

УДК 533.6.011

Т.В.Баженова, В.В.Голуб, О.А. Мирова

Объединенный институт высоких температур РАН, Россия,
125412, Москва, Ижорская ул., 13/19, E-mail: bazhenovai@ihed.ras.ru

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПЕСЧАНОЙ ПРЕГРАДЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Исследовалось воздействие взрывной волны на преграду из легкоразрушаемого материала, установленную в канале. Измерения давления на боковой стенке ударной трубы вблизи преграды из прессованного песка показали, что уменьшение импульса давления за отраженной волной тем больше, чем меньше толщина преграды. Для объяснения этой закономерности были проведены опыты по визуализации процесса разрушения слоя песка с помощью цифровой скоростной камеры CORDIN-530 в режиме развертки и покадровой съемки. Кинограммы показали, что скорость движения фронта песка уменьшается с увеличением толщины слоя песка по экспоненциальному закону. Ослабление ударной волны больше при взаимодействии с тонкой стенкой, которая разрушается быстрее.

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ФОТОГРАФИЯ, УДАРНАЯ ВОЛНА, ПЕСЧАНАЯ ПРЕГРАДА

ВВЕДЕНИЕ

С целью ослабления действия взрыва на производстве и в результате террористических актов предлагаются различные материалы для изготовления защитных экранов, ослабляющих взрывную волну. В [1] исследовалось поведение бетона под воздействием ударно-волновой нагрузки и предлагалось конструировать убежища из бетонных плит с использованием специальных усиливающих конструкций. В числе предложений по ослаблению действия взрывной волны рассматривается использование гранулированных материалов [2] и стенок из влажного песка [3] в качестве ограждения взрывоопасного объема. В работах [4, 5] исследовался процесс разрушения преграды из слабо сцементированного песка под воздействием взрывной волны. Было установлено, что материал разрушается без образования крупных осколков, после чего частицы песка разлетаются, унося значительную часть энергии взрыва и ослабляя интенсивность проходящей ударной волны. Исследованный материал был предложен для создания взрывозащитных конструкций [6].

При взрыве внутри помещения разрушительное действие взрывной волны увеличивается за счет отражения от стен помещения. В этом случае необходимо принимать меры для ослабления действия отраженной ударной волны. Целью данной работы является определение параметров взаимодействия отраженной ударной волны с деформируемой преградой. Актуальность задачи определяется необходимостью анализа перераспределения импульса ударной волны при взаимодействии ее с разрушаемой преградой.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследован одномерный случай – воздействие взрывной волны в канале на преграды изготовленные из различных материалов. Исследовалось воздействие на преграду “коротких” ударных волн, в которых пик давления сопровождается быстрым падением

давления в волне разрежения. Этот тип волны характеризует действие взрыва на близком расстоянии от источника, отнесенном к радиусу источника.

Для моделирования короткой взрывной волны использовалась ударная труба (рис. 1) с короткой камерой высокого давления (НРС) длиной 0,23 м. Длина камеры низкого давления (LPC) квадратного сечения $72 \times 72 \text{ мм}^2$ составляла 6 м. В камере низкого давления находился воздух при атмосферном давлении, камера высокого давления наполнялась воздухом до давления 15 атм. После разрыва диафрагмы D в секции низкого давления распространялась ударная волна. В секции высокого давления при истечении из нее толкающего газа возникала волна разрежения, которая отражалась от закрытого конца ударной трубы и распространялась в секцию низкого давления, догоняя ударную волну. При низких числах Маха ударной волны и короткой камере высокого давления голова волны разрежения быстро догоняет ударную волну и за ней создается характерный падающий профиль давления, подобный профилю давления за взрывной волной.

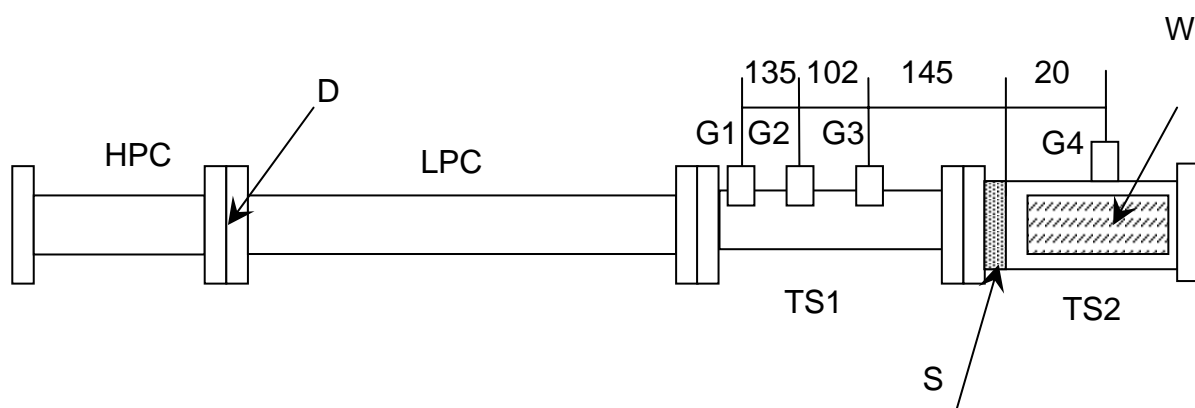


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: НРС – камера высокого давления, LPC – камера низкого давления, TS1, TS2 – исследовательские секции, G1 – G4 – датчики давления. D – диафрагма, W – окно, S – преграда

За КНД устанавливались две исследовательские секции (TS1, TS2) таким образом, что расстояние от диафрагмы до исследуемого образца составляло 5 м.

Измеренное на расстоянии 145 мм от преграды число Маха ударной волны в разных опытах составляло 1,6 – 1,73. Избыточное давление на фронте ударной волны составляло около 2,2 бар. Такое давление соответствует, например, взрыву 20 кг TNT на расстоянии 5 м от точки измерения [7].

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

В стенке первой исследовательской секции (TS1) устанавливались три датчика давления (G1, G2, G3), с помощью которых измерялись скорости падающей и отраженной ударных волн, а так же, изменение во времени давления за падающей и за отраженной ударными волнами.

В начале второй секции (TS2) устанавливались различные преграды: жесткая металлическая стенка и стенка из прессованного природного песка (S) (плотность $1,8 \text{ г/см}^3$, прочность на сжатие по градуировке $0,5 \text{ кг/см}^2$). Давление на боковой стенке трубы за прошедшей преградой ударной волной измерялось датчиком G4. Вторая исследовательская секция была снабжена прозрачными окнами из оргстекла для визуализации разрушения песчаной стенки после взаимодействия со взрывной волной. Измерение скорости ударной волны проводилось базовым методом с точностью 1%. Движение границы песчаной стенки регистрировалось с помощью цифровой скоростной камеры CORDIN-530 в режимах

временной развертки и покадровой съемки. Давление на боковой стенке ударной трубы измерялось пьезоэлектрическими датчиками РСВ 113А36.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Уменьшение импульса давления при взаимодействии ударной волны с разрушаемой стенкой

Осциллограммы давления.

На рис. 2 и рис. 3 приведены образцы осциллограмм давления на боковой стенке ударной трубы после взаимодействия ударной волны с песчаными стенками различной толщины. Первая ступенька на осциллограмме соответствует повышению давления за падающей ударной волной, второй пик соответствует повышению давления при подходе к датчику ударной волны, отраженной от слоя песка. При отражении от жесткой стенки давление резко увеличивается, а затем падает в волне разрежения. При отражении от песчаной стенки давление на фронте близко к значениям, полученным при отражении от жесткой стенки и из расчета для стационарной ударной волны. При отражении от песчаной стенки, толщина которой соизмерима с длиной положительной фазы взрывной волны, падение давления происходит по тому же закону, что и при отражении от жесткой стенки (рис. 2). При отражении от тонкой песчаной стенки за фронтом наблюдается более резкое падение давления, чем при отражении от толстой стенки (рис. 3).

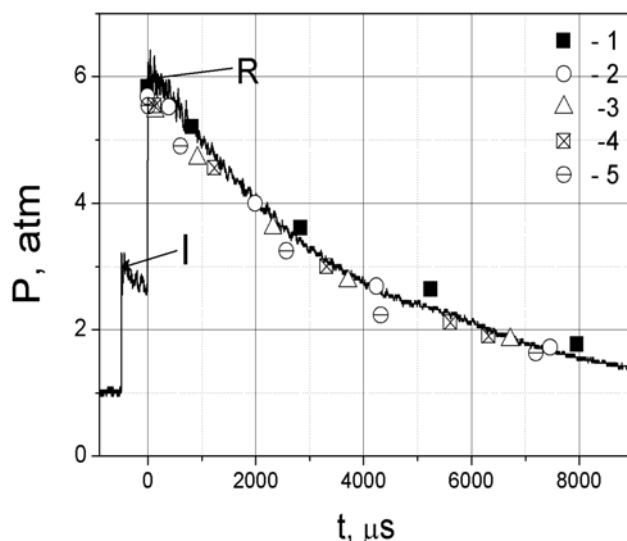


Рис. 2. Давление на боковой стенке канала камеры TS1 при отражении коротких ударных волн от стенок из песка различной толщины. Кривая - осциллограмма давления при отражении от жесткой стенки; точки - значения амплитуды давления за отраженной ударной волной при толщине слоя песка h: 1 - 20 мм, 2 - 25 мм, 3 - 30 мм, 4 - 40мм, 5 - 50 мм

Уменьшение импульса давления.

На рис. 4 представлен коэффициент уменьшения импульса давления $K = I_s / I_R$ за отраженной ударной волной на боковой стенке канала камеры TS1. Здесь I_s импульс давления за ударной волной, отраженной от стенки из песка, I_R - импульс давления за фронте ударной волны, отраженной от жесткой стенки. Уменьшение импульса давления тем больше, чем тоньше слой песка.

На рис. 5 представлено значение импульса давления за фронтом прошедшей сквозь песчаную преграду ударной волны на боковой стенке исследовательской камеры TS2 в зависимости от толщины преграды. Импульс вычислен по осциллограммам давления и выражен в условных единицах.

Из рис. 5 следует, что проходящая ударная волна ослабляется при малых толщинах слоя песка, затем ослабление уменьшается и снова увеличивается. Это указывает на то, что ослабление при малых и больших толщинах происходит в результате различных механизмов. Ослабление импульса прошедшей волны при взаимодействии с толстым слоем песка происходит за счет ослабления при распространении по гранулированной среде. Ослабление импульса отраженной ударной волны может зависеть от двух факторов: затрата энергии на разрушение слоя песка или приход волны разрежения из камеры TS2 при разрушении стенки или смещении стенки как целого.

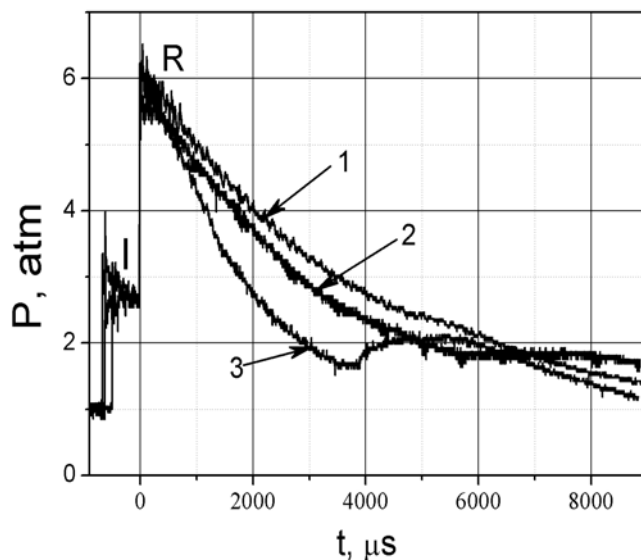


Рис. 3. Осциллограммы давления за ударными волнами при отражении от: 1 – жесткой стенки; 2, 3 от песчаной стенки, толщиной: h : 2 – 16 мм, 3 – 9 мм. Отсчет времени ведется от момента прихода к датчику отраженной ударной волны

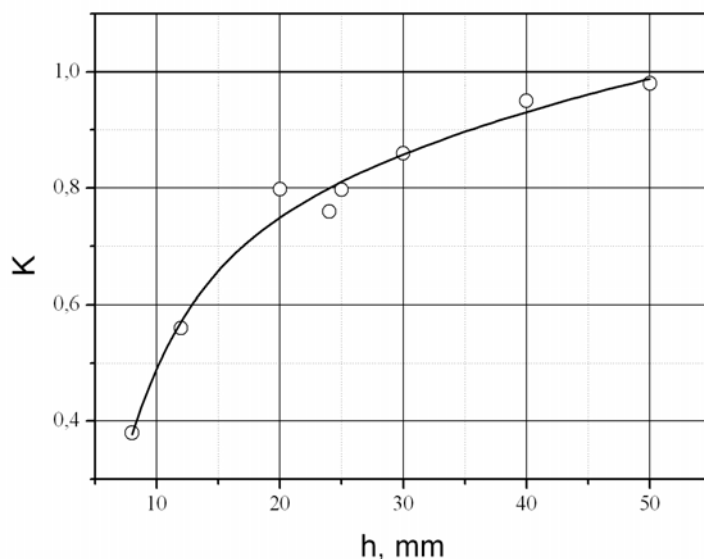


Рис. 4. Коэффициент ослабления давления $K = I_S / I_R$ за фронтом ударной волной отраженной от преграды из прессованного песка на боковой стенке исследовательской TS₁. Здесь: I_S – импульс давления измеренный за ударной волной, отраженной от песчаной стенки, I_R – импульс давления за фронтом ударной волны, отраженной от жесткой стенки

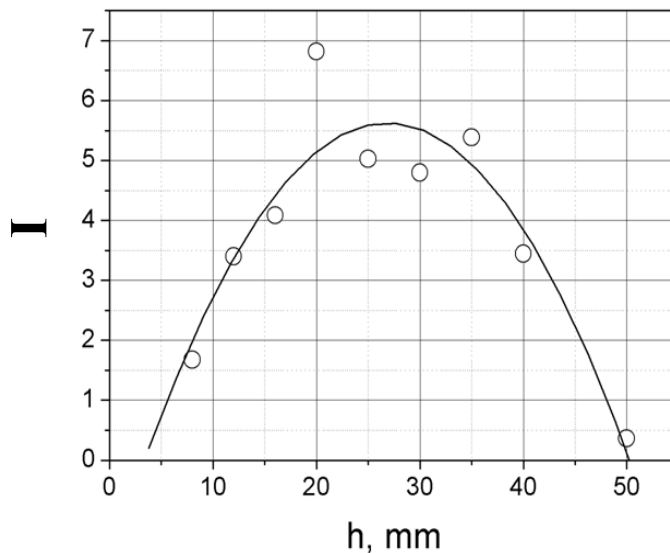


Рис. 5. Импульс давления I за фронтом прошедшей сквозь песчаную преграду ударной волны на боковой стенке исследовательской камеры TS2 в зависимости от толщины преграды. Импульс выражен в условных единицах

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПЕСКА

Кинограммы

Для определения механизма ослабления отраженной ударной волны были проанализированы кинограммы процесса разрушения песка (рис. 6). На кинограммах фиксировалось положение заднего фронта разрушаемой преграды в виде границы светлого и темного фона при сквозном просвечивании. Треки на светлом фоне являются следствием воздействия песчинок на окна из оргстекла. На фотографиях перед темной областью в центре камеры видны темные области у нижней и верхней стенки канала. Кроме того, перед фронтом фиксируется область слабого затемнения по всему сечению камеры. Темные области у нижней и верхней стенки постепенно смыкаются с темной областью в центре камеры, и все сечение камеры становится перекрытым. Перемещения или разрушения передней границы слоя песка не наблюдалось в течение всего времени киносъемки, т.е. на протяжении 9000 мкс. Это свидетельствует о том, что, смещение стенки как целого в направлении движения падающей ударной волны и приход волны разрежения из камеры TS2 при разрушении стенки не служит причиной создания волны разрежения.

Временные развертки

На рис. 7 представлены образцы временных разверток движения песка, полученные при расположении щели по центру камеры TS2.

Развертки получены при взаимодействии ударной волны со стенками толщиной $h = 9, 12, 16$ мм. Впереди темного фронта видно движение слабо затемненной области, как на кинограммах (рис. 6). Наклон траектории на линейном участке характеризует скорость движения заднего фронта песка.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Структура фронта рассыпающегося песка

Наличие на кадрах кинограмм темных областей у нижней и верхней стенки и области слабого затемнения по всему сечению камеры перед фронтом позволяет предположить следующую картину взаимодействия ударной волны с песчаной стенкой. После прохождения через слой песка ударной волны за задней стенкой возникает облако мелкого песка, увлекаемого спутным потоком за фронтом ударной волн. Песок осаждается тонким слоем на стенках камеры. На фотографиях тень от тонкого слоя песка по всему сечению окна слабая, но в направлении верхней и нижней стенок более плотная, так как луч света проходит большой путь. В углах камеры осаждается больше песка. Слой осыпавшегося песка у нижней стенки толще, чем у верхней из-за влияния силы тяжести.

Траектории различных участков фронта рассыпающегося песка

На основании кинограмм движения заднего фронта разрушаемой стенки из слабосцементированного песка, после взаимодействия с взрывной волной, получены координаты границы песка в осевой плоскости канала и вдоль нижней и верхней стенок исследовательской камеры. Траектории движения различных участков фронта представлены на рис. 8. При $h = 9$ и 12 мм движение фронта песка вдоль центральной оси исследовательской камеры происходит с большей скоростью, чем вдоль верхней и нижней стенок камеры, к концу окна траектории сближаются. При $h = 16$ мм движение фронта песка вдоль центральной оси исследовательской камеры происходит с меньшей скоростью, чем вдоль верхней и нижней стенок камеры. К концу окна траектории расходятся.

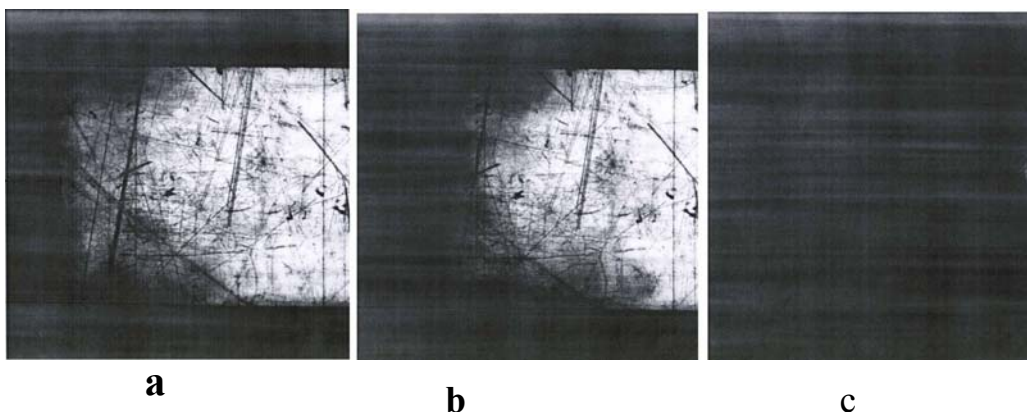


Рис.6. Кинограммы процесса разрушения преграды из прессованного песка толщиной 16 мм под воздействием ударной волны. Кадры а и б разделяет 240 мкс. Кадры б и с разделяет 480 мкс

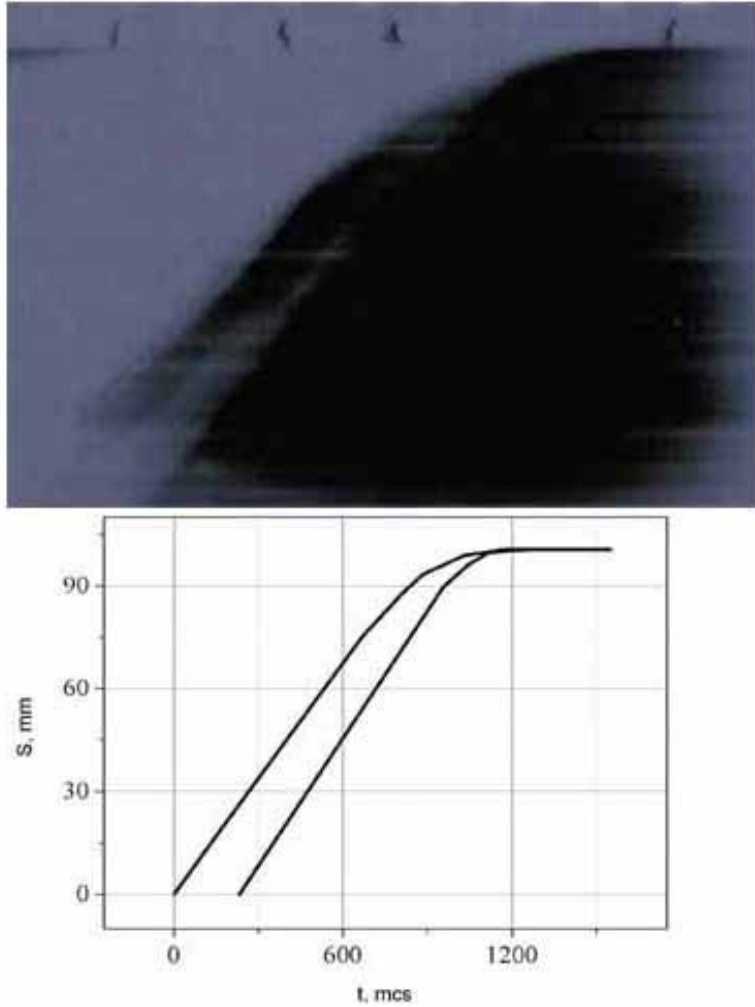


Рис. 7. Образец временной развертки движения песка, полученной при расположении щели по центру камеры TS2 Развертки получены при взаимодействии ударной волны с песчаной стенкой толщиной $h = 9$ мм

Движение фронта песка вдоль центральной оси исследовательской камеры происходит с большей скоростью при разрушении более тонких слоев песка.

Скорость движения фронта песка

Дифференцированием траекторий получена скорость движения фронта песка в центре канала (рис. 8). Скорость движения фронта V уменьшается с увеличением толщины слоя песка h по экспоненциальному закону

$$V = 240 * \exp(-h/8,4) + 15(m/s).$$

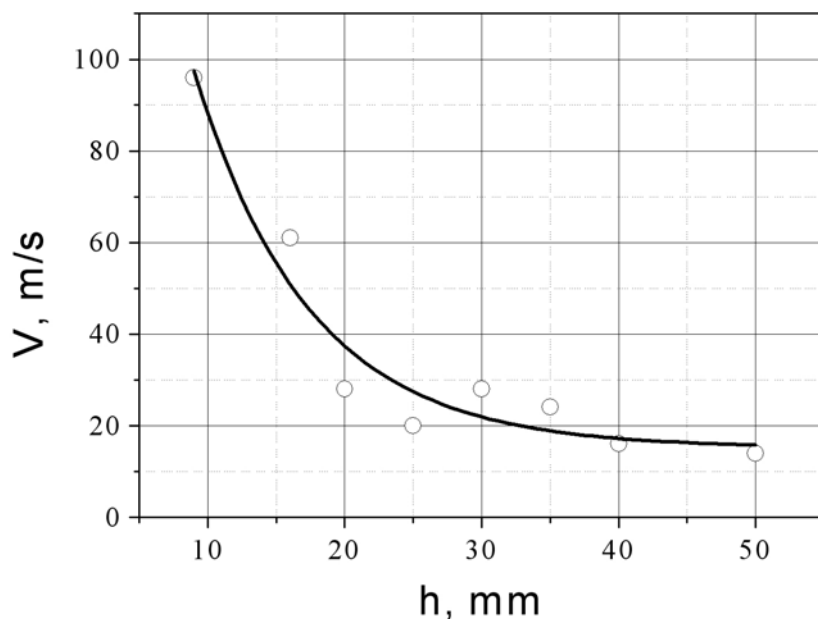


Рис. 8. Скорость движения фронта песка в центре канала в зависимости от толщины преграды

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установленные закономерности позволяют понять механизм ослабления интенсивности отраженной ударной волны при взаимодействии со стенкой из прессованного песка. Ослабление импульса отраженной ударной волны при взаимодействии с тонкой преградой из легкоразрушаемого материала при разрушении преграды происходит в результате затраты энергии на разрушение тонкого слоя песка. Ослабление ударной волны больше при взаимодействии с тонкой стенкой, которая разрушается быстрее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Advanced** SDOF approach for structural concrete systems under blast and impact loads / Krauthammer T., Frye M., Schoedel T.R et al. // In: CD proc. 11th International Symposium of Interaction of Minitions Effects with Structures, Manheim, Germany, May 5-9, 2003.
2. **Bakken J., Slungaard T., Engebretsen T.** // Shock waves. 2003. V. 13. № 1. P. 33-40.
3. **Покровский Г. И.** Взрыв. М.: Недра. 1980. 190 с.
4. **Golub V.V., Lu F.K., Medin S.A.et al.** // In: CD proc. of 24th International Symposium on Shock Waves, Beijing, China, July 20-25, 2004. publication no. 1841
5. **Мирова О.А.** // В сб. Научные труды Института теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН. Выпуск 6 - 2005 , под редакцией В.Е. Фортова и А.П. Лихачева. – М.: ОИВТ РАН. 2004. С. 5 4- 60
6. **Взрывозащитный экран** / Голуб В.В., Володин В.В., Мирова О.А., Медин С.А, Петухов В.А. и др. Патент РФ по заявке № 2004107093/03. Приоритет от 11.03.2004, БИ № 35.22.12.2005.
7. **Яковлев Ю.С.** Гидродинамика взрыва. Л.: Судпромгиз. 1961. С. 149.

T.V. Bazhenova, V.V. Golub, O.A. Mirova

*Joint Institute for High Temperatures RAS, Russia,
125412, Moscow, Izhorskaja st., 13/19, E-mail: bazhenova@ihed.ras.ru*

VISUALIZATION OF SAND BARRIER DESTRUCTION UNDER SHOCK WAVE ACTION

The goal of the current research was the investigation of the blast wave effect on a easily destructible material barrier placed in a channel. It was shown by pressure measurements on the lateral wall of the shock tube near the pressed sand barrier that the reduction of the impulse behind the reflected shock wave increases with the decrease of a barrier thickness. Experimental visualization of sand barrier destruction process was performed by means of digital high-speed CORDIN-530 camera in order to explain this dependency. Camera films analysis showed that the sand front movement speed decreases with the increase of the sand layer thickness by the exponential law. The decrease of the shock wave impulse due to interaction with the sand barrier was greater for thinner sand barrier, which destructs faster.

HIGH-SPEED PHOTO, SHOCK WAVE, GRANULAR MATERIAL