

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЯ УГЛЯ СТРУЕЙ ВОДЫ

А. М. Журавский

Исследование процесса разрушения угля струей воды в целях построения рациональной теории явления представляет трудную теоретическую и экспериментальную задачу. Сложность исследования обусловлена недостаточной изученностью процесса хрупкого разрушения, сложностью строения разрушаемой породы, недостатком наших сведений о самом разрушающем агенте и его действии. В столь сложной обстановке представляется естественным на первых шагах исследования отказаться от полного учета всех факторов, действующих в процессе разрушения, упростить и схематизировать явление. Исследование, проведенное в упрощенной схеме, дает лишь приближенные зависимости между механическими характеристиками разрушаемой породы и параметрами, характеризующими струю, производящую разрушение. Однако полученные зависимости, будучи подвергнуты опытной проверке, могут быть оценены в отношении точности доставляемых ими результатов и допустимости их использования в практике технического расчета. На основе опыта в них могут быть внесены коррективы, учитывающие сложность действительного явления и сближающие упрощенную схему с действительностью.

Вопросы, подлежащие разрешению, относятся к разрушающему агенту и разрушаемому объекту. В отношении разрушаемой среды прежде всего следует поставить вопрос о величине нагрузки, при которой начинается разрушение породы, ее зависимости от механических характеристик породы и способа приложения нагрузки. Дальнейшей задачей является определение работы, которая должна быть совершена силой, приложенной у груди забоя, чтобы напряжения в разрушаемой породе достигли критической величины и началось разрушение. Третьим важным для эксплуатации вопросом является задача о зависимости между работой, затраченной разрушающей силой у груди забоя, и объемом разрушенной породы.

Работа разрушения, совершаемая жидкой струей, происходит за счет потери ее кинетической энергии при встрече с разрушаемой преградой. Исследуя разрушающее действие струи, прежде всего необходимо решить вопрос о падении скорости по длине струи и связанный с ним вопрос о распределении скорости по площади поперечного сече-

ния струи. Изучение поля скоростей разрушающей струи неотделимо от ее строения и формы. Решение вопроса о поле скоростей позволяет связать энергию в начальном сечении струи с энергией, теряемой у груди забоя, и оценить в конечном счете работу электропривода гидромонитора, затрачиваемую на разрушение единицы объема породы.

Упрощенная схема разрушения, в рамках которой получены решения указанных вопросов, характеризуется рядом положений. Первое и основное из них упрощает процесс хрупкого разрушения. Принимается, что в хрупком образце разрушение наступает сразу, как только разрушающая нагрузка создает напряженное состояние, выходящее за предел упругости, т. е. как только наибольшее скалывающее напряжение в этой точке переходит за предел упругости. Второе положение упрощает строение разрушаемой породы. Разрушаемая среда принимается сплошной, однородной и изотропной. Третье положение упрощает форму поверхности разрушаемой породы. Разрушаемая порода занимает полупространство, ограниченное плоскостью. Четвертое положение относится к характеру приложения нагрузки. Нагрузка действует статически. Так в первом приближении следует рассматривать давление, производимое струей, не перемещающейся по груди забоя. Пятое положение касается области приложения нагрузки и характера ее распределения. Разрушающая нагрузка прилагается по площади круга и обладает круговой симметрией.

Характеристика поля скоростей разрушающей струи получена на основе положений, принятых относительно ее формы, строения и взаимодействия с воздушной средой, через которую она проходит. Эти положения будут подробно перечислены ниже, так как исследование энергетических потерь по длине струи можно вести в рамках различных представлений об ее строении. В первом представлении разрушающая струя трактуется как сплошная. Таким во всяком случае является основное ядро струи на значительном участке ее длины, примыкающем к насадке гидромонитора. Во втором представлении строение разрушающей струи принимается дискретным. Струя представляется распадающейся на капли на расстоянии, достаточно удаленном от насадки.

При рассмотрении количественных соотношений, связанных с каждым из упомянутых представлений, будут указаны соответствующие положения, принятые в целях упрощения схемы явления.

Решение поставленных выше вопросов в рамках указанной упрощенной схемы процесса разрушения породы струей воды было получено А. М. Журавским, В. Г. Лабазиным, Р. Э. Соловейчиком при участии А. Г. Абазова и А. Е. Виноградовой в период 1956—1957 гг. Экспериментальные исследования, проведенные для проверки и уточнения теоретических изысканий, были выполнены Л. П. Севериным, В. С. Берсеновым. В исследовании строения и поля скоростей струи принимал деятельное участие К. Г. Асатур.¹

Обзор полученных теоретических результатов составляет основное содержание настоящей статьи. Установленные количественные зависимости приводятся без подробного вывода с указанием лишь на общую идею или общий метод их обоснования, которое подробнее будет развито в других статьях (в частности, в статье В. Г. Лабазина).

¹ См. в настоящем сборнике статью К. Г. Асатура «Исследование кинематики свободной незатопленной струи».

В настоящую статью не входят исследования 1958 г. и частично 1957 г., относящиеся к осложненной схеме разрушения, когда учитывается анизотропия и трещиноватость разрушаемой породы, а потери кинетической энергии по длине струи уточняются на основе опытных исследований.

Свободная струя. Струя, свободно выходящая из насадка гидромонитора, имеет сложное строение и форму. В своем движении она смешивается с окружающим ее воздухом и увлекает его частицы. По мере удаления от насадка аэрация струи возрастает и одновременно увеличивается глубина проникновения воздушных частиц в жидкость. Трение, развивающееся между частицами, находящимися на поверхности струи, и неподвижным воздухом, приводит сначала к отрыву отдельных ее капель, а в дальнейшем в связи с общей неустойчивостью струи [4], [5], [6] вызывает полное ее распадение. Границы струи теряют

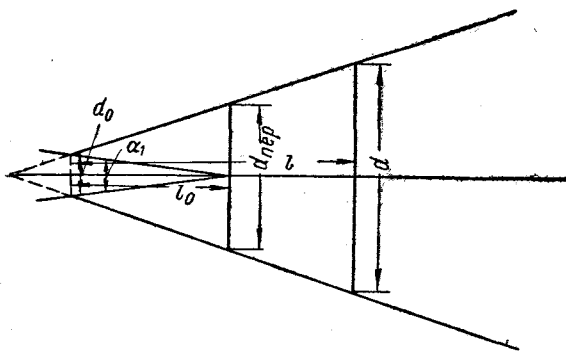


Рис. 1

правильность очертания, приобретают сложное строение и форму. Тело струи получает пережимы и пустоты, заполняемые воздухом и, наконец, распадается на капли.

Описанный процесс деформации струи и ее распада носит в известной мере случайный характер и его исследование требует соответствующих теоретико-вероятностных методов. Однако использование по-

следних в начальной стадии исследования, когда подлежат определению основные количественные соотношения, характеризующие энергетику струи, представляется нежелательным ввиду сложности самого аналитического аппарата исследования. Целесообразнее использовать результаты гидромеханики, пойдя на условную схематизацию строения струи с сохранением основных энергетических соотношений. Возможным путем к поставленной цели является перенос результатов, установленных для затоплений струи [1], [2] (когда жидкая струя вытекает в жидкость той же плотности), на струю свободную (когда жидкость вытекает в газообразную среду или жидкость иной плотности), а также экстраполяция результатов исследований, проведенных для коротких струй, на струи большей длины [6], [7]. Перенос результатов, установленных для струи затопленной, на свободную требует изменения основного параметра, характеризующего трение турбулентного перемешивания, величина которого определена по данным эксперимента. Принятая условная схема строения струи следующая. Струя, вытекающая из насадка гидромонитора с диаметром выходного отверстия d_0 , представляется в виде сплошной, ограниченной конической поверхностью, ось которой перпендикулярна плоскости выходного отверстия насадка, и проходит через его центр. Меридиональное сечение ядра струи показано на рис. 1. Внешний диаметр поперечного сечения струи на расстоянии l от насадка определяется равенством

$$d = d_0 + 6,8al, \quad (1)$$

где a — безразмерный параметр, связанный с внутренним трением, вызываемым турбулентным перемешиванием.

В струе на некотором участке, примыкающем к выходному отверстию насадка и называемом начальным, сохраняется ядро струи, где величина скорости v та же, что при выходе из насадка. Начальный участок струи, на котором движение жидкости остается не возмущенным, ограничен конической поверхностью, имеющей вершину на оси струн в расстоянии l_0 от выходного отверстия насадка

$$l_0 = 0,335 \frac{d_0}{a}. \quad (2)$$

Диаметр d' поперечного сечения ядра струи на расстоянии от выходного отверстия насадка выражается равенством

$$d' = d_0 - 3,0al. \quad (3)$$

Как видно из рис. 1, на основном участке, примыкающем к начальному, возмущение охватывает уже всю толщу поперечного сечения струи и невозмущенное ядро исчезает. Скорость струи изменяется с удалением сечения от выходного отверстия насадка и зависит от положения точки на поперечном сечении струи. Падение скорости по оси струи с удалением от выходного отверстия насадка может быть установлено на основании равенства

$$v_* = \frac{0,49v_0d_0}{al + 0,145d_0}, \quad (4)$$

связывающего скорость v_* на оси струи в расстоянии l от выходного отверстия насадка с начальной скоростью v_0 . Осевая составляющая u скорости $\vec{v}$ в точке на поперечном сечении основного участка, где скорость на оси струи v_* дается равенством (4), определяется уравнением

$$u = v_* \Phi\left(\frac{y}{al + 0,145d_0}\right), \quad (5)$$

где y — расстояние рассматриваемой точки от оси струи.

Значение функции $\Phi(x)$ находится по приведенной таблице.

Т а б л и ц а

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
0	1	0,9	0,653	1,8	0,265	2,7	0,046
0,1	0,984	1,0	0,606	1,9	0,230	2,8	0,034
0,2	0,958	1,1	0,555	2,0	0,198	2,9	0,024
0,3	0,922	1,2	0,510	2,1	0,169	3,0	0,017
0,4	0,884	1,3	0,470	2,2	0,146	3,1	0,011
0,5	0,843	1,4	0,425	2,3	0,117	3,2	0,007
0,6	0,795	1,5	0,378	2,4	0,094	3,3	0,003
0,7	0,748	1,6	0,340	2,5	0,075	3,4	0,000
0,8	0,700	1,7	0,300	2,6	0,059		

Указанные соотношения определяют поле скоростей струи и позволяют решить в первом приближении вопрос о падении кинетической энергии по ее длине. Из равенства (5) следует, что отношение энергии струи E в данном сечении к энергии E_0 при выходе из насадка выражается равенством

$$\frac{E}{E_0} = 1,92 \frac{v_*}{v_0} \int_0^{3,4} \Phi^3(x) x dx.$$

Величина интеграла в правой части равенства легко находится по таблице

$$\int_0^{3,4} \Phi^3(x) x dx = 0,331.$$

Падение энергии по длине струи характеризуется равенством

$$\frac{E}{E_0} = 0,636 \frac{v_*}{v_0} \approx \frac{2}{3} \frac{v_*}{v_0}. \quad (6)$$

Равенства (4) и (6) показывают, что

$$E = \frac{0,33d_0}{a l + 0,145d_0} E_0. \quad (7)$$

Пользуясь равенством (7), можно составить приближенное суждение об энергетике струи. Величина параметра a по опытным данным может быть принята равной 0,005.

Струя капельного строения. Изучение энергетики струи в рамках схемы дискретного ее строения, когда струя представляется распавшейся на капли, проводилось на основе ряда упрощающих положений.

Первое положение дает характеристику силе сопротивления F , которое оказывает воздух движению капли

$$F = CS \frac{\rho v^2}{2}, \quad (8)$$

где S — площадь поперечного сечения (миделя) капли;

ρ — плотность капли;

v — скорость движения центра тяжести капли;

C — коэффициент формы.

Второе положение характеризует движение системы капель, образующих струю. Принимается, что капли перемещаются в одном и том же направлении параллельно оси струи, причем скорость всех капель, центры тяжести которых проходят через данное поперечное сечение струи, одинакова.

Третье положение характеризует структуру капельной струи. Принимается, что все капли имеют одинаковую форму, причем площадь миделя капель, центры тяжести которых находятся на данном поперечном сечении струи, одинаковы. Анализ падения кинетической энергии струи по ее длине производился в различных вариантах, имевших своей задачей выяснение основных факторов, определяющих энергетику струи. В первом варианте решающая роль отводилась сопротивлению воздуха, и потери кинетической энергии, связанные с изменением общей массы струи и распадом капель на более мелкие, не принимались во внимание. Падение скорости v по длине струи, полученное в результате проведенного анализа, характеризуется равенством

$$\left(\frac{v}{v_1}\right)^2 = e^{-hx}, \quad (9)$$

где v_1 — скорость струи в сечении, начиная с которого струя полностью распадается на капли;

x — расстояние от этого сечения до рассматриваемого;

$$h = \frac{3}{4} \frac{C}{r_0}, \quad (10)$$

где r_0 — радиус миделя капель.

Во втором варианте, подобно первому, ведущая роль сохранялась за силой сопротивления воздуха, но при этом учитывалось влияние изменения размеров отдельных капель по длине струи. Связанные с этим энергетические потери и потери массы струи не учитывались. Падение скорости по длине струи в этом случае

$$\left(\frac{v}{v_1}\right)^2 = \frac{1}{\varphi^6(x)} e^{-hf(x)}, \quad (11)$$

где $\varphi(x)$ и $f(x)$ определяются равенствами

$$\varphi(x) = \frac{r}{r_0} \quad (12)$$

и

$$f(x) = \int_0^x \frac{dx'}{\varphi(x')}, \quad (13)$$

а r обозначает радиус миделя капли в рассматриваемом сечении струи.

Функция $\varphi(x)$, характеризующая изменение размера капли по длине струи, подлежит определению по опытным данным.

В третьем варианте при учете тормозящего эффекта сопротивления воздуха принимались во внимание потери массы струи, вызванные испарением капель. В остальном сохранились условия второго варианта. Падение скорости по длине струи

$$\left(\frac{v}{v_1}\right)^2 = \frac{e^{-hx}}{\omega(x)} \{1 + F(x)\}, \quad (14)$$

где

$$\omega(x) = \varphi^6(x); \quad (15)$$

$$F(x) = \frac{jL}{v_1^2} \int_0^x e^{hf(x')} d\omega(x'), \quad (16)$$

где L — скрытая теплота парообразования;

j — термический эквивалент работы.

Функция $\varphi(x)$ определяется по опытным данным. Изменение массы капли

$$\frac{m}{m_0} = \varphi^3(x). \quad (17)$$

Равенства (14) и (17) позволяют установить падение кинетической энергии по длине струи.

В четвертом варианте анализа учитывались энергетические потери, связанные с дроблением капель и не принимались во внимание потери массы. Энергия поверхностного натяжения $E_{п.н.}$, зависящая от размеров капли, характеризовалась равенством

$$E_{п.н.} = kr^2, \quad (18)$$

где k — постоянный коэффициент.

Падение скорости по длине струи в этом случае

$$\left(\frac{v}{v_1}\right)^2 = e^{-hf(x)} \{1 - \Phi(x)\}, \quad (19)$$

где

$$\Phi(x) = \frac{E_{п. н_0}}{V_0} \int_0^x e^{hx'} d\psi(x'); \quad (20)$$

$$\psi(x) = \frac{1}{\varphi(x)}.$$

Отношение $\frac{E_{п. н_0}}{V_0}$ выражает величину энергии $E_{п. н_0}$ поверхностного натяжения капли, отнесенной к единице ее первоначального объема V_0 . Все указанные формулы для определения падения скорости по длине струи содержат неизвестную функцию $\varphi(x)$, подлежащую

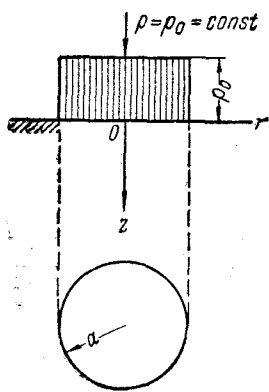


Рис. 2

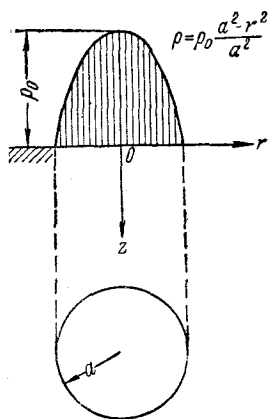


Рис. 3

определению по опытным данным. Результаты обработки опытных данных позволяют судить не только о функции $\varphi(x)$, но и о том, какой из указанных вариантов больше соответствует действительности и какие факторы оказывают большее влияние на энергетику струи. Это исследование проводится в настоящее время и сообщение о его результатах последует в дальнейшем.¹

Напряженное состояние разрушаемого массива. Оценка напряженного состояния разрушаемой поро-

ды, проведенная в рамках описанной выше схемы, была выполнена для двух вариантов распределения разрушающей нагрузки по груди забоя, где эта нагрузка прилагается. В первом варианте предполагалось, что нагрузка распределяется равномерно по площади круга (рис. 2). Во втором варианте распределение нагрузки принималось изменяющимся от центра круга к ограничивающей его окружности по параболическому закону (рис. 3). Если характеризовать положение точки M разрушаемой породы цилиндрическими координатами r, ϑ, z относительно оси oz , проходящей через центр круга, и полярной системы r, ϑ , лежащей в плоскости этого круга, то составляющие тензора напряжений

$$\begin{pmatrix} \sigma_r, & \tau_{r\vartheta}, & \tau_{rz} \\ \tau_{r\vartheta}, & \sigma_\vartheta, & \tau_{z\vartheta} \\ \tau_{rz}, & \tau_{z\vartheta}, & \sigma_z \end{pmatrix}$$

в точке M для случая равномерного нагружения могут быть представлены равенствами

$$\sigma_r = P_0 \left[(1 - 2\nu) I_1 + 2(1 + \nu) I_2 - I_3 + 2(2 - \nu) I_4 - I_5 - \frac{1}{2}(1 + 2\nu) \right]; \quad (21)$$

¹ Результаты получены Р. Э. Соловейчиком.

$$\sigma_z = P_0(2I_3 - 1); \quad (22)$$

$$\tau_{rz} = -P_0 I_6, \quad (23)$$

где

$$I_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \ln [\sqrt{R^2(\psi, r_*, z_*) + 1} + 1] \cos 2\psi d\psi; \quad (24)$$

$$I_2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi F(\psi, r_*, z_*) d\psi; \quad (25)$$

$$I_3 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi F^3(\psi, r_*, z_*) d\psi; \quad (26)$$

$$I_4 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi F(\psi, r_*, z_*) \cos 2\psi d\psi; \quad (27)$$

$$I_5 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi F^3(\psi, r_*, z_*) \cos 2\psi d\psi; \quad (28)$$

$$I_6 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \Phi^3(\psi, r_*, z_*) \cos \psi d\psi. \quad (29)$$

Функции $F(\psi, r_*, z_*)$ и $\Phi(\psi, r_*, z_*)$ определяются из равенств

$$F(\psi, r_*, z_*) = \frac{1}{\sqrt{R^2(\psi, r_*, z_*) + 1}}; \quad (30)$$

$$\Phi(\psi, r_*, z_*) = \frac{R(\psi, r_*, z_*)}{\sqrt{R^2(\psi, r_*, z_*) + 1}}, \quad (31)$$

где

$$z_* R(\psi, r_*, z_*) = r_* \cos \psi + \sqrt{1 - r_*^2 \sin^2 \psi}; \quad (32)$$

$$r_* = \frac{r}{a}; \quad (33)$$

$$z_* = \frac{z}{a}. \quad (34)$$

Величина a равна радиусу круга, по которому приложено давление с нагрузкой p_0 на единицу площади. В силу осевой симметрии нагружения

$$\tau_{r\theta} = \tau_{z\theta} = 0. \quad (35)$$

Выражение σ_θ не приводится ввиду того, что оно дальше не требуется.

Наибольшее касательное напряжение определяется равенством

$$\tau_{\max} = \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_r - \sigma_z)^2 + \tau_{rz}^2}. \quad (36)$$

Вопрос о напряженном состоянии полупространства исследовался Бусинеском [9], Черрути [10] и рядом других авторов. Случай равномер-

ного нормального нагружения границы полупространства по кругу подробно рассмотрен в работе Лява [11]. Опираясь на эти исследования, было изучено напряженное состояние массива и получены формулы критической нагрузки, вызывающей разрушение, установлен объем откалываемой породы и выведена формула работы, потребной для получения откола в условиях статического приложения нагрузки. Не останавливаясь на выводе упомянутых формул, который составляет предмет отдельной статьи, укажем, что разрушение наступает при

$$P_0 \left[0,5 - \nu + 0,315 (1 + \nu)^{\frac{3}{2}} \right] > 2\tau_e, \quad (37)$$

где ν — коэффициент Пуассона;

τ_e — предел упругости на скалывание.

Разрушение начинается на глубине z_0

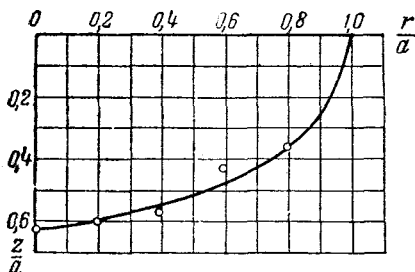


Рис. 4

$$z_0 = a \sqrt{\frac{z(1+\nu)}{7-2\nu}}, \quad (38)$$

причем меридиональное сечение откалываемого куска породы в безразмерных координатах r_* , z_* характеризуется следующими значениями r_* и z_* :

r_*	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
z_*	0,65	0,60	0,56	0,44	0,36	0

Изображение меридионального сечения откалываемого куска породы показано на рис. 4.

Небезынтересно отметить, что для образцов разрушения плексиглаза, полученных в Институте горного дела АН СССР, форма отколотых частей близка к указанной на рис. 4 [3]. Величина отколотого объема

$$V \approx \frac{\pi a^2 z_0}{2} = \frac{\pi a^3}{2} \sqrt{\frac{2(1+\nu)}{7-2\nu}}. \quad (39)$$

Работа A , затрачиваемая на откол объема V , находится

$$A = \frac{8}{3} (1 - \nu^2) \frac{p_0^2}{E} a^3, \quad (40)$$

где E — модуль упругости разрушаемой среды.

Если вместо разгрузки p_0 ввести величину силы P , приложенной по площади круга, то величина работы A выразится равенством

$$A = \frac{8}{3} \frac{(1 - \nu^2)}{\pi^2} \frac{P^2}{Ea}. \quad (40')$$

Не останавливаясь столь же подробно на случае параболического распределения нагрузки по площади круга, как это было сделано для равномерного распределения, укажем лишь, что величина работы, затрачиваемой на деформацию породы, приводящую к разрушению, выражается равенством

$$A = \frac{256}{315} (1 - \nu^2) \frac{p_0^2}{E} a^3. \quad (41)$$

Для сравнения результатов (40) и (41) следует в равенство (41) ввести величину среднего давления по площади круга $\bar{p}$ вместо макси-

мального давления p_0 в его центре. Среднее давление при параболической нагрузке

$$p = p_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \quad (42)$$

выражается равенством

$$\bar{p} = \frac{1}{2} p_0 \quad (43)$$

и равенство (41) принимает вид

$$A = \frac{1024}{315} (1 - \nu^2) \frac{\bar{p}^2}{E} a^3. \quad (44)$$

Как видно из равенства (44), величина работы в случае параболической нагрузки примерно на 18% больше работы, расходуемой на разрушение при равномерной погрузке.¹

Энергоемкость разрушения. Сопоставляя величину работы, затрачиваемой на деформацию разрушаемой среды до размеров, при которых возникающие напряжения вызывают ее разрушение, с величиной отключаемого объема, можно составить представление о величине работы, расходуемой на разрушение заданного объема. Для случая статического приложения нагрузки, равномерно распределенной по площади круга радиуса a , работа A_* , затрачиваемая на откол, и объем V отколотой породы связаны зависимостью

$$A_* = \frac{16}{3\pi} (1 - \nu) \sqrt{(3,5 - \nu)(1 + \nu)} \frac{p_0^2}{E} V, \quad (45)$$

вытекающей из равенств (39) и (40).

Если учесть, что величина нагрузки p_0 , разрушающей породу, должна удовлетворять условию (38), то зависимость (45) может быть представлена в виде

$$A_* = k_* \frac{\tau_e^2}{E} V, \quad (46)$$

где

$$k_* = 0,8 \cdot 10^4 \frac{(1 - \nu) \sqrt{(3,5 - \nu)(1 + \nu)}}{\left[0,5 - \nu + 0,315(1 + \nu)^{\frac{3}{2}} \right]^2} k; \quad (k > 1). \quad (47)$$

Равенство (47) и дает величину коэффициента k_* для случая, когда в равенстве (46) τ_e и E выражены в килограммах на квадратный сантиметр, объем V в кубических метрах и A_* в килограммометрах. Если A_* выражается в киловатт-часах, то k_* определяется равенством.

$$k_* = 0,185 \frac{(1 - \nu) \sqrt{(3,5 - \nu)(1 + \nu)}}{\left[0,5 - \nu + 0,315(1 + \nu)^{\frac{3}{2}} \right]^2} k; \quad (k > 1). \quad (48)$$

Коэффициент k введен в равенство (47) и (48) для учета того обстоятельства, что хрупкое разрушение наступает не сразу, как только p_0 переходит через значение, определяемое равенством

$$p_0 \left[0,5 - \nu + 0,315(1 + \nu)^{\frac{3}{2}} \right] = 2\tau_e.$$

¹ Результаты получены В. Г. Лабазиным.

По данным испытаний, проведенных в лаборатории гидроотбойки Ленинградского горного института, величину k можно принимать равной 1,5. Равенство (46) выражает зависимость работы, необходимой для откола данного объема породы, от ее механических характеристик: модуля упругости E , коэффициента Пуассона ν и предела упругости на скалывание τ_e . Пользуясь формулами (1) — (7) и равенством (46), можно определить работу, которую должен в определенных условиях затратить гидромонитор на разрушение заданного объема породы данных механических качеств. С этой целью, определив по формуле (46) работу, необходимую на откол заданного объема V породы, находим по формуле (7) энергию E_0 струи гидромонитора при выходе по ее величине E на расстоянии l от насадка, соответствующем положению гидромонитора относительно груди забоя.

В расчете принимаем

$$E = A_* k^*; \quad k^* > 1. \quad (49)$$

Коэффициент k^* учитывает энергетические потери, связанные с неполным превращением энергии струи, донесенной до груди забоя, в работу разрушения породы. При настоящем положении наших знаний его можно принимать равным

$$k^* = 1,2 \div 1,5.$$

Поясним сказанное примером, подсчитав энергию, которую должен затрачивать гидромонитор, работающий на расстоянии 7 м от груди забоя, на разрушение 1 м³ породы с механическими характеристиками

$$E_{п.н} = 3 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2; \quad \nu = 0,2; \quad \tau_e = 150 \text{ кг/см}^2.$$

Диаметр выходного отверстия насадка $d_0 = 1 \text{ см}$. По формуле (48)

$$k_* = 0,185 \frac{0,8 \cdot \sqrt{3,3 \cdot 1,2}}{\left[0,3 + 0,315 \cdot 1,2^{\frac{3}{2}}\right]} 1,5 = 0,86.$$

Величина работы, необходимой для откола 1 м³ породы, по формуле (46)

$$A_* = 0,86 \frac{150^2}{3 \cdot 10^4} 1 = 0,65 \text{ квт.}$$

Принимая k^* равным 1,5, определяем величину энергии E , расходуемой у груди забоя. Согласно формуле (49),

$$E = 1,5 \cdot 0,65 = 0,88 \text{ квт.}$$

Начальная величина энергии по формуле (7)

$$\frac{0,33 \cdot 1}{0,005 \cdot 700 + 0,145 \cdot 1} E_0 = 0,88,$$

откуда

$$E_0 = \frac{0,88 \cdot 3,64}{0,33} = 9,7 \approx 10 \text{ квт.}$$

Учитывая гидравлические потери в гидромониторе и коэффициент полезного действия электропривода, можно оценить работу электропривода величиной

$$A_{прив} = k E_0 \approx 11 \div 12 \text{ квт.}$$

С помощью указанных соотношений решается ряд задач, связанных с энергетическим расчетом гидромонитора и встречающихся при его проектировании.

Предстоящие исследования. Изложенные результаты не исчерпывают полностью проведенных исследований. Они представляют лишь первое приближение в решении тех трудных вопросов, которые выдвигаются проблемой разрушения угля струей воды и которые сейчас еще далеки до полного разрешения. Остановимся коротко на вопросах, стоящих перед исследованием и являющихся предметом ведущихся изысканий. Эти изыскания направлены как на уточнение наших представлений о разрушающем агенте, так и на исследование процесса разрушения среды. В отношении разрушающего агента на очереди стоит задача об уточнении энергетики струи на базе опытного исследования закона сопротивления воздушной среды ее движению и выяснении динамической картины сопротивления. Неоднородность состава струи, вследствие ее аэрации, неустойчивость движения, приводящая к ее распадению, создают многочисленные теоретические и экспериментальные трудности, требующие для своего преодоления разработки новых методов исследования.

Много новых задач встает при изучении дробления струи. Исследование процесса разрушения среды требует в первую очередь учета ее неоднородности и анизотропии, а также наличия в ней трещин. Решение задачи намечено сначала провести для простейших случаев слоистой неоднородности и анизотропии, для трещин простейшей формы и вида с постепенным переходом в дальнейшем к более сложным формам с осложнением аппарата и методики исследования.

Особенные трудности представляет изучение процесса дальнейшего разрушения уже частично разрушенной породы. В исследованиях нельзя будет ограничиться изучением статического приложения разрушающей нагрузки. Необходимо перейти к исследованию динамического воздействия, выяснить количественную сторону зависимости величины разрушающей нагрузки от частоты и амплитуды ее колебаний, изучить ее ударное действие. Предстоит выяснить скорость распространения разрушения, найти зависимость между мощностью разрушающей установки и ее производительностью в заданных условиях эксплуатации.

На базе указанных исследований следует развивать методику расчета разрушающих гидроустановок, как основание рационального проектирования и рациональной эксплуатации последних. Разработка приемов и схем расчета входит сюда как необходимая часть.

Создание рациональных оснований для проектирования и эксплуатации разрушающих автоматических гидроустановок является конечной целью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г. П. Теория свободной струи и ее приложение. Труды ЦАГИ, 1936, № 293.
2. Абрамович Г. П. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. ГЭИ, 1948.
3. Зеленин А. Н. Некоторые исследования в части построения кругов Мора. Доклад на совещании по вопросам разрушения горных пород. ИГД АН СССР, 1958.
4. Raybeigh. Proc. London Math. Soc., 1879, v. V.
5. Weber. Z. angew. Math. und Mech., 1937, B. II, H. 2.
6. Henlein A. Forsch. Geb. Ingenieurwesens, 1931, B. 2, N 4.
7. Oguey P. et Mamin M. Bull. techn. Suisse romande, 1944, 14/X, N 21; 28/X, N 22.
8. Oguey P. et Mamin M. Bull. techn. Suisse romande, 1951, 24/XI, N 4; 10/III, N 5.
9. Boussinesque. Applications des potentielles a l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. Paris, 1885.
10. Cerruti V. Atti Accad. naz. Lincei. Mem. Cl. sci. fis., mat. e natur. Sez. I, 1881—1882, v.13.
11. Looe A. E. Philos. Trans. Roy. Soc. London A, 1929, v. 228.