

СНИЖЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ВОЗДУШНО-ВОДЯНОЙ ЗАВЕСЫ

А. А. Бузуков

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Экспериментально исследована эффективность использования воздушно-водяной капельной завесы для защиты от силового и шумового действия воздушной ударной волны открытого взрыва. Показано, что завеса, создаваемая выбросом распыленной воды при подводном упреждающем взрыве детонирующего шнура, является надежным средством снижения давления на фронте ударной волны. Изучена зависимость «эффективного коэффициента снижения массы заряда» от положения завесы относительно места взрыва, ее протяженности, времени развития и других условий. Обнаружено наличие зон, в которых наблюдаются локальные спад или подъем давления в ударной волне, объясняемые наложением на нее вторичных волн сжатия и разрежения. Рассмотрены возможные физические механизмы, благодаря которым обеспечивается защитный эффект.

По-видимому, первая информация об успешном опыте «направленного противодействия» воздушной ударной волне (УВ) с помощью образования на пути ее распространения воздушно-водяной завесы (ВВЗ) появилась в начале 60-х годов [1] и относилась, в первую очередь, к условиям работы горно-добывающих предприятий. При этом ВВЗ прежде всего рассматривалась как средство, предотвращающее пылеобразование от взрывной волны и тем самым снижающее вероятность возникновения взрывоопасной атмосферы в угольных [1], соляных и калийных [2] шахтах. Показано также, что ВВЗ является существенно более эффективным способом предупреждения взрыва и гашения уже воспламенившейся метановоздушной смеси или угольной пыли, чем выброс инертных порошков [3–6]. Описаны случаи успешного использования ВВЗ в реальных аварийных ситуациях [3]. Большое внимание уделено вопросам защиты сооружений, оборудования, коммуникаций от непосредственного силового действия УВ, что особенно важно при проведении массовых взрывов в подземных рудниках [7–9]. Практические рекомендации, разработанные на основании результатов экспериментов в опытной штольне [8, 9], проверялись в условиях действующего производства. Испытания [10] позволили установить, что благодаря применению ВВЗ затраты на восстановительные работы в шахте сократились

в среднем на 50 %. Опубликованы сведения об успешном испытании ВВЗ и их использовании на горно-добывающих предприятиях Чехословакии, Австрии, Болгарии, Германии [3] и Австралии [7].

В процессе экспериментальных исследований разработаны и апробированы различные способы создания ВВЗ: стационарные водораспыливающие системы [1], в том числе промышленные «туманообразующие установки» [6]; способ, при котором сама взрывная волна опрокидывает установленные в выработках «корыта» с водой [3]; взрывное распыление воды, заготовленной в эластичных резервуарах, подвешенных в выработке [4] или уложенных на грунте [5, 8], а также в стационарных водоемах, окружающих место проведения взрыва [11]; водяная забойка при взрывах шпуровых [2] или накладных [12] зарядов.

Следует отметить, что параллельно с исследованием защитных свойств ВВЗ разрабатывались и другие средства снижения разрушающего действия УВ — пассивно-механические (породные, песчаные, водяные и др.) заслоны или перемычки [13] или защитные экраны из высокократной пены [14]. Испытания показали, что обустройство таких систем и непрерывное поддержание их в рабочем состоянии требуют значительных затрат, а эффективность не оправдывает затраченных средств [13, 14 и др.]. Что же касается исследований защитных свойств ВВЗ по отношению

к УВ открытых взрывов, то они проводились в ограниченном объеме [10, 11], а их результаты начали публиковать относительно недавно [15].

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования, в котором изучалось влияние условий опыта на защитные качества ВВЗ при образовании УВ от надводного взрыва сосредоточенных зарядов взрывчатого вещества (ВВ) массой $2,5 \div 30$ кг. В этих экспериментах завеса создавалась путем разового импульсного выброса распыленной воды от упреждающего подводного взрыва вспомогательного заряда — детонирующего шнура [11]. В этих опытах давление на фронте воздушной УВ измеряли с помощью мембранных крешерных датчиков [16]. Такие механические системы определения параметров воздушной УВ при соответствующем метрологическом обеспечении просты и надежны, и их успешно используют при полигонных испытаниях [8, 10, 17].

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 представлены схемы, поясняющие условия проведения экспериментов. Сосредоточенные заряды ВВ устанавливались на плотиках на поверхности водоема. На расстоянии r от заряда на стойках подвешивались с заглублением h нити детонирующего шнура (ДШ) марки ДШ-В. В первом варианте (*а*) двойная нить шнура полностью окружала место взрыва основного заряда ($r = 3$ м, $h = 20$ см). Во втором (*б*) — отрезки ДШ закреплялись на стойках ($h = 15$ см) в несколько рядов с шагом 1 м так, чтобы при их одновременном взрыве ВВЗ перекрывала сектор 90° в направлении предполагаемого защищаемого объекта. В опытах меняли количество взрываемых рядов ДШ и их расположение. Таким образом, можно было оценивать влияние положения завесы относительно места взрыва и ее протяженности в направлении распространения волны на защитные свойства.

Для упреждения взрыва ДШ перед подрывом основного заряда использовали пиротехнические реле задержки детонации КЗДШ-58, а первичное инициирование шнура осуществляли от электродетонатора ЭКД-8Э. Путем последовательного соединения нескольких реле время развития ВВЗ Δt в различных опытах устанавливали от 0,2 до 0,5 с.

Для измерения параметров УВ, образующихся непосредственно от взрыва основного

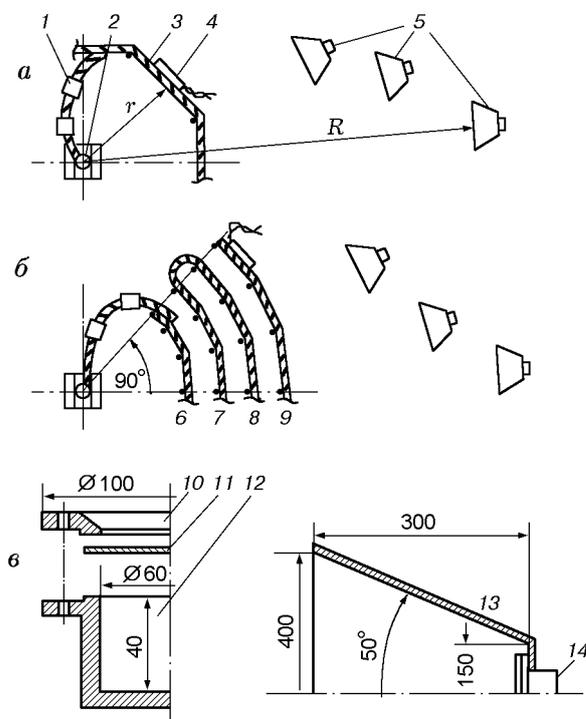


Рис. 1. Схемы организации экспериментов:

а — расположение основного и вспомогательного зарядов при создании однорядной круговой воздушно-водяной завесы, *б* — то же самое при создании секционной многорядной завесы, *в* — устройство мембранного крешерного датчика давления, *г* — схема рупорного усилителя; 1 — пиротехническое реле задержки детонации, 2 — основной заряд ВВ, 3 — детонирующий шнур, 4 — электродетонатор, 5 — рупорные акустические усилители, 6–9 — ряды детонирующего шнура, 10 — прижимной фланец, 11 — мембрана, 12 — корпус датчика, 13 — рупор акустического усилителя, 14 — датчик давления

заряда, а также ослабленных после их взаимодействия с завесой, использовали мембранные крешерные датчики давления, общий вид которых представлен на рис. 1, в. Мембраны датчиков изготавливали из свинцового проката толщиной $\delta = 0,25 \div 1,25$ мм. Этим, с одной стороны, обеспечивалась высокая чувствительность датчиков (надежно регистрируемые предельно низкие перепады давления при статической нагрузке составляли 8 кПа). С другой стороны, мембраны из свинца хорошо сохраняют остаточный прогиб f после снятия нагрузки. Следует отметить также, что результатами испытаний установлены ограничения: при $f \leq 0,5$ мм или $f \geq 6$ мм измерения становятся ненадежными. В первом случае на остаточный прогиб заметное влияние оказывают упру-

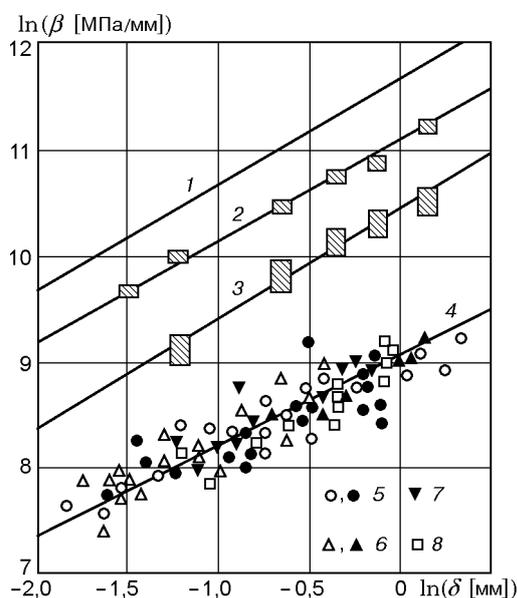


Рис. 2. Результаты тарировки датчиков (нагрузочные характеристики):

1 — расчет [16], 2 — экспериментальная статическая тарировка, 3 — динамическая тарировка, 4 — динамическая тарировка с применением рупорных усилителей при поверхностных взрывах: гексогена (5), сплава ТГ 50/50 (6), тротила (7), аммонита (8); светлые точки — наземные взрывы, темные — надводные

гие свойства материала. Во втором — большая деформация мембраны приводит к ее сильному истончению, а при этом нарушается линейная связь между стрелой прогиба f и нагрузкой Δp [16, 17].

Значительный интерес представляют данные о параметрах УВ на больших удалениях от места взрыва, где давление на фронте волны приближается к пределу чувствительности датчиков. Поэтому в опытах использовали рупорные акустические усилители (см. рис. 1, 2) с установленными в их доньшке описанными выше мембранными датчиками и размещали их на расстоянии $R = 10 \div 80$ м (5 на рис. 1, а). Благодаря использованию этих устройств чувствительность системы измерения давления возросла до 1,6 кПа.

Определение рабочих характеристик системы осуществляли как расчетным путем, так и с помощью статических и динамических тарировок. На рис. 2 приведены результаты такой методической проработки — зависимость нагрузочной характеристики $\beta = \Delta p/f$ от толщины мембраны δ : расчетная [16] для статической нагрузки; экспериментальная статиче-

ская тарировка; зависимость, полученная при динамической тарировке на воздушной ударной трубе; динамическая тарировка датчиков с рупорными акустическими усилителями. В последнем случае нагрузки во время наладочных испытаний создавали при наземных взрывах или взрывах на поверхности водоема зарядов ВВ массой $0,5 \div 120$ кг. При этом перепад давления на фронте воздушной УВ (Δp_F , МПа) и длительность действия его положительной фазы (τ_+ , мс) рассчитывали по формулам Садовского [18]:

$$\Delta p_F = 0,096 \bar{G} + 0,395 \bar{G}^2 + 1,317 \bar{G}^3, \quad (1)$$

$$\tau_+ = 1,5 \sqrt[6]{\bar{G}} \sqrt{R}, \quad (2)$$

где $\bar{G} = \sqrt[3]{G}/R$ — приведенная масса заряда, размерные коэффициенты установлены при условии, что масса заряда G выражена в килограммах (в пересчете на тротильный эквивалент), а расстояние R — в метрах.

Статистическая обработка всего объема накопленных при наладочных испытаниях данных позволила установить, что их среднее отклонение при измерении давления составляет 13 %.

Анализ результатов экспериментов показывает [16], что во всех опытах с помощью выбранной системы измерений регистрировали перепад давления на фронте УВ Δp_F . При условии $\tau_+ \geq \tau_t$, где τ_t — продолжительность вытяжки мембраны при внезапно приложенной нагрузке, погрешность измерения Δp_F не превышает, согласно [16], 5 %. При $\tau_+ \geq 3\tau_t$ погрешность возрастает до 10 %. Соответствующие оценки свидетельствуют о том, что в 85 % опытов ($G \geq 4$ кг и одновременно $R \geq 15$ м) справедливо первое условие, а в остальных выполняется второе. Таким образом, при обработке экспериментальных данных допускалась систематическая погрешность до 10 %, если измерения проводили на близких к месту взрыва расстояниях и заряды были относительно невелики. В остальных случаях погрешность не превышала 5 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 3 представлены зависимости эффективного коэффициента снижения массы заряда K_G от расстояния R между местом установки заряда и точкой измерения (см. рис. 1, а), от массы заряда G , от положения заве-

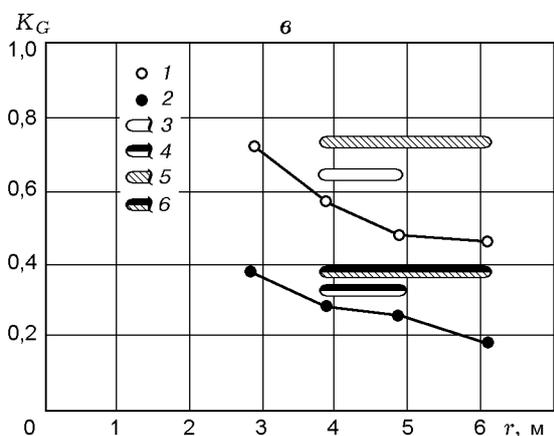
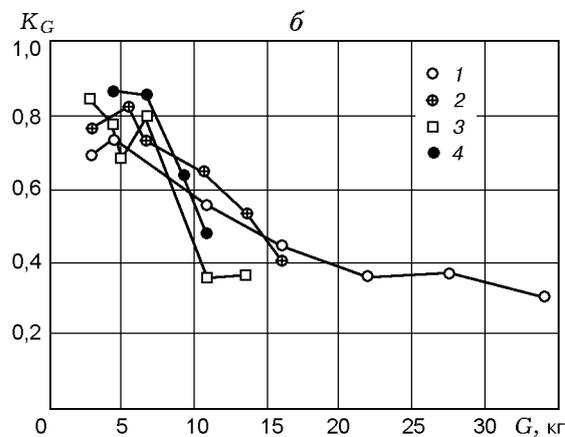
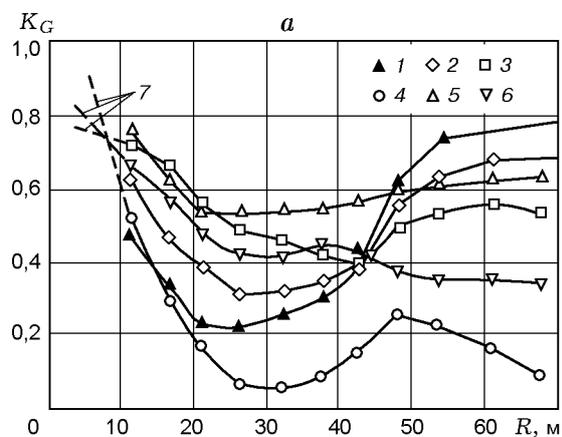


Рис. 3. Зависимость эффективного коэффициента снижения массы заряда от расстояния до места взрыва (а), от мощности взрыва (б), от положения секторной завесы (в):

а — $G = 4 \div 6$ (1), $12 \div 15$ (2), $25 \div 30$ (3); время задержки взрыва рабочего заряда $\Delta t = 0,3$ (1–3), $0,2$ (4), $0,4$ (5), $0,5$ с (6), заряд тротила 27,6 кг; 7 — предполагаемый ход зависимостей;
 б — $r = 2,9$ (1, 3), $3,5$ м (2, 4), $R = (80 \pm 10)$ м, $\Delta t = 0,26$ с, одинарная нить ДШ-В $h = 15$ см, заряд аммонита (1, 2), сплава ТГ 50/50 (3, 4);
 в — заряд ТГ 50/50: $G = 12,2$ (1, 3, 5), 30 кг (2, 4, 6), $R = 35$ м, $\Delta t = 0,26$ с; завеса: 1, 2 — однорядная, 3, 4 — двухрядная, 5, 6 — трехрядная

сы r относительно места взрыва при различной ее протяженности, определяемой количеством одновременно взрываемых рядов ДШ (см. рис. 1,б). В качестве коэффициента K_G , характеризующего защитное действие ВВЗ, принята величина $(G - G_S)/G$ [8], где G_S — масса некоторого фиктивного заряда ВВ, который, будучи взорван вместо основного без завесы, образовал бы УВ с давлением на фронте, равным измеренному после прохождения волною зоны завесы.

При анализе результатов экспериментов, приведенных на рис. 3,а (схема опытов изображена на рис. 1,а), прежде всего обращает на себя внимание своеобразный характер зависимостей $K_G(R)$. Во всех случаях в ближней к завесе зоне ($R \approx 10$ м) наблюдаются наиболее высокие значения K_G , достигающие в ряде случаев $0,7 \div 0,8$. Но по мере удаления от места взрыва защитный эффект ВВЗ падает, и на расстоянии $20 \div 40$ м значения K_G оказываются минимальными. Затем они снова возрастают и стабилизируются на некотором уровне.

На предельно больших расстояниях, определяемых возможностями используемой системы измерений, этот уровень может оказаться как выше, так и ниже измеренного непосредственно за завесой.

Примечательно, что качественный характер зависимостей $K_G(R)$ сохраняется при изменении условий опытов, но количественно они зависят от многих факторов. В первую очередь, это относится к мощности взрыва. Из рис. 3,а следует, что значения K_G в ближней к завесе зоне оказываются ниже, а «провалы» на средних дистанциях более значительны при взрывах меньших зарядов. При этом положения минимумов K_G при снижении массы заряда смещаются в сторону малых расстояний. В дальнейшем значения K_G «подтягиваются» к характерным для каждого значения G уровням: на предельных расстояниях защитный эффект заметно падает с возрастанием массы заряда.

Об этом же свидетельствуют данные, представленные на рис. 3,б. Спадающий характер зависимости $K_G(G)$ позволяет предпо-

лагать существование некоторого предела возможностей ВВЗ к снижению параметров УВ. Благодаря этому ее свойству с увеличением мощности взрыва и, соответственно, с повышением давления во внедряющейся в завесу волне доля потерь в ней после исчерпания такого «защитного ресурса» снижается.

В свете изложенного выше предположения представляют интерес результаты экспериментов, в которых изучалось влияние расстояния от места взрыва до завесы и ее протяженности на коэффициент K_G . Во всех случаях датчики давления располагали на расстоянии $R = 35$ м, т. е. в зоне спада зависимости $K_G(R)$. Однорядную завесу создавали взрывом одинарных нитей ДШ, устанавливавшихся в одном из положений: $r = 2,9; 3,9; 4,9$ или $6,1$ м. Для образования двухрядной завесы одновременно взрывали две нити шнура на расстояниях $3,9$ и $4,9$ м, а трехрядной — три нити на расстояниях $3,9; 4,9; 6,1$ м. То, что в данном случае завеса не является круговой, не позволяет проводить строгое количественное сопоставление полученных результатов с представленными на рис. 3,а. Но основные закономерности физических процессов в обоих случаях одинаковы, и это находит свое отражение на графиках. В частности, из рис. 3,в следует, что значения коэффициента K_G возрастают при изменении массы заряда от малого (3 кг) к увеличенному (12,2 кг). Но удаление ВВЗ от места взрыва рабочего заряда и, соответственно, снижение давления в УВ ведут к снижению защитного эффекта.

Увеличение протяженности ВВЗ приводит к возрастанию K_G , но этот эффект (полосы 3, 4 и 5, 6 на рис. 3,в) выражен слабо: при увеличении протяженности l в 3–4 раза K_G возрастает не более чем на 35 %. Этот результат соответствует описанному выше. Действительно, в опытах наращивание протяженности завесы осуществляли с ее внешней от места взрыва стороны. Поэтому в каждый следующий слой завесы входила УВ, уже ослабленная взаимодействием с предыдущим слоем. Кроме того, интенсивность волны падала из-за ее радиальной симметрии по мере удаления от места образования. Оба эти обстоятельства и ведут к падению уровня потерь в УВ, и эффективность наращивания протяженности завесы невелика. Таким образом, оказалось, что защитное действие однорядной завесы, расположенной близко к заряду ВВ, не ниже, чем отодвинутой многорядной.

На рис. 3,а представлены также данные, демонстрирующие зависимость защитных свойств ВВЗ от степени ее развития. Это качество завесы можно охарактеризовать периодом Δt задержки взрыва основного заряда относительно момента инициирования ДШ. Опыты показали, что максимальные значения K_G (в том числе измеренные на предельно больших расстояниях) наблюдаются при $\Delta t = 0,35$ с. Как увеличение, так и уменьшение интервала Δt снижает значения K_G . В первом случае это объясняется тем, что при относительно длительной задержке взрыва основного заряда завеса становится слишком разреженной, поскольку основная часть воды, поднятой взрывом детонирующего шнура, перемещается в головную часть султана на высоту $7 \div 10$ м [10]. Поэтому ВВЗ становится «прозрачной» для УВ, и ее защитное действие снижается. Во втором случае завеса при малом времени развития, наоборот, не успевает подняться на высоту, необходимую для перекрытия сектора распространения УВ в горизонтальном направлении. Действительно, киносъемка показала [10], что в описываемых условиях за время $0,2$ с высота кольцевого барьера распыленной воды, выброшенной подводным взрывом ДШ, составляет всего $2 \div 3$ м. Поэтому волна дифрагирует над ВВЗ, в результате чего ее интегральные защитные качества не могут проявиться в полной мере. Но во всех случаях «волнообразный» характер зависимости $K_G(R)$ остается неизменным.

О том, что такой результат не случаен, свидетельствуют измерения параметров воздушных УВ после их взаимодействия с ВВЗ, проводившиеся в опытной штольне [8, 9]. Здесь характер изменения коэффициента K_G по длине выработки оказался таким же: наиболее высокие значения (до $0,8$) он имеет или в самой завесе, или сразу же за ней, затем K_G снижается, а на больших расстояниях от взрывной камеры снова возрастает.

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ ВВЗ

Для объяснения изложенных выше результатов экспериментов проанализируем основные возможные физические модели, описывающие процесс взаимодействия воздушной УВ с воздушно-водяной капельной завесой.

Вначале рассмотрим рассеяние УВ на отдельных каплях воды как на элементах про-

странственной жесткой решетки («перфорированная преграда» [19], «проницаемая стенка» [20] и др.) или решетки, деформируемой под действием потока газа за фронтом УВ [21–23]. Такая модель удовлетворительно описывает явление в случае взаимодействия волны с достаточно разреженным скоплением частиц. Но если занятая ими зона имеет большую протяженность, то результирующие потери в волне могут оказаться заметными. Так, например, оценка [22] и соответствующие экспериментальные исследования [21, 22] показывают, что для сфероподобных частиц диаметром ≈ 40 мкм, распределенных в пространстве с плотностью 10^9 м^{-3} (для распыленной воды это составляет $\approx 0,03 \text{ кг/м}^3$), давление на фронте УВ после прохождения ею четырехметровой зоны снижается на $10 \div 25 \%$ в зависимости от интенсивности исходной волны. Следует подчеркнуть, что рассматриваемый механизм взаимодействия УВ с дисперсной средой физически состоятелен лишь в том случае, когда частицы в ней расположены достаточно далеко друг от друга (в приведенном примере дистанция между частицами составляет 25 их диаметров) и волны рассеиваются на каждом элементе решетки независимо от наличия других. В то же время показано [24, 25], что при сокращении расстояния между частицами до 5 их линейных размеров возникают эффекты затенения и вторичного рассеяния УВ, и тогда линейная расчетная модель оказывается несостоятельной.

Если обратиться к реальным характеристикам ВВЗ, создаваемой подводным взрывом детонирующего шнура, то в данном случае правомерность распространения описанного механизма на процесс взаимодействия УВ с завесой становится проблематичной. Действительно, оценка [9, 26] показывает, что средняя плотность распределения жидкости в такой завесе колеблется от 20 до 5 кг/м^3 при $\Delta t = 0,2 \div 0,5 \text{ с}$, а протяженность завесы составляет $\approx 0,5 \text{ м}$ на один ряд ДШ. Кроме того, средний размер капель воды в ВВЗ оценивается в $1 \div 5 \text{ мм}$ [27, 28], а расстояние между ними лишь в $3 \div 5$ раз превышает их диаметр.

В таких условиях более правильным является другой подход, в соответствии с которым процесс взаимодействия УВ с завесой рассматривают как прохождение волной границы раздела двух сред с различными акустическими сопротивлениями [29, 30]. Решение идеализиро-

ванной задачи о прохождении УВ сквозь слой утяжеленной газоподобной среды рассмотрено, например, в [31], а в [32, 33] оно распространено на пенную пробку в предположении замороженной температуры жидкого компонента. Результаты расчетов и соответствующих экспериментальных исследований [33–35] показывают, что снижение давления на фронте УВ после прохождения ею зоны завесы слабо зависит от исходного давления в волне и составляет $15 \div 20 \%$. Если такой расчет предпринять по отношению к условиям проводившихся экспериментов ($G = 3 \div 30 \text{ кг}$, $r = 3 \text{ м}$, $l \approx 0,5 \text{ м}$), то получим, что $K_G \leq 0,35$.

Этот результат принципиален, и он объясняется характером газодинамических течений, составляющих основу описываемой модели. Модель предполагает, что при натекании УВ на слой дисперсной среды образуются две волны — отраженная от его передней стенки обратная УВ и проходящая УВ, распространяющаяся по самому слою. После выхода проходящей волны на противоположную поверхность слоя в газ излучается новая УВ со сниженным по сравнению с исходной волной давлением на фронте. При этом давление снижается лишь за счет двух ударных переходов на границах раздела сред (считается, что другие потери отсутствуют). Расчет показывает [36], что в такой постановке падение давления не превышает 30% . Кроме того, отметим, что обсуждаемая модель не содержит информации об образовании каких-либо вторичных газодинамических течений, которые могли бы повлиять на результирующий защитный эффект.

Но, как показывают результаты описываемых экспериментов и исследований [9, 10, 15], реальное защитное действие воздушно-водяной капельной завесы значительно выше рассчитанного по описанным моделям. Это объясняется тем, что в них дисперсные среды рассматриваются как «пассивные» [10], в которых отсутствуют диссипативные процессы. В то же время записи эпюр давления в УВ в ходе их взаимодействия как со слоем газожидкостной смеси [15], так и с пенной пробкой [35] показывают, что в таких средах происходит перестроение их физической структуры, приводящее к необратимым потерям и дополнительному образованию серии волн сжатия и разрежения. Именно их взаимодействие с первичной УВ приводит к эффектам, характеризуемым в конечном счете как защитное действие ВВЗ.

Что касается непосредственно воздушно-водяной завесы, то известно [37–40], что при внедрении в нее фронта УВ на некотором расстоянии за ним происходят диспергирование капель жидкости до мелкодисперсного состояния и быстрое вовлечение образовавшейся водовоздушной смеси в движение. Отметим, что в данном случае именно процесс диспергирования капель воды, носящий «взрывной» характер [40], является ключевым, и с учетом этого можно говорить о третьем физическом механизме защитного действия ВВЗ. Очевидно, что за время активного взаимодействия воздушно-водяной завесой, которое в соответствии с (2) не превышало 10 мс, миллиметровые капли воды не успевают вовлечься в поток газа и тем самым не могут существенно повлиять на его структуру. Но период релаксации мельчайших капелек жидкости ($20 \div 50$ мкм [41]), образовавшихся в процессе диспергирования крупных, существенно меньше τ_+ . Поэтому быстрое «подвешивание» даже части инертной массы к потоку газа решающим образом влияет на его характер. При этом, очевидно, большое влияние на этот процесс оказывает динамика диспергирования капель.

Существование «периода задержки распыливания» [38, 40] связано с тем, что требуется определенное время на предварительную деформацию капли и развитие в ней соответствующего течения. Зато по прошествии этого времени разрушение капли и втягивание жидкости в поток происходят относительно быстро [38, 40]. Благодаря тому, что плотность образовавшейся дисперсной смеси многократно превышает плотность воздуха, происходит резкое торможение потока. Таким образом, в «недрах» УВ образуется утяжеленная низкоскоростная пробка, приводящая к формированию волны разрежения. Через некоторое время она догоняет ударный фронт, и при наложении этих газодинамических структур наблюдается спад давления в головной части УВ. Но, с другой стороны, перед затормозившим потоком давление резко возрастает, образуя волну сжатия. Под ее взаимодействием, а в некоторых случаях и под действием расширяющихся продуктов детонации водовоздушный поршень разгоняется и перед ним формируется вторичная волна сжатия, которая снова догоняет первичную, ослабленную. В результате через некоторое время на фронте головной УВ наблюдается новое повышение давления. При реали-

зации описанного «активного» [10] механизма взаимодействия УВ с завесой возможно образование последующих волн сжатия и разрежения. Они также вносят свой вклад в эффективность защитного действия ВВЗ. Что же касается относительно больших расстояний от места взрыва, то на них весь комплекс волн сжатия и разрежения трансформируется в единую автомодельную волну [42, 43]. При этом все потери, в том числе и образовавшиеся благодаря рассеянию УВ на отдельных каплях воды, суммируются [43, 44].

Описанный «активный» [10] механизм взаимодействия УВ с капельной воздушно-водяной завесой наглядно иллюстрируют кадры кинограммы на рис. 4. Здесь размещение основного и завесообразующего зарядов соответствует схеме, показанной на рис. 1, б: основной заряд ТГ 50/50 массой $G = 3$ кг, $\Delta t = 0,26$ с, завесообразующий заряд — одинарные нити ДШ на расстояниях $r = 3,9$ и $4,9$ м. Помимо демонстрации технологического процесса в целом, два из приведенных кадров обращают на себя особое внимание — пятый и седьмой. Из пятого кадра видно, что через несколько десятков миллисекунд после взрыва основного заряда завеса, до того представлявшая собою слой грубо раздробленной жидкости (см. предыдущие три кадра), превращается после прохождения сквозь нее УВ в белое, напоминающее паровое, диффузное облако тонко диспергированной воды. Из этого же кадра следует, что в процессе образования это водовоздушное облако сдвинулось (≈ 1 м) в направлении распространения волны, что свидетельствует о включении диспергированной воды в движение и о приобретении ею части импульса УВ. Из седьмого кадра видно, что наблюдается не только разгон слоя смеси потоком газа за фронтом УВ и разлетающимися продуктами детонации, но и прорыв последних сквозь завесу (на кадре продукты детонации из-за обильного содержания сажи имеют черный цвет). В таком случае вслед за головной волной и преследующей ее волной разрежения формируется вторичная мощная волна сжатия.

Попытка учесть нестационарный процесс распада капель жидкости в потоке газа за фронтом УВ (измельчение капель ведет к более быстрому вовлечению их в поток) предпринята в [45], где показано, что в зависимости от интенсивности этого процесса (различные механизмы аэромеханического разрушения капель

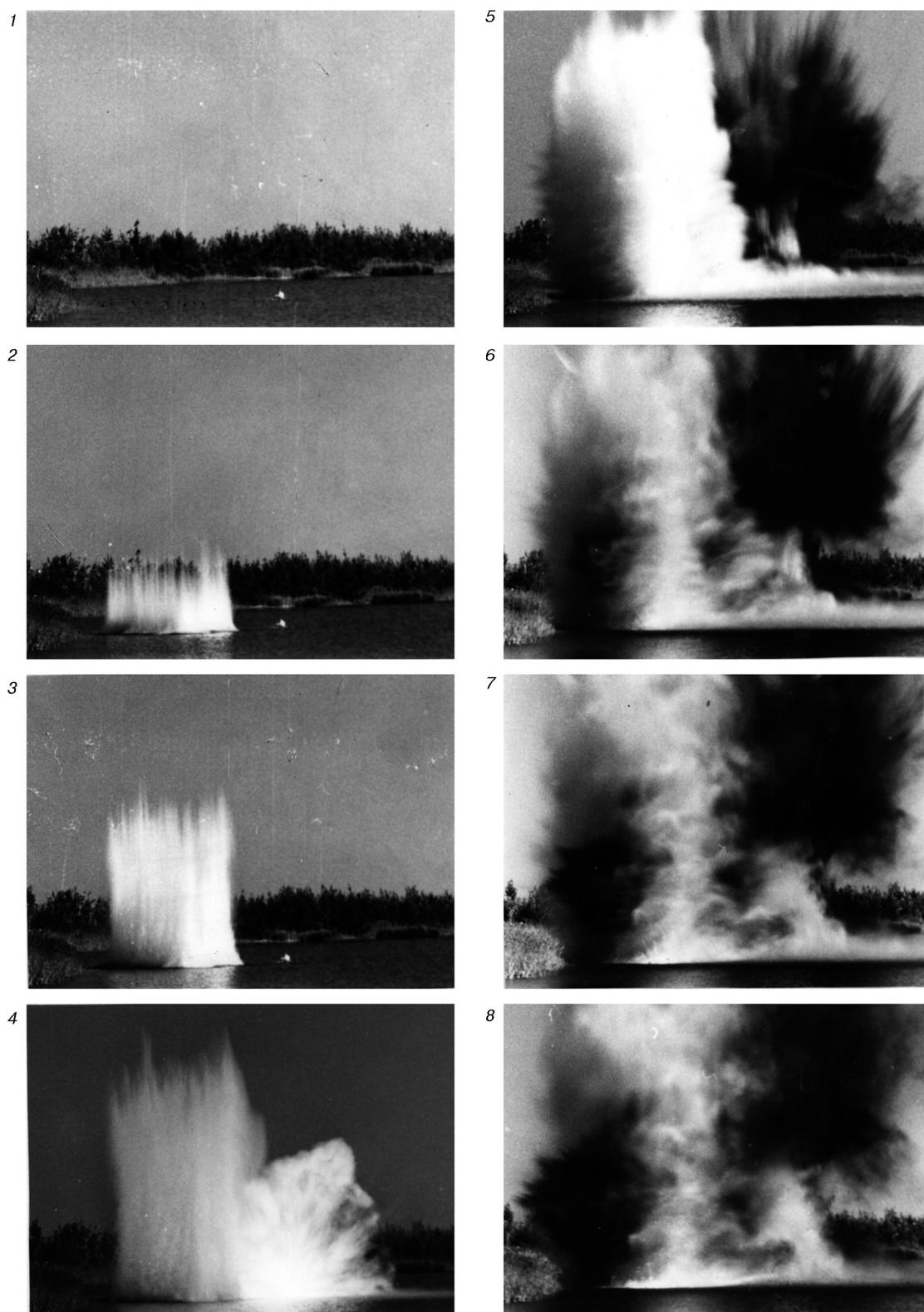


Рис. 4. Кинограмма процесса взаимодействия воздушной ударной волны с завесой:
моменты экспонирования кадров, с: 1 — 0, 2 — 0,032, 3 — 0,128, 4 — 0,256, 5 — 0,320, 6 — 0,384,
7 — 0,400, 8 — 0,540

жидкости описаны в [41]) существенно меняется структура течения в головной части УВ.

В работе [10] рассмотрена задача, позволяющая с учетом эффекта «задержки распыливания капель жидкости» [38, 40] рассчитывать траектории распространения волн разрежения и сжатия, образующихся при внедрении УВ в капельную водовоздушную среду, оценивать интенсивности этих волн, а также результаты их наложения на головную волну. С использованием ряда упрощающих допущений в одномерной постановке (плоская, стационарная УВ) определено расстояние, на котором наблюдается максимальное снижение давления на фронте УВ, рассчитано положение сечения, в котором вторичная волна сжатия достигает уже ослабленную первичную (при определенных условиях взаимодействие вторичной УВ и предшествующей ей волны разрежения начинается еще до выхода их в головной участок УВ), оценено снизу результирующее снижение давления на фронте УВ на больших расстояниях за завесой.

Непосредственное количественное сопоставление результатов вычислений по указанной схеме и экспериментально полученных в настоящей работе некорректно, так как опыты проводили в условиях, когда одномерность газодинамических течений заведомо не выполнялась. Однако большинство качественных результатов расчетов соответствуют данным опытов. В частности, в [10] показано, что на тех расстояниях, где достигается максимальное снижение давления на фронте УВ (это, как правило, зона, расположенная непосредственно за ВВЗ [8, 9]), коэффициент K_G может достигать значений $0,8 \div 0,9$, причем эти значения растут со снижением мощности взрыва (давления на фронте падающей УВ). Это обстоятельство на рис. 3, а условно обозначено штриховыми линиями 7. И наоборот, на расстояниях, где в головную часть УВ выходит вторичная волна сжатия, меньшие значения K_G наблюдаются при взрыве малых зарядов ВВ. Но на дальних от ВВЗ расстояниях, как показывают и расчет, и опытные данные (см. рис. 3, б), результирующий защитный эффект падает с увеличением мощности взрыва.

Представляет интерес зависимость защитного действия ВВЗ от содержания в ней воды. Расчет (специальных опытов не проводилось) показывает, что с уменьшением объемного содержания воды ($\alpha_W = 0,02 \div 0,0001$) значения

коэффициента K_G монотонно снижаются, но резкое падение наблюдается при $\alpha_W < 0,005$. Для ВВЗ с меньшим содержанием воды расчет по рассматриваемой схеме становится некорректным. При столь малых значениях α_W , как указывалось выше, более действенным становится другой физический механизм, в соответствии с которым процесс взаимодействия УВ со слоем воздушно-капельной среды представляется как рассеяние волны на отдельных каплях воды [19–23].

В [10] показано, что основную роль в снижении давления на фронте воздушной УВ играют слои ВВЗ, в которых происходит первичное взаимодействие волны с дисперсной средой. Поэтому наращивание протяженности завесы оказывается все менее эффективным. Этот расчетный результат соответствует данным экспериментов, представленным на рис. 3, в.

Таким образом, описанная физическая модель и разработанная на ее основе расчетная схема позволяют качественно и в определенной степени количественно охарактеризовать взаимодействие УВ с воздушно-водяной капельной завесой, а также объяснить ряд особенностей этого процесса, наблюдаемых в опыте.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально показано, что воздушно-водяные капельные завесы являются высокоэффективным техническим средством снижения механического и шумового действия воздушных ударных волн открытого взрыва сосредоточенного заряда. Установлена степень зависимости защитного эффекта от интенсивности исходной ударной волны и от таких характеристик завесы, как ее протяженность, расположение относительно места взрыва, содержание воды в ней и др.

2. Показано, что высокими защитными качествами обладают завесы, создаваемые выбросом распыленной воды при упреждающем подводном взрыве вспомогательного заряда — нитей детонирующего шнура, подвешиваемых с заданным заглублением в водоеме, окружающем место установки рабочего заряда. Защитные качества такой завесы, если их оценивать «эффективным коэффициентом снижения массы заряда», в отдельных случаях могут достигать 90 %.

3. Рассмотрены возможные физические механизмы взаимодействия воздушной ударной волны с водокапельной завесой, благодаря ко-

торым осуществляется снижение параметров волны. При малом содержании диспергированной воды в завесе последнюю можно рассматривать как пространственную полупроницаемую решетку, на которой происходит рассеяние волны, или как акустически более плотную, но сплошную среду, на границах которой осуществляется преломление волны. Но оценки и результаты экспериментов дают основание полагать, что в практически значимых случаях ведущим механизмом процесса является распыливание капель воды до мелкодисперсного состояния потоком газа за фронтом ударной волны и быстрое вовлечение образовавшейся водовоздушной смеси в движение. Благодаря этому в недрах волны, уже частично ослабленной за счет отражения, образуется низкоскоростная утяжеленная газодинамическая пробка, от которой вслед за головным ударным фронтом направляется сначала волна разрежения, а затем вторичная волна сжатия. В результате наложения всех газодинамических структур на некотором расстоянии от завесы наблюдается значительное снижение давления в ударной волне.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кравец В. В., Балановский В. Ф., Зинченко В. В. и др.** Эффективность водяных завес направленного противодействия ударной воздушной волне // Уголь Украины. 1962. № 5. С. 38–41.
2. **Медведев И. И., Бухаров И. И., Сафонов А. В.** Применение водяной забойки в калийных рудниках // Безопасность труда в промышленности. 1966. № 9. С. 45.
3. **Михайлов В. М.** Водяные заслоны для локализации взрывов угольной пыли // Там же. С. 62–63.
4. **Стигачев В. И., Мегеря В. М., Шевцов Н. Р.** Совершенствование водяной завесы при взрывных работах // Безопасность труда в промышленности. 1966. № 10. С. 30–40.
5. **Мегеря В. М.** К вопросу оценки предохранительного действия водяных завес // Вопросы безопасности взрывных работ в угольных шахтах: Сб. статей / Министерство угольной промышленности СССР; МакНИИ. Макеевка, Донбасс, 1968. С. 121–132.
6. **Стигачев В. И., Кудинов Ю. В., Мегеря В. М.** Исследование возможности создания водяных завес длительного действия // Там же. С. 142–151.
7. **Water Barriers** // Mining J. 1970. V. 274, N 7028. P. 394.
8. **Бузуков А. А., Сваровский Б. М., Щекотихин Б. Н.** Защита от воздушных ударных волн в подземных выработках с помощью воздушно-водяной завесы // Подземная разработка рудных месторождений: Сб. науч. трудов / Под ред. Н. Г. Дубинина / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т горного дела. Новосибирск, 1970. С. 176–185.
9. **Бузуков А. А., Щекотихин Б. Н.** О возможности использования защитных свойств воздушно-водяной завесы при проведении взрывных работ в подземных условиях // Использование взрыва в народном хозяйстве: Труды VIII сессии Научного совета по народнохозяйственному использованию взрыва, Днепропетровск, 15–20 мая 1969. Часть 2: Действие взрыва в скальных породах. Киев: Наук. думка, 1970. С. 346–352.
10. **Исследование** защитного действия воздушно-водяной завесы от воздушных ударных волн при взрывных работах в подземных условиях: Научный отчет / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т горного дела. Новосибирск, 1972.
11. **А. с. 187580 СССР**, Кл. 78e, 1; 72g, 7/03. Устройство для защиты объектов от воздействия ударных волн при открытых взрывных работах / А. А. Бузуков. № 947688/40-23; Заявл. 17.03.65; Оpubл. 11.10.66, Бюл. № 20.
12. **Кудинов Ю. В., Мегеря В. М., Шевцов Н. Р., Воропаева С. Б.** Безопасный способ дробления негабаритов накладными зарядами в шахтах, опасных по пыли и газу // Вопросы безопасности взрывных работ в угольных шахтах: Сб. статей / Министерство угольной промышленности СССР; МакНИИ. Макеевка, Донбасс, 1968. С. 151–159.
13. **Савенко С. К., Гурин А. А., Граммков В. Л.** Гашение воздушных ударных волн в подземных выработках // Разработка рудных месторождений. 1970. № 10. С. 56–61.
14. **Шевцов Н. Р., Стигачев В. И., Воронин П. А., Арабев М. М.** Исследование предохранительной среды из высокократной воздушно-механической пены в шахте // Вопросы безопасности взрывных работ в угольных шахтах: Сб. статей / Министерство угольной промышленности СССР; МакНИИ. Макеевка, Донбасс, 1968. С. 132–141.
15. **Бузуков А. А.** Взаимодействие воздушной ударной волны с газожидкостным экраном // Дисперсные системы: Тез. докл. XVIII конференции стран СНГ. Одесса, Украина, 14–18 сентября 1998. Одесса: Одесский гос. ун-т, 1998. С. 39–40.
16. **Захарова Т. В., Харитон Ю. Б.** Теория мембранного крешера // Физика взрыва: Сб. трудов в области физики взрыва / АН СССР. Ин-т хим. физики. М.: Изд-во АН СССР, 1952. № 1. С. 117–129.

17. **Van Netten A. A., Dewey J. M.** A study of blast wave loading on cantilevers // *Shock Waves*. 1997. V. 7, N 3. P. 175–190.
18. **Садовский М. А.** Механическое действие воздушных ударных волн по данным экспериментальных исследований // *Физика взрыва: Сб. трудов в области физики взрыва / АН СССР. Ин-т хим. физики. М.: Изд-во АН СССР, 1952. № 1. С. 20–110.*
19. **Шакин А. А., Доценко В. А.** Взаимодействие ударных волн с перфорированными преградами // *Механическое действие ударных волн: Тр. военно-инж. академии им. В. В. Куйбышева. М.: ВИА, 1967. Вып. № 26. С. 5–78.*
20. **Войтенко Д. М.** Взаимодействие ударной волны и проницаемой стенки // *Вестн. МГУ. Сер. 1. Математика, механика. 1969. № 3. С. 118–122.*
21. **Eisuke Outa, Kiyohiro Tajima, Hiroomi Morii.** Experiments and analyses on shock waves propagating through a gas — particle mixture // *Bul. JSME*. 1976. V. 19, N 130. P. 384–394.
22. **Aisik F., Ben-Dor G., Elperin T. et al.** Attenuation law of planar shock waves propagating through dust — gas suspensions // *AIAA Journal*. 1995. V. 33, N 5. P. 953–955.
23. **Das H. K., Kurian J.** Attenuation of shock waves in gas — particle mixture // *AIAA Journal*. 1997. V. 35, N 3. P. 576–578.
24. **Dabora E. K., Fox G. E.** The breakup of liquid droplet columns by shock waves // *Astronautica Acta*. 1972. V. 17, N 4, 5. P. 669–674.
25. **Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Тимофеев Е. И., Шепарнев С. М.** Разрушение совокупности капель жидкости в ударных волнах // *ПМТФ*. 1978. № 6. С. 43–48.
26. **Бузуков А. А., Тесленко В. С.** Начальная скорость подъема купола воды при подводном взрыве сферического и шнурового зарядов // *Физика горения и взрыва*. 1970. Т. 6, № 2. С. 253–255.
27. **Бородин В. А., Дитякин Ю. Ф., Клячко Л. А., Ягодкин В. И.** Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение, 1967.
28. **Плит И. Т., Слинченко В. Н., Олещенко И. А., Гупало М. Т.** К закономерности движения крупных капель в газовой среде // *Хим. технология*. 1971. Вып. 23. С. 72–78.
29. **Ляхов Г. М.** Отражение и преломление ударных волн в многокомпонентных средах и в воде // *Изв. АН СССР, ОТН. Механика и машиностроение*. 1959. № 5. С. 58–63.
30. **Рахматулин Х. А.** О распространении волн в многокомпонентных средах // *Прикл. математика и механика*. 1969. Т. 33, вып. 4. С. 598–601.
31. **Гласс И., Паттерсон Г.** 2. Теоретическое и экспериментальное исследование потоков в ударной трубе // *Ударные трубы: Сб. статей / Под ред. Х. А. Рахматуллина, С. С. Семенова. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. С. 138–190.*
32. **Гельфанд Б. Е., Губанов А. В., Тимофеев Е. И.** Особенности распространения ударных волн в пенах // *Физика горения и взрыва*. 1981. Т. 17, № 4. С. 129–136.
33. **Суров В. С.** Распад произвольного разрыва в односкоростной модели дисперсной среды Рахматулина // *Физика горения и взрыва*. 1997. Т. 33, № 1. С. 143–147.
34. **Британ А. Б., Зиновик И. Н., Левин В. А.** Распространение ударных волн по вертикальному столбу пены с градиентом плотности // *ПМТФ*. 1992. № 2. С. 27–32.
35. **Британ А. Б.** Прохождение ударной волны по защитному экрану из пены // *Теплофизика высоких температур*. 1993. Т. 31, № 3. С. 439–443.
36. **Суров В. С.** Анализ волновых явлений в газожидкостных средах // *Теплофизика высоких температур*. 1998. Т. 36, № 4. С. 624–630.
37. **Engel O. G.** Fragmentation of water drops in the zone behind an air shock // *J. Research of the National Bureau of Standards*. 1958. V. 60, N 3. P. 245–280.
38. **Бузуков А. А.** Разрушение капель и струй жидкости воздушной ударной волной // *ПМТФ*. 1963. № 2. С. 154–158.
39. **Reineke W. G., Waldman G. D.** An investigation of water drop disintegration in the region behind strong shock waves // *Intern. Conf. on Rain Erosion and Related Phenomena: Proceedings*. Wintly, Hampshire, England, Aug. 11–13, 1970. London, 1979. P. 1–42.
40. **Когарко С. М., Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Борисов А. А.** Динамика разрушения капель жидкости в газовом потоке // *Докл. АН СССР*. 1971. Т. 198, № 1. С. 71–83.
41. **Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М.** Разновидности дробления капель в ударных волнах и их характеристики // *Инж.-физ. журн.* 1974. Т. 27, № 1. С. 119–126.
42. **Коротков П. Ф.** Об ударных волнах на значительном расстоянии от места взрыва // *Изв. АН СССР, ОТН*. 1958. № 3. С. 165–168.
43. **Вахненко В. А., Кудинов В. М., Паламарчук Б. И.** К вопросу о затухании сильных ударных волн в релаксирующих средах // *Физика горения и взрыва*. 1984. Т. 20, № 1. С. 105–111.
44. **Паламарчук Б. И., Вахненко В. А.** Воздушные ударные волны при сварке и резке взрывом и методы их локализации // *Автоматическая сварка*. 1988. № 2(419). С. 69–72.
45. **Uthreza F., Saurel R., Daniel F., Lorand J. C.** Droplet break-up through an oblique shock wave // *Shock Waves*. 1996. V. 5, N 5. P. 265–273.

*Поступила в редакцию 24/VIII 1998 г.,
в окончательном варианте — 11/X 1999 г.*