра визуально, что также не могло обеспечить получения точных данных, и т. д. Все это не могло не оказать влияния на результаты исследований, но все же и на этом этапе некоторые качественные зависимости были определены достаточно точно.

В процессе дальнейшей работы оборудование лаборатории гидромеханизации было полностью обновлено: установлен насос марки ГБ-354 производительностью 100 *л/мин* при давлении до 200 *атм*, заново сконструирован испытательный стенд с гидравлической системой подъема и опускания его рабочего стола, изготовлен мощный электронный усилитель для исследований с записями на шлейфном осциллографе МПО-2, приобретен и смонтирован ряд ценных приборов и аппаратов. Все это позволило провести вторую половину исследований [1] на более высоком техническом уровне.

I. **Исследование водяных струй.**[2] Серьезным моментом при исследовании водяных струй был вопрос о конструкции насадок. Дебит насоса позволял применять насадки диаметром на выходе не выше 5 *мм*. Поэтому применялись насадки с выходным отверстием преимущественно около 3 *мм*.[3] В результате исследования значительного числа насадков различного профиля нами установлено, что наилучшие результаты получаются при конических насадках без криволинейного сопрягающего участка в начале и без цилиндрического участка в конце. Угол конусности насадков различных диаметров для одного и того же гидромонитора различен. Если исключить данные Д'Обюиссона и Кастеля [5], опыты которых производились при напоре 3 *м*, то все исследователи высоконапорных струй (В. М. Сухаревский, В. С. Мучник [5, 4]) указывают на отсутствие ощутимого влияния угла конусности в определенном диапазоне его изменения на характер изменения струи. Принятый нами угол конусности насадков 11—13° давал наименее распыленную струю.

Во всех струепроизводящих установках обязательной деталью считаются стабилизаторы (иногда называемые турбулизаторами), устанавливаемые в трубопроводе перед насадком и предназначенные для устранения осевого закручивания струи. По визуальным наблюдениям, а также по изучению кадров киносъемки, полученных при частоте до 4000 кадров в секунду (рис. 9) создалось впечатление стремительного вращения струи, поверхность которой при работе без стабилизатора образует как бы своеобразный «жидкий винт». Так как мнения различных исследователей о роли и значении стабилизаторов различны, то было признано необходимым изучить и влияние закрученной струи на эффективность разрушения горных пород; поэтому наши исследования производились и со стабилизатором, и без него. Стабилизатор длиной 1 *м* в форме треугольной звезды, согнутой из листового железа, располагался на прямом участке трубопровода за верхним коленом — в 0,5 *м* от насадка.

На последнем этапе работ применялась предельно высокая современная скоростная киносъемка для изучения структуры и, возможно, кинематики струи и исследовалась динамика струй с помощью тензометрических датчиков, установленных на воспринимающей удар струи пластине и соединенных с осциллографом.

---

[1] Ответственным исполнителем второй части работ по теме в целом был Л. П. Северин.

[2] Руководитель работ данной подтемы К. Г Асатур, исполнители М. Д. Суходрев, К. К. Екимов, П. Д. Коганов, И. М. Пресс и Г. Я. Степанович.

[3] Струи малого диаметра детально изучались КузНИУИ.

При скоростных киносъемках использовалась камера ФП-2 конструкции Л. А. Самурова, фотографирующая со скоростью до 100 000 кадров в секунду.[1] Специальный расчет показал, что для обеспечения необходимой резкости изображения при такой скорости съемки возможно фотографировать струю с предельной скоростью до 120 *м/сек*, что соответствует давлению примерно до 50—60 *атм*. Таким образом, при скоростных киносъемках не использовался весь тот диапазон давлений, который обеспечивался установкой. Однако исследование струй и в указанном выше ограниченном диапазоне давлений позволило установить интересные зависимости. Съемки производились при диаметре выходного отверстия насадков 3,1; 3,9 и 5 *мм* в сечениях струй, находящихся на расстояниях в 125—200 раз больших диаметров насадков. Первоначальными исследованиями при помощи пружинного динамометра установлено, что именно в этих сечениях наблюдается максимум силы струи.

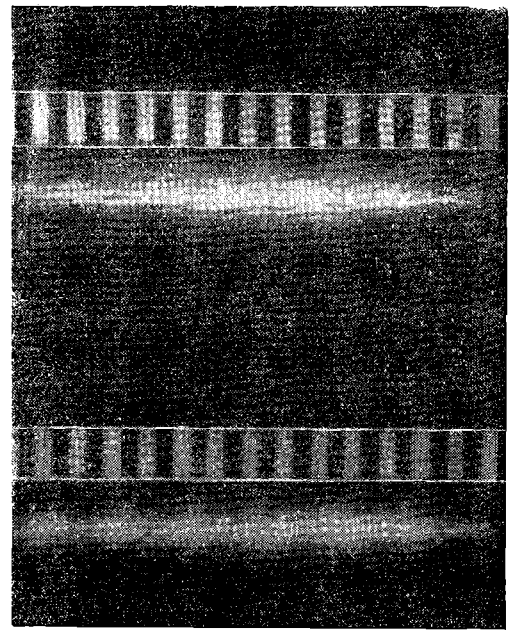


Рис. 9. Фотоснимок струи при частоте съемки 4000 кадров в 1 сек.

Некоторое представление о структуре струи дают приведенные на рис. 10 отпечатки отдельных кадров. При давлении 1,9 *атм* и диаметре насадка 5 *мм* струя имеет в местах углублений толщину 3,9 *мм*, расширения же струи подобны волнам. При давлении в 15 *атм* эти волны приобретают форму языков, концы которых почти не загнуты назад, но сама струя еще остается плотной. При дальнейшем увеличении давлений языки удлиняются и загибаются назад. Частицы воды начинают отрываться от тела струи. Внутри тела струи, вблизи оси, возникают сквозные воздушные полости, которые, достигая ширины порядка 2,5 *мм*, дают начало разрывам струи. Средний диаметр оторвавшихся частиц около 2 *мм*. Они заметны на расстоянии до 8 *мм* от оси струи. Понятно, что плоская съемка, вследствие наложения друг на друга отдельных разорванных областей струй, показывает, несомненно, более плотную структуру, чем это имеет место в действительности.

Исследование скорости движения струи и ее пульсации потребовало покадрового изучения полученных фильмов под микроскопом. Была установлена близость величины скорости струи к значениям, вычисленным по формуле Торричелли. Как видно из графика рис. 11, при коэффициенте скорости $\varphi = 1$, что примерно отвечает средним величинам экспериментальных значений скоростей, опытные точки близко лежат к кривой Торричелли. Интересно, что для давления 15 *атм* 5 раз повторилось значение скорости 50 *м/сек* (при скорости по формуле

[1] Киносъемки производились сотрудниками кинолаборатории института Л. В. Либиным, И. В. Чуркиным и др. при консультации Л. А. Самурова и П. Б. Песнопевцева.

Торричелли 54,3 *м/сек*), а для давления 50 *атм* 5 раз повторилось значение 100 *м/сек* (при теоретической скорости 96 *м/сек*). Остальные же значения имели место лишь по одному разу. При переходе от оси струи к пе-

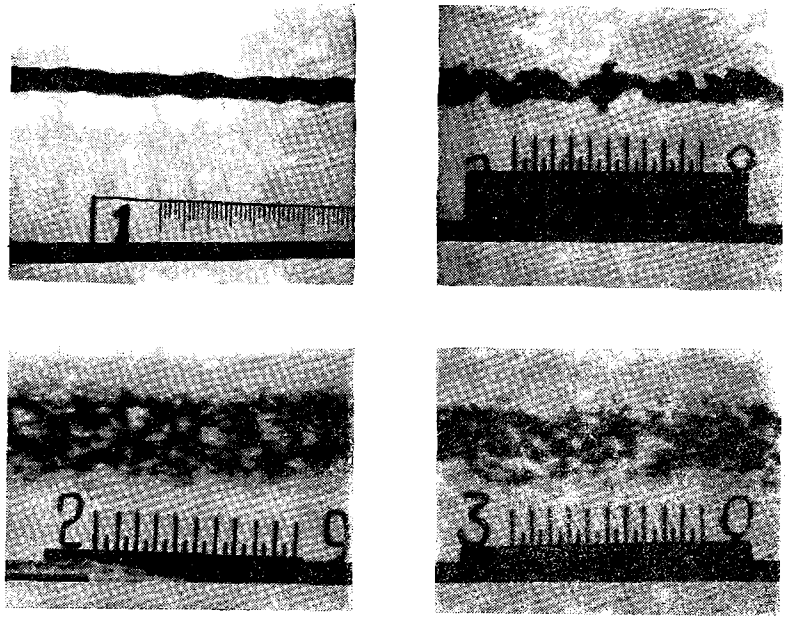


Рис. 10. Структура струи по данным киносъемки при частоте 50 000 кадров в 1 сек.

риферии заметного уменьшения скорости не установлено. Отставание краев языков, наблюдаемое при больших давлениях, относительно невелико. Значения скорости получались одинаковыми при разных диаметрах насадков и оказались не зависящими от применения стабилизаторов.

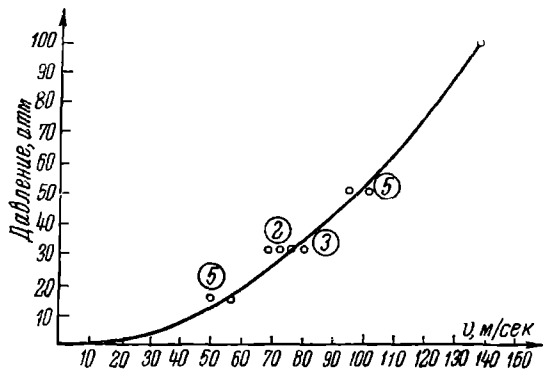


Рис. 11. Зависимость скорости движения струи от давления. Опытные точки близки к кривой Торричелли. Цифры у кривой показывают число точек, попавших в центр

Из графика рис. 12, где приведены данные о частоте волн, видно, что с уменьшением диаметра выходного отверстия насадка и увеличением давления частота пульсации возрастает. Применение стабилизатора уменьшает частоту пульсации. График на рис. 12 получен на основании статистического осреднения данных опытов, так как строгой периодичности в длине всплесков пульсации нет. Частота пульсации меняется от 1000 *гц* при 1,9 *атм* до 7000 *гц* при 100 *атм*. Пульсация не связана с периодичностью работы насоса, которая дает частоту 17 *гц*.

Угол расширения струи установить было трудно в связи с постоянным изменением ее толщины. Он, повидимому, зависит от давления и на

принятом у нас расстоянии от насадка меняется от 7 до 52′ Влияния стабилизаторов на структуру струи установить не удалось.

Для практических целей большое значение имеет исследование динамики свободных незатопленных струй, встречающих на своем пути преграду. Для этого были разработаны конструкции датчиков и схема электронного усилителя. После изготовления и наладки все это было применено в работе совместно с осциллографом МПО-2 * (рис. 13).

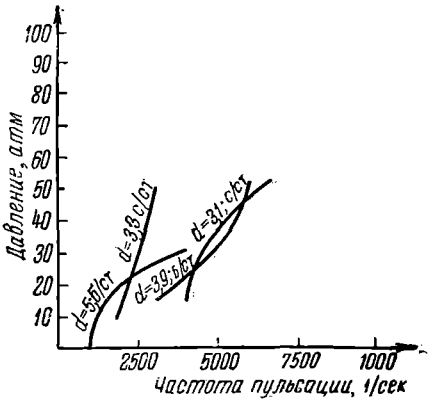


Рис. 12. Зависимость частоты пульсации струи от давления, диаметра насадка и наличия стабилизатора (по данным киносъемок). Значение диаметра усредненное

Работы по осциллографированию имели следующее назначение.

1. Выявление изменчивости силы водяной струи в зависимости от расстояния между диском системы датчиков и выходным отверстием насадка. Для этого были взяты три участка на расстоянии 1,2; 2 и 3 *м* от насадка. Осциллографирование велось при диаметре выходного отверстия насадка 3,2 *мм* и при давлении на выходе 10, 30, 50, 70, 90 и 110 *атм*.

2. Выявление влияния стабилизатора; записи делались только на втором участке.

3. Выявление влияния включенных в гидравлическую систему установки воздушных баллонов; записи делались также только на втором участке.

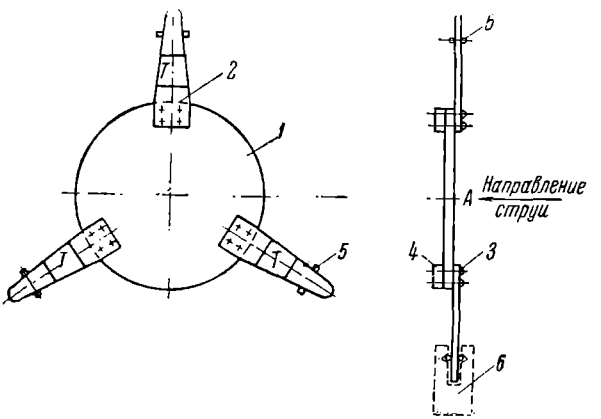


Рис. 13. Схема расположения датчиков при осциллографических исследованиях:

1 — алюминиевый диск; *2* — стальные гибкие полосы с наклеенными на них тензометрами сопротивления; *3*, *4* — винты и накладки для присоединения полос к диску; *5* — стальные каленые штифты; *6* — разрезные колодки для крепления системы датчиков к матрице стола стенда

На рис. 14 приведены три осциллограммы, снятые при давлении струи на выходе 90 *атм* и на расстоянии от насадка 2,0 *м*. Первая относится к струе, полученной без стабилизатора, вторая — к струе, полученной со стабилизатором, и третья — к струе, полученной при включенных воздушных баллонах. Всплески сил на осциллограммах имеют одну и ту же частоту — 17 *гц*, что обусловлено числом ходов поршневого насоса. Включение воздушных баллонов, очевидно, не способствует выравниванию давления. Промежуточные подъемы и спады силы обусловлены, возможно, частотой собственных колебаний датчиков. Ни на одной из полученных осциллограмм не обнаружено пик силы струи в

* В постановке осциллографических исследований приняли участие сотрудники одного из ленинградских институтов Л. И. Михайлов, Ю. Н. Федоров, Б. А. Дубинин и М. Г. Матвеев.

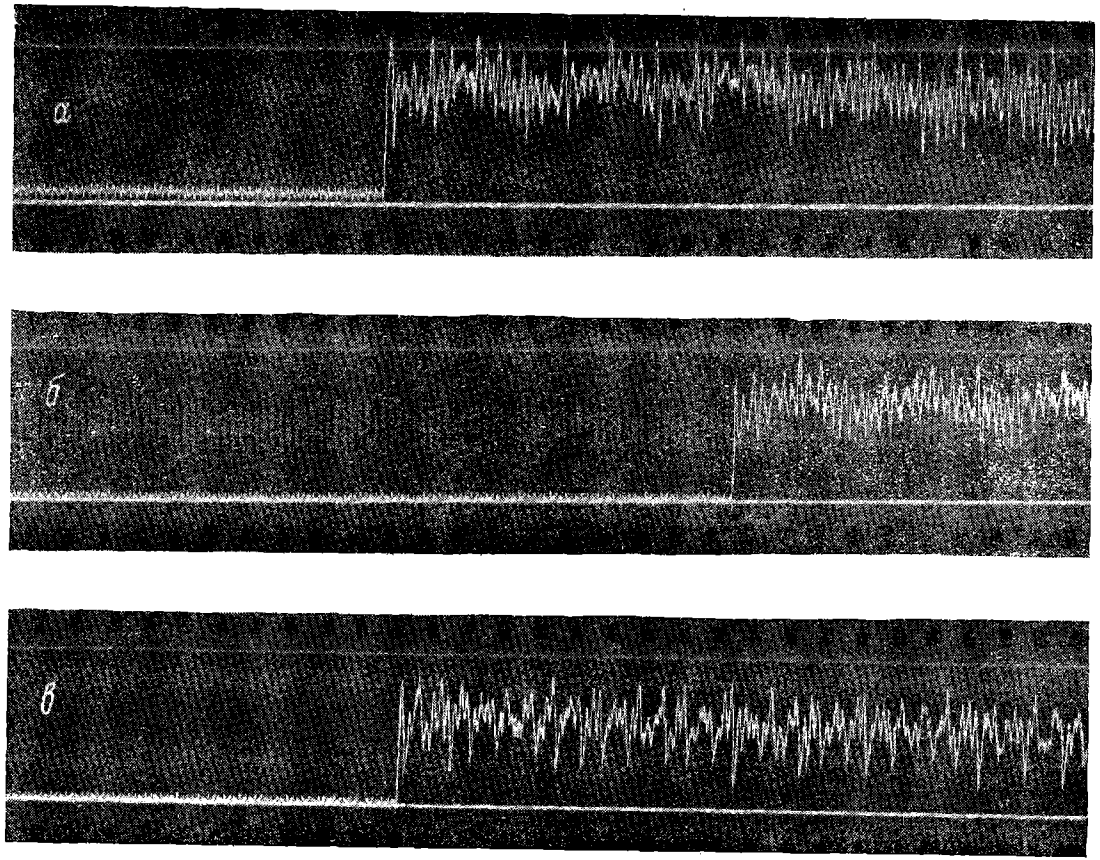


Рис. 14. Осциллограммы:

а — при струе без стабилизатора; *б* – при струе со стабилизатором; *в* — при струе со стабилизатором и включенными воздушными баллонами

момент удара. Возможно, что такие пики силы не удалось записать из-за недостаточно высокой частоты собственных колебаний датчиков.

В результате обработки полученных осциллограмм выяснено следующее.

1. Введение стабилизаторов и воздушных баллонов ухудшает динамические качества струи (рис. 15)

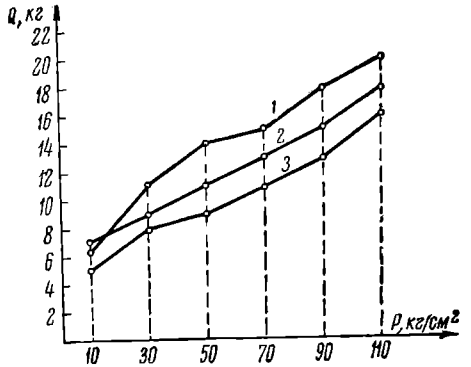


Рис. 15. Диаграммы силы струи:

1 — без стабилизатора; *2* — со стабилизатором; *3* — со стабилизатором и включенными воздушными баллонами. $Q = f(P)$, $L = 2$ *м*, $d = 3{,}2$ *м*, $F = 0{,}08$ *см*²

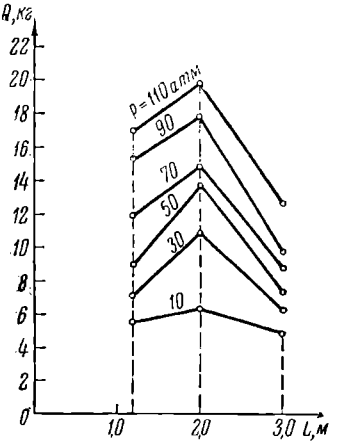


Рис. 16. Зависимость силы струи от расстояния. Струя без стабилизаторов и баллонов. $Q = f(L$ и $P)$, $d = 3{,}2$ *мм*

2. При расстоянии от насадка 2 *м* средние значения силы струи на 20—50% выше, чем при расстоянии 1,2 *м*. Дальнейшее увеличение расстояния до 3 *м* ведет к уменьшению силы струи на 30—40% по отношению к значениям, полученным при расстоянии 2 *м* (рис. 16). Аналогичные оптимумы силы струи получены были и ранее при исследовании силы струи при помощи динамометра. К таким же

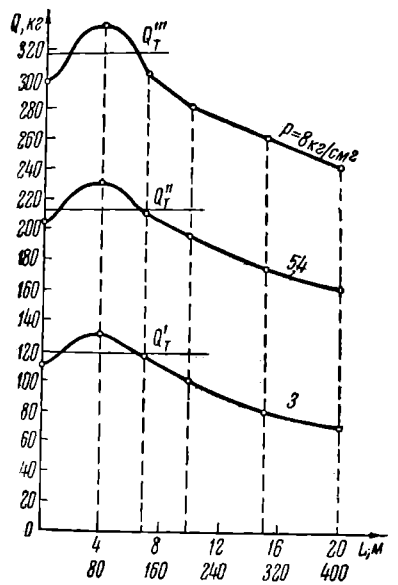


Рис. 17. Зависимость силы струи от расстояния. По данным ВНИОМСа для низконапорных струй. $Q = f(L$ и $P)$, $d = 50$ *мм*

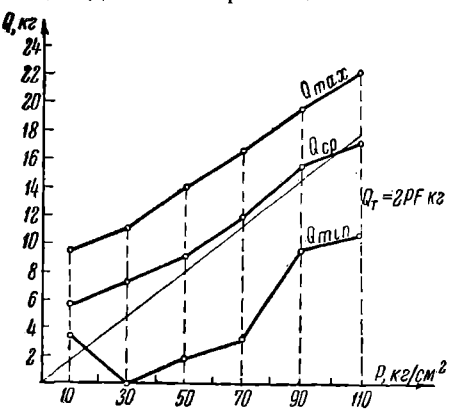


Рис. 18. Минимальные, максимальные и средние значения силы струи по данным осциллограмм. $Q = f(P)$, $L = 1{,}2$ *м*, $d = 3{,}2$ *мм*, $F = 0{,}08$ *см*²

данным пришли и другие исследователи. На рис. 17 приведены графики, построенные по материалам ВНИОМС для низконапорных струй. На

графики нанесены и расчетные значения силы струи, вычисленные по формуле

$$Q = 2PF \ кг,$$

где P — давление струи на выходе из насадка, $кг/см^2$;
F — площадь выходного отверстия насадка, $см^2$.

Из графиков видно, что фактические значения силы струи могут быть выше теоретических.

3. Давление струи не является постоянным. На рис. 18, где приведена графическая интерпретация данных осциллограмм, полученных

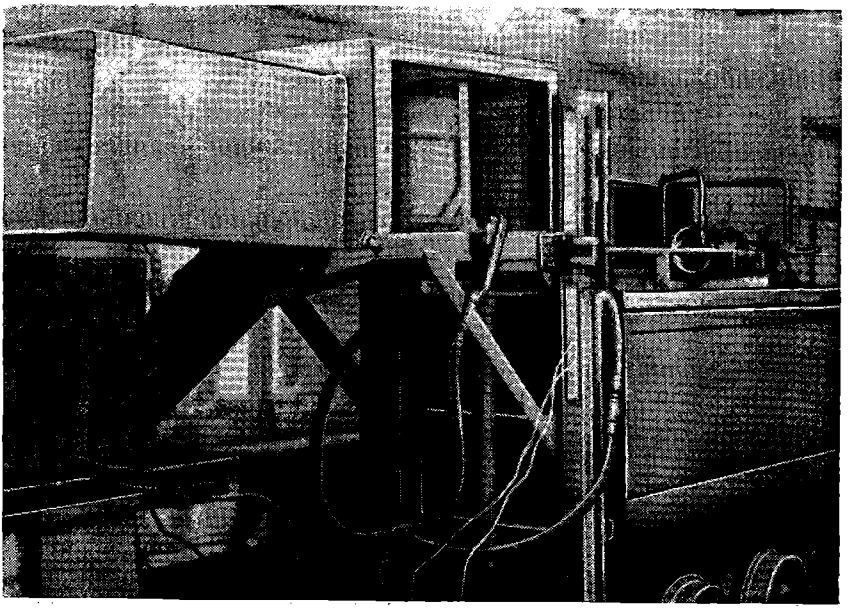


Рис. 19. Испытательный стенд

при расстоянии от насадка 1,2 *м*, видно, насколько среднеинтегральные значения $Q_{ср}$ отличаются от максимальных Q_{max} и минимальных Q_{min} значений. Прямой линией на рисунке показаны теоретические значения силы струи при различных давлениях на выходе из насадка, вычисленные по приведенной выше формуле.

II. **Исследование энергоемкости процесса разрушения.**[1] Имеющееся лабораторное оборудование давало возможность получать струю воды при диаметре выходного отверстия насадка не свыше 5 *мм*. Поэтому, как видно из приведенной выше формулы и диаграмм рис. 18, сила струи была небольшой. Исходя из предположения, что все твердые тела имеют общие законы разрушения с теми или иными зависящими от физико-механических свойств материала отклонениями, основным материалом для изготовления образцов был принят глиноземистый цемент марки «400».

Для работ был сконструирован специальный стенд (рис. 19), оборудованный защитным застекленным кожухом, гидравлической системой для подъема и опускания стола и винтовым устройством для перемещения матрицы с образцом в горизонтальной плоскости. При перемещении

[1] Непосредственные исполнители работ подтемы — В. С. Берсенев, Е. П. Кавралов, В. И. Морозов, Б. М. Столбов и др.

стола во время работы в вертикальной плоскости время нахождения образца в зоне действия струи замерялось с помощью скользящих контактов электрическим секундомером. Для устранения влияния на результаты исследования периодов пуска насоса и подъема давления в гидравлической системе установки был сконструирован отсекатель (рис. 20), который позволял наносить удар струей воды по образцу в течение заданного наперед времени. Тарировка отсекателя проводилась с помощью датчика и электрического секундомера, а ее результаты проверялись киносъемкой. При всех экспериментах по разрушению применялся конический насадок с диаметром выходного отверстия 3 *мм*. Давление струи

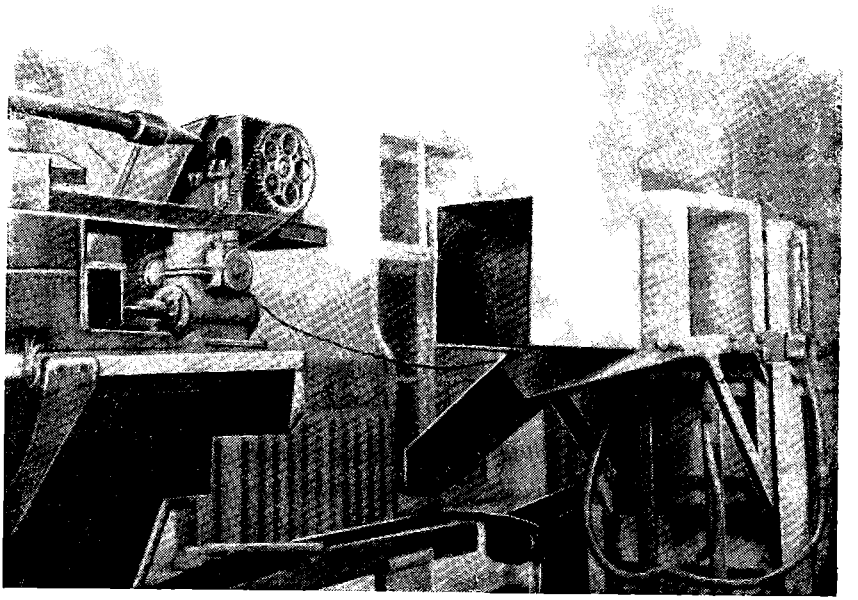


Рис. 20. Отсекатель

на выходе из насадка менялось от 10 до 175 *атм*. Для обеспечения возможности сопоставления получаемых при экспериментах данных был проведен ряд специальных мероприятий, на изложении которых здесь не будем останавливаться.

При исследованиях определялись: а) зависимость удельной работы разрушения от давления $E = f(P)$; б) зависимость удельной работы разрушения от продолжительности импульса $E = f(t)$; в) закономерности разрушения при перемещении точки удара струи по образцу.

При исследованиях зависимости $E = f(P)$ каждый эксперимент представлял собой удар в точку одиночным импульсом длительностью 1,83 сек. Удар в точку нельзя признать идеальным для отделения от массива больших объемов угля, но закономерности, имеющие место при таком разрушении, возможно, присущи и другим видам воздействия струи. Поэтому результаты этой серии исследований являются ценными для изучения процесса разрушения.

Как видно на рис. 21, при давлениях менее 10 *атм* разрушение происходит медленно, поэтому кривая зависимости $E = f(P)$ в этой области асимптотически приближается к оси ординат. С увеличением давления эффективность разрушения резко возрастает и при давлении 30—40 *атм*

в данных условиях достигает максимума (минимум кривой энергоемкости). При дальнейшем увеличении давления кривая $E = f(P)$ довольно резко поднимается до некоторого предела, при котором занимает почти параллельное оси абсцисс положение. Затем кривая снова опускается, т. е. энергоемкость разрушения уменьшается. Но дальнейшее изменение зависимости $E = f(P)$ не исследовалось.

Закономерности, полученные при более длительных импульсах, аналогичны, но увеличение длительности импульса ведет к увеличению энергоемкости разрушения. Более детально зависимость $E = f(t)$ показана на рис. 22. Она получена на основании данных обработки серии экспериментов, проведенных при постоянном давлении 75 *атм*. Это явление может быть объяснено как особенностями разрушения твердого тела пульсирующей нагрузкой, так и уменьшением влияния жидкого буфера.

Большой интерес представляло изучение закономерностей разрушения твердого тела переме-

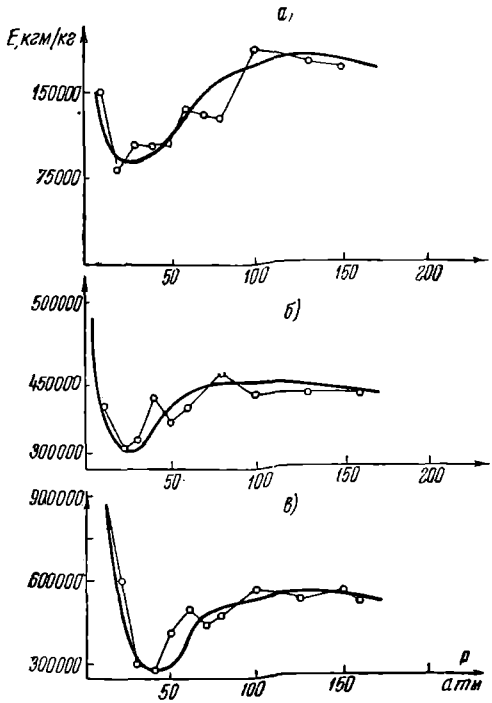


Рис. 21. Зависимость $E = f(P)$ при длительности импульса:
а – 1,83 сек.; *б* – 3,03 сек.; *в* – 5,65 сек.

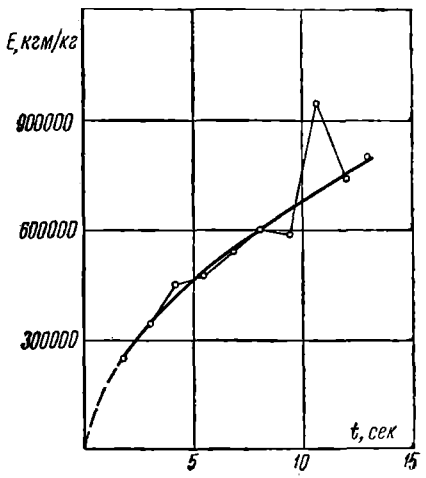


Рис. 22. Зависимость $E = f(t) \cdot P = \text{const} = 75$ *атм*

щающейся струей воды. Исследования произведены при давлениях струи на выходе 50, 75, 100 и 125 *атм* и при скоростях перемещения до 4,5 *м/мин* (эти скорости были предельными при гидравлическом устройстве стола стенда). Как видно из графиков рис. 23, при малой скорости передвижения струи до 0,5 *м/мин* энергоемкость разрушения невелика — приближается к энергоемкости при ударе в точку. На этом участке верхняя ветвь кривой асимптотически приближается к оси ординат. При увеличении скорости передвижения струи резко уменьшаются затраты энергии на разрушение. В области, соответствующей $v > 2$ *м/мин*, кривая $E = f(v)$ все более и более выполаживается и ее можно считать асимптотически приближающейся к некоторой прямой, параллельной оси абсцисс, т. е. при дальнейшем увеличении скорости передвижения затраты энергии на разрушение практически стабилизуются. Ординату прямой,

параллельной оси абсцисс, к которой кривая $E = f(v)$ приближается асимптотически, можно считать показателем энергоемкости разрушения данного материала струей воды, при условии, конечно, что давление выше критического (рис. 24).

При передвижении точки удара струи воды по забою (или по образцу) получается канавообразный вруб, который не может не оказывать

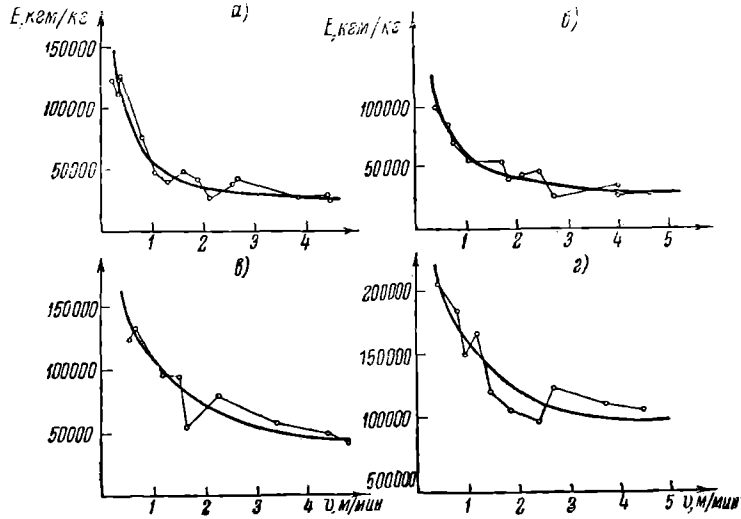


Рис. 23. Закономерности разрушения при перемещении точки удара струи и давлении:
а — 50 *атм*; *б* — 75 *атм*; *в* — 100 *атм*; *г* — 125 *атм*; $E = f(v)$

влияния на смежные части образца. При некотором значении $l_{опт}$ энергоемкость разрушения становится минимальной (рис. 25). Понятно, что числовые значения $l_{опт}$ в значительной степени будут определяться и размерами сечения струи, в свою очередь зависящими от диаметра выходного отверстия насадка.

Была сделана попытка определения в лабораторных условиях закономерности разрушения струей воды угольных образцов. Характер их разрушения во многом оказался аналогичным разрушению цементных образцов. При ударе в точку на угле получалась такая же по своему характеру лунка, как и на цементном образце. Передвижение струи по поверхности образца вызывало образование точно такого же вруба. Однако наличие поверхностей отдельностей внесло много нового в характер разрушения. Имели место случаи, когда при давлении 20 *атм* образец из угля раскалывался на несколько частей, а при 100 *атм* образовывалась только лунка. Влияние поверхностей отдельностей во многих случаях было так велико, что не представлялось возможным про-

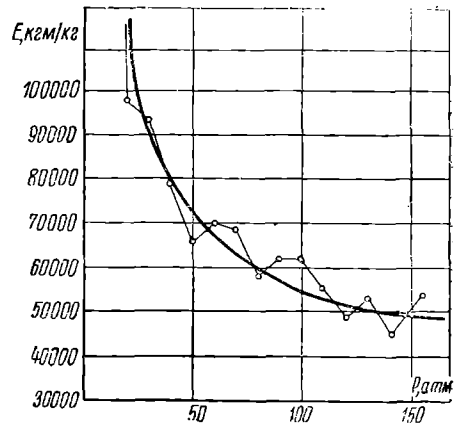


Рис. 24. Зависимость $E = f(P)$ при $v = \text{const} \approx 3{,}50 \div 3{,}78$

следить энергоемкость разрушения, так как внезапное разрушение образца уничтожало результаты предшествующих экспериментов и вызывало необходимость в переходе на новый образец, несомненно, имеющий несколько иные физико-механические характеристики.

Для выяснения характера воздействия струи воды на твердое тело угольный образец в лаборатории подвергался местному статическому воздействию жидкости. При повышении давления до 250 *атм* на поверхности образца не было обнаружено видимых признаков разрушения. В то же время воздействие струи при 20 *атм* сразу раскалывало образец на две части. Следовательно, струя имеет резко выраженный динамический характер воздействия на твердое тело.

Для изучения стадийности разрушения твердого тела воздействию струи воды подвергался образец из плексигласа. На первой стадии разрушения на поверхности образца образовались невидимые невооруженным глазом трещины. Наблюдение их оказалось возможным при изучении образца сбоку при сильном боковом освещении, когда поверхности трещин подобно микрозеркалам посылают отраженный свет в глаз наблюдателя. Расположение трещин по поверхности образца неравномерное: они в основном сконцентрированы возле случайных механических повреждений, царапин, забоин и т. п. Вторым этапом разрушения является дальнейшее развитие трещин и соединение их отдельных групп. При тщательном наблюдении такие трещины можно обнаружить и с поверхности образца. Так как развитие трещин внутрь образца не может происходить беспредельно из-за увеличивающихся с глубиной сопротивлений материала, то наибольшее развитие получают те трещины, направление которых может стать параллельным поверхности образца. В результате развития этих трещин наступала третья стадия разрушения — скол отдельных элементов. Место удара струи имеет матовую, сильно изрезанную трещинами поверхность. Вокруг контактной зоны располагаются веерообразно сколы округлой формы. Поверхность каждого из таких сколов близка сферической, а форма отдельных сколовшихся элементов напоминает чешуйки. Такой скол образуется как при разрушении образца из плексигласа, так и образцов из гудрона или вара (рис. 26). С ростом глубины воронки повышается интенсивность разрушения за счет увеличения размеров и объема каждой чешуйки.

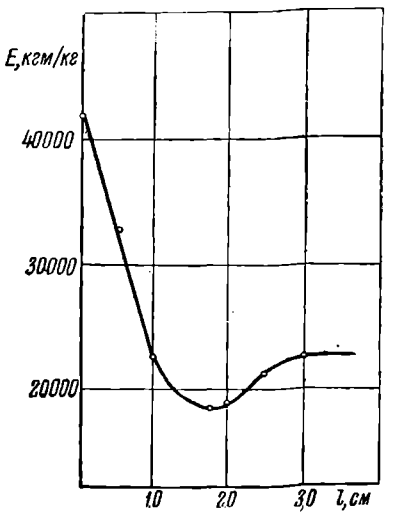


Рис. 25. Зависимость удельной работы разрушения от расстояния между осями смежных параллельных врубов. $E = f(l)$, $P = 75$ *атм*; $v \approx 3{,}5$ *м/мин*.

Разрушение горных пород должно идти несколько иначе, так как, во-первых, они не изотропны, а во-вторых, их поверхность уже имеет достаточное количество мельчайших трещин. Поэтому можно ожидать, что при разрушении горных пород будет отсутствовать первая, наиболее энергоемкая, стадия разрушения. При изучении механизма разрушения образцов угля были поставлены следующие серии экспериментов: 1) разрушение при ориентировке струи по напластованию угля; 2) то же при ориентировке струи перпендикулярно напластованию; 3) то же при ориентировке струи под углом 45° к плоскости напластования. Исследо-

вались возможно крупные куски угля неправильной формы с хорошо сохранившейся структурой. На рис. 27 в соответствующих схемах приведены наши представления о процессе разрушения угля при ударе струи в точку. Вначале, повидимому, образуется лунка, внутри которой возникает водяная подушка (буфер), препятствующая дальнейшему заглублению лунки. Под действием возникающего при этом давления трещины раскрываются по плоскостям ослабления угля. Нагнетаемая в трещины вода действует подобно жидкому клину, что и вызывает в конечном итоге отрыв части образца. Наиболее эффективным оказался процесс разрушения при ориентировке струи по напластованию. Следовательно, при гидроотбойке необходимо максимально использовать кливаж и плоскости ослабления угля.

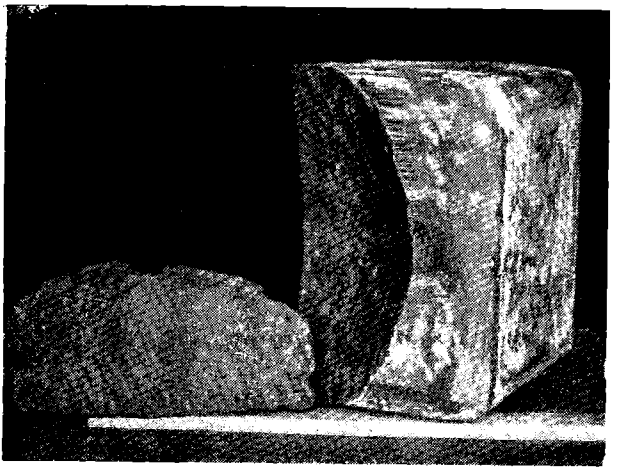


Рис. 26. Характер разрушения струей воды образца из гудрона

III. **Теоретическое обобщение материалов лабораторных исследований.** Параллельно с экспериментальными работами по ударному разрушению и разрушению струей воды велись теоретические исследования, имеющие своей целью дать математические интерпретации некоторых полученных в результате экспериментов положений.

Так как качественная сторона процесса разрушения при статическом и ударном воздействии оказывается весьма сходной, а также в начальной фазе процесса разрушения всегда имеется внедрение (погружение) ударника в уголь, оказалось возможным для получения чисто качественных выводов рассмотреть задачу о давлении плоского штампа на упругую полуплоскость.[1] Решение этой задачи показало, что под штампом развиваются значительные касательные напряжения, отделяющие зону интенсивного сжатия (уплотненное ядро) от остальной части разрушаемого тела. Исследование распределения наибольших касательных напряжений по горизонтальным сечениям (рис. 28) показывает, что максимальные значения этих напряжений лежат на кривой, уравнение которой имеет вид

$$2(x^2 \quad y^2) + 2a^2(x^2 - y^2) - 3a^3(x^2 + a^2) - a^4 = 0,$$

где a — ширина полуштампа.

[1] Работа выполнена М. Л. Вержбинским и М. С. Бирманом.

Кривые этого вида до глубины $r = 1{,}64\ a$ имеют два максимальных значения, постепенно уменьшающихся с увеличением глубины. На глубине большей, чем 1,64 a, кривые обладают только одним максимумом. Если соединить точки максимальных значений касательных напряжений (рис. 28), то получится контур уплотненной зоны, возникающей под штампом, при предельных деформациях которой

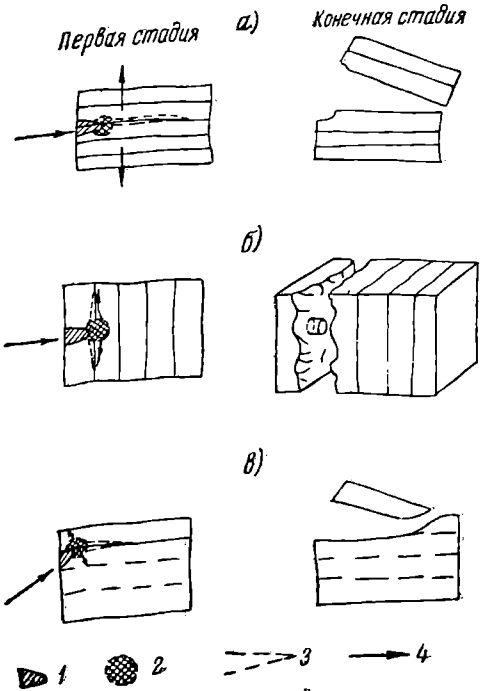


Рис. 27. Схемы стадийности процесса разрушения угля струей воды:

а — по напластованию; *б* — поперек напластования; *в* — под углом к напластованию; *1* — воронка; *2* — зона уплотнения ядра; *3* — действие жидкого клина; *4* — направление растягивающих напряжений

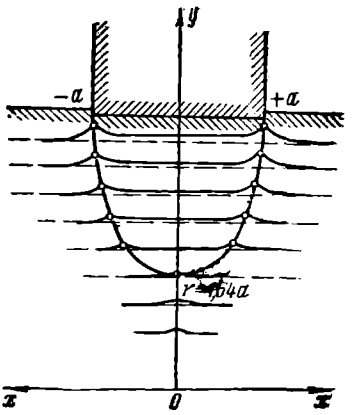


Рис. 28. Распределение касательных напряжений под штампом

и возникают в дальнейшем нормальные разрывающие напряжения. Установленное теоретически соотношение $r = 1{,}64\ a$ достаточно точно согласуется с полученными экспериментальным путем данными.

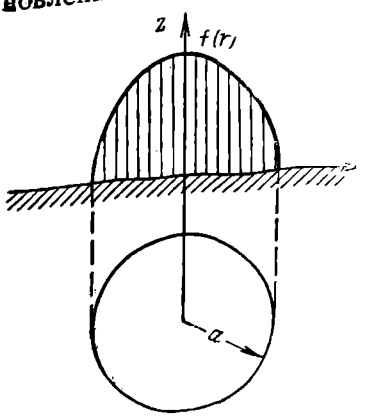


Рис. 29. Распределение давления по сечению струи

В дальнейшем решалась задача, относящаяся к проблеме теоретического исследования процесса разрушения угля струей воды. [1] Изыскивались формулы, устанавливающие зависимость возникающих в угле напряжений от развиваемого струей воды напряжения. В основу задачи была поставлена следующая схема: угольный образец и струя воды рассматриваются как полупространство, загруженное по площади круга нормальными напряжениями, симметрично распределенными относительно центра круга (рис. 29). Радиус a является центром окружности, ограничивающей плоскость соприкосновения струи воды с образцом. Функция $f(r)$, характеризующая распределение давления по сечению струи в месте соприкосновения ее с образцом,

[1] Работа выполнена А. М. Журавским, В. Г. Лабазиным и Р. Э. Соловейчиком.

должна быть определена эмпирическим путем, но в качестве первого приближения было принято, что распределение давления по сечению струи симметричное, изменяющееся по параболическому закону. Воздействие струи на образец рассматривалось как статическое воздействие системы напряжений, распределенных по кругу некоторого радиуса. Математическое рассмотрение вопроса было ограничено рамками линейной теории упругости. В результате теоретических исследований после ряда преобразований и упрощений была получена формула

$$\tau = \frac{P_{раз}}{2}\left[8{,}5 + \mu - \sqrt{15 + 6\mu}\right]$$

или

$$P_{раз} = \frac{2\tau}{8{,}5 + \mu - 2\sqrt{15 + 6\mu}},$$

где P — давление в центре струи, при котором происходит разрушение образца;

τ — предел упругого сопротивления образца на скалывание;

μ — коэффициент Пуассона.

Как показали подсчеты, $P_{раз}$ составляет примерно 0,4—0,5 от временного сопротивления на раздавливание крепких углей Кузнецкого бассейна, что хорошо согласуется с опытами МГУ и КузНИУИ.

Последующие теоретические исследования привели к выводу приближенных уравнений, позволяющих при некоторых осреднениях определять падение скорости движения капельной струи по ее длине от насадка. Численное решение этих уравнений требует дальнейших экспериментальных работ по определению ряда числовых параметров. Однако вывод этих, хотя и приближенных, уравнений является первой попыткой теоретического представления о динамическом воздействии струи на массив.

Использованная литература

1. Гаварин Н. П. Исследование гидромониторных струй. Известия АН СССР, ОТН, 1939, № 7.

2. Геронтьев В. И. Предварительные результаты и основные направления теоретических и экспериментальных исследований разрушения углей ударной нагрузкой. Труды совещания по координации исследований в области отделения от массива углей и пород. Изд. АН СССР, 1954, стр. 64—78.

3. Геронтьев В. И., Кальницкий Я. Б., Берсенев В. С. Некоторые итоги исследований разрушения углей в массиве ударной нагрузкой. «Вопросы разрушения и давления горных пород». Углетехиздат, 1955, стр. 96—112.

4. Мучник В. С. Повышение эффективности гидроотбойки угля и пород. Фонды КузНИУИ, 1951.

5. Сухаревский В. М. Испытание некоторых гидромониторных струй повышенного давления. Уголь, 1940, № 9.