

#09, сентябрь 2015

УДК 622.22

### **Анализ возможного технического решения перфорационной системы с наддувом легким газом**

*Рубашкин В.В. студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Высокоточные летательные аппараты»*

*Научный руководитель: Бабкин А.В., д.т.н., профессор  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Высокоточные летательные аппараты»*

*[pc-os@bmstu.ru](mailto:pc-os@bmstu.ru)*

Представленная работа посвящена анализу и исследованию одного из возможных технических решений перфорационной системы – с наддувом легким газом ее внутренней полости и полостей кумулятивных зарядов-перфораторов. Как показывают опыты, проведенные за рубежом, в рамках такой схемы в определенных случаях удавалось получать повышения среднего пробития почти на 40% [2,3].

Ключевая физическая идея заключается в следующем. Кумулятивные струи из пористых композитных облицовок по ходу их движения могут испытывать радиальное рассеивание, приводящее к падению плотности струи и к снижению пробивного действия [5]. Этому можно противодействовать – радиальным обжатием струи газом с высоким давлением. Воздействие должно быть организовано так, чтобы исключить побочные негативные эффекты влияния газа с высоким давлением на схлопывание облицовки и формирование кумулятивной струи.

В расчетах рассматривался «ливерморский» кумулятивный заряд. Диаметр заряда  $D = 46$  мм, с массой ВВ 23 г, состоящего на 98,5-99% из гексогена и на 1-1,5% из парафина. Материал композитной порошковой облицовки: вольфрам (45,20%), медь (43,19%), олово(11,05%), графит (0,53%), смазочное масло (0,03%). Начальная пористость около 10%. Вид заряда показан на рис. 1.

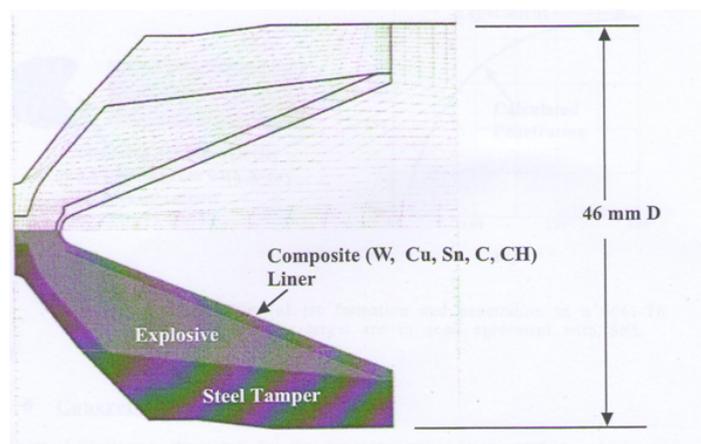


Рис. 1. Вид рассматриваемого заряда кумулятивного перфоратора

Самым простым и дешевым вариантом реализации этой идеи был бы наддув полости перфорационной системы воздухом. Как это интуитивно чувствуется – воздухом высокого давления, но наличие в полости кумулятивного заряда достаточно сильно сжатого воздуха неблагоприятно сказывается на работе этого заряда. Это предсказывают и мои расчеты, и расчеты из известных американских работ. Расчеты проводились с помощью пакета программ AUTODYN [2,3].

В качестве модели воздуха использована модель совершенного идеального газа, модель композитного порошкового материала облицовки – модель пористого материала  $p-\alpha$  [2,3].

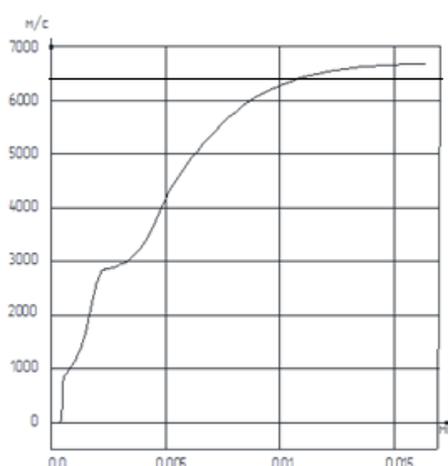


Рис. 2. График зависимости скорости головной части струи от времени

Оценка точности вычислений проводилась по параметру скорости головной части струи на начальной стадии схлопывания облицовки (рис. 2). В оригинальной работе при  $t=10\text{мкс}$  скорость головной части струи достигала 6.4 км/с. На рис. 2 представлен график

зависимости скорости головной части струи от времени, полученный в результате численного моделирования. Сходство исследуемых величин позволяет говорить о достаточной точности вычислений.

Пример влияния окружающего воздуха на кумулятивный процесс показан на рис.3, где верхняя часть рисунка отображает результаты расчетов в оригинальной работе, нижняя – в данной. Обычно в расчетах кумуляции влиянием воздуха пренебрегают – в обычных условиях оно мало. Однако в общем случае это совсем не так. Так, при начальном давлении в 35 Мпа (350 атм) процесс формирования струи просто нарушается за счет возникновения воздушного пузыря, препятствующего схлопыванию облицовки. При этом воздух даже уже при начальном давлении представляет собой конденсированную - достаточно плотную - среду с плотностью около  $\rho \sim 0.3 \text{ г/см}^2$ . Еще большей плотность воздуха будет в ходе схлопывания. И таким образом идея позитивного радиального обжатия порошковой композитной струи «на воздухе» реализована быть не может.

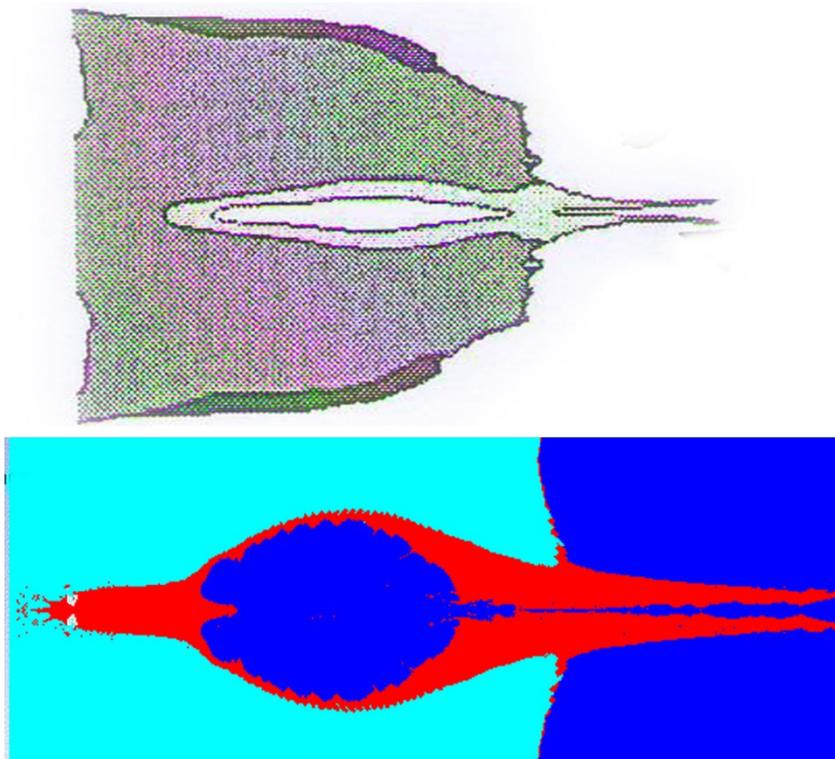


Рис. 3. Влияние воздуха высокого давления на кумулятивную струю

Возможный способ ухода от этой проблемы – замена окружающего газа на более легкий, чтобы при одинаковом давлении он имел бы меньшую плотность и соответственно, не представлял бы такое серьезное препятствие для схлопывания облицовки. Идеальным вариантом мог бы стать водород, как газ с наименьшей молярной

массой, но взрывоопасность водорода не представляет возможным его использование на практике.

Следующим рассматриваемым газом явился гелий, который больше подходит на роль заменителя воздуха как среды, в которой происходит подрыв.

И американскиерасчеты, и расчеты, проведенные в данной работе, показывают, что когда в качестве поджимающего газа берется гелий, ни при каких условиях не наблюдается образования газового пузыря, и при любых условиях формируется кумулятивная струя. Это видно по рис. 4, где группа рисунков слева относится к «ливерморским» расчетам, а правая группа – к настоящей работе.

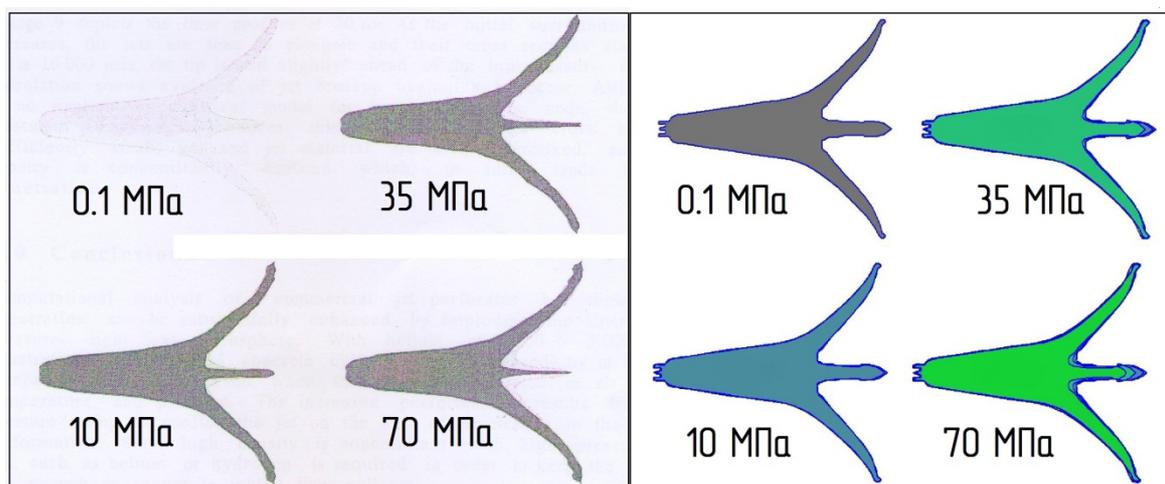


Рис. 4. Сопоставление результатов численного моделирования

Причины отсутствия газового пузыря могут быть связаны не только с меньшей плотностью легкого газа, но и с большей скоростью распространения в таком газе звуковых возмущений. Попытка сформироваться газовому пузырю в легком газе, судя по всему, тут же парируется распространением по этому газу волн разрежения и соответствующим движением газа вдоль струи в сторону ее головной части.

В порядке оценки правомерности такого предположения в работе сопоставлены характеристики динамической сжимаемости воздуха и гелия в рамках моделей как совершенного, так и реального газов. В качестве характеристик динамической сжимаемости рассматривались ударная адиабата газа  $p(\rho)$ , а также вспомогательная

кинематическая величина  $c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}$ , взаимосвязанная со скоростью звука в газе.

Для совершенного газа с его калорическим уравнением состояния  $P = \rho E(k - 1)$  уравнение ударной адиабаты (ударной адиабаты Гюгонио) получается с привлечением уравнения энергии на фронте ударной волны

$$E - E_0 = \frac{P + P_0}{2} \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right). \quad (1)$$

Что касается реального газа с термическим уравнением состояния Ван-дер-Ваальса

$$\left( P + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT,$$

где  $R$  – газовая постоянная,  $a$  и  $b$  – константы, то для него удельная внутренняя энергия  $E$  состоит из двух составляющих – тепловой и потенциальной энергии объемной деформации [4]

$$E = C_v * T - \frac{a}{V}.$$

Результирующее калорическое уравнение состояния для реального газа принимает вид

$$P(V - b) = E \frac{R}{C_v} + \frac{a}{V} \left( RC_v - 1 + \frac{b}{V} \right).$$

Далее с использованием уравнения энергии (1) получается ударная адиабата реального газа:

$$P = \frac{C_v a \rho (RC_v - 1 + b\rho) + E_0 + \frac{P_0}{2} \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right)}{R \left[ \left( \frac{1}{\rho} - b \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) \right]}.$$

Результаты сопоставления характеристик динамической сжимаемости для двух газов показаны на рис. 5. Как видно из рисунка, легкий газ гелий существенно менее сжимаем, чем воздух. Это можно видеть и по относительному расположению ударных адиабат и по скорости распространения малых возмущений – для легкого газа они гораздо больше, чем для воздуха.

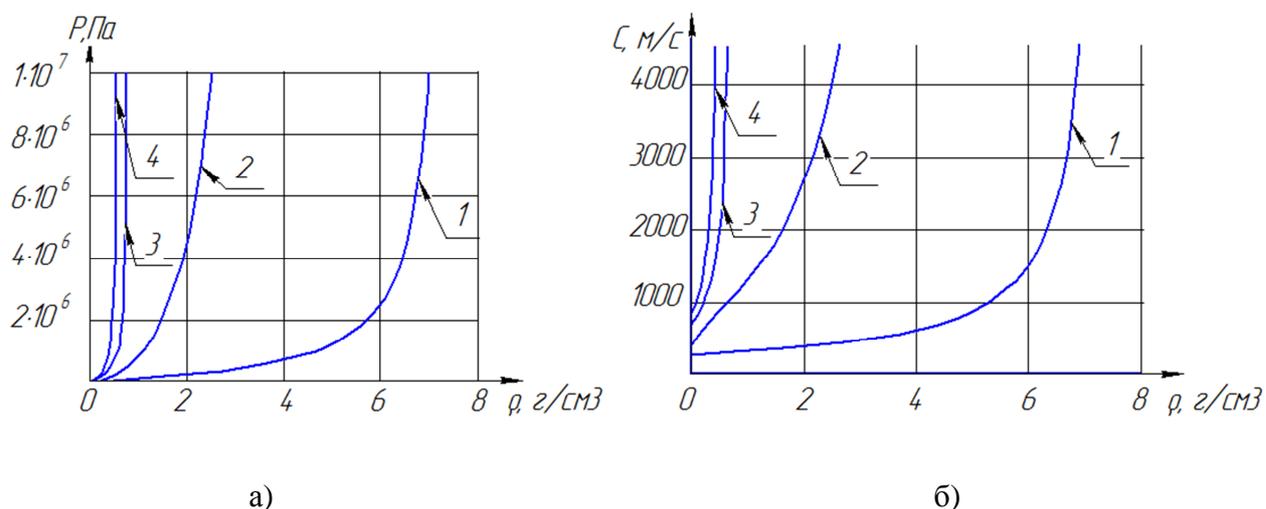


Рис. 5. Ударные адиабаты (а) и скорости звука (б) в разных газах; 1 – модель воздуха, как реального газа; 2 – модель воздуха, как идеального газа; 3 – модель гелия, как идеального газа; 4 – модель воздуха, как реального газа

В проведенном сопоставлении расчетных результатов по гелию (рис. 4), известных зарубежных и полученных в настоящей работе, существует проблема. Проведенные здесь расчеты предсказывают формирование более толстой, и несколько менее градиентной струи. Это может быть связано с неточностью модели рассматриваемого газа. Вероятно, использование модели реального газа даст более качественные результаты.

Подводя итоги, следует отметить, что, в целом проблема понимания пока еще остается. Например, неясна значимость механизмов воздействия на струю. То есть, что влечет наиболее сильное на нее воздействие: радиальный поджим струи сжатым газом, осевое движение сильно сжатого легкого газа вдоль струи или же выполнение гелием функции инертного газа – недопущение кислорода окружающего воздуха к окислению горючих добавок в рецептуру кумулятивной струи. Но тем не менее, подтвержден механизм разрешения кумулятивной струи в атмосфере с высоким давлением за счет образования газового пузыря.

#### Список литературы

1. Андреев С.Г., Бабкин А.В., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф. Физика взрыва / под ред. Л.П. Орленко в 2 т. Т.2. М.: Физматлит, 2004. 656 с.
2. Glenn L.A. (1998) Pressure Enhanced Penetration with Shaped Charge Perforators. Available at: <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/234318.pdf>, accessed 25.05.2014.

3. Glenn L.A., Chase J.B., Barker J., Leidel D.J. (1999) Experiments in Support of Pressure Enhanced Penetration with Shaped Charge Perforators. Available at: <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/236925.pdf>, accessed 25.05.2014.
4. Сивухин Д. В. Общий курс физики. М.: Наука, 1975. В 5 т. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. 519 с.
5. Войтенко Ю.И., Гошовский С.В., Драчук А.Г., Бугаец В.П. Механическое действие кумулятивных зарядов с пористыми облицовками // Физика горения и взрыва. 2013. Т.49. № 1. С. 125-133.