

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 623

DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-1-133-142

КУМУЛЯТИВНЫЕ ЗАРЯДЫ С ТОНКИМИ И СВЕРХТОНКИМИ ОБЛИЦОВКАМИ

Владилен Федорович Минин

Доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР, академик АТН РФ, e-mail: prof.minin@gmail.com

Игорь Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института стратегического развития, e-mail: prof.minin@gmail.com

Олег Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института стратегического развития, e-mail: prof.minin@gmail.com

Целью исследования является рассмотрение формирования кумулятивных струй в зарядах с кумулятивными облицовками с толщиной стенки порядка толщины струеобразующего слоя в классических зарядах. На основе математического моделирования и экспериментально показано, что в таких зарядах продукты детонации взрывчатых веществ могут играть роль дополнительного тела, влияющего на осевую скорость метания облицовки и приводящие к углу схлопывания более 180° . При этом процессе масса струи больше массы песта. Впервые экспериментально обнаружены гофры на поверхности облицовки при ее взрывном обжатии. На поверхности облицовки могут возникать гофры, приводящие к неустойчивости процесса формирования кумулятивной струи. В результате проведенного исследования установлено, что минимальная толщина стенки облицовки преимущественно определяется неустойчивостью ее поверхностью (появление гофр на ее поверхности).

Ключевые слова: гиперкумуляция, кумулятивный заряд, кумулятивная струя, облицовка, неустойчивость Рихтмайера – Мешкова, скорость струи

Введение

Значительную роль в возможности реализации соударения материала кумулятивной облицовки под углами большими 180° с формированием кумулятивной струи в гиперкумулятивных зарядах, предложенных авторами, имеет повышенная область давления продуктов детонации заряда взрывчатого вещества (ВВ), находящаяся за облицовкой

вблизи оси симметрии заряда после прохождения по нему детонационной волны [1–10].

Повышенное давление продуктов детонации образуется за счет волн разгрузки с периферии заряда и существует некоторое время, в течение которого оно сообщает дополнительный импульс центральной части кумулятивной облицовки и в значительной мере способствует увеличению угла схождения материала облицовки на ось симметрии заряда.

Для практики формирования глубоких перфораций скважин значительный интерес представляют тонкие облицовки в зарядах диаметром 30–50 мм и более из легких и тяжелых металлов и проблемы, сопутствующие их конструированию.

В этой связи рассмотрим «тонкие» кумулятивные облицовки стенки порядка толщины струеобразующего слоя в классической кумуляции. В первую очередь рассмотрим кумулятивные облицовки из легких металлов, таких как алюминий, где можно проще проследить за особенностями формирования струи. Далее рассмотрим тяжелые металлы, такие как медь, железо и другие. При этом необходимо учитывать как технологические проблемы изготовления тяжелых, весьма тонких кумулятивных облицовок, так и проблемы борьбы с неустойчивостями, возникающими при сжатии сверхтонких, тяжелых облицовок.

Эти проблемы находят свое решение при соответствующем увеличении диаметра заряда с тяжелыми, тонкими кумулятивными облицовками. Тонкие облицовки имеют практический интерес, так как растянуть массивную кумулятивную струю с применением су-

ществующих ВВ всегда трудно и приходится уменьшать количество металла в облицовке для нахождения компромисса при создании конструкции.

Основные результаты исследования

Рассмотрим заряд диаметром 40 мм с облицовкой из алюминия с углом раствора 90° и толщиной 0,35 мм или 0,875 % от диаметра заряда. Можно предположить, что в таких зарядах толщина стенки «тонкой» кумулятивной облицовки порядка толщины струеобразующего слоя в толстых облицовках из того же материала. В таком заряде формируется кумулятивная струя с максимальной скоростью порядка 11,1 км/с, а песта 4,8 км/с (рис. 1). При этом концентрация давления продуктов детонации ВВ происходит в области на оси симметрии заряда у вершины кумулятивной облицовки и она может играть роль своеобразного дополнительного тела, воздействующего на облицовку. Давление продуктов детонации ВВ на оси заряда увеличивает осевую скорость метания вершины облицовки, и схлопывание материала облицовки происходит под углами более 180° .

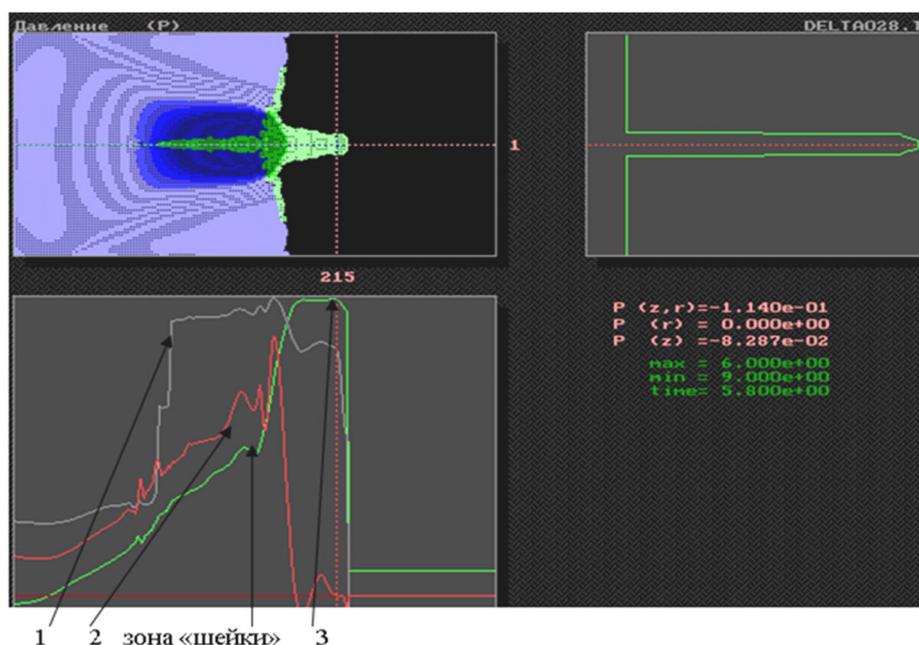


Рис. 1. Течение материалов кумулятивного заряда на момент 5,8 мкс после соударения алюминиевых струй (давление) и распределения скорости (V_z), давления и плотности вдоль оси заряда:

1 – график плотности; 2 – график давления; 3 – графики скорости (V_z)

На рис. 1 видно, что облицовка начала терять устойчивость, меняется форма ее поверхности; приведены изоуровни давления в диапазоне от 6 до 9 ГПа. Потеря устойчивости облицовки приводит к нарушению регулярного процесса схлопывания и к сложному характеру течения, хотя в целом образование массивной струи и тонкого низкоскоростного песта продолжается. Из-за начальных неустойчивостей облицовка схлопывается «гармошкой», что отражается на форме кумулятивной струи и песта (см. рис. 1).

Как следует из графика распределения плотности материала вдоль оси симметрии заряда, выявился любопытный факт: плотность материала песта существенно больше плотности материала кумулятивной струи. Плотность материала песта по оси симметрии заряда составляет не менее 3 г/см^3 , а плотность материала струи порядка $2,7\text{--}2,67 \text{ г/см}^3$. Понижение плотности материала струи связано с ее расширением, после выхода из зоны сжатия в зону нормального, низкого давления. Пик максимальной плотности материала струи совпадает с максимумом давления.

Для устранения неустойчивости формы поверхности кумулятивной облицовки при ее ускорении взрывом необходимо увеличить толщину стенки облицовки. Толщина алюминиевой облицовки была увеличена до величины 0,7 мм или 1,59 % от диаметра заряда, ввели железный корпус заряда толщиной 2 мм. Таким образом, общий диаметр заряда стал равным 44 мм.

На рис. 2 показаны течения материалов взрыва и кумулятивной облицовки на момент 35,6 мкс после инициирования заряда и приведены изоуровни радиальной скорости (V_r). Практически весь материал облицовки переходит в кумулятивную струю. На песте отчетливо видна «шейка», возникшая при переходе течения через полный угол схождения материала облицовки на ось симметрии заряда, равный 180° . Максимальная скорость кумулятивной струи равна 9,5 км/с. Диаметр формируемой кумулятивной струи существенно больше диаметра песта. Плотности материала песта и кумулятивной струи сравнялись и стали равными порядка плотности алюминия в нормальных условиях.

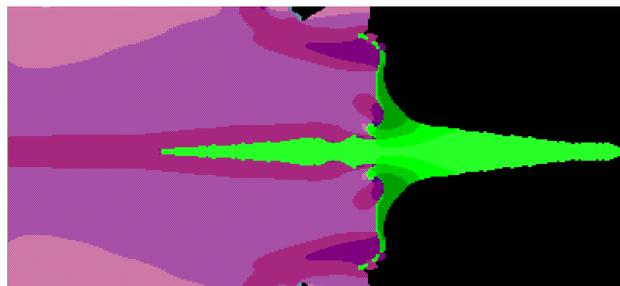


Рис. 2. Течение материалов на момент времени 35,6 мкс после инициирования заряда.

Показаны изоуровни радиальной скорости (V_r)

Если толщина стенки кумулятивной облицовки предельно мала, то реализовать процесс соударения материала кумулятивной облицовки под углами большими 180° довольно легко. Но масса такой струи из-за тонкости облицовки оказывается небольшой и может быть сравнима с массой струи, формируемой в режиме классической кумуляции.

Процессу схождения и соударения материала кумулятивной облицовки под углами большими 180° препятствуют два ограничения: это технология изготовления «тонких» облицовок и устойчивость таких «тонких» облицовок при их сжатии продуктами детонации заряда ВВ. Такие заряды позволяют уменьшить пестообразование и забивание канала продуктами взрыва заряда за счет малой толщины стенки облицовки. Однако малая толщина стенки облицовки ведет к уменьшению массы формируемой струи, участвующей в пробивании преграды.

Применение тонких облицовок в кумулятивных перфораторах с величиной толщины стенки порядка толщины струеобразующего слоя в классической кумуляции позволяет получить гиперкумулятивное течение при малых углах раскрытия облицовок, которые применяются в классической кумуляции. В этом случае масса металла, идущая в струю, возрастает за счет длины образующей облицовки. Реально для зарядов диаметром порядка 40 мм, толщины алюминиевой облицовки в ее вершине составляет порядка 0,4–0,5 мм.

На рис. 3 приведены результаты моделирования формирования кумулятивной струи из заряда с высокой облицовкой диаметром 40 мм и с полным углом раствора 38° на время

5,8 мкс после начала детонации заряда и график V_z скорости вдоль оси симметрии заряда. Максимальная скорость формируемой кумулятивной струи 12,77 км/с. В результате формирования кумулятивной струи из тонкой облицовки формируется пест с диаметром существенно меньше диаметра струи. Этот эксперимент демонстрирует, что течение с массивной толстой струей и тонким пестом существует в классической кумуляции и при достаточно малых углах раскрытия облицовки.

Для облицовок из тяжелых металлов, например, меди, такая толщина стенки облицовки, при указанном диаметре заряда не позволяет организовать схождение его материала на ось симметрии заряда под углом более 180° не только по

технологическим причинам, но и в связи с потерей устойчивости таких облицовок при их сжатии взрывом. Для этого процесса необходимо увеличивать диаметр заряда. В качестве примера рассмотрим заряд с облицовкой из более тяжелого металла, например, железа. Это заряд диаметром 120 мм, имеющий железную облицовку с минимальной толщиной стенки, равной 2 мм и максимальной толщиной стенки 5 мм. В качестве ВВ в заряде использовался октоген. Детонация заряда ВВ происходит плоской детонационной волной. Для данного диаметра заряда такая облицовка тоже является тонкой. Постановка задачи приведена на рис. 4, а, а на рис. 4, б показан процесс течения материалов взрыва на момент времени 21,2 мкс.

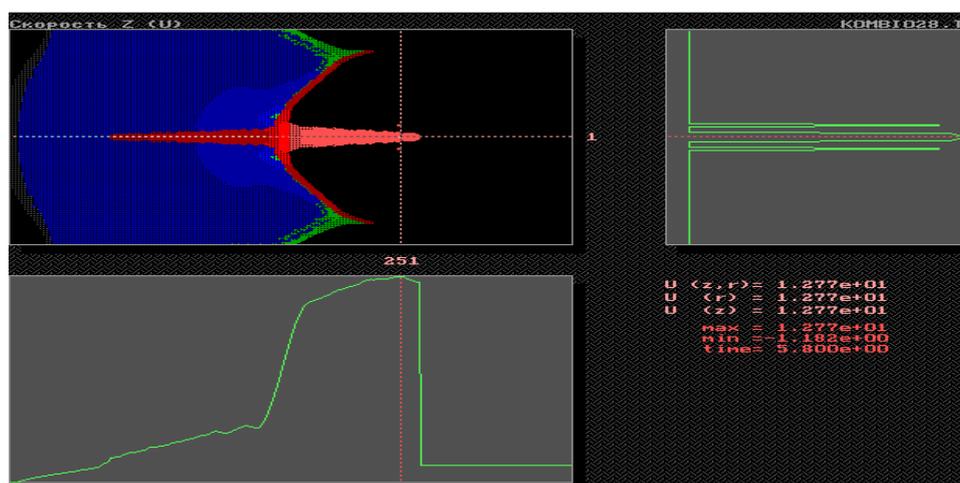


Рис. 3. Состояние кумулятивного взрыва на время 5,8 мкс после начала детонации. Показаны изолинии V_z скорости

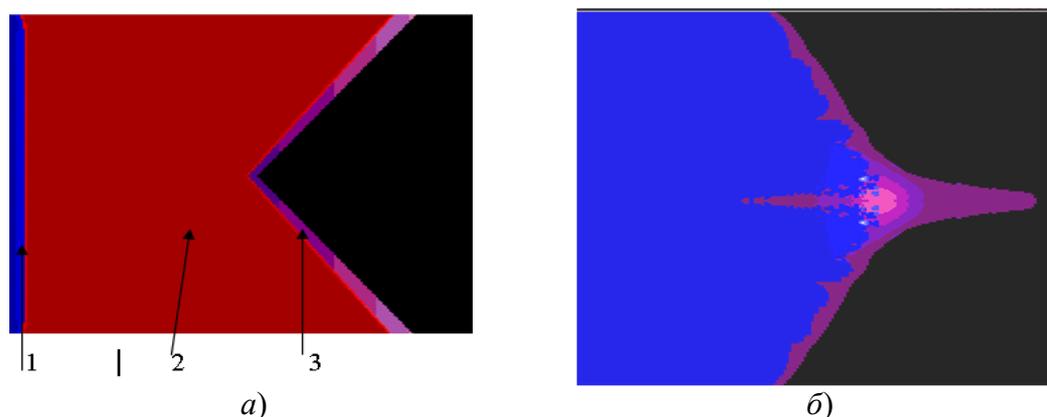


Рис. 4. Пример формирования кумулятивной струи в кумулятивном заряде с железной облицовкой:

а) постановка задачи: 1 – продукты детонации ВВ, 2 – заряд ВВ с выемкой, 3 – кумулятивная облицовка из железа; б) процесс течения материалов взрыва на момент времени 21,2 мкс. Показаны изолинии давления

В этом кумулятивном взрыве также идет формирование массивной струи и практически отсутствует пест. Скорость струи достигает величины 7,4 км/с. При больших диаметрах заряда можно сформировать кумулятивную струю в режиме гиперкумуляции из тонкой облицовки, выполненной из материала с большой плотностью, например, из меди.

Таким образом, для тонких облицовок реализуется режим их схлопывания на оси симметрии заряда под углами более 180° с образованием массивной струи и тонкого низкоскоростного песта. Этого режима в моделях соударения струй не происходит, так как при этом нет ВВ и продуктов детонации ВВ, которые в реальном взрыве играют роль дополнительного тела.

Рассмотрим вопрос о минимальной толщине стенки кумулятивной облицовки. Она может определяться из условия неразрушения ее продуктами детонации заряда ВВ и потери устойчивости ее поверхности при метании и сжатии облицовки.

В проведенном эксперименте по осесимметричному обжатию импульсным осесимметричным магнитным полем алюминиевой облицовки с формированием кумулятивной струи на ее внутренней и внешней поверхностях были впервые обнаружены сформированные продольные гофры (рис. 5).

Математическое моделирование подобного явления является сложной задачей, так как требуются расчеты в 3D-модели с высоким пространственным разрешением и авторам такие работы не известны.

Степень неустойчивости поверхности кумулятивной облицовки увеличивается с ро-

стом плотности вещества, из которого она изготовлена [1–5]. Причем неустойчивость поверхности облицовки сначала возникает на ее внешней поверхности, а затем переходит на ее внутреннюю поверхность. Высота возникающих «гофр» на внешней поверхности облицовки больше, чем на ее внутренней поверхности.

Характерно, что формирование гофр на формируемом взрывом теле происходит и в высоких кумулятивных облицовках с толщиной стенки порядка струеобразующего слоя [1–4].

Качественные расчеты в 2D-модели показали, что гофры на поверхности облицовок образовывались при их взрывном обжатии для легких и тяжелых металлов, высоких и низких облицовок.

Например, для облицовки из алюминия с толщиной стенки 0,148 мм и с полным углом раствора $48,6^\circ$ формировалась массивная кумулятивная струя и малый пест. При меньшей толщине стенки облицовки происходило ее разрушение продуктами детонации ВВ. Особенностью формирования струи из сверхтонких облицовок является модуляция диаметра песта и струи (рис. 6). Это явление обусловлено появлением процесса начальной неустойчивости, периодическим изменением угла схождения материала облицовки на ось симметрии заряда. При полном угле схождения менее 180° увеличивается диаметр песта и уменьшается диаметр струи. При полном угле схождения более 180° уменьшается диаметр песта и увеличивается диаметр струи. В сечении, указанном маркером, скорость песта составляет 3 км/с.

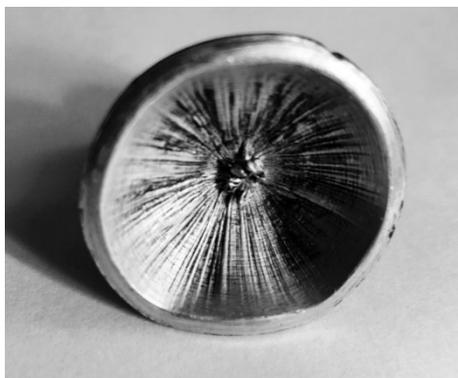


Рис. 5. Гофры на поверхности алюминиевой облицовки при ее импульсном нагружении высокоинтенсивным осесимметричным магнитным полем

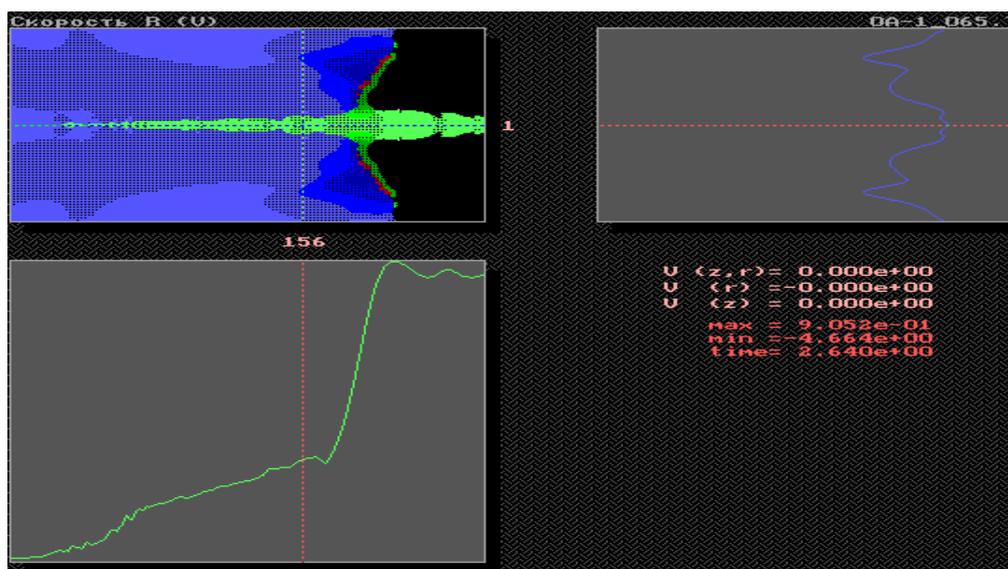


Рис. 6. Формирование кумулятивной струи на момент времени 2,64 мкс.

Показаны изолинии радиальной скорости V_r

Методами вычислительного эксперимента авторы показали, что минимальная толщина стенки облицовки не зависит от диаметра заряда.

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что минимальная толщина стенки облицовки определяется преимущественно неустойчивостью ее поверхности (появлением гофр на ее поверхности).

Без всякого сомнения, мы можем говорить лишь о существовании «гофр» на поверхности облицовки, но для изучения структуры гофр, их направлении – поперечном или продольном по отношению к оси симметрии заряда – необходимо провести соответствующее 3D-моделирование процесса.

Несмотря на сверхтонкую толщину облицовки, при формировании кумулятивной струи образуется пест. Наличие неустойчивости поверхности облицовки приводит к модуляции массы (диаметра) вещества, поступающего как в струю, так и в пест.

Наибольший интерес представляют тонкие металлические облицовки из легких и тяжелых материалов, так как при их метании лучше происходит передача импульса от продуктов детонации к облицовке, чем достигаются высокие скорости ее метания и формируемой струи при малом песте. Использование зарядов со сверхтонкими облицовками

позволяет применять предельно малое количество ВВ. Минимальная толщина стенки облицовки ограничивается появлением различного рода неустойчивостей, возникающих при обжати облицовки, разрушением ее продуктами детонации заряда ВВ и т. п.

Тонкие облицовки могут быть изготовлены точением металла, но в такого рода облицовках рельеф точения может быть сравним с толщиной облицовки. В этом случае могут возникать неустойчивости Рихтмайера – Мешкова.

Возмущения метательного элемента в виде волнистой части облицовки, ее «колебания», переменная плотность материала облицовки, интерференция различных волн, разрушение материала облицовки и т. д. приводят к появлению неустойчивости при обжати облицовки и, как следствие, к уменьшению эффективности воздействия на мишень. Неустойчивость Рихтмайера – Мешкова [11–12] возникает между двумя контактирующими сплошными средами различной плотности, когда поверхность раздела испытывает ускорение, например, при прохождении ударной волны. Развитие нестабильности начинается с возмущения малой амплитуды, которая первоначально возрастает линейно со временем. Далее неустойчивость приобретает нелинейный характер со смешиванием веществ.

Неустойчивость Рихтмайера – Мешкова является предельным случаем неустойчивости Рэля – Тейлора, когда постоянное воздействие силы заменяется на кратковременный импульс.

Если ударная волна проходит через искривленную свободную границу конденсированного материала, эволюция начального этапа развития неустойчивостей может иметь струйный характер [13], приводящий к уменьшению импульса метаемой облицовки, нарушения условий струеобразования.

В качестве примера рассмотрим заряд, представленный на рис. 7.

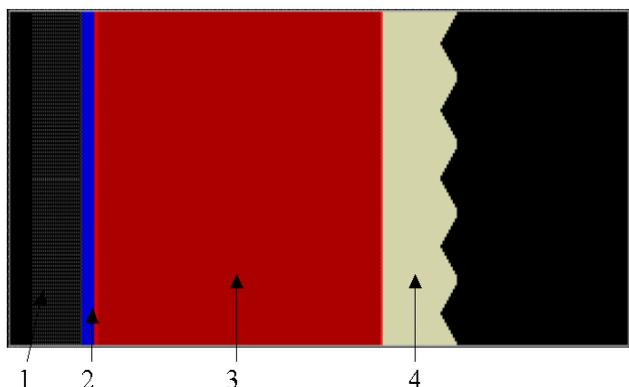


Рис. 7. Постановка задачи:

- 1 – инициатор, парафиновая пластина;
- 2 – продукты детонации заряда ВВ; 3 – заряд ВВ; 4 – элемент облицовки

Детонация заряда ВВ происходит метаемой парафиновой пластиной, толщиной 0,5 мм со скоростью 10 км/с, создающей плоскую детонационную волну. В качестве ВВ используется состав TNT плотностью 1,61 г/см³ и толщиной 3 мм. Модель детонации – идеальная. В заряде применяется облицовка в форме пластины из железа с плоской левой границей. Ее правая граница аппроксимируется пилообразной кривой с амплитудой 0,15 мм и периодом 0,15 мм. Толщина пластины 0,6 мм. Задача решалась в аксиальной симметрии.

На рис. 8 показан последовательный процесс формирования кумулятивных струй и их эволюция, приведены изоуровни Z скорости. В результате выхода ударной волны из профилированной поверхности железной пластины формируются кумулятивные струи с максимальной скоростью 4,55–4,99 км/с в зависимости от расстояния от оси симметрии задачи. У центральной кумулятивной струи произошел откол материала от ее головной части со скоростью 5,4 км/с.

Периферийные кумулятивные струи искривлены.

Аналогичные зависимости сохраняются для материала пластины из тяжелого металла, например, свинца и легкого материала – алюминия.

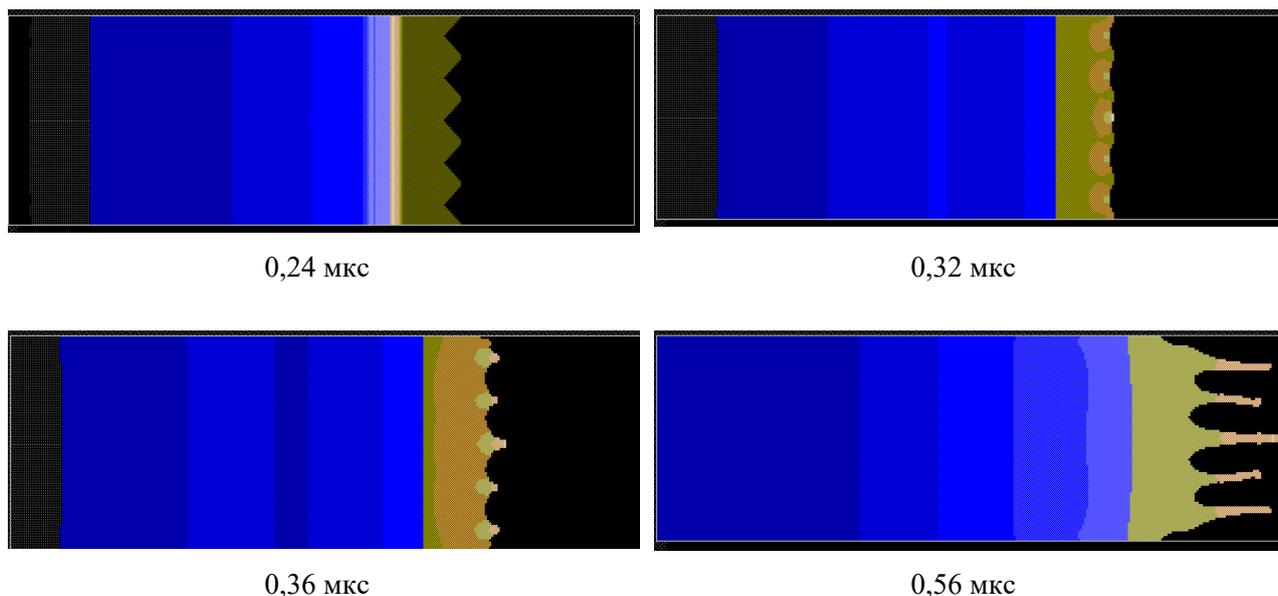


Рис. 8. Процесс формирования кумулятивных струй из гофр

В результате выхода ударной волны из профилированной поверхности свинцовой пластины формируются кумулятивные струи с максимальной скоростью порядка 3,8 км/с. В результате выхода ударной волны из профилированной поверхности алюминиевой пластины формируются кумулятивные струи с максимальной скоростью порядка 7,87–8,72 км/с. Максимальная скорость струи формируется на оси симметрии задачи, а минимальная – на ее периферии и, возможно, обусловлена интерференцией ударных волн в пластине.

Характерно, что разброс скоростей формируемых кумулятивных струй уменьшается с увеличением плотности материала пластины.

Заключение

Приведенные результаты доказывают возможность процесса струеобразования при выходе ударной волны, сформированной продуктами детонации заряда ВВ, на шероховатую свободную поверхность конденсированного вещества облицовки. Данный эффект приводит к неустойчивости поверхности тонкой облицовки при ее сжатии, уменьшению эффективности воздействия на мишень и неустойчивости получения результатов. Этот факт важен для технологии изготовления тонких и сверхтонких кумулятивных облицовок и требований к рельефу их поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Минин В. Ф., Минин И. В., Минин О. В. Способ и устройство (варианты) формирования высокоскоростных кумулятивных струй для перфорации скважин с глубокими незапестованными каналами и с большим диаметром : Патент РФ № 2412338, опуб. 20.02.2011, Бюл. № 5. – 46 с.
2. Минин В. Ф., Минин И. В., Минин О. В. Физика гиперкумуляции и комбинированных кумулятивных зарядов. – Новосибирск : ООО «Новополиграфцентр», 2013. – 272 с.
3. Минин И. В., Минин О. В. Кумулятивные заряды. – Новосибирск : СГГА, 2013. – 200 с.
4. Minin V. F., Minin O. V., Minin I. V. Physics hypercumulation and combined shaped charges // Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), 2012, 11th International Conference on IEEE. – Novosibirsk : IEEE, 2012. – P. 34–52.
5. Minin V. F., Minin O. V., Minin I. V. Physics of hypercumulation: jet formation in shaped charge and ablatively-driven implosion of hollow cones // International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy. – 2014. – Vol. 3. – P. 76.
6. Hu Xiaomin, Liu Yingbin, Hu Xiaoyan, Sun Miao, Zhao Jiajun. Numerical Simulation on Affection of Hypercumulation Formation by the Structure of Shaped Charge liner // Journal of Ordnance Equipment Engineering. – 2019. – Vol. 40(12). – P. 35–39.
7. Shi Jun-lei, Liu Ying-bin, Hu Xiao-yan, Zhang Xu-guang. Numerical simulation of effect of material of additional liner on the performances of hypercumulation // Chinese Journal of Explosives & Propellants. – 2017. – Vol. 40(1). – P. 69.
8. LI Qing-xin, Wang Zhi-jun, Chen Li, Yi Jian-ya. Simulation Research of a Super Shaped Charge Structure // Journal of Ordnance Equipment Engineering. – 2016. – Vol. 6. – P. 35–38.
9. Минин В. Ф., Минин О. В., Минин И. В. Максимальная скорость сплошной кумулятивной струи // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 3 (23). – С. 129–137.
10. Минин В. Ф., Минин О. В., Минин И. В. Технология изготовления анизотропной облицовки кумулятивного заряда // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 237–242.
11. Richtmyer R. D. Taylor instability in a shock acceleration of compressible fluids // Communications on Pure and Applied Mathematics. – 1960. – Vol. 13. – P. 297–319.
12. Е. Е. Мешков, И. Ю. Безрукова, А. Д. Ковалева, С. С. Косарим, О. В. Ольхов Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной // Изв. АН СССР, МЖГ. – 1969. – № 5. – С. 151–158.
13. Бахрах С. М. Кумулятивный характер неустойчивости поверхности конденсированного вещества // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32, вып. 3. – С. 19–24.

Получено 19.11.2020

© В. Ф. Минин, И. В. Минин, О. В. Минин, 2021

SHAPED CHARGES WITH THIN AND ULTRA-THIN FACINGS

Vladilen F. Minin

D. Sc., Professor, Winner of the State Prize of the USSR, Academician of the ATN of the Russian Federation, e-mail: prof.minin@gmail.com

Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Chief Researcher, Scientific Research Institute for Strategic Development, e-mail: prof.minin@gmail.com

Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Chief Researcher, Scientific Research Institute for Strategic Development, e-mail: prof.minin@gmail.com

The aim of the research is to study the formation of cumulative jets in charges with cumulative facings with a wall thickness of the order of the thickness of the jet-forming layer in classical charges. Based on mathematical modeling and experiments, it is shown that in such charges, the detonation products of explosives can play the role of an additional body that affects the axial velocity of the lining throwing and leads to a collapse angle of more than 180 degrees. In this process, the mass of the jet is greater than the mass of the pestle. For the first time, corrugations were experimentally detected on the surface of the lining during its explosive compression. Corrugations may occur on the surface of the lining, leading to instability of the cumulative jet formation process. As a result of the study, it was found that the minimum wall thickness of the cladding is mainly determined by the instability of its surface (the appearance of corrugations on its surface).

Keywords: hypercumulation, cumulative charge, cumulative jet, facings, Richtmayer–Meshkov instability, jet speed

REFERENCES

1. Minin, V. F., Minin, I. V., & Minin, O. V. (2011). Method and device (options) for forming high-speed cumulative jets for perforation of wells with deep untested channels and with a large diameter. Patent of the Russian Federation No. 2412338.
2. Minin, V. F., Minin, I. V., & Minin, O. V. (2013). *Fizika giperkumulyatsii i kombinirovannykh kumul'yativnykh zaryadov [Physics of hypercumulation and combined cumulative charges]*. Novosibirsk: OOO "Novoprystan" Publ., 272 p. [in Russian].
3. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2013). *Kumulyativnye zaryady [Cumulative charges]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 200 p. [in Russian].
4. Minin, V. F., Minin, O. V., & Minin, I. V. (2012). Physics hypercumulation and combined shaped charges. *11th International Conference on IEEE: Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)* (pp. 34–52). Novosibirsk: IEEE.
5. Minin, V. F., Minin, O., & Minin, I. V. (2014). Physics of hypercumulation: jet formation in shaped charge and ablatively-driven implosion of hollow cone. *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*, 3, P. 76.
6. Hu Xiaomin, Liu Yingbin, Hu Xiaoyan, Sun Miao, & Zhao Jiajun. (2019). Numerical Simulation on Affection of Hypercumulation Formation by the Structure of Shaped Charge liner. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 40(12), 35–39.
7. Shi Jun-lei, Liu Ying-bin, Hu Xiao-yan, & Zhang Xu-guang. (2017). Numerical simulation of effect of material of additional liner on the performances of hypercumulation. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 40(1), P. 69.
8. Li Qing-xin, Wang Zhi-jun, Chen Li, & Yi Jian-ya. (2016). Simulation Research of a Super Shaped Charge Structure. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 6, 35–38.
9. Minin, V. F., Minin, O. V., & Minin, I. V. (2013). Maximum speed of a continuous cumulative jet. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 3(23), 129–137 [in Russian].

10. Minin, V. F., Minin, O. V., & Minin, I. V. (2016). Technology for manufacturing anisotropic shaped charge cladding. *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 4(36), 237–242 [in Russian].
11. Richtmyer, R. D. (1960). Taylor instability in a shock acceleration of compressible fluids. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 13, 297–319.
12. Meshkov, E. E. (1969). Instability of the interface between two gases accelerated by a shock wave. *Izvestiya AN SSSR, MZhG [Izvestia of the USSR Academy of Sciences]*, 5, 151–158 [in Russian].
13. Bakhrakh, S. M. (2006). Cumulative nature of the instability of the surface of condensed matter. *Pis'ma v ZhTF [Letters to the Journal of Technical Physics]*, 32(3), 19–24 [in Russian].

Received 19.11.2020

© V. F. Minin, I. V. Minin, O. V. Minin, 2021