

УДК 622.22

**Особенности функционирования кумулятивных зарядов с двухслойными и порошковыми облицовками**

**# 12, декабрь 2012**

Серов А.Ю.

*Студент, кафедры «Высокоточные летательные аппараты»*

*Научный руководитель: А.В. Бабкин,*

*д.т.н., профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[ayiserov@gmail.com](mailto:ayiserov@gmail.com)

Явление кумуляции нашло широкое применение не только в военной технике, но также и в народном хозяйстве, в таких отраслях, как нефте- и газодобыча. Кумулятивные перфораторы интенсивно используются для вторичного вскрытия пластов, поэтому вопросы их усовершенствования актуальны.

В данной статье излагается анализ результатов численного моделирования работы кумулятивных зарядов с облицовками различных форм и конфигураций, в том числе и с двухслойными облицовками. Целью этих исследований являлось изучение физических процессов, происходящих в области схлопывания, оценка взаимного влияния слоев облицовки друга и возможности увеличения эффективности действия и/или снижения стоимости зарядов за счет применения двухслойной схемы и порошковых материалов.

Основной проблемой, препятствующей использованию порошковых материалов в производстве облицовок, является крайне низкая сопротивляемость их разрушению. При образовании кумулятивной струи частицы металла, в зависимости от их начального расположения, испытывают сильное нагружение, сопровождающееся последующей разгрузкой при их выходе в струю (или в пест). Разумно предположить, что порошковый материал в этих условиях будет рассыпаться.

Для исследования механических напряжений в материале был проведен ряд вычислительных экспериментов в системе ANSYS AUTODYN-2D. Рассматривались двумерные осесимметричные задачи, решаемые на эйлеровой сетке. Расчет производился без учета прочности, так как при изучаемых конфигурациях облицовок ее влияние пренебрежимо мало по сравнению с гидродинамическим давлением.

На облицовку устанавливались несколько групп лагранжевых датчиков (маркеров) для записи графиков давления, скорости и прочих физических величин. Каждая группа располагалась на нормали к внутренней поверхности облицовки, датчики размещались через равные промежутки. Поскольку по гидродинамической теории кумуляции толщина внутреннего слоя облицовки, переходящего в струю,

довольно мала, то промежуток между соседними маркерами выбирался с расчетом, чтобы хотя бы некоторое их число попало в струю.

Среди исследованных материалов - медь, свинец, а также порошковый материал, полученный композицией меди и вольфрама. Для свинца и меди использовались ударные адиабаты в линейной форме  $D = a + bu$ , где  $D$  - скорость фронта ударной волны,  $u$  - массовая скорость материала за фронтом ударной волны,  $a$ ,  $b$  - коэффициенты. Для порошкового материала использовалось уравнение сжимаемости в полиномиальной форме:  $p = A\mu + B\mu^2 + C\mu^3$ , где  $p$  - давление,  $\mu = \rho / \rho_0 - 1$  - относительное сжатие. Коэффициенты в этой формуле были получены методом наименьших квадратов. Для получения расчетных точек была применена следующая модель пористого вещества: пусть у нас есть основа (медь) с начальной плотностью  $\rho_{01}$  и ударной адиабатой  $p_1(\rho_1)$  и добавка (вольфрам) с начальной плотностью  $\rho_{02}$  и ударной адиабатой  $p_2(\rho_2)$ . Массовая доля добавки равна  $\alpha$ . Тогда объемы основы и добавки равны

$$V_1 = \frac{m(1-\alpha)}{\rho_1}, V_2 = \frac{m\alpha}{\rho_1}.$$

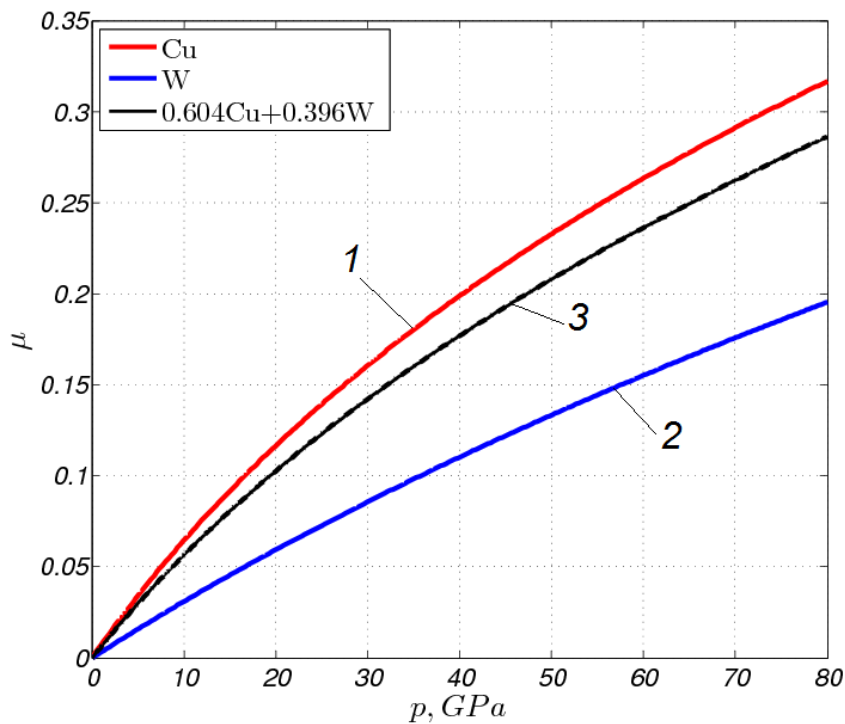


Рис. 1 Ударные адиабаты меди (1), вольфрама (2) и порошкового материала (3)

Поскольку общий объем материала равен сумме объемов его составляющих, то получаем ударную адиабату в виде

$$\rho(p) = \frac{m}{V_1 + V_2} = \frac{\rho_1(p) \cdot \rho_2(p)}{\alpha \rho_1(p) + (1-\alpha) \rho_2(p)}.$$

Отсюда же можно получить выражение для массовой доли добавки при известной начальной плотности  $\rho_0$  порошкового материала:

$$\alpha = \frac{\rho_2}{\rho_0} \frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1}$$

В расчетах использовался состав, имеющий начальную плотность, равную плотности свинца, т.е.  $\rho_0 = 11,3 \text{ г/см}^3$ , при этом  $\alpha = 0,396$ , а аппроксимация ударной адиабаты принимает вид

$$p = 157,9\mu + 321,9\mu^2 + 359,2\mu^3, \text{ ГПа.}$$

Графики ударных адиабат представлены на рис. 1.

В окрестности точки схлопывания облицовки вблизи оси симметрии создается зона высокого давления за счет торможения набегающего потока материала и гашения его радиальной скорости. Радиальная скорость схождения облицовки достигает 3-4 км/с. В зависимости от материала и условий схлопывания предельные значения давления имеют порядок 50-80 ГПа. Характер нагружения при вхождении в эту область неударный, но при определенных режимах течения может образовываться т.н. присоединенная ударная волна, связанная с тем, что скорость звука в материале недостаточна для распространения возмущений вверх по облицовке. Образование присоединенной УВ считают главным условием образования разрушенной и диспергированной кумулятивной струи [1].

При использовании свинцовой облицовки вследствие низкой объемной скорости звука такая картина наблюдается в широкой области параметров схлопывания. Рис. 2 демонстрирует наличие присоединенной УВ в монолитной свинцовой облицовке, а рис. 3 - ее отсутствие при тех же начальных условиях в композитной облицовке. Заряд взрывчатого вещества – октогена с уравнением состояния в форме JWL [1], находился в массивном стальном корпусе. Облицовка – коническая, переменной толщины с закруглением при вершине. Двойной угол раствора конуса равен  $48^\circ$ . Диаметр заряда – 40 мм. Градация давлений: красный цвет соответствует значениям более 40 ГПа, темно-синий – меньше -2 ГПа.

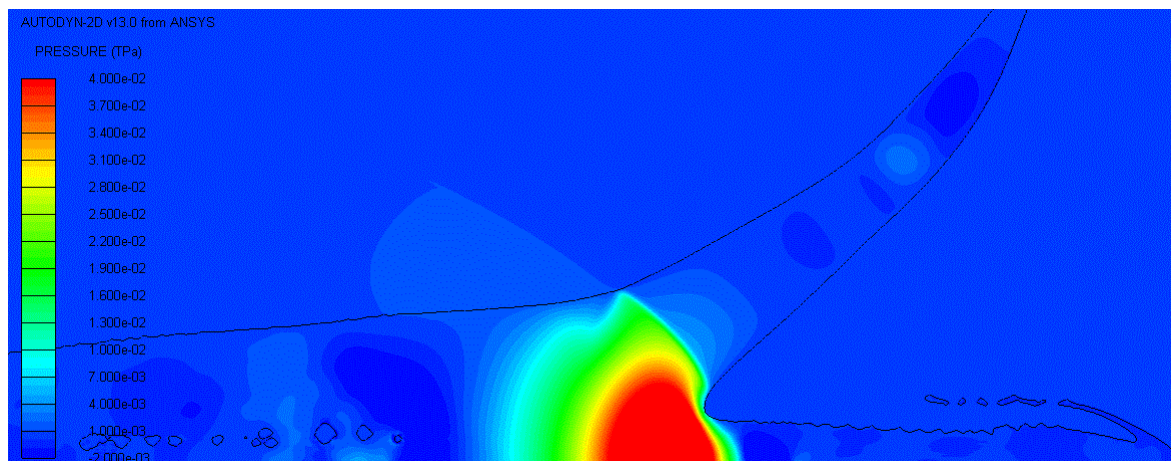


Рис. 2 Присоединенная УВ в свинцовой облицовке

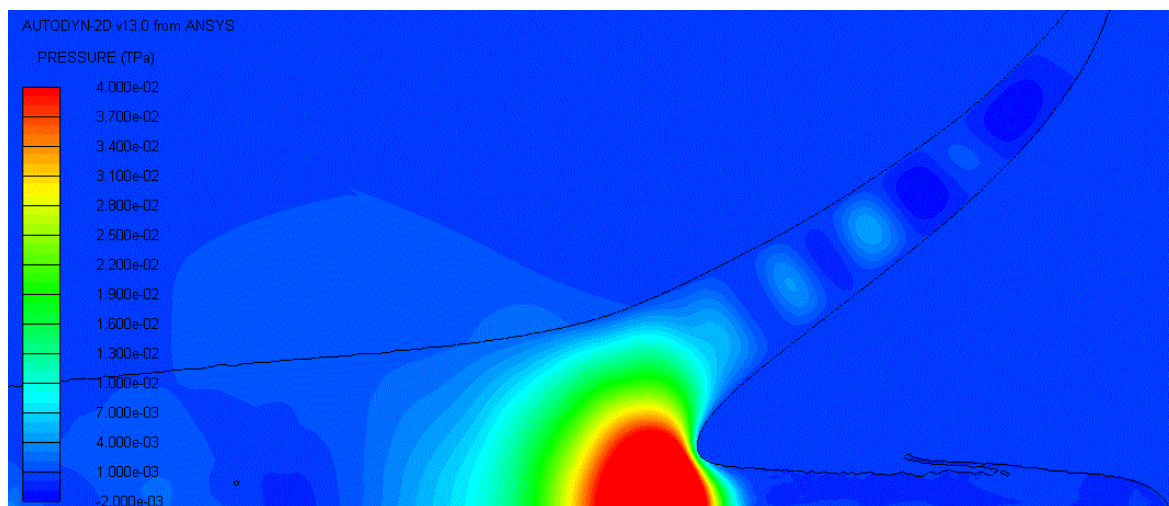


Рис. 3 Плавное повышение давления и уходящие вверх возмущения в порошковой облицовке

Поскольку в струю переходит достаточно тонкий слой материала с внутренней поверхности, есть основание полагать, что этот слой протекает через приповерхностную зону, не заходя в область высокого давления. Кроме того, на рис. 3 видно, что вблизи внутренней поверхности ударная волна является «размазанной». Исходя из этого, можно рассматривать двухслойную схему кумулятивной облицовки [2, 3]: ее наружная часть изготовлена из свинца, а основная внутренняя часть - из порошкового материала. При схлопывании внутренний слой переходит в струю, а пест формируется из свинцовой части. Ожидается, что вследствие взаимодействия с областью высокого давления пест (или хотя бы его часть) будет разрушаться в волнах разгрузки, в то время как минующая эту область струя не сильно пострадает. Такая конструкция более выгодна в экономическом плане, чем аналогичная монолитная, изготовленная целиком из порошкового материала.

Скорость звука в свинце практически в два раза меньше, чем в меди или в вольфраме (а, следовательно, и в их композиции), поэтому свинец должен тормозить уходящие вверх возмущения и образовывать присоединенную УВ, ухудшая условия струеобразования.

Численное моделирование функционирования данной схемы данной схемы позволяет утверждать следующее:

- 1) Толщина струеобразующего слоя непостоянна — чем дальше от оси симметрии, тем большая доля облицовки формирует струю.
- 2) Наличие тонкого порошкового слоя не вносит существенных изменений в волновую картину — она остается практически такой же, какой была в монолитной свинцовой облицовке.
- 3) Часть струеобразующего слоя проходит через область высокого давления — согласно датчикам, пиковое давление в них достигает 60-70 ГПа, с последующей разгрузкой в течение 1-2 мкс. Такому нагружению подвергается материал, впоследствии формирующий сердцевину струи и песта — их наружные слои нагружаются значительно слабее, и испытывают более мягкую разгрузку.

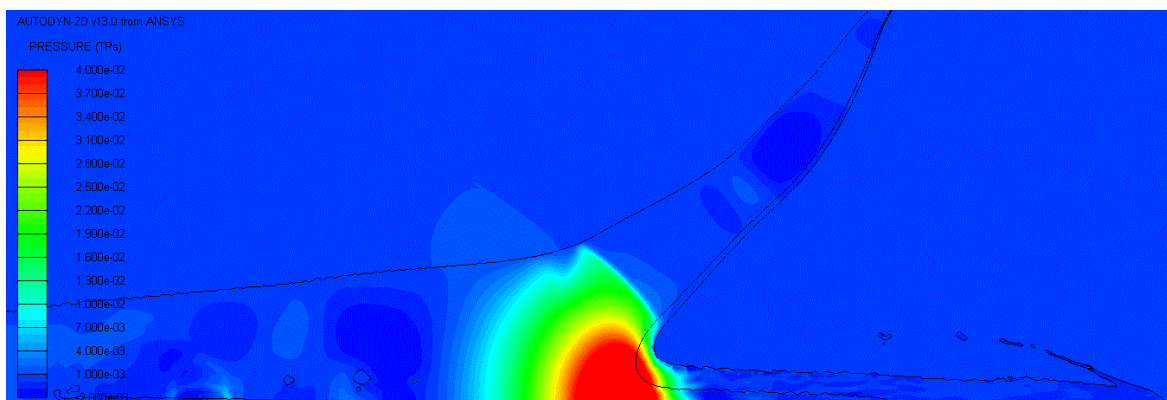


Рис. 4 Двухслойная свинцово-порошковая облицовка

На рис. 4 изображено образование кумулятивной струи из двухслойной облицовки описанной выше конструкции. Хотя толщина порошковой части подбиралась по результатам предыдущих расчетов таким образом, чтобы полностью соответствовать толщине струеобразующей части, видно, что струя также образуется двухслойная – ее сердцевина формируется из свинца. Вместе с тем, скорости струи в случае как чисто порошковой облицовки, так и двухслойной практически одинаковы – около 7 км/с для головной части.

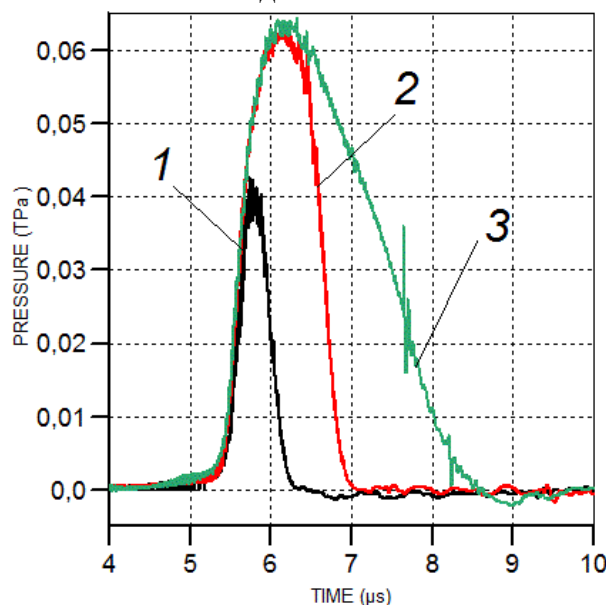


Рис. 5 Графики изменения давления в лагранжевых точках облицовки по мере образования струи. Датчики 1, 2, 3 расположены на расстоянии 15, 30, 45 мкм от внутренней поверхности облицовки соответственно

На рис. 5 представлено изменение давления в датчиках, расположенных в струеобразующем слое. Все представленные точки переходят в струю. Чем выше номер датчика – тем дальше от свободной поверхности он расположен. Из графиков видно, что наружные слои струи претерпевают меньшую нагрузку, однако даже для них разгрузка с 40 ГПа за 1 мкс, скорее всего, приведет к разрушению.

Дальнейшее моделирование производилось с учетом возможности разрушения материалов. Ввиду малой длительности разгрузки использовался критерий разрушения по отрицательному давлению: при  $p < p_{кр}$  частица перестает воспринимать нагрузку. Сохраняется возможность «залечивания» материала, т.е. восстановления его механических свойств, как только разгрузка закончится

(т.е. при  $p \geq p_{кр}$ ). Установленные значения  $p_{кр}$ : для свинца -20 МПа, для порошкового материала -10 МПа.

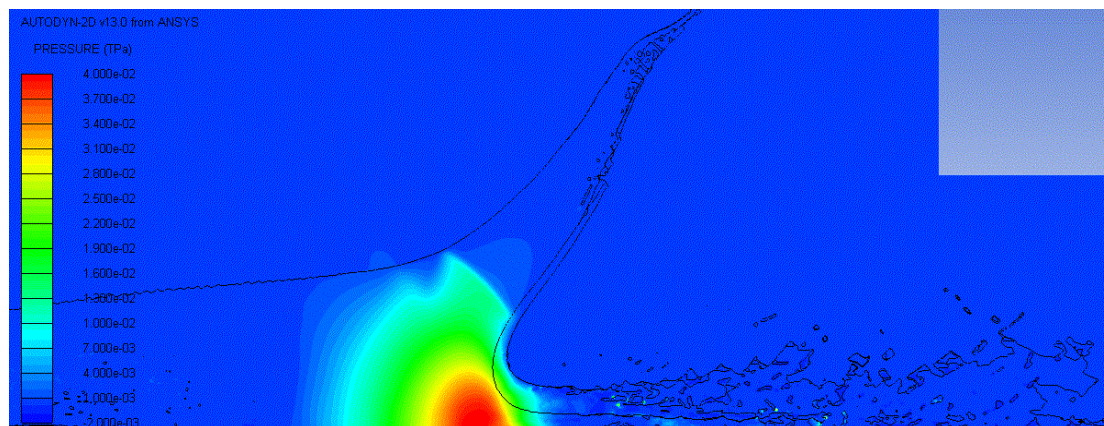


Рис. 6 Разрушение головной части струи в волнах разгрузки

Как видно из рис. 6, головная часть струи диспергирует, причем в основном разрушению подвержена наружная часть струи, свинцовая же практически полностью сохраняет свою целостность. Ситуация с пестом прямо противоположная – наружная его часть оказалась не разрушена, но наблюдаются разрушения вблизи оси симметрии.

По мере эволюции процесса струеобразования угол схлопывания облицовки увеличивается, что приводит к отходу присоединенной ударной волны. Как следствие, склонность струи к диспергированию уменьшается (см. рис. 7).

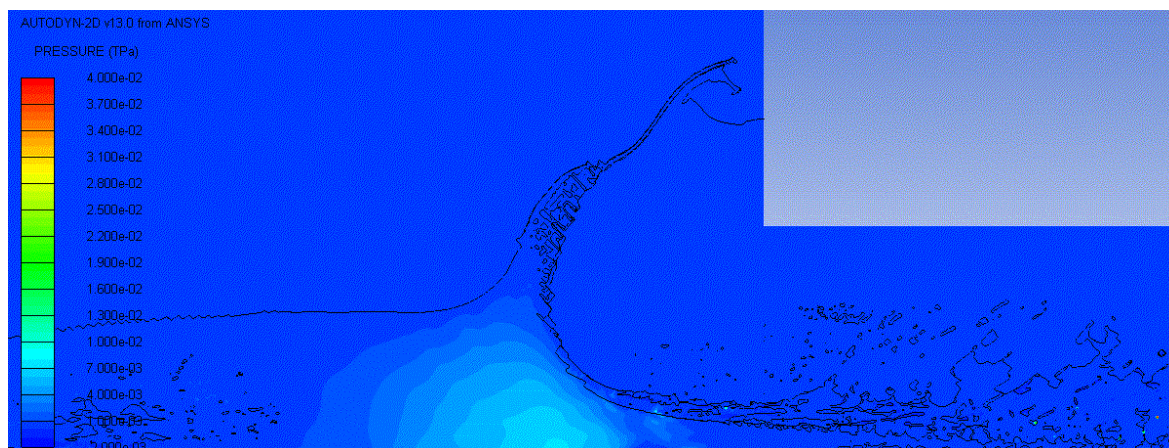


Рис. 7 Уменьшение склонности к диспергированию струи на завершающих стадиях схлопывания

Следует отметить, что в аналогичных условиях производилось моделирование схлопывания медной облицовки. С учетом того, что длительность действия фаз всестороннего растяжения материала в ходе процесса составляет 0,5...2 мкс, уровень разрушающих напряжений рассматривался в достаточно широком диапазоне в 30...3 кбар [4]. На верхней границе диапазона расчетом предсказывается неразрушенная струя, на нижней – просматриваются признаки разрушения.

В целом, проведенные расчеты показывают, что реализация идеи двухслойной облицовки с наружным свинцовым и внутренним порошковым

композитным слоями сопряжена с трудностями и с риском разрушения струи. Возможно, идея будет более продуктивной при изменении геометрии заряда.

#### **Список литературы**

1. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко – в 2 т. – М.: Физматлит, 2004.
2. Zygmunt B., Wilk Z. Formation of Jets by Shaped Charges with Metal Powder Liners // Propellants, Explosives, Pyrotechnics – 2008. - Vol. 33. - P. 482-487.
3. Биметаллические облицовки для кумулятивных зарядов с коническими выемками // А.Е. Курепин, В.П. Власов, В.А. Семин, Н.А. Спорыхин, В.Н. Якимович / Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Сборник докладов научной конференции Волжского регионального центра РАН. – Саров, ВНИИЭФ, 2000 г.
4. Временная зависимость прочности материалов при долговечности микросекундного диапазона // Физика твердого тела / Н.А. Златин, Г.С. Пугачев, С.М. Мочалов, А.Н. Брагов. – 1975. - Т. 17, выпуск 9. - С. 2599-2602.