

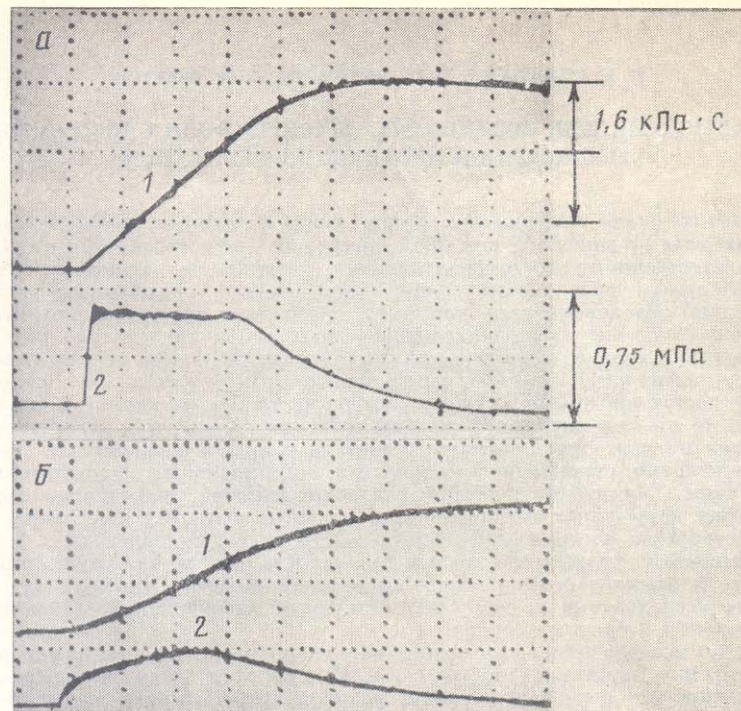
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЗДУШНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН С ПРЕГРАДОЙ,  
ЗАЩИЩЕННОЙ ПРОТЯЖЕННЫМ ЭКРАНОМ

На практике часто встречаются случаи, когда воздушная ударная волна, прежде чем встретиться с защитной или иной преградой, распространяется по искусственному или естественному предохранительному сооружению. В шахтах такого рода предохранительным сооружением может быть канал с повышенным уровнем трения. Последний обуславливается, например, специально сформированными пересечениями сечения за счет установки разнообразных типов препятствий [1]. Косвенно роль препятствий вполне может выполнять также всякого рода технологическое оборудование и крепежная оснастка, размещенная внутри канала. В штреке после взрыва при достаточно высоком уровне потерь на трение по каналу распространяется импульс не ступенькообразной или треугольной формы, а с нарастающим уровнем давления по мере проникновения в зону за ударным фронтом [2]. Для практических приложений существенно определить потенциальные разрушительные возможности таких, достаточно необычных в общепринятой практике по форме, волн давления. Без корректных измерений под вопросом остается полезность и эффективность устройств поглотителей энергии воздушных ударных волн в форме каналов с повышенным уровнем потерь на трение. Для ответа на возникающие вопросы научного и прикладного характера имеется приемлемый удобный путь экспериментального исследования за счет соответствующей модификации стандартной методики наблюдений в ударных трубах.

Опыты по исследованию взаимодействия ударных волн с преградой после того, как волна прошла защитный участок с высоким уровнем потерь на трение, проводились на специально переоборудованной ударной трубе. Камера высокого давления имела во всех опытах длину 0,5 м и внутренний диаметр 0,05 м. Камера низкого давления длиной 2 м и диаметром 0,05 м перед торцом оснащена протяженной преградой. Протяженная преграда конструировалась из сборных вставных каскадов, составленных из металлических колец. Ансамбли металлических колец, нанизанных на тонкие стальные стержни, различались числом колец и шагом между соседними кольцами  $s$ . Высота кольца  $k=5$  мм, наружный диаметр 48 мм, толщина 3 мм. Давление в ударных волнах на участке, свободном от колец, а также в загроможденном участке, фиксировалось шестью пьезоэлектрическими датчиками, стоящими вдоль образующей трубы и на торце камеры низкого давления. По разнице времен прихода волны на датчики и известному расстоянию между ними определялась средняя скорость движения возмущения давления. Сигналы датчиков давления записывались с помощью электронных осциллографов. Заполнение камеры высокого давления осуществляли азотом. Камера низкого давления заполнялась воздухом при нормальных условиях. Скорость ударных волн  $D$ , пропускаемых в загроможденный участок, отвечала числу Маха  $M_0 = Da_0^{-1} = 1,1-2,0$  ( $a_0$  — скорость звука в воздухе). Длительность фазы постоянства давления в волне не менее 0,4 мс.

В предварительной отладочной серии опытов исследовано затухание ударных волн в трубе без кольцевых проставок. В условиях опытов ослабление ударных волн в трубе без вставок на длине 2 м оказалось пренебрежимо малым. На распространение волны продольные (вдоль оси трубы) стержни не оказывали заметного влияния. Не было практически значимого различия в поведении волнового пакета при установке колец в трубу без зазора со стенкой и с зазором до 1 мм по внешней поверхности колец.

При нормальном падении ударной волны на поверхность конструктивного элемента последний подвергается действию давления отражения. Если объект находится внутри защитного экрана, то на него падает волна с нарастающим за фронтом уровнем давления [2]. Для оценки действия динамической нагрузки на торцевую стенку проводились измерения давления отражения и импульса давления с помощью торцевого датчика и электронного интегратора сигнала [3]. На фиг. 1 приведены примеры осциллограмм записей импульса (лучи 1) и давления (лучи 2) в опытах с  $M_0=1,5$ . На фиг. 1, а показаны записи торцевого датчика при нормальном падении ударной волны в отсутствие защитного экрана. Снижение давления на луче 2 через время около 2,5 мс обусловлено приходом отраженной от торца камеры высокого давления волны разрежения. Фигура 1, б иллюстрирует изменение параметров в отраженной волне после прохождения исходным возмущением секции с кольцевыми вставками длиной  $L=91$  см. Из сравнения приведенных осциллограмм видно, что импульс и давление в волне, проходящей защитный экран, заметно ниже, чем в волне, распространяющейся в гладком канале. Давление на фронте отраженной ослабленной волны почти в 7 раз меньше давления отражения исходного возму-

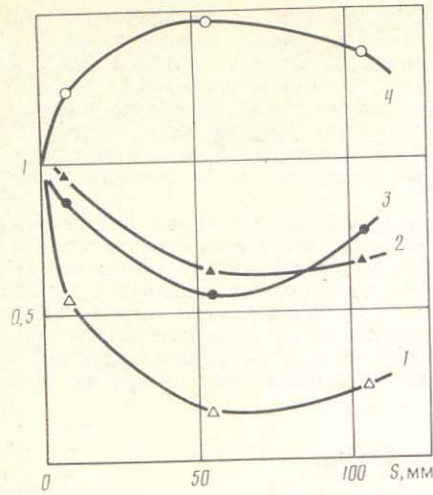


Фиг. 1

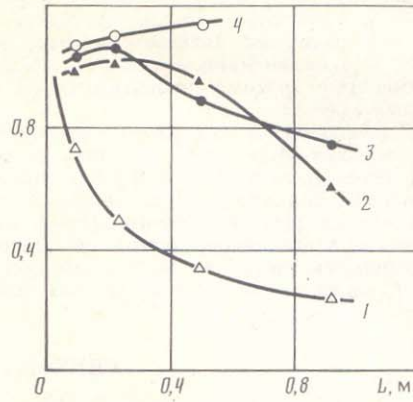
щения. За фронтом отраженной волны, так же как и за фронтом падающей волны, отмечается нарастание давления. При этом максимальное давление в глубине релаксационной зоны ( $\Delta p_m$ ) оказывается меньше давления отражения неослабленной волны ( $\Delta p_{m0}$ ).

На фиг. 2 суммированы результаты измерений параметров отраженной ударной волны ( $M_0=1,5$ ) после прохождения защитного экрана длиной  $L=91$  см, примыкающего к торцу камеры низкого давления, в зависимости от шага установки колец. Кривая 1 соответствует величине  $\Delta p_f/\Delta p_{f0}$ , 2 —  $I/I_0$ , 3 —  $\Delta p_m/\Delta p_{m0}$ , 4 —  $\tau/\tau_0$ . Здесь  $\Delta p_f$ ,  $I$ ,  $\Delta p_m$  и  $\tau$  — соответственно избыточное давление на фронте, импульс фазы сжатия, максимальное избыточное давление и длительность фазы сжатия в отраженной волне. Те же параметры с индексом ноль относятся к перечисленным величинам в отраженной неослабленной волне. Из фиг. 2 следует, что расстановка колец с  $s=50$  мм является самой эффективной как по достигнутому уровню ослабления избыточного давления в отраженной волне, так и по снижению уровня величин импульса. При использованной конфигурации экрана возрастает лишь длительность фазы сжатия  $\tau$ . Измерения гидравлического сопротивления труб с кольцевыми вставками обнаруживают, по [4], немонотонный характер зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от шага установки колец  $s$ . Максимум коэффициента сопротивления приходится на относительное расстояние между кольцами  $s/k=6-10$ . В условиях экспериментов, представленных на фиг. 2, наибольшее ослабление ударных волн также достигается при  $s/k \approx 10$ . Эксперименты с экранами другой длины и с другой высотой колец показали, что наиболее эффективное ослабление волн достигается при  $s/k=5-10$ , т. е. при максимальном значении гидравлического сопротивления экрана.

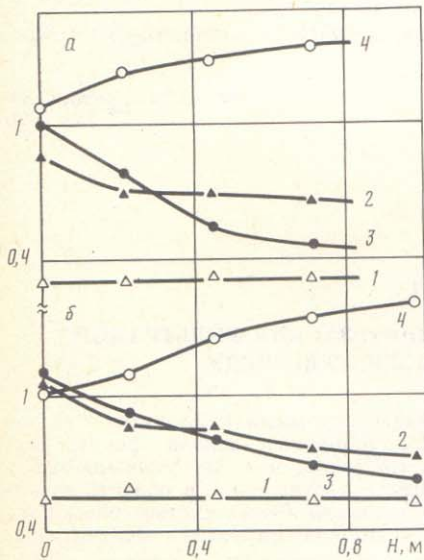
На фиг. 3 показано изменение параметров в отраженной ослабленной ударной волне в зависимости от длины секции с кольцами, примыкающей к торцевой стенке ( $s=53$  мм,  $M_0=1,5$ ). Здесь и ниже нумерация кривых соответствует фиг. 2. При малой длине экрана ( $L \leq 40$  см) импульс, действующий на торец камеры низкого давления, и максимальное избыточное давление в отраженной волне несколько превышают соответствующие значения при нормальном отражении неослабленного фронта. С ростом длины  $L$  максимальное избыточное давление и импульс возрастают до тех пор, пока на процесс не начинает влиять отраженная от торца камеры высокого давления волна разрежения, приводящая к снижению  $\Delta p_m$  и  $I$ . Таким образом, длина экрана, необходимого для эффективного ослабления импульса в отраженной



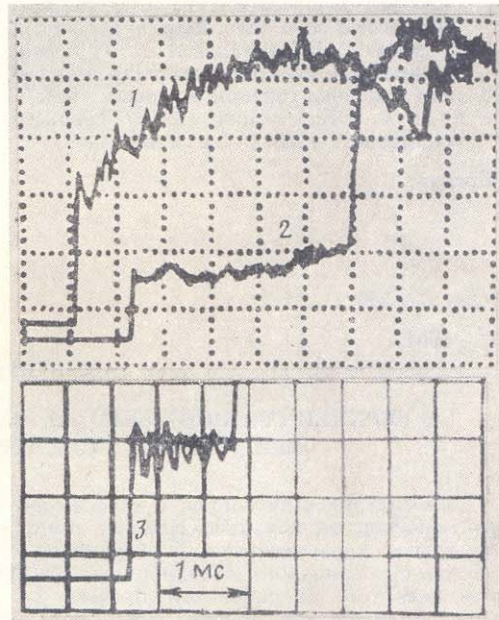
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

ударной волне, определяется также длиной (или длительностью фазы сжатия) исходного возмущения.

Следующая серия экспериментов посвящена исследованию влияния воздушного зазора между экраном и поверхностью защищаемого объекта (торца камеры низкого давления) на эффективность защиты. На фиг. 4 приведены зависимости измеряемых величин при  $M_0=1,5$  от длины зазора  $H$  для экранов из кольцевых вставок с  $s=53$  мм,  $L=47$  см (фиг. 4, а) и  $L=21$  см (фиг. 4, б). Из фиг. 4 видно, что избыточное давление на фронте отраженной волны практически не зависит от  $H$ , тогда как импульс и максимальное избыточное давление сначала резко уменьшаются с ростом  $H$ , а затем (при  $H \geq L$ ) убывают относительно медленно. Длительность фазы сжатия увеличивается с ростом  $H$ . По характеру кривых 3 на фиг. 4 можно предположить, что при больших  $H > L$  отраженная ударная волна приобретает ступенькообразную форму, так что  $\Delta p_m \approx \Delta p_f$ . Оптимальная величина воздушного зазора между экраном и защищаемой поверхностью порядка длины самого экрана.

На фиг. 5 приведены осциллограммы записи давления в ударной волне ( $M_0 = 1,5$ ) при прохождении через шероховатый участок (экран) длиной  $L = 50$  см ( $s = 91$  мм;  $H = 0,43$  м). Расстояние от нижнего торца до датчика 1 — 0,68 м (цена деления вертикальной шкалы 0,04 МПа), до датчика 2 — 0,44 м (0,06 МПа), до датчика 3 — 0,2 м (0,03 МПа). Видно, что после выхода из экрана волна с нарастающим за фронтом давлением трансформируется в стандартную ударную волну ступенчатого профиля с неизменной величиной избыточного давления на фронте и за ним. Эксперименты с другими конфигурациями экранов и другими  $M_0$  подтвердили обнаруженный эффект.

Таким образом, использование экрана в виде каскада колец ограниченной длины позволяет эффективно ослабить ударные волны на выходе из экрана, т. е. уменьшить перепад давления на фронте при сохранении ступенчатого профиля давления. Трансформация профиля давления за ударным фронтом, сопряженная с потерями импульса на трение газового потока, проявляется только внутри загроможденного участка и в его непосредственной близости. Удаление защищаемого объекта на незначительную длину от экрана снимает неопределенность в форме воздушной волны, обусловленную релаксационным воздействием фрикционных потерь на газовый поток.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гурин А. А., Малый П. С., Савенко С. К.* Ударные воздушные волны в горных выработках. М.: Недра, 1983. 223 с.
2. *Чеховских А. М., Орлов Н. В., Шапуров А. В.* Влияние запыленности воздуха на процесс распространения воздушных ударных волн в горных выработках // Горноспасательное дело. Вып. 5. Донецк, 1972. С. 90–93.
3. *Медведев С. П., Поленов А. Н., Гельфанд Б. Е., Цыганов С. А.* Воздушные ударные волны при внезапном расширении сжатой двухфазной среды насыщенной плотностью // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23. № 3. С. 135–139.
4. *Koch R.* Druckverlust and wärmeübergang bei verwirbelter strömung // VDI-Forschungsheft. 1958. В. 24. № 469. 44 S.

Москва

Поступила в редакцию  
10.1.1990