

#09, сентябрь 2015

УДК 623.4.082.6

Градиентное растяжение кумулятивной струи из композитного материала

Круцкевич М.А., 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

Введение. Данная работа посвящена исследованию функционирования кумулятивных зарядов с реакционноспособными составляющими в составе композитных кумулятивных облицовок. Реакционноспособные материалы в настоящее время рассматриваются как в варианте боевого применения, так и применения мирного - в кумулятивных перфораторах нефтяных скважин [1]. Реакционноспособные материалы в кумуляции – это объект настоящего исследования.

При функционировании кумулятивного заряда непосредственное действие по преграде обеспечивается кумулятивной струей. От того, какой струя будет по длине и по плотности к моменту взаимодействия с преградой, зависит результат этого взаимодействия. Поэтому предмет исследования – это как раз кумулятивная струя, как с инертными, так и с реакционноспособными составляющими материала.

В качестве метода исследования поведения кумулятивной струи было выбрано физико-математическое моделирование с позиции механики сплошной среды. Для получения решения использовался численный конечно-разностный метод на основе схемы Неймана-Рихтмайера [2]. Непосредственно для расчетов привлекалось прикладное программирование на языке C++ [3].

Научные задачи работы:

1. Создать инструмент исследования «реакционноспособной» струи.
2. Провести само исследование влияния состава композитной облицовки на поведение струи в свободном полете и на состояние такой струи вследствие наличия в ней различных составляющих, в том числе и реакционноспособных.

3. Если получится, то оценить результат действия такой струи по преграде и на этой основе систематизировать численные результаты.

Физико-математическая постановка задачи. Рассматривалось деформирование цилиндрического стержня (рис. 1) – элемента струи – при линейном распределении скорости по нему.

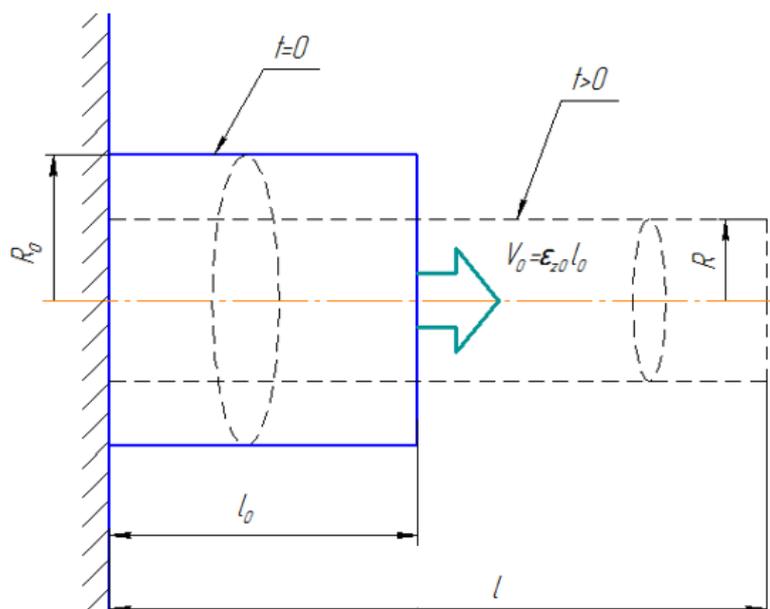


Рис. 1. Модель деформирования цилиндрического стержня

Задача решалась в рамках квазидвумерной постановки [4]. Основные уравнения в системе уравнений (1) – это одномерные осесимметричные нестационарные уравнения движения сжимаемой жидкой или упругопластической среды. Фактор градиентного растяжения учитывался через кинематическое соотношение для осевой скорости, а также через уменьшение погонной массы стержня по мере его растяжения. В сущности, при такой постановке как бы следят за деформированием одного лишь плоского сечения, но учитывают наличие соседствующих других таких же. Система уравнений имеет вид:

где $n = 1 + \epsilon'_{z0} t$ – текущий коэффициент удлинения градиентного стержня, V_r – радиальная скорость его индивидуальных частиц, r – эйлера радиальная координата, r_n – лагранжева линейная координата, dm_0 и dm – начальная и текущая погонные массы индивидуальной частицы, ϵ'_{z0} – начальный градиент осевой скорости, $D_{\sigma r}$, $D_{\sigma z}$, $D_{\sigma \theta}$ – компоненты девиатора напряжений, G – модуль сдвига, Y_0 – динамический предел

текучности, σ_r , σ_z , σ_θ – компоненты тензора напряжений, $\dot{\varepsilon}_r = \partial V_r / \partial r$, $\dot{\varepsilon}_\theta = V_r / r$, $\dot{\varepsilon}_z = 0$, – компоненты тензора скоростей деформаций, $V = 1/\rho$ – удельный объем, \dot{V} – скорость изменения удельного объема.

Начальные условия соответствуют несжимаемому градиентному стержню [5]. Это соответствие позволяет определить начальные распределения радиальных скоростей, компонент тензора напряжений, давления, компонент девиатора напряжений.

$$\begin{cases} V_r = -\frac{\dot{\varepsilon}_{z0} r}{2} \\ \sigma_r = \sigma_\theta = -\frac{3}{8} \rho_0 \dot{\varepsilon}_{z0}^2 (R_0^2 - r^2) \\ \sigma_z = Y_0 + \sigma_r \end{cases}$$

Граничные условия – это кинематические граничные условия на оси стержня $r = 0$, равенство нулю радиальной скорости $V_r = 0$. На свободной поверхности стержня $r = R$ – динамические граничные условия, нулевое радиальное напряжение $\sigma_r = 0$.

Особую роль в системе уравнений играет уравнение состояния материала струи.

В ситуации монолитной струи (это важный опорный частный случай) в качестве упрощенного уравнения состояния можно взять баротропную характеристику динамической сжимаемости – ударную адиабату в форме Тета [6]:

$$P = A \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right]. \quad (2)$$

Сложнее, когда материал струи в дополнение к основному (матричному) материалу содержит еще и материал твердой добавки. Добавка может быть инертной, и тогда ее сжимаемость так же можно описать своим уравнением Тета (2).

Добавка может быть реакционноспособной, и тогда из нее по задаваемому директивно закону (3) может образовываться (полностью или частично) газовая фаза (см. рис. 2):

$$z(t) = \begin{cases} 0 & t < t_1 \\ \frac{t' - t_1}{t_2 - t_1} & t_1 \leq t \leq t_2 \\ 1 & t > t_2 \end{cases} \quad (3)$$

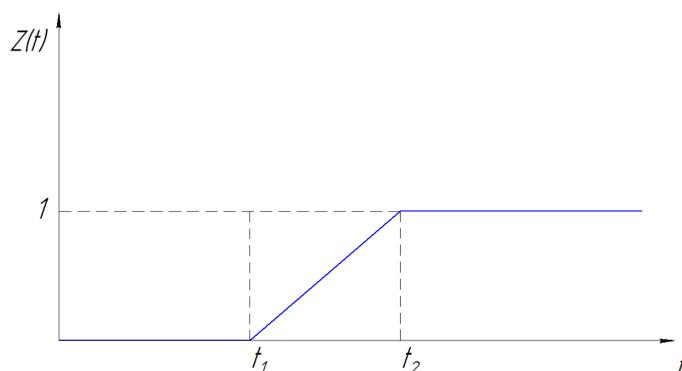


Рис. 2. Закон образования газовой фазы из реакционноспособной добавки

где $z(t)$ характеризует газифицировавшуюся часть массы твердой добавки. Сжимаемость образующейся газовой фазы можно описать уравнением политропы (4), где показатель степени $k=3$ будет соответствовать конденсированной среде – сильно сжатому высокоплотному газу [6]:

$$P = A\rho^k, k = 3. \quad (4)$$

Константу A в уравнении политропы можно определить из условия равенства работы расширения газа тепловому эффекту химической реакции при газификации твердой добавки.

Если теперь использовать уравнение аддитивности объемов (5), среды в целом и ее составляющих, каждой со своим уравнением сжимаемости, то получается уравнение относительно одной неизвестной величины – давления:

$$\frac{1}{\rho_{\text{ср}}} = \frac{\beta_{\text{матр}}^0}{\rho_{\text{матр}}(P)} + \frac{\beta_{\text{доб.г}}^0 z(t)}{\rho_{\text{доб.г}}(P)} + \frac{\beta_{\text{доб.тв}}^0 (1-z(t))}{\rho_{\text{доб.тв}}(P)} \quad (5)$$

где $\beta_{\text{матр}}^0$ и $\beta_{\text{доб.тв}}^0$ – начальные массовые концентрации матричного материала и добавки, $\rho_{\text{ср}}$ – средняя плотность индивидуальной частицы композита, $\rho_{\text{матр}}(P)$, $\rho_{\text{доб.г}}(P)$, $\rho_{\text{доб.тв}}(P)$ – зависящие от давления согласно уравнениям (2), (4) плотности, соответственно, матричного материала, газа, и твердой газифицирующейся добавки. Разрешение этого уравнения при данной средней плотности среды $\rho_{\text{ср}}$ позволяет определить как само давление, так и плотности составляющих фаз.

Таким подходом описывается довольно сложная баротропная среда, которая является трехфазной, односкоростной и с одинаковым давлением для всех трех фаз (то есть как бы «однодавленческой»). Количество инертных фаз в рамках такого подхода вполне может быть и больше двух – матричная инертная фаза может быть дополнена более чем одной инертной добавкой.

Численное решение системы уравнений (1)-(5) растяжения градиентного композитного стержня – композитной кумулятивной струи – получалось с помощью конечно-разностной схемы на основе схемы Неймана-Рихтмайера [2]. Работоспособность методики численного расчета проверялась на ряде задач с известным аналитическим решением [6]. Кроме того, контролировался баланс энергии

$$\delta = \frac{(W_T + W_d) - (W_{r0} + A_z)}{(W_{r0} + A_z)} 100\% ,$$

где W_{r0} – начальная кинетическая энергия радиального движения элемента кумулятивной струи, W_T – его текущая кинетическая энергия, A_z – работа осевой силы, внешней по отношению к элементу струи, W_d – внутренняя энергия (работа деформирования). Например, при расчете растяжения однородного медного стержня при количестве ячеек по радиусу равным 50 и при общем количестве временных слоев ~50000 дисбаланс (15) энергии не превышает 2% (рис. 3).

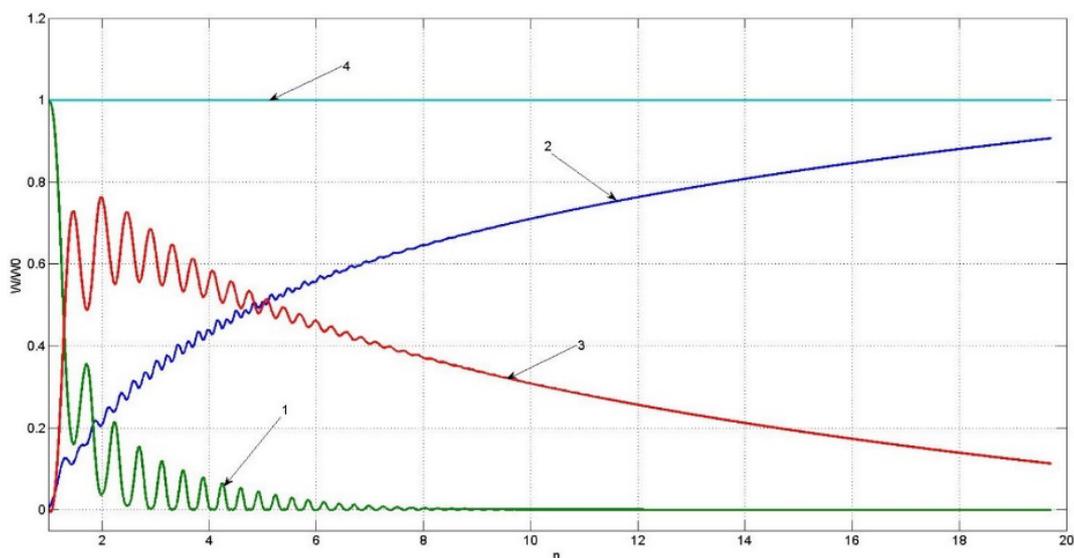


Рис. 3. Контрольная диаграмма дисбаланса по энергии:

1–кинетическая энергия радиального движения; 2 – внутренняя энергия (работа деформирования); 3– работа внешней осевой силы; 4 – суммарная энергия

О численных результатах. Полученные на данный момент результаты численных расчетов пока не имеют системного характера. Они скорее частные, демонстрационные. Примеры результатов приведены для элемента срединной части кумулятивной струи лабораторного заряда диаметром 50 мм. Для такого элемента начальный градиент осевой скорости $\dot{\epsilon}_z = 3,18 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, радиус $R_0 = 3,5$ мм.

Так, растяжение однородной медной струи имеет колебательный характер (рис.4, а, б). Сжимаемость и инертность материала порождают ее радиальные колебания – по скоростям и напряжениям [4]. Колебания происходят вокруг значений, характерных для несжимаемого градиентного стержня [4,5].

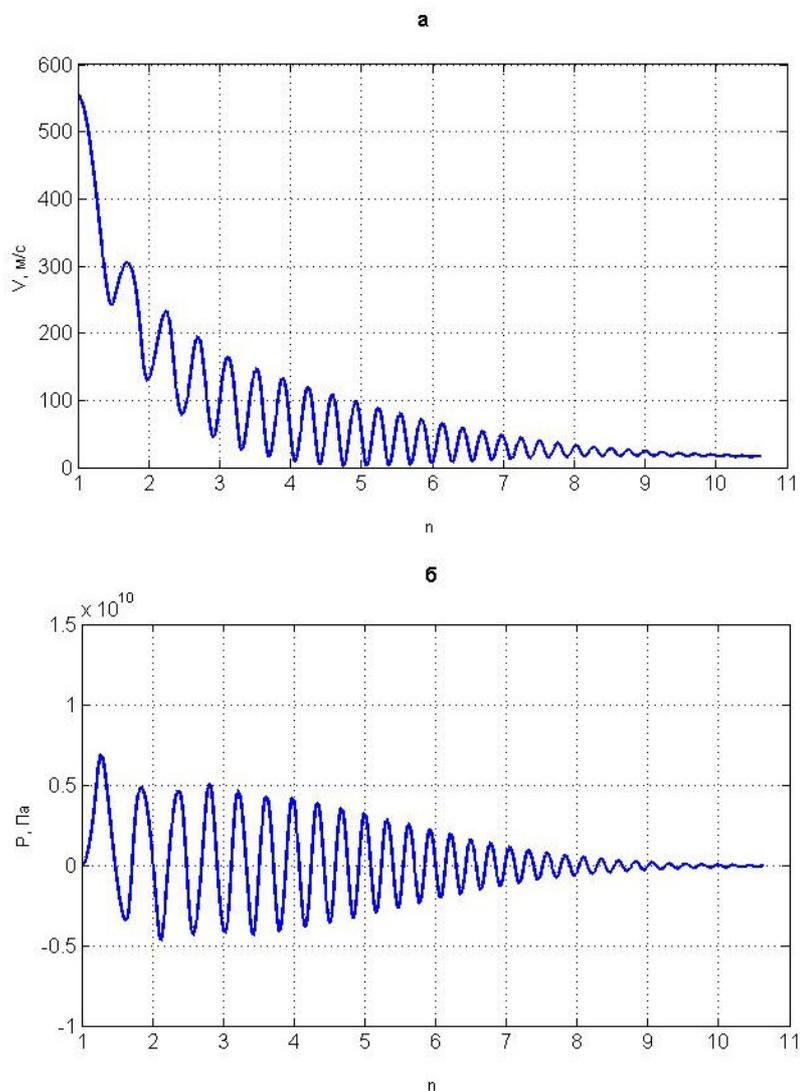


Рис 4. Графики колебаний скоростей (а) и напряжений (б) в зависимости от коэффициента удлинения n для однородной медной кумулятивной струи

Изменение состава композита материала струи может изменить радиальное движение даже в отсутствие газообразной фазы. Усилить – как это имеет место в случае медновольфрамового композита (рис. 5, а, б).

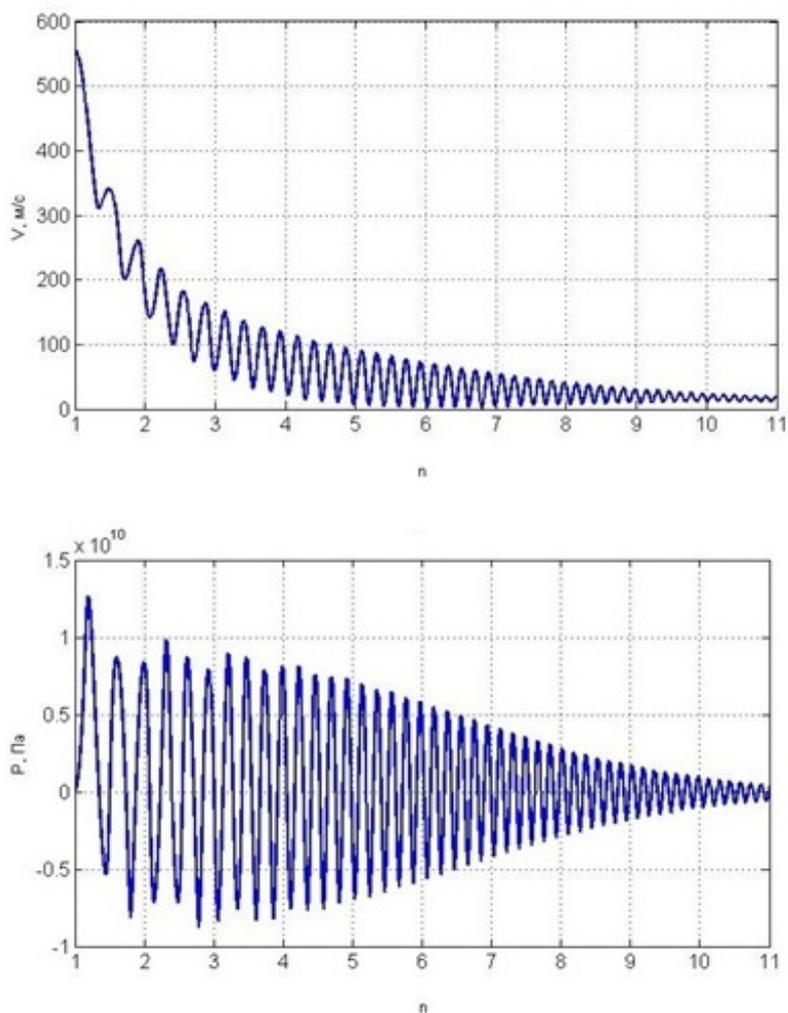


Рис 5. Графики колебаний скоростей (а) и напряжений (б) в зависимости от коэффициента удлинения n для медно-вольфрамового композита W75-Cu25

Или ослабить – как будет происходить с интерметаллидной никелево-алюминиевой композицией (рис.б, а, б). Еще более сильные изменения струи скорее всего будут происходить, если материал будет реакционноспособным, и в его составе будут содержаться добавки, образующие газообразную фазу.

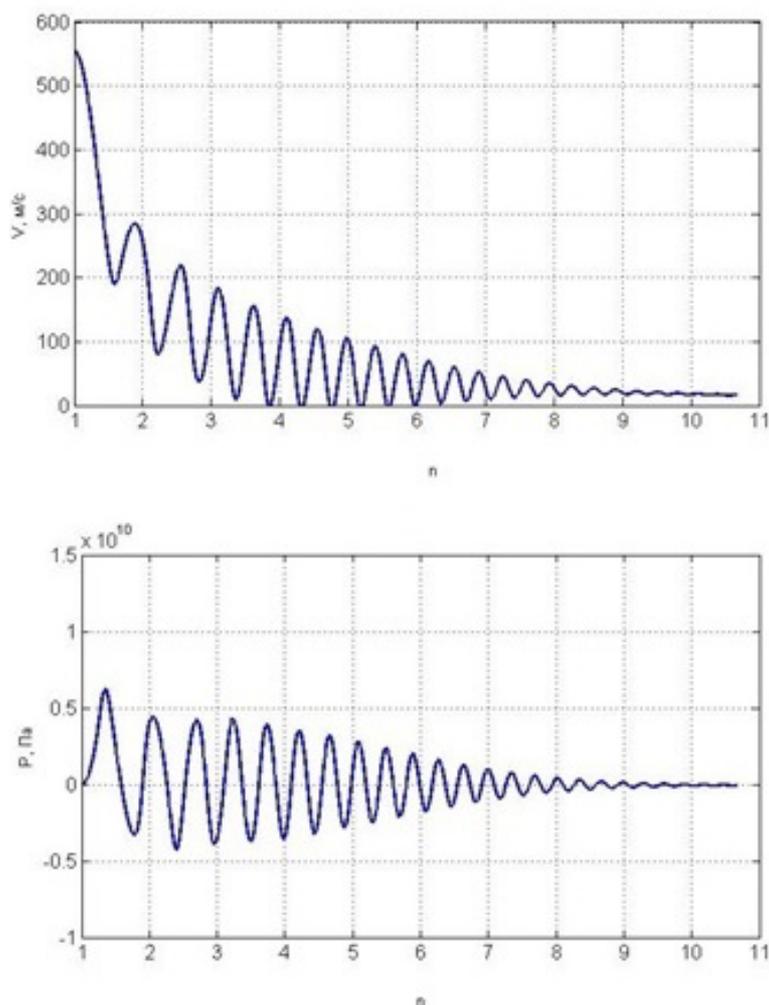


Рис 6. Графики колебаний скоростей (а) и напряжений (б) в зависимости от коэффициента удлинения n для никелево-алюминиевого композита Ni95-Al5

В целом же на данный момент основным достижением является создание методики численного расчета – инструмента исследования параметров кумулятивной струи из композитного материала. Проведенные частные расчеты обнадеживают с точки зрения получения интересных результатов в дальнейшем.

Список литературы

1. Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. Analysis of influence of the sintered liner composition on the shaped-charge jet free flight behavior and its penetration capacity // 25-th Int. Symp. on Ballistics (Beijing, China, 17-21 May 2010): proc. Beijing, 2010. V.2. P. 954-961.

2. Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н, Селиванов В.В. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов: учебник для втузов. 2-е изд., испр. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 520 с.
3. Похомов Б.И. С/C++ и MS Visual C++ 2010 для начинающих. Спб.: БХВ-Петербург, 2011. 736 с.
4. Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В, Маринин В.М. Влияние сжимаемости и прочности материала кумулятивных струй на особенности их инерционного растяжения в свободном полете // ПМТФ. 1997. Т. 38, № 2. С. 32–38.
5. Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В, Маринин В.М. Особенности инерционного растяжения кумулятивных струй в свободном полете // ПМТФ. 1997. Т.38, № 2. С. 38-43.
6. Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А., Имховик Н.А. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко. Изд. 3-е, испр. В 2 т. Т. 2. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 656 с.