

Расчет и конструирование

УДК.662.215.25

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ ЧЕРЕЗ РАЗРУШАЕМУЮ ПРЕГРАДУ

В.Д. Головатенко, А.В. Головатенко

Описан метод определения скорости прохождения кумулятивной струи непосредственно в преграде. Найдено, что эта осреднённая во времени скорость меньше скорости детонации взрывчатого вещества, на порядок уступает скорости прохождения звука в металле преграды и меньше скорости перемещения продуктов детонации. Результаты экспериментов коррелируют с вязкоупругой моделью разрушения преграды кумулятивной струей.

Ключевые слова: волна прямая и отражённая, вязкоупругая модель, детонация, кумуляция, преграда, продвижение струи, разрушение, скорость, экран.

Метод определения скорости прохождения кумулятивной струи в преграде основан на способе погашения в точке встречи волн – прямой и отраженной от экрана – и отличается от метода, использованного авторами [1, 2]. Прямая волна, возникшая после подрыва взрывчатого вещества и образования им кумулятивной струи, продвигается по преграде со скоростью на порядок меньшей, чем скорость распространения волны напряжения в металле (скорость звука материала преграды), и, встретившись с отраженной от экрана волной, энергия которой аккумулируется в материале, имеющем большое «живое упругое сопротивление» [3], образует узел. Определяя расстояние от точки встречи кумулятивной струи с отражённой волной – место расположения узла (место останова продвижения струи в преграде) и зная физико-технические характеристики металла преграды, резиноподобного материала, аккумулирующего потенциальную энергию кумулятивной струи, а также данные по скорости детонации взрывчатого вещества, можно вычислить скорость прохождения кумулятивной струей преграды.

Эксперименты проводились на преградах, на одной стороне которых был закреплён изготовленный для этих целей линейный детонирующий заряд, имевший медную оболочку диаметром $3,25 \cdot 10^{-3}$ м и толщиной $2 \cdot 10^{-4}$ м со сферической формы выемкой радиусом $1,5 \cdot 10^{-3}$ м. В качестве взрывчатого вещества (ВВ) использовался октоген [4]. Скорость детонации этого вещества определялась по уравнению Б.И. Шехтера [5] с использованием данных авторов [6–8] и принималась равной 7400...7600 м/с, при плотности 1500 кг/м^3 . Давление в центре раздвигаемых после разрушения поверхностей на расстояние $0,1 \cdot 10^{-3}$ м составляло около 950...1000 МПа. Работа взрыва определялась методом баллистического маятника, а расчёт проведён по методике [9]. Преграды цилиндрических форм в месте разрушения имели толщину $4 \cdot 10^{-3}$ м и были выполнены с точностью $\pm 4 \cdot 10^{-7}$ м по всей окружности. Преграды были изготовлены из алюминиевого сплава АМГ6.М ОСТ 192096-83 (АМГ6 ГОСТ 4784-97).

На внешней стороне у каждой преграды, симметрично относительно располагаемому линейному заряду, были выполнены прямоугольной формы канавки с размерами: шириной $8 \cdot 10^{-3}$ м и глубиной $4 \cdot 10^{-3}$ м для первой серии экспериментов и, соответственно, 13 и $8,5 \cdot 10^{-3}$ м для второй. Эти канавки в первой конструкции были заполнены резиноподобным материалом (материал включал 20 % асбеста) 51-2150 ТУ 2513-108-00152075-2008, имевшим плотность 1160 кг/м^3 и твёрдость 90,7 по Шор А ГОСТ 263-75; во второй – подобным материалом – 51-2153 ТУ 2513-086-00152075-2006 с плотностью 640 кг/м^3 и твёрдостью 50,7. При этом толщина слоя резиноподобного материала, обладающего большим «живым упругим сопротивлением», определялась по [3] исходя из мощности линейного заряда. Для изготовления экранов, имевших форму колец, использовался стеклопластик ТЗМК-8. Размеры этих колец: ширина $13,5 \cdot 10^{-3}$ м и толщины 4,5 и

Расчет и конструирование

$2,5 \cdot 10^{-3}$ м для соответствующих серий опытов. Стеклопластик был изготовлен из стеклонеполнителя цельнотканого многослойного типа МКТ-4,2 ТУ 6-19-293-85 с эпоксидным связующим ЭДТ-10 (смола эпоксидная модифицированная КДА, КДА-2 ТУ 2225-032-00203306-97, отвердитель «Алюмоэпокси» ТУ 2250-001-16638325-2012).

Скорость прохождения звука в сплаве рассчитывалась по справочным данным (модулю Юнга и плотности) и составляла для АМГ6.М (АМГ6) – 5135...5190 м/с. Скорость звука в резиноподобных материалах 51-2150 и 51-2153 принималась для расчёта равной значениям для резины и каучука [10, 11] – 1760 и 1600 м/с соответственно (автор [12] для резины принял этот параметр равным 1040 м/с). При этом считалось, что наполнители (графит для резины и хризотил-асбест в резиноподобном материале) имеют одинаковые акустические характеристики.

Для подтверждения достаточности мощности линейного заряда для разрушения преграды без заполнения внешних канавок резиноподобными материалами были проведены контрольные испытания, в том числе и на преграде, изготовленной из сплава МЛ ГОСТ 2856-79, давшие положительные результаты по достаточности энергии кумулятивного заряда для разрушения преграды. При этом избыточность энергии заряда не превышала 20 %. При определении числа экспериментов, необходимых для подтверждения надежности полученных результатов по разрушению конструкции линейным зарядом, были использованы данные авторов [8] применительно к рассматриваемой задаче. Так, частные от делений толщин разрезанных стальных листов на толщины облицовок линейных зарядов и расстояния, на которые были удалены листы от зарядов к тем же толщинам оболочек, дают величины, равные 190,62 и 12,83 с относительными ошибками, соответственно, 0,55 % (для пяти позиций) и 1,24 % (для четырёх позиций), что говорит о стабильности и воспроизводимости результатов для системы «Преграда – линейный кумулятивный заряд». В испытаниях применялся стандартный электрический детонатор.

Результаты испытаний. Число осколков от разрушенного экрана в результате воздействия на него ударной волны на порядок меньше, чем число осколков, полученное при дроблении металлической оболочки снаряда [8]. Факт дробления пластмассового экрана на части говорит о волновом продвижении сдетонировавшего взрывчатого вещества от места его подрыва детонатором в двух направлениях: вдоль линейного заряда и поперёк него – вдоль кумулятивной струи. Наложение перпендикулярных колебаний на круговое движение по цилиндрической поверхности преграды и продольных – вдоль кумулятивной струи – приводит к наблюдаемой эпитрохиде разрушения экрана и различной глубине разрушения преграды поперёк образующей цилиндра. Волновой фронт от действия кумулятивной струи проходит следующие отрезки пути:

вперёд – толщину материала преграды и толщину резиноподобного материала до стеклопластмассового экрана и отразившись от последнего;

обратно – через резиноподобный материал и часть неразрушенной преграды до встречи с лидерной частью кумулятивной струи, где и наблюдается узел или остановка в продвижении струи в преграде. Используя вышеприведённые физико-технические характеристики, по материалам испытанных конструкций узлов с детонирующим зарядом из октогена расчётом получили скорость продвижения кумулятивной струи в алюминиевой преграде в первой серии экспериментов – 370 м/с, а во второй – 355 м/с. Значение этих величин меньше скоростей детонации для октогена (7500 м/с), прохождения звука в металле преграды (5100...5190 м/с) и продвижения продуктов детонации заряда (1875 м/с). Но, по данным [1], скорость движения кумулятивной струи в преграде при скорости детонации плавного пентолита 50/50...7450 м/с [8] равна 2700 м/с. Эта скорость регистрировалась с помощью фотосъёмки (метод авторов [1]), при которой проблематично определить границу между струёй и фронтомдвигающихся вслед за нею продуктов детонации. Данные авторов [1] близки данным по величине скорости перемещения продуктов детонации (для пентолита) – при политропе $n = 2$ (Taylor G.I., 1948–1950, [8]) – 2500 м/с или – 1862 м/с при $n = 3$ (Станюкович К.П., 1945–1946, [13]), – в расчётах в России используются данные К.П. Станюковича, а не G.I. Taylor. Полученные в экспериментах данные по скоростям перемещения кумулятивной струи непосредственно в преградах – 355...370 м/с – согласуются с данными авторов [8] – от 500 до 1000 м/с, относимыми ими к скорости перемещения песта кумулятивной струи для заряда с конической выемкой. Для заряда со сферической выемкой, по данным этих авторов пест перемещается приблизительно в два раза медленнее, и скорость составит в расчёте 710...740 м/с.

Опережение фронта ударной волны при детонации заряда взрывчатого вещества скорости разрушения преграды проявляется в изгибной деформации впередилежащих слоёв металла и, естественно, их разрушении до прихода составных частей кумулятивной струи. Это состояние металла преграды представлено на образце, приведённом на рис. 1 (серия № 2), где радиус выгиба преграды доходил до $1,5...2 \cdot 10^{-3}$ м. На втором образце, вырезанном из этой преграды через 180 угловых градусов относительно первого, см. рис. 2 (вид слева), просматривается положение стержня кумулятивной струи в момент полного прохождения им препятствия (образцы взяты из второй серии экспериментов). На другой стороне этого образца (диаметр образца равен $3,55 \cdot 10^{-2}$ м), вид справа, стержень отсутствует, но наблюдается механический разрыв последнего слоя металла. При размещении линейного заряда на внешней стороне преграды наблюдается на расстоянии $4 \cdot 10^{-3}$ м от зоны реза в месте нахождения концентратора напряжения скол цилиндрической части оболочки, изготовленной из магниевого сплава МЛ на дуге порядка 180 угловых градусов. Таким образом, при расчёте конструкции на прочность необходимо учитывать волну напряжения, создаваемую сдетонировавшим взрывчатым веществом, при этом в точке встречи прямой и отражённой волн давление продуктов взрыва может превысить удвоенное начальное значение [14].

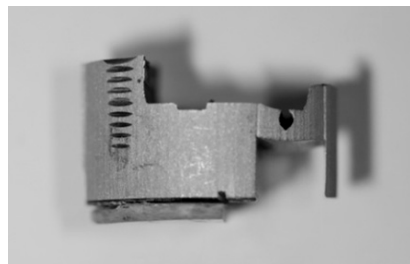


Рис. 1. Фрагмент от преграды в зоне размещения детонатора

По форме в поперечном сечении разрушенное пространство в алюминиевой преграде кумулятивной струей напоминает игрушечную юлу (см. рис. 1) с шириной входа порядка $0,5...1 \cdot 10^{-3}$ м, а боковые стенки состоят из оплавленных двойников. По данным Г. Могаупта [15], диаметр отверстия в преграде из алюминия превышает диаметр кумулятивной струи в 10 раз за счёт интенсивного испарения металла. Кроме этого, при подрыве кумулятивного заряда со сферической облицовкой, по данным этого же автора, пест (стержень) вообще не образуется. Однако по материалам проведённых экспериментов следует, что часть металла оболочки от линейного заряда переходит в пест, как видно на рис. 2. Центральная часть оболочки заряда при образовании кумулятивной струи, выворачиваясь, имеет вид длинного жгута-полусферы с рваными боковыми краями шириной около 1 мм и усиленного по массе фрагментами от её боковых поверхностей (рис. 3, серия № 1). Внутри полости-юлы обнаружен отдельный фрагмент из зоны разрушения (рис. 4, серия № 2). На рис. 5 (серия № 1) показаны два фрагмента от разрушенного экрана с нанесённым на них резиноподобным материалом.

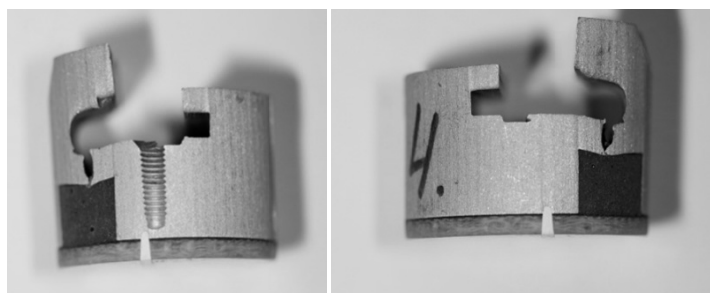


Рис. 2. Два вида (слева и справа) фрагмента преграды, извлеченного через 270° от места начала детонации

Известно [16], что энергия любого процесса представляется уравнением Дж.В. Гиббса через сумму произведений интенсивных факторов на экстенсивные:

$$E = TS - PV + \mu m + Uq + \sigma F,$$

где T и S – температура и энтропия;

P и V – давление и объём;

μ и m – потенциал (химический) и масса;

U и q – напряжение и электрический заряд;

σ и F – поверхностное натяжение и площадь.



Рис. 3. Пест (жгут)
от линейного заряда



Рис. 4. Фрагмент от преграды,
обнаруженный внутри
вырезанного образца (рис. 2)



Рис. 5. Части от экрана
с резиноподобным материалом

Количественно воздействие электрического поля и поверхностного натяжения на ансамбле ожигенных частиц в кумулятивной струе, которые рассматривались в [17], на преграду не известно. Но по данным [6], превышение уровня электромагнитного излучения, наблюдаемого при детонации взрывчатого вещества над ожидаемым, в результате термического излучения ионов продуктов горения составляет около 70 %. Центральный член уравнения – произведение потенциала на массу – трактовалось в [17] как структурные изменения в преграде (двойникование металла преграды по линии продвижения кумулятивной струи). Второй член уравнения описывает работу разрушения и вынос металла из каверны в процессе разрушения преграды кумулятивной струей, а первый член – плавление этой разрушенной части. Местно на поверхностях разрушения преграды наблюдаются вкрапления меди от разрушенной оболочки линейного заряда размером 0,1 на $0,2 \cdot 10^{-3}$ м. Количественное соотношение между первым и вторым членами уравнения в экспериментах не определялось, но может быть вычислено из сравнения экспериментально найденной величиной работы, совершённой линейным зарядом и энергетическими данными заряда при знании коэффициента полезного действия устройства.

Представленный материал по экспериментальному определению скорости прохождения кумулятивной струи в преграде во время её разрушения и наблюдавшиеся при этом эффекты укладываются в ранее предложенную модель вязкоупругого разрушения препятствия [17], согласно которой лидер кумулятивной струи производит структурные изменения по трассе своего продвижения, а пест (жгут, стержень) совершает её разрушение. При расчёте процесса разрушения конструкции необходимо также учитывать волну напряжения в металле, идущую впереди продуктов детонации взрывчатого вещества и деформирующую преграду.

В итоге преграда разрушается со скоростями:

- на первом участке в результате кинетического удара кумулятивной струи по преграде со скоростью детонации взрывчатого вещества заряда;
- на втором (основном) – со скоростью продвижения песта (жгута) составной части кумулятивной струи;
- на последнем отрезке – со скоростью продвижения волны напряжения (звука) в материале преграды.

Протяжённость первого участка разрушения зависит от энергии взрывчатого вещества в кумулятивном заряде и физических и технических свойств материала преграды.

Авторы предполагают, что предложенная методика по определению осреднённой во времени скорости кумулятивной струи в момент её прохождения через преграду для заряда со сферической выемкой и экспериментальная реализация этой методики продемонстрированы впервые.

Литература

1. *Explosives with Lined Cavities* / G. Birkhoff, D.P. McDougall, E.M. Pugh, G. Taylor // *Journal of Applied Physics*. – 1948. – Vol. 19. – P. 563–582.
2. *Kerr Cell Photography of High Speed Phenomena* / E.M. Pugh, R.V. Heine-Gelden, S. Foner, E.C. Mutschler // *Journal of Applied Physics*. – 1951. – Vol. 22. – № 4. – P. 487–493.
3. Тимошенко, С.П. *Сопротивление материалов* / С.П. Тимошенко. – М.: Наука, 1965. – Т. 1. – 363 с.

4. Октоген. Получение, свойства и применение / Е.Ю. Орлова, Н.А. Орлова, В.Ф. Жилин, Г.М. Шутов [и др.]. – М.: Типография МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1970. – 57 с.
5. Горст, А.Г. Пороха и взрывчатые вещества / А.Г. Горст. – М.: Машиностроение, 1972. – 207 с.
6. Шаль, Р. Физика детонации / Р. Шаль // Физика быстропотекающих процессов: сб. ст. – М.: Мир, 1971. – Т. 2. – С. 276–349.
7. Беляев, А.Ф. Теория взрывчатых веществ / А.Ф. Беляев. – М.: Оборонгиз, 1960. – 595 с.
8. Райнхарт, Дж.С. Поведение металлов при импульсных нагрузках / Дж.С. Райнхарт, Дж. Пирсон. – М.: Иностран. лит., 1958. – 296 с.
9. Боуден, Ф.П. Возбуждение и развитие взрыва в твёрдых и жидких веществах / Ф.П. Боуден, А.Д. Иоффе. – М.: Иностран. лит., 1955. – 119 с.
10. Кэй, Дж. Таблицы физических и химических постоянных / Дж. Кэй, Т. Лэби. – М.: Физматгизлит, 1962. – 247 с.
11. Чайлдс, У. Физические постоянные / У. Чайлдс. – М.: Физматгиз, 1962. – 80 с.
12. Кольский, Г. Волны напряжения в твёрдых телах / Г. Кольский. – М.: Иностран. лит., 1955. – 192 с.
13. Станюкович, К.П. Одноразмерный разлёт продуктов детонации бризантных взрывчатых веществ / К.П. Станюкович // Доклады Академии наук СССР. – 1946. – Т. 53. – № 6. – С. 523–526.
14. Райнхарт, Дж.С. Взрывная обработка металлов / Дж.С. Райнхарт, Дж. Пирсон. – М.: Мир, 1966. – 391 с.
15. Мозаунт, Г. Кумулятивные заряды / Г. Мозаунт // Вспомогательные системы ракетно-космической техники: сб. ст. – М.: Мир, 1970. – С. 341–356.
16. Гиббс, Дж.В. Термодинамические работы / Дж.В. Гиббс. – М.-Л.: Изд-во технико-теорет. литературы, 1950. – 492 с.
17. Головатенко, В.Д. Процесс взаимодействия кумулятивной струи с преградой / В.Д. Головатенко, А.В. Головатенко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2012. – Вып. 19. – № 12 (271). – С.13–22.

Головатенко Владислав Денисович. Заслуженный конструктор Российской Федерации, ведущий инженер-конструктор, ОАО «ОКБ «Новатор» (Екатеринбург), main@okb-novator.ru.

Головатенко Андрей Владиславович. Консультант-сотрудник, ОАО «ОКБ «Новатор» (Санкт-Петербург), main@okb-novator.ru.

Поступила в редакцию 2 апреля 2014 г.

**Bulletin of the South Ural State University
Series “Mechanical Engineering Industry”
2014, vol. 14, no. 3, pp. 5–10**

EXPERIMENTAL DEFINITION OF SPEED OF CUMULATIVE FLOW PROGRESS THROUGH DESTRUCTABLE OBSTACLE

*V.D. Golovatenko, EMDB “Novator”. LLC, Yekaterinburg, Russian Federation, main@okb-novator.ru,
A.V. Golovatenko, EMDB “Novator”. LLC, S. Petersburg, Russian Federation, main@okb-novator.ru*

A method is described to define the speed of advance of cumulative flow directly in an obstacle. It is found out that this speed, if averaged in time, is less than the speed of explosive detonation, is about ten times less than the sound speed in metal and less than the speed of movement of detonation products. These results prove the viscous-elastic model of obstacle destruction by a cumulative flow.

Keywords: direct wave, indirect wave, viscous-elastic model detonation, cumulation, flaw feed motion destruction, speed, screen.

References

1. Birkhoff G., MfcDougall D.P., Pugh E.M., Taylor G. Explosives with Lined Cavities. *Journal of Applied Physics*, June 1948, vol. 19, pp. 563–582.
2. Pujh E.M., Heine-Gelden R.V., Foner S., Motschler E.C. Kerr Cell Photography of High Speed Phenomena. *Journal of Applied Physics*, April 1951, vol. 22, no. 4. pp. 487–493.
3. Timoshenko, S.P. *Soprotivlenie materialov* [Materials Strength]. Moscow, Nauka Publ., 1965, vol. 1. 363 p.
4. Orlova E.Yu., Orlova N.A., Zhilin V.F., Shutov G.M., Zbarskiy V.L., Bitovskaya L.I. *Oktogen. Poluchenie, svoystva i primeneniye* [Cyclotetramethylene Tetranitramine (Octogene). Production, Properties, and Usage]. Moscow, Tipografiya MKHTI imeni D.I. Mendeleeva Publ., 1970. 57 p.
5. Gorst A.G. *Porokha i vzryvchatye veshchestva* [Blasting Powders and Explosives]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 207 p.
6. Shal' R. [Detonation Physics]. *Sbornik statey: Fizika bystroprokayushchikh protsessov* [Collected Works: Physics of High-Speed Processes]. Moscow, Mir Publ., 1971, vol. 2. pp. 276–349. (in Russ.)
7. Belyaev A.F. *Teoriya vzryvchatykh veshchestv* [Explosive Materials Model]. Moscow, Oborongiz Publ., 1960. 595 p.
8. Raynkhart Dzh.S., Pirson Dzh. *Povedeniye metallov pri impul'snykh nagruzkakh* [Metal Damage under Impulse Loads]. Moscow, Inostrannaya literature Publ., 1958. 296 p.
9. Bouden F.P., Ioffe A.D. *Vozbuzhdeniye i razvitiye vzryva v tverdykh i zhidkikh veshchestvakh* [Explosion Initiation and Development in Solid and Liquid Substances]. Moscow, Inostrannaya literature Publ., 1955. 119 p.
10. Key Dzh., Lebi T. *Tablitsy fizicheskikh i khimicheskikh postoyannykh* [Physical and Chemical Constants Table]. Moscow, Fizmatgozlit Publ., 1962. 247 p.
11. Chaylds U. *Fizicheskie postoyannye* [Physical Constants]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962. 80 p.
12. Kol'skiy G. *Volny napryazheniya v tverdykh telakh* [Stress Waves in Solid Bodies]. Moscow, Inostrannaya literature Publ., 1955. 192 p.
13. Stanyukevich K.P. [Uniform Fly-off of the High-Velocity Explosives Detonation Products]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Academy of Sciences of the USSR Reports], 1946, vol. 53, no. 6. pp. 523–526. (in Russ.)
14. Raynkhart Dzh.S., Pirson Dzh. *Vzryvnaya obrabotka metallov* [Metals Explosion Processing]. Moscow, Mir Publ., 1966. 391 p.
15. Mogaupt G. [Cumulative Charges]. *Vspomogatel'nye sistemy raketno-kosmicheskoy tekhniki: sb. st.* [Space-Rockets Machinery Auxiliary Systems: Collected Works]. Moscow, Mir Publ., 1970, pp. 341–356. (in Russ.)
16. Gibbs Dzh.V. *Termodinamicheskie rabory* [Thermodynamic Operations]. Moscow-Leningrad, Izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury Publ., 1950. 492 p.
17. Golovatenko V.D., Golovatenko A.V. [Process of Explosive Jet Interaction with a Barrier]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical engineering industry*, 2012, iss. 19, no. 12 (271), pp. 13–22. (in Russ.)

Received 2 April 2014