

УДК 539.3

О ПРОСТРАНСТВЕННОЙ АНИЗОТРОПИИ ПОТОКОВ ДИСПЕРГЕНТА У ЖИДКОЕМКОСТНЫХ ЛОКАЛИЗАТОРОВ ВЗРЫВА*)

А.И. Садырин¹, М.В. Сильников², А.И. Михайлин², С.В. Крылов¹

¹НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

²НПО «Спецматериалы», Санкт-Петербург

Представлено сопоставление экспериментальных данных с результатами численного решения задачи о пространственно-временном распределении потоков диспергированной жидкой фазы локализаторами взрыва типа «ФОНТАН». Показано, что, варьируя геометрические параметры формы внутренней полости локализатора, можно эффективно управлять характеристиками разлета диспергента.

Ключевые слова: ударная волна, поражающие факторы взрыва, газожидкостный экран.

К основным поражающим факторам взрыва открытого заряда взрывчатого вещества (ВВ) на окружающую среду относят воздушную ударную волну (УВ), первичное и вторичное осколочные поля и термическое воздействие. С целью снижения интенсивности поражающих факторов и локализации последствий несанкционированных взрывов ВВ используются различного вида технические устройства, так называемые локализаторы взрыва (ЛВ). Высокую эффективность в этом отношении демонстрируют жидкостные ЛВ «ФОНТАН» [1].

Изделия «ФОНТАН» представляют собой изолирующую заряд ВВ от окружающей среды оболочечную конструкцию, заполненную гомогенной газожидкостной средой (диспергентом) плотностью $\rho \approx 500 \text{ кг/м}^3$ и с аномально высокой сжимаемостью. Подавление поражающих факторов взрыва ЛВ «ФОНТАН» достигается за счет трансформации фронта взрывной волны при прохождении через диспергент и передачи части кинетической энергии продуктов детонации диспергенту [2, 3], сопровождающейся рассеянием диспергента в пространстве.

На рис. 1 изображена схема сечения горизонтальной плоскостью корпуса накрывающего заряд ВВ типового ЛВ, внешняя и внутренняя поверхности которого представляют собой шестигранники, буквами **E**, **D**, **S** отмечены зоны расположения заряда ВВ, диспергента и воздушной среды соответственно.

На качественном уровне процессы дивергенции диспергированной жидкой среды в локализаторе взрыва с внутренней полостью, представляющей собой прямоугольный параллелепипед, можно проиллюстрировать путем компьютерного

*) Выполнено в рамках реализации Программы государственной поддержки ведущих научных школ России (проект НШ-4807.2010.8) и при поддержке РФФИ (проект 11-08-00545-а).

моделирования процесса взаимодействия продуктов детонации в рамках двумерной постановки задачи (плоская деформация). Двумерная постановка задачи позволяет достичь при анализе численного решения большей наглядности процессов взаимодействия ударной волны с плоскими стенками внутренней полости и допускает сравнительно простую интерпретацию эффектов интерференции ударной волны в угловых зонах. Для численного моделирования взаимодействия продуктов детонации ВВ с корпусом локализатора использовался программный комплекс UPSGOD, реализованный в рамках численной схемы [4].

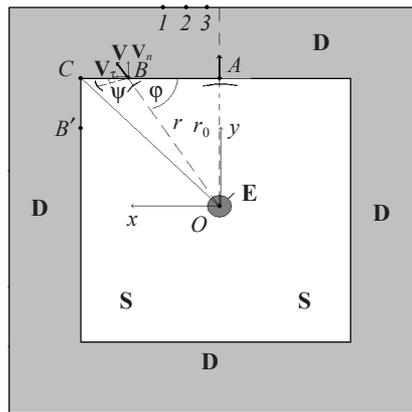


Рис. 1

При взаимодействии продуктов детонации ВВ (зона **Е** на рис. 1) с воздушной средой, находящейся во внутренней полости ЛВ (зона **С** на рис. 1), формируется интенсивная первичная УВ, взаимодействующая затем с боковыми стенками и крышкой корпуса ЛВ. На расстояниях, составляющих несколько характерных размеров компактного заряда ВВ, фронт УВ приобретает форму, близкую к сферической [2, 3]. Поскольку плотность газожидкостной среды ЛВ (зона **Д** на рис. 1) выше плотности среды в первичной УВ, то падение ее на стенки внутренней полости ЛВ сопровождается нарастанием давления по сравнению с давлением в падающей волне.

Отраженная от элементов внутренней полости ЛВ сходящаяся ударная волна сжатия распространяется с нарастающей амплитудой к точке O , где затем формируется вторичная ударная волна. Амплитудой и периодом времени действия на корпус ЛВ этих двух УВ определяются, в основном, время формирования пространственной структуры основных потоков диспергента и амплитуда воздушной УВ вне корпуса ЛВ. По-видимому, в этот же период времени нарушается целостность корпуса ЛВ и происходит диспергирование жидкой фазы в капельное состояние.

При падении фронта УВ под углом φ к боковой стенке внутренней полости ЛВ давление на стенке и вызванное им движение диспергента по направлению и по величине массовой скорости определяются из условий непрерывности нормальных компонент напряжений и скоростей на контактном разрыве [5]. Обозначим вектор массовой скорости среды на фронте УВ в точке B через $\mathbf{V}^S(r)$, где r – расстояние от центра заряда до стенки. Величины проекций $\mathbf{V}^S(r)$ на внешнюю нормаль к боковой стенке (ось y) V_n^S и касательную к стенке (ось x) V_τ^S определяются выражениями

$$V_n^s = V_y^s = |\mathbf{V}^s| \sin(\varphi), \quad V_\tau^s = V_x^s = |\mathbf{V}^s| \cos(\varphi). \quad (1)$$

При взаимодействии УВ с корпусом ЛВ в соответствии с условиями на контактном разрыве [5] корректируется только нормальная составляющая V_n^s потока среды, касательная компонента V_τ^s потока остается без изменений. Для угла $\varphi = \pi/2$ при $r = r_0$ компонента V_n^s принимает максимальное значение, а $V_\tau^s = 0$. Давление на внутренней поверхности ЛВ, определяемое величиной V_n^s , в окрестности точки A будет максимальным, скорость слоя диспергента \bar{V}^∂ , примыкающего к контактному разрыву, будет также максимальной и направлена вдоль оси y ($V_n^\partial \approx |\bar{V}^\partial|$, $V_\tau^\partial \approx 0$). Расчетный график изменения во времени давления в точке A представлен на рис. 2,а.

По мере удаления от точки A величина V_n^s будет уменьшаться как за счет роста расстояния до стенки $r = r_0/\sin(\varphi)$, так и за счет уменьшения величины $\sin(\varphi)$ в формулах (1), что повлечет соответствующее уменьшение давления в диспергенте. Образовавшийся вследствие разгрузки градиент давления в диспергенте инициирует некоторое движение (дивергенцию) диспергента вдоль оси x со скоростью V_x^∂ .

При падении ударной волны на стенки корпуса в окрестности угла боковых граней ЛВ (точка C на рис. 1) происходит образование отраженной волны сжатия, направленной под некоторым углом ψ к боковой грани. Линия OC является линией симметрии, и на нее из симметричной точки B точки B' падает такая же волна сжатия. Далее эти волны отражаются от линии OC в направлении боковых стенок и порождают область высокого сжатия газовой среды, концентрирующуюся в окрестности точки C , сюда же сходятся потоки, связанные с компонентами V_τ^s массовой скорости газовой фазы в УВ. Это приводит к локальному ускорению движения диспергента в угловой зоне локализатора в направлении линии OC .

Таким образом, при взаимодействии УВ с боковыми стенками ЛВ образуется две качественно различные зоны движения диспергента. В первой зоне (окрестность точки A) поток диспергента направлен в положительном направлении оси y с минимальной скоростью дивергенции (расходимости) потока в направлении оси x . Этот поток практически представляет собой струю, возможно, частично диспергированную и эшелонированную вдоль оси y . Для заряда ТНТ массой $m = 1,5$ кг штриховыми линиями на рис. 2,б показано расчетное изменение во времени скорости диспергента V_x^∂ в точках 1, 2 и 3 (см. рис. 1).

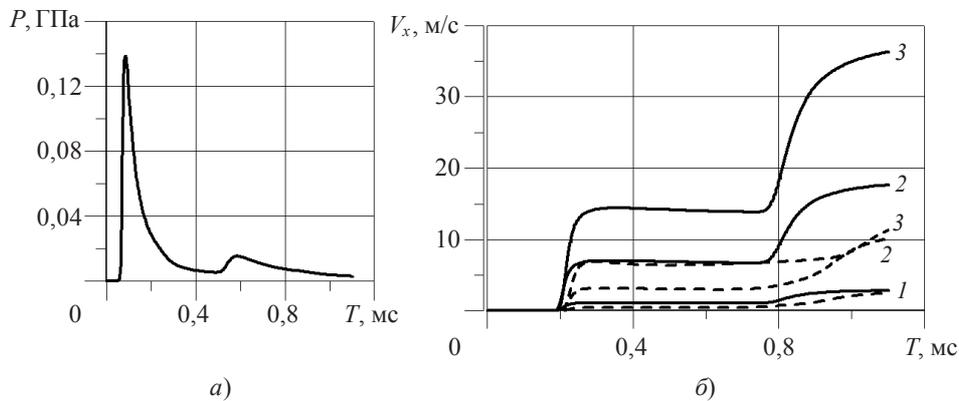


Рис. 2

К моменту времени $T = 1,2$ мс, соответствующему окончанию волновых процессов во внутренней полости ЛВ, отношение скоростей дивергенции диспергента V_x^{δ} к скорости струи V_y^{δ} в первой зоне не превышает 3%. Вторая зона расположена в окрестности точки C , где в результате интерференции волн возникают высокие массовые скорости диспергента в направлении линии OC , обеспечивающие существенную пространственную дивергенцию диспергента.

На рис. 3,а представлена фотография натуральных испытаний взрыва заряда ТНТ массой $m = 2,0$ кг с использованием ЛВ «ФОНТАН», имеющего квадратное сечение внутренней полости. В разлете диспергента наблюдается явная анизотропия, с четырьмя горизонтальными струями диспергента. Приведенные результаты анализа численных расчетов качественно совпадают с экспериментально наблюдаемой картиной разлета диспергента.

Управление анизотропией процессов пространственной дивергенции потоков диспергента при использовании ЛВ «ФОНТАН» представляет определенный прикладной интерес. Из приведенного выше анализа следует, что анизотропия потоков диспергента определяется, в основном, геометрическими параметрами внутренней полости ЛВ. Подтверждением этого являются испытания ЛВ, внешний контур которого представляет собой описанный ранее шестигранник, а внутренняя полость имеет форму кругового цилиндра с плоской крышкой. Как видно из рис. 3,б, картина разлета диспергента в горизонтальной плоскости в этом случае близка к изотропной. Наблюдается лишь характерная вертикальная струя диспергента, напоминающая фонтан, давшая в свое время название «ФОНТАН» семейству жидкостных ЛВ. Для заряда ТНТ массой $m = 1,5$ кг сплошными линиями на рис. 2,б показано расчетное изменение во времени скорости диспергента V_x в точках 1, 2 и 3 внешнего контура, полученное для ЛВ с внутренней полостью цилиндрической формы и иллюстрирующее существенное повышение изотропности дивергенции потоков диспергента в плоскости xy .



Рис. 3

Расчеты и эксперименты показывают, что анизотропия амплитуды воздушной УВ, формирующейся вне корпуса ЛВ на расстоянии трех метров от заряда, не превышает 20% для обоих типов ЛВ [3]. Иными словами, эффективность подавления фугасного действия взрыва локализаторами взрыва «ФОНТАН» мало зависит от формы внутренней полости используемых ЛВ «ФОНТАН».

Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что:

- путем варьирования формы внутренней полости ЛВ можно управлять характером разлета диспергента, обеспечивая желательное направление потоков газо-жидкостной смеси и увлекаемых ею поражающих элементов;
- защитные свойства ЛВ по подавлению фугасного действия взрыва практически не зависят от формы внутренней рабочей полости ЛВ и определяются характерным размером ЛВ, массой окружающего диспергента и его начальным распределением.

Литература

1. Гельфанд, Б.Е. Химические и физические взрывы. Параметры и контроль / Б.Е. Гельфанд, М.В. Сильников. – СПб.: Полигон, 2003. – 416 с.
2. Влияние параметров жидкостного контейнера, изолирующего заряд ВВ, на давление в ударной волне при взрыве / М.В. Сильников [и др.] // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды Второй Всерос. научно-практич. конф. – СПб., 1999. – Т. 2. – С. 189–190.
3. Ослабление воздушных ударных волн при взрыве зарядов ВВ в объеме жидкости, ограниченной эластичной оболочкой / Б.Е. Гельфанд [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37, №5. – С. 128–133.
4. Метод распада разрывов в динамике упругопластических сред / М.Х. Абузьяров [и др.] // ЖВМ и МФ. – 2000. – Т. 40, №6. – С. 940–953.
5. Седов, Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1. / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1973. – 536 с.

[03.10.2011]

A SPACIAL ANISOTROPY OF DISPERSANT FLOWS NEAR LIQUID-CAPACITY EXPLOSION LOCALIZERS

A.I. Sadyrin, M.V. Sil'nikov, A.N. Mikhaylin, S.V. Krylov

The comparison of experimental data with numerical results is presented for the space-time distribution problem of the dispersant liquid phase flow by explosion localizer «ФОНТАН»-type. It is shown that the effective control of dispersant scattering characteristics is possible by the variation of geometric parameters of the interior cavity shape of the localizer.

Keywords: shock wave, injury factors of explosion, gas-liquid screen.