

УДК 533.6011

## ВЛИЯНИЕ ЭКРАНА ИЗ ГРАНУЛИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА НА МНОГОКРАТНОЕ ОТРАЖЕНИЕ ПЛОСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ВНУТРИ ЗАМКНУТОГО ОБЪЕМА

© 2020 г. О. А. Мирова<sup>1</sup>, \*, Т. В. Баженова<sup>1</sup>, В. В. Голуб<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, Россия

\*E-mail: mittelster@gmail.com

Поступило в редакцию 19.07.2018 г.

После доработки 27.02.2019 г.

Принято к публикации 22.10.2019 г.

Рассмотрено распространение и многократное отражение плоской ударной волны внутри канала с закрытыми торцами, один из которых защищен экраном из гранулированного легко разрушаемого материала. Волна распространялась по ударной трубе, при отражении от торца разрушала защитный экран и далее многократно отражалась от обоих закрытых торцов ударной трубы. Установлена зависимость уменьшения давления на фронте отраженной ударной волны от толщины защитного слоя и величины зазора между защитным экраном и закрытым торцом ударной трубы.

DOI: 10.31857/S0040364420010135

### ВВЕДЕНИЕ

Ударная волна, образовавшаяся в результате взрыва, оказывает сильное поражающее действие на людей и технику. Поражающими факторами являются избыточное давление и длина положительной фазы волны. С целью их ослабления на протяжении последних нескольких десятилетий предлагались защитные устройства различной конструкции и степени эффективности, самые современные из которых жидкосодержащие [1] и геотекстильные [2].

В работах [3, 4] предлагалось ослаблять воздействие взрывной волны экранами из прессованного речного песка. При взаимодействии взрывной волны с таким экраном он разрушается, поглощая значительную часть энергии волны и тем самым уменьшая ее поражающие факторы. Основные достоинства этого метода – его эффективность и дешевизна.

Однако отраженная ударная волна также представляет опасность, так как при отражении происходит резкое увеличение давления и температуры за ее фронтом, что может привести к горению и детонации, особенно если в замкнутом объеме находится горючая смесь газов [5, 6].

В работах [3, 4, 7] показано, что импульс отраженной от песчаного экрана волны тем меньше, чем меньше толщина экрана. Это справедливо как для взрывных [3, 7], так и для плоских [4] ударных волн.

Если увеличить время наблюдения, в поле зрения исследователя попадают последующие отра-

жения взрывной волны внутри замкнутого объема. В работе [8] исследовалось многократное отражение взрывной волны внутри канала. Было установлено, что при первичном отражении от песчаной стенки интенсивность взрывной волны падает и при ее последующих отражениях давление на ее фронте недостаточно для возникновения критических температур.

В данной работе исследовались распространение и многократное отражение от стенок замкнутого объема плоской ударной волны, которая отличается от взрывной тем, что давление за ее фронтом при распространении вдоль канала не уменьшается. Это явление возникает, например, на большом расстоянии от эпицентра взрыва, когда фронт взрывной волны искажается настолько, что становится подобен плоскому. Плоская ударная волна возникает также в трубопроводах, когда происходят разрывы, сопровождаемые истечением газа.

Основная задача – установить, будет ли плоская ударная волна значительно усиливаться при последовательном отражении от закрытых торцов ударной трубы, если один из них защищен легко разрушаемым песчаным экраном. Предполагается, что при первичном отражении от защитного экрана и его разрушении фронт плоской ударной волны трансформируется в спадающий профиль, подобный профилю взрывной волны, и дальнейшие отражения будут происходить с ослаблением интенсивности волны. Также произведено сравнение особенностей многократного отражения плоской и взрывной ударных волн.

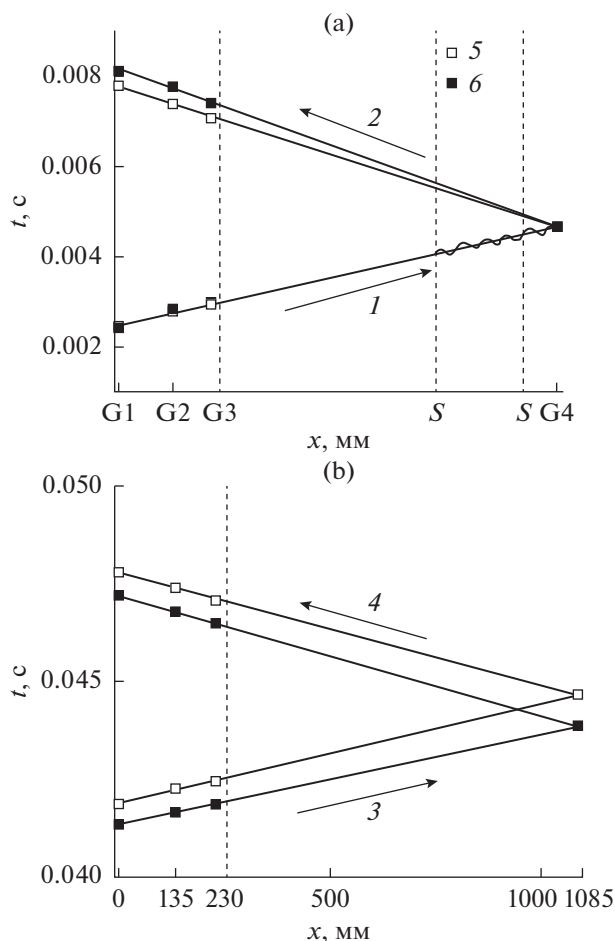


Рис. 1.  $x-t$ -диаграммы движения ударных волн.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Ударная труба квадратного сечения  $72 \times 72$  мм<sup>2</sup> состояла из последовательно соединенных камеры высокого давления (КВД) длиной 1 м и камеры низкого давления (КНД) общей длиной 6.9 м. КВД была максимально удлинена для создания ударной волны с плоским профилем давления. Между КВД и КНД находилась медная диафрагма.

В боковой стенке КНД были установлены датчики давления G1–G3, в торце КНД – датчик G4. Расстояния между датчиками были: G1–G2 – 13.5, G2–G3 – 9.5, G3–G4 – 85.5 см соответственно. Наличие четырех датчиков давления давало возможность определять давление, а также скорость и направление движения ударных волн.

В ходе эксперимента у торца КНД устанавливались преграды толщиной 20 и 40 мм из прессованного природного песка. Такие толщины соответствовали двум пограничным случаям. Толщина 20 мм – минимальная конструктивно возможная толщина защитного экрана, 40 мм – максимальная толщина экрана, которая может быть разру-

шена ударной волной (УВ) заданной интенсивности.

Расстояние  $h$  между задней поверхностью защитного экрана и торцом КНД изменялось от 0 до 15 см. Задней поверхностью экрана будем называть поверхность образца, обращенную к торцу КНД.

### ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Плоская ударная волна, образовавшаяся в результате разрыва диафрагмы, распространялась в направлении торца КНД, защищенного песчаным экраном. УВ частично отражалась от поверхности экрана, частично проходила сквозь него. В процессе разрушения преграды УВ ослаблялась, ее фронт деформировался. На рис. 1 представлены  $x-t$ -диаграммы движения ударных волн для случая незащищенного торца ударной трубы (УТ) 5 и для случая, когда торец был прикрыт защитным экраном толщиной 20 мм, установленным на расстоянии 10 см от торца 6. Символы обозначают достижение ударной волной точки расположения датчика; линии, их соединяющие, – траектории их движения. Пунктирные вертикальные линии обозначают расположение песчаного экрана  $S$ . На рис. 1б их нет, так как защитный экран уже разрушен. На рисунке стрелками обозначены направления движения: 1 – падающей ударной волны; 2 – ударной волны, отразившейся от торца КНД; 3 – УВ, отразившейся от торца КВД; 4 – УВ, вторично отразившейся от торца КНД. Отражение УВ от торца КВД на рисунке не представлено. В связи с этим шкала времени (вертикальная) между диаграммами 1а и 1б имеет разрыв.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 сравнивались  $x-t$ -диаграммы движения ударных волн для случая, когда торец был защищен песчаным экраном толщиной 20 мм, расстояние между торцом и задней границей образца было 10 см (6), и случая, когда торец ударной трубы был не защищен (5). Видно, что на участке движения, соответствующем этапу распространения падающей ударной волны вблизи торца КНД, в боковой стенке которой установлены датчики (1 на рис. 1а), диаграммы для обоих случаев совпадают. На участке движения 2 (рис. 1а) ударная волна, отраженная от песчаной преграды, опережает ударную волну, отраженную от торца ударной трубы, так как ее траектория начинается на поверхности экрана и отражается до того, как экран успеет разрушиться. Однако скорость ее меньше (что связано с потерей энергии на разрушение экрана), чем скорость ударной волны, отраженной от торца. На участках движения 3 и 4 ударная волна отстает от ударной волны, отраженной от торца ударной трубы.

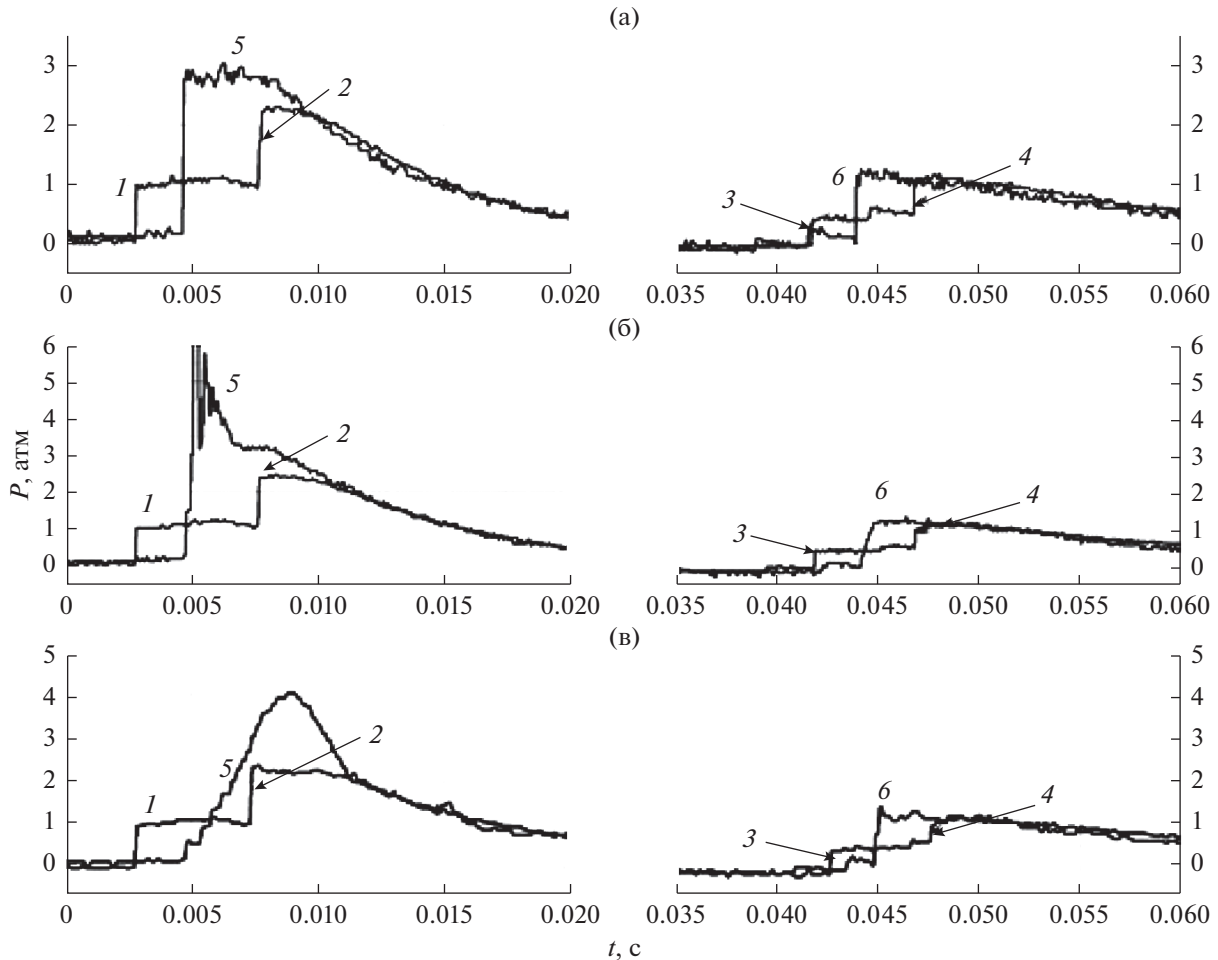


Рис. 2. Осциллограммы давления.

Волнистой линией показана область взаимодействия ударной волны с разрушаемой песчаной стенкой, а затем с песчано-воздушной взвесью.

Осциллограммы давления, полученные при помощи представленных на рис. 1 датчиков G1–G4, показывают процесс последовательных отражений УВ от торцов УТ общей длиной 7.9 м на протяжении 60 мс. На рис. 2 представлены осциллограммы давления, полученные с помощью датчика (G2), установленного в боковой поверхности КНД на расстоянии 95 см от торца, и датчика (G4), установленного в торце. Цифрами обозначены: 1 – падающая ударная волна; 2 – ударная волна, отразившаяся от торца КНД; 3 – ударная волна, отразившаяся от торца КВД; 4 – ударная волна, вторично отразившаяся от торца КНД. Случаям рис. 2 соответствуют следующие режимы: (а) – торец незащищен; (б) – торец защищен песчаным экраном толщиной 20 мм, установленным к нему вплотную; (в) – торец защищен песчаным экраном толщиной 20 мм, установленным на расстоянии 10 см от него.

Цифрами 5 и 6 обозначено изменение давления на торце КНД падающей первичной ударной волны и волн, отраженной от торца КВД, соответственно.

При отражении от торца КНД, защищенного песчаным экраном толщиной 20 мм, установленного вплотную к нему, экран был полностью разрушен. Однако амплитуды давления на фронтах 1–4 близки к соответствующим значениям для случая, когда защитный экран отсутствовал. Для случая, когда торец защищен экраном толщиной 20 мм, установленным в 10 см от него (рис. 2в), видно, что форма профиля отраженной волны изменилась.

На рис. 2 представлены также осциллограммы давления, полученные при помощи датчика G4, установленного в торце КНД. Для трех представленных режимов экспериментов изменение давления на торце имело различный характер: для незащищенного торца (рис. 2а) оно представляло собой “полку”; для случая, когда разрушаемый экран установлен вплотную к датчику давления

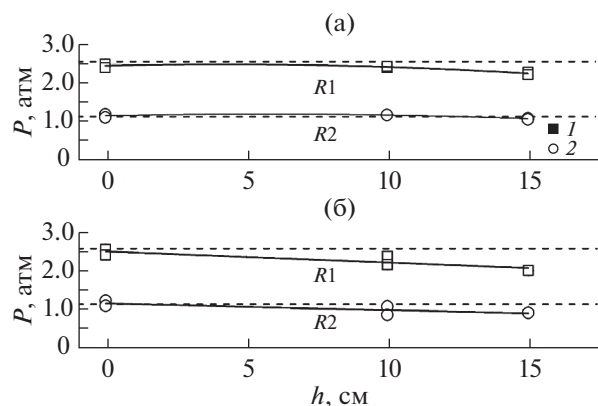


Рис. 3. Зависимости амплитуды давления ударной волны от расстояния между защитным экраном и торцом КВД, удаленным от точки измерения давления на 95 см; число Маха в эксперименте – 1.26.

(рис. 2б), амплитуда давления резко увеличивалась, а затем сразу уменьшалась; в последнем случае (рис. 2в) осциллограмма представляла собой “горб”. В первых двух случаях ширина фронта ударной волны составляла 1.5 мкс. На рис. 2в, когда между песчаным экраном и торцом КВД существовал зазор, давление плавно увеличивалось в течение 790 мкс и уже не представляло собой ударную волну.

Полученные импульсы давления (датчик G4, торец) оказались для трех описанных случаев практически одинаковыми.

На рис. 3 представлены зависимости амплитуд давления  $P$  первично и вторично отраженных ударных волн от расстояния между торцом и задней поверхностью образца  $h$  для толщин экрана 20 (рис. 3а) и 40 мм (рис. 3б). Символы 1 соответствуют амплитудам первичной отраженной УВ, 2 – вторичной. Видно, что при отсутствии зазора между экраном и преградой ( $h = 0$ ) амплитуды отраженных УВ выше, чем при наличии такового.

При увеличении зазора от 5 до 15 см амплитуды отраженных волн уменьшаются.

Во всех случаях амплитуды давления УВ при вторичном отражении меньше, чем при первичном, т.е. при последовательных отражениях многократного увеличения интенсивности УВ не происходит. Штриховой линией обозначены соответствующие значения давления для случая, когда торец не защищен.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Плоская УВ при отражении от песчаного экрана не превращается в волну со спадающим профилем, подобную взрывной.

- Защитное действие песчаного экрана выражается в уменьшении давления за фронтом УВ при ее многократном отражении от торцов УТ. Коэффициент ослабления при первом отражении составляет 85–65%, при вторичном отражении от правого торца – 90–75% при расположении экрана на расстоянии 5–15 см от торца.

- Ослабление более эффективно для большей толщины экрана и при большем расстоянии от закрытого торца до задней стенки экрана.

- В отсутствие зазора между торцом ударной трубы и задней стенкой экрана ослабляющего эффекта не наблюдалось.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bornstein H., Ryan S., Mouritz A.P. Blast Mitigation with Fluid Containers: Effect of Mitigant Type // Int. J. Impact Eng. 2018. V. 113. P. 106.
2. Vivek P., Sitharam T.G. Shock Wave Attenuation by Geotextile Encapsulated Sand Barrier Systems // Geotextiles and Geomembranes. 2017. V. 45. P. 149
3. Котельников А.Л., Мирова О.А., Голуб В.В., Баженова Т.В., Ленкевич Д.А. Исследование взаимодействия взрывной волны с разрушаемым экраном из гранулированного материала // ТВТ. 2014. Т. 52. № 5. С. 739.
4. Мирова О.А., Котельников А.Л., Голуб В.В., Баженова Т.В. Воздействие ударной волны на защитные песчаные экраны различной толщины // ТВТ. 2015. Т. 53. № 1. С. 145.
5. Онуфриев С.В. Температура продуктов взрыва водородовоздушной смеси в конической полости // ТВТ. 2012. Т. 50. № 2. С. 264.
6. Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Хомик С.В., Агафонов В.Л. Самовоспламенение смесей водорода с воздухом за отраженными взрывными волнами // ТВТ. 2010. Т. 48. № 3. С. 458.
7. Баженова Т.В., Голуб В.В., Мирова О.А., Котельников А.Л., Ленкевич Д.А. Ослабление действия отраженной ударной волны при взрыве внутри объема со стенками из гранулированного материала // ТВТ. 2012. Т. 50. № 3. С. 476.
8. Мирова О.А., Котельников А.Л., Голуб В.В., Баженова Т.В. Многократные отражения ударной волны при взрыве в замкнутом объеме с защищенными экранами стенками // ТВТ. 2017. Т. 55. № 2. С. 324.