

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ С ИНЕРТНЫМИ И РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫМИ СОСТАВЛЯЮЩИМИ

А.В. Бабкин¹

А.А. Медельцев¹

Ф.С. Загрядцкий¹

М.А. Круцкевич²

pc-os@bmstu.ru

medeltsev@hotmail.com

zagr-filipp@yandex.ru

makc.krutzkevich@gmail.com

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² ПАО «Туполев», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследованы процессы, сопутствующие свободно-му полету кумулятивной струи, формируемой из композитной облицовки кумулятивного заряда. Выполнено математическое моделирование процесса с позиции механики сплошных сред с использованием численных методов решения соответствующих уравнений. Кумулятивная струя моделировалась в квазидвумерном нестационарном приближении как высокоградиентный цилиндрический сжимаемый упругопластический или жидкий стержень. Материал струи рассмотрен как односкоростная трехфазная среда. Сжимаемость каждой фазы описана присущей ей баротропной зависимостью давления от плотности. Результирующее давление в многофазной смеси частиц кумулятивной струи, рассматриваемой как композиционный материал, определено на основе условия аддитивности объемов. При оценке состава струи начальные концентрации компонент определены с использованием программного комплекса термодинамического моделирования химически реагирующих систем. Для нахождения численного решения задачи растяжения многофазной (композитной) струи применен конечно-разностный метод на основе схемы Неймана — Рихтмайера. Численный анализ исследуемого процесса проведен на примере лабораторного кумулятивного заряда. Выявлены характерные особенности и возможные варианты поведения струи в зависимо-

Ключевые слова

Численное моделирование, кумуляция, облицовка, композит, струя, проникание

сти от наличия составляющих композитной облицовки (матричной, инертной и реакционноспособной добавок) и их свойств. Дана оценка изменению проникающей способности струи по сравнению с опорным вариантом кумулятивной облицовки из однородного однофазного монолитного материала

Поступила 07.11.2018

© Автор(ы), 2019

Введение. Кумулятивные заряды взрывчатых веществ находят широкое применение для перфорации нефтяных и газовых скважин. В последние годы в таких зарядах все чаще используют порошковые композитные кумулятивные облицовки. Материал этих облицовок и формируемых из них кумулятивных струй включает в себя основной инертный (так называемый матричный) материал, наполненный пространственно распределенными инертными и реакционноспособными (активными) добавками. Примерами таких материалов являются двух- [1–3] или многокомпонентные композиты [4].

Добавки в составе композитной кумулятивной облицовки будут оказывать влияние на растягивающуюся в свободном полете кумулятивную струю. В первом приближении влияние этого фактора на проникающую способность кумулятивной струи исследовано в работе [5]. В настоящей работе проведено дальнейшее исследование влияния добавок в материал облицовки кумулятивного заряда на проникающую способность струи.

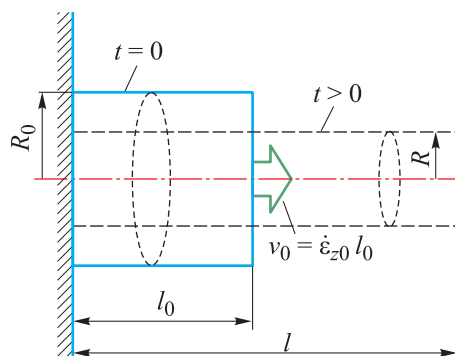
В качестве метода исследования использовано математическое моделирование изучаемого процесса в рамках механики сплошных сред на основе численных методов решения соответствующих уравнений. Разработаны физико-математическая модель и программа численного расчета параметров растяжения выделенного из кумулятивной струи элемента, рассматриваемого как цилиндрический высокоградиентный сжимаемый композитный упругопластический или жидкий стержень (композитная струя). Проведено численное исследование процесса, выявлены его специфические особенности.

Постановка задачи — математическая модель кумулятивной струи.

Геометрическая модель растягивающегося элемента кумулятивной струи рассмотрена в работах [6, 7] и приведена на рис. 1. Деформирование цилиндрического стержня рассматривалось при начальном линейном распределении скоростей: осевой скорости — по длине стержня, радиальной скорости — по его радиусу. Задача решалась в цилиндрической системе координат, в квазидвумерной нестационарной постановке, описываемой одномерными нестационарными уравнениями движения сжимаемой

Рис. 1. Геометрическая модель растягивающегося элемента кумулятивной струи:

l_0, l — начальная и текущая длины элемента кумулятивной струи; R_0, r — начальный и текущий радиусы элемента струи; $v_0 = \dot{\epsilon}_{z0} l_0$ — неизменный во времени перепад осевой скорости между двумя фиксированными сечениями; $\dot{\epsilon}_{z0}$ — начальный градиент осевой скорости



жидкой ($Y_0 = 0$) или упругопластической среды ($Y_0 \neq 0$), где Y_0 — динамический предел текучести материала струи:

$$\begin{aligned} \frac{dv_r}{dt} &= \frac{\partial(r\sigma_r)}{\rho r \partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{\rho r}; \\ dm_0 &= \rho_0 r_{л} dr_{л}; \\ dm &= \frac{dm_0}{1 + \dot{\epsilon}_{z0} t} = \rho r dr; \\ \frac{dr}{dt} &= v_r; \\ \dot{\epsilon}_r &= \frac{\partial v_r}{\partial r}; \quad \dot{\epsilon}_\theta = \frac{v_r}{r}; \quad \dot{\epsilon}_z = \frac{\dot{\epsilon}_{z0}}{1 + \dot{\epsilon}_{z0} t}; \\ \frac{dD_{\sigma i}}{dt} + 2G\dot{\lambda} D_{\sigma i} &= 2G \left(\dot{\epsilon}_i - \frac{\dot{V}}{V} \right); \quad i = r, \theta, z; \\ D_{\sigma r}^2 + D_{\sigma \theta}^2 + D_{\sigma z}^2 &= \frac{2}{3} Y_0^2. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь v_r — радиальная скорость; $r, r_{л}$ — эйлерова и лагранжева радиальные координаты; ρ — плотность; σ_r, σ_θ — радиальная и тангенциальная компоненты тензора напряжений; $\dot{\epsilon}_r, \dot{\epsilon}_\theta$ — компоненты тензора скоростей деформаций; $D_{\sigma r}, D_{\sigma \theta}, D_{\sigma z}$ — радиальная, тангенциальная и осевая компоненты деватора напряжений; G — модуль сдвига; i — свободный индекс в уравнениях пластического течения; $\dot{\lambda}$ — скалярный множитель в уравнениях пластического течения, связанный с удельной мощностью пластической деформации; $V = 1/\rho$ — удельный объем; \dot{V} — скорость изменения удельного объема. Фактор осевого градиентного растяжения кумулятивной струи учитывался через кинематическое соотношение для осевой скорости деформаций $\dot{\epsilon}_z = \dot{\epsilon}_{z0}/(1 + \dot{\epsilon}_{z0} t)$, а также через уменьшение погонной массы стержня по мере его растяжения

$dm = dm_0/(1 + \dot{\epsilon}_{z0}t)$, где $n = l/l_0 = (1 + \dot{\epsilon}_{z0}t)$ — текущий коэффициент удлинения градиентного стержня. Замыкающее уравнение в системе (1) соответствует критерию пластичности Мизеса.

Начальные условия для системы (1) задавались как для несжимаемого градиентного стержня [8], что дало возможность определить начальную радиальную скорость и компоненты тензора напряжений:

$$\begin{aligned} v_r &= -\frac{\dot{\epsilon}_{z0}r}{2}; \\ \sigma_r &= \sigma_\theta = -\frac{3}{8}\rho_0\dot{\epsilon}_{z0}^2(R_0^2 - r^2); \\ \sigma_z &= Y_0 + \sigma_r, \end{aligned}$$

а затем давление и компоненты девиатора напряжений. Граничные условия соответствуют равенству нулю радиальной скорости $v_r = 0$ на оси стержня (при $r = 0$) и нулевое радиальное напряжение $\sigma_r = 0$ на его свободной поверхности при $r = R$ ($r_{л} = R_0$). Здесь R_0, R — начальный и текущий радиусы стержня.

Учет многофазности кумулятивной струи. Особенность рассматриваемой модели кумулятивной струи — учет многофазности состава струи, описываемой как композиционный материал, содержащий матрицу и наполнитель (добавки), соответствующий инертным и реакционно-способным компонентам (фазам). В рамках этой модели сжимаемость каждой фазы характеризовалась баротропными зависимостями вида $p = p(p)$. В частности, для твердых тел матричной фазы и для инертных фаз использовалось уравнение Тэта

$$p = A\left(\left(\rho/\rho_0\right)^n - 1\right) \quad (2)$$

или уравнение Бриджмена $p = K(1 - \rho_0/\rho)$, где K — модуль объемного сжатия. Для образующегося из реакционноспособной добавки газа (конденсированная высокоплотная среда) динамическая сжимаемость описывалась уравнением политропы вида $p = A_{\Gamma}\rho^k$ при $k = 3$ [9]. Взаимосвязь между фазами осуществлялась через условие аддитивности объемов

$$\frac{1}{\rho_{\text{ср}}} = \frac{\beta_{\text{матр}}^0}{\rho_{\text{матр}}(p)} + \frac{\beta_{\text{ТВ}}^0 z(t)}{\rho_{\Gamma}(p)} + \frac{\beta_{\text{ТВ}}^0 (1 - z(t))}{\rho_{\text{ТВ}}(p)}, \quad (3)$$

где $\beta_{\text{матр}}^0, \beta_{\text{ТВ}}^0$ — начальные массовые концентрации матрицы и твердых добавок; $\rho_{\text{ср}}$ — средняя плотность индивидуальной частицы композита; $\rho_{\text{матр}}(p), \rho_{\Gamma}(p), \rho_{\text{ТВ}}(p)$ — плотности материала матрицы, газа и твердой

газифицирующейся добавки, зависящие от давления согласно уравнениям сжимаемости. Образование газа из твердой добавки учитывается параметром $z(t)$ — долей прореагировавшей реакционноспособной добавки. При отсутствии достоверной информации по кинетике химической реакции реакционноспособной добавки функция $0 \leq z(t) \leq 1$ задавалась набором кусочно-линейных зависимостей

$$z(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq t_1; \\ \frac{t-t_1}{t_2-t_1} & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2; \\ 1 & \text{при } t \geq t_2. \end{cases} \quad (4)$$

При $t \leq t_1$ реакционноспособные добавки полностью инертны; при $t \geq t_2$ энерговыделение совершилось полностью; интервал $t_1 \leq t \leq t_2$ соответствует энерговыделению реакционноспособной добавки.

Полагалось, что все фазы в пределах макрочастицы имеют одинаковую скорость и одинаковое давление (но различную плотность). При этом число инертных фаз в рамках такого подхода может быть и больше двух — матричная инертная фаза может быть дополнена более чем одной инертной добавкой при соответствующем изменении уравнения (3). Условие аддитивности объемов (3) в сочетании с уравнениями сжимаемости компонентов является уравнением состояния многофазной (композитной) среды и замыкает систему уравнений (1). Решение этого уравнения при получаемой численным расчетом средней плотности среды $\rho_{\text{ср}}$ позволяет определить как давление p , так и плотности составляющих фаз. Для решения уравнения (3) при заданных в общем случае уравнениях сжимаемости (2) использовался численный метод половинного деления.

Определение начального фазового состава материала струи. В отличие от ранее рассмотренной модели кумулятивной струи [6, 7] в настоящей работе определен начальный фазовый состав материала струи, образующийся из исходного материала композитной кумулятивной облицовки.

Изменение исходного фазового состава (или его отсутствие) оценивалось с использованием программного комплекса «ТЕРРА» определения термодинамических параметров химического и фазового равновесия многокомпонентных систем [10], что может рассматриваться как начальное приближение в анализе быстропротекающих процессов кумуляции с композитной облицовкой. На результирующий фазовый состав оказывал влияние воздух, учитываемый в рамках расчетов, приведенных в работе [10], как начальная газовая составляющая сообразно пористости композита облицовки [5].

Композитные составы кумулятивных облицовок выбирались на основе экспериментальных данных, приведенных в работах [1–3]. Во всех случаях рассматривались порошковые композиты с медной матричной основой и с одной или двумя добавками.

Расчеты с использованием программного комплекса [10] позволяют получить два возможных варианта поведения композита облицовки после ее нагружения: 1) инертное; 2) реакционноспособное (активное).

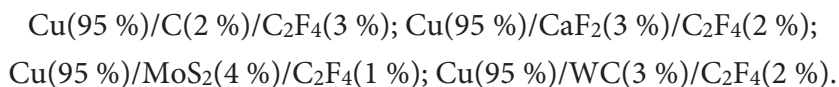
К инертному поведению в диапазоне «кумулятивных» значений температуры $T = 400 \dots 600$ °С [9] и давления $p = 10^8 \dots 40 \cdot 10^8$ Па близки «двойные» составы медной матричной основы композитных облицовок с оксидом бора $\text{Cu}(95\ \%) / \text{B}_2\text{O}_3(5\ \%)$, графитом $\text{Cu}(95\ \%) / \text{C}(5\ \%)$, свинцом $\text{Cu}(95\ \%) / \text{Pb}(5\ \%)$, фторидом кальция $\text{Cu}(95\ \%) / \text{CaF}_2(5\ \%)$, дисульфидом молибдена $\text{Cu}(95\ \%) / \text{MoS}_2(5\ \%)$, карбидом вольфрама $\text{Cu}(95\ \%) / \text{WC}(5\ \%)$, оксидом титана $\text{Cu}(95\ \%) / \text{TiO}_2(5\ \%)$. Здесь и далее термины «двойной» и «тройной» композиты использованы для краткости и приведены без кавычек.

Инертно ведут себя и многие тройные композиты с компонентами из перечисленных выше веществ, например $\text{Cu}(87,5\ \%) / \text{Pb}(12\ \%) / \text{C}(0,5\ \%)$, $\text{Cu}(85\ \%) / \text{Pb}(14\ \%) / \text{MoS}_2(1,0\ \%)$.

Однако некоторые тройные композиты оказываются вполне реакционноспособными. Таким композитом является, например, тройной бор-и фторсодержащий композит $\text{Cu}(94\ \%) / \text{B}_2\text{O}_3(2\ \%) / \text{C}_2\text{F}_4(4\ \%)$, отличающийся по составу от двойного $\text{Cu}(95\ \%) / \text{B}_2\text{O}_3(5\ \%)$ включением политетрафторэтилена C_2F_4 [11]. В этом случае программный комплекс «ТЕРРА» предсказывает существенное изменение фазового состава, причем образуются сразу три газовые фазы: 1) трифторид бора BF_3 ; 2) углекислый газ CO_2 ; 3) газообразная фаза соединения $\text{F}_3\text{B}_3\text{O}_3$. Медная матричная основа не реагирует с другими веществами, оставаясь неизменной. Изменение фазового состава материала кумулятивной струи и, главное, образующееся значительное количество газа — рабочего тела (до 0,05 общей массы композита) — может значительно повлиять на поведение струи в полете и на ее проникающую способность.

Согласно результатам термодинамического анализа [10], политетрафторэтилен оказывает некоторое иницилирующее воздействие на композиты. Так, на основе совершенно инертного двойного композита $\text{Cu}(95\ \%) / \text{TiO}_2(5\ \%)$ может быть сформирован тройной композит $\text{Cu}(94\ \%) / \text{TiO}_2(3\ \%) / \text{C}_2\text{F}_4(3\ \%)$. При нагружении такого композита прогнозируется газовыделение CO_2 на уровне 0,016 массы композита.

Однако включение в состав композита политетрафторэтилена C_2F_4 не гарантирует его реакционноспособность. Большая часть тройных композитов, в том числе и с политетрафторэтиленом, будут инертными:



Таким образом, анализ фазового состава материала, образующегося из исходных составляющих композитной кумулятивной облицовки, позволяет указать на изменение или на неизменность состава струи по сравнению с материалом облицовки.

Материал композитной облицовки должен выбираться в зависимости от решаемой задачи. На практике чаще интересует вопрос повышения проникающей способности кумулятивной струи за счет формирования ее с повышенной, а лучше — с «неограниченной способностью к удлинению» [5]. Этому больше всего соответствует случай инертного поведения добавок — составляющих композита при неизменном фазовом составе кумулятивной струи. Композиты с такими добавками вполне могут выполнять функцию одного из средств повышения эффективности кумулятивного действия.

Основные результаты численных расчетов. В растягивающейся струе изменения радиальных скоростей боковой поверхности и внутренних напряжений имеют колебательный характер. Параметры радиальных колебаний изменяются относительно параметров, свойственных несжимаемому стержню (кривые синего цвета на рис. 2, а, б). Основная причина колебаний — свойства инертности и сжимаемости материала струи [6, 9]. Еще одна причина, определяющая своеобразие изменения скоростей и напряжений в растягивающейся струе, — наличие или отсутствие способности ее материала сопротивляться всестороннему растяжению, периодически сменяющему в струе всестороннее сжатие. Это проявляется тогда, когда в составе струи имеется только монолитный однородный матричный материал (медь) и кратковременно действующие и сменяющие друг друга напряженные состояния растяжения-сжатия не будут сопровождаться его разрушением. Если тот же однородный матричный материал немонолитен, например, изготовлен из порошка холодным прессованием с определенной пористостью [1], такой материал вряд ли будет выдерживать всестороннее растяжение, объемно разрушаясь и при этом не допуская появления областей всестороннего растяжения (рис. 2, г). Таким же образом будет вести себя композитный материал из компонентов, сильно различающихся по физико-механическим свойствам. Совместное деформирование макрочастиц, вклю-

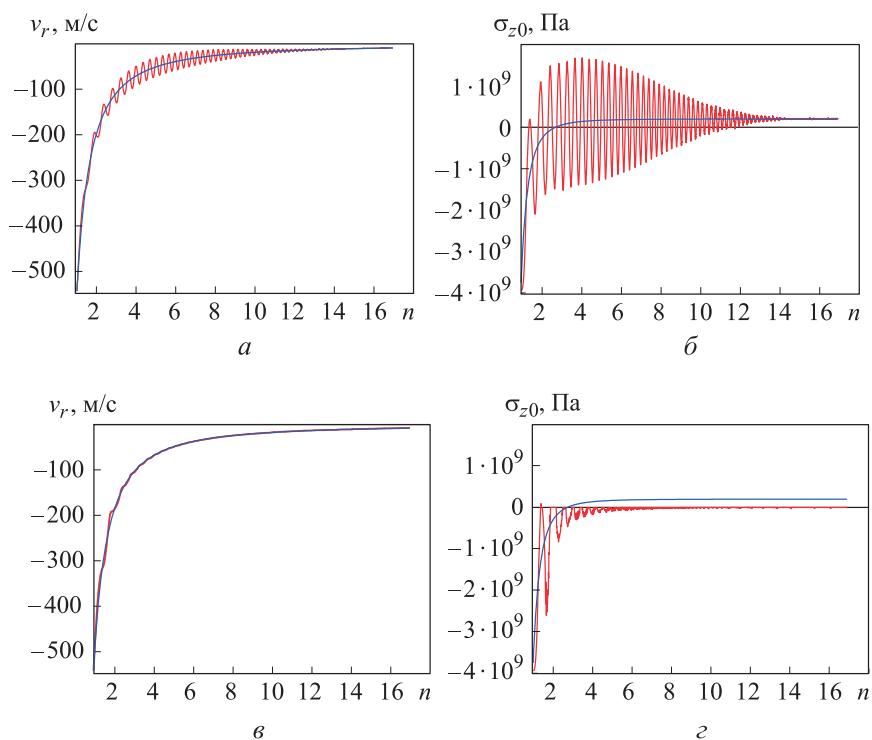


Рис. 2. Радиальные скорости (*а, в*) и осевые напряжения (*б, з*) в медной монолитной кумулятивной струе, предположительно воспроизводящей как всестороннее сжатие, так и всестороннее растяжение без ограничений (*а, б*), и в однофазной медной порошковой струе, предположительно воспроизводящей всестороннее сжатие, но не воспроизводящей всестороннее растяжение (с ограничением по давлению $p \geq 0$) (*в, з*)

чающих в себя такие компоненты, также будет приводить к их объемному разрушению [5] с последующим лишением материала способности сопротивляться всестороннему растяжению.

Для материалов, не сопротивляющихся всестороннему растяжению, колебательный процесс по скоростям «сглаживается» (рис. 2, в). Изменение радиальных скоростей во времени становится таким же, как и у несжимаемого стержня, что легко объяснить появлением внутренней разгрузки в растягивающейся струе. При этом состав композитной струи очень слабо влияет на кинематику ее радиального движения. Радиальные скорости для порошковой меди Cu(100 %) и инертных композитов Cu(90 %)/C(10 %), Cu(90 %)/WC(10 %) оказываются близки друг к другу и к значениям скорости, приведенным на рис. 2, в.

Представленные выше результаты можно рассматривать как верификационную составляющую рассматриваемого численного исследования.

Следующие примеры дают более общее представление о возможностях рассматриваемой физико-математической модели и методики численного расчета параметров растяжения композитной кумулятивной струи. В этих примерах в составе композита кумулятивной облицовки и кумулятивной струи учитывалось наличие твердой реакционноспособной добавки, которая изначально инертна, но с определенного момента времени газифицируется согласно (4). Предполагалось, что полная выделяющаяся энергия определяется массой прореагировавшей части добавки и удельной теплотой экзотермической реакции ее теплового разложения Q . Удельная теплота реакции полагалась равной работе расширения политропного газа, образующегося из твердой добавки,

$$\int_{1/\rho_{0г}}^{\infty} p dV = Q,$$

что в результате позволило задать уравнение политропного газа как

$$p = Q\rho_{0г}(k-1)\left(\rho/\rho_{0г}\right)^k, \quad (5)$$

где $\rho_{0г}$ — начальная плотность газа, равная плотности добавки.

Подобный подход к учету поведения реакционноспособных добавок в композите детально не учитывает химических процессов, в частности кинетику химических реакций и состав реагирующих веществ. Такой подход можно назвать энергетическим (в смысле уравнения (5)) и директивным (в смысле уравнения (4)) подходом, рассматривая его как некий промежуточный шаг на пути совершенствования модели поведения композитной кумулятивной струи.

Характер изменения параметров в растягивающейся струе резко меняется по отношению к инертному композиту, если в ее составе есть твердая реакционноспособная добавка, с определенного времени приводящая к более или менее интенсивному газообразованию.

Появление газа в элементах объема струи можно рассматривать как потерю сдвиговой прочности (последующее исчезновение девиатора напряжений). При этом давление не может быть отрицательным, что является причиной затухания радиальных колебаний и установления определенной радиальной скорости движения боковой поверхности — отрицательной (схождение к оси) или положительной (дивергентное, расходящееся от оси движение).

Сравнение радиальных скоростей боковой поверхности для пяти различных вариантов энерговыделения в типовом элементе кумулятивной струи лабораторного кумулятивного заряда приведено на рис. 3. Во всех

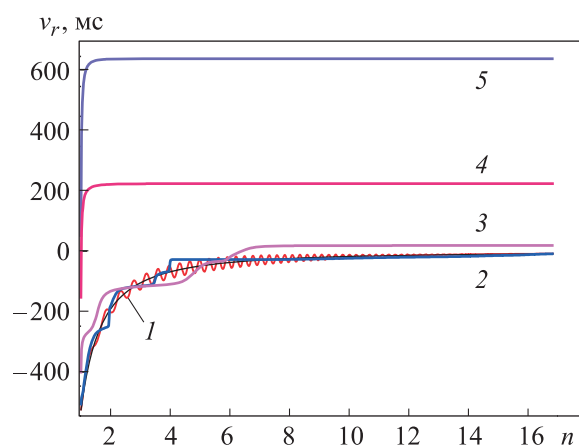


Рис. 3. Радиальные скорости в кумулятивных струях:

1 — медной монолитной с сопротивлением всестороннему растяжению; 2 — композитной медь–графит Cu(90 %)/C(10 %) с массовой долей в композите его энерговыделяющей части $\delta = 0,001$; 3 — то же с $\delta = 0,01$; 4 — то же с долей добавки $\delta = 0,05$; 5 — то же с $\delta = 0,1$ (полная активация реакционноспособной добавки)

случаях в качестве базового рассматривался композит Cu(90 %)/C(10 %) — медь с 10%-ной графитовой добавкой. Свойства добавки задавались такими же, как и у пиролизного графита.

Кривая 1 соответствует монолитной кумулятивной струе при отсутствии реакционноспособной добавки. Характерен колебательный процесс, свойственный несжимаемому жесткопластическому стержню. При этом имеется сопротивление всестороннему растяжению, а объемное разрушение струи отсутствует. Кривая 2 соответствует энерговыделяющей части твердой добавки $\delta = 0,001$ массы композита струи (10%-ное массовое содержание графитовой добавки в композите струи; 1%-ная доля активированной части всей добавки). В этом случае колебательный процесс становится менее выраженным, но радиальное, сходящееся к оси симметрии движение имеет место. Кривая 3 с энерговыделением от твердой добавки $\delta = 0,01$ массы композита соответствует расходящемуся от оси симметрии течению, кривые 4 и 5 — еще большим долям активирования твердой реакционноспособной добавки, причем последняя отвечает 100 % ее газификации (с участием окислителей, например кислорода воздуха). Соответствующие скорости радиального разлета составляют порядка сотни метров в секунду.

Следствием радиального разлета струи является ее прогрессирующее разуплотнение, которое приводит к уменьшению показателей относительной проникающей способности $L/L_0 = \sqrt{\rho_{\text{ср}}/\rho_0}$ по отношению к беспори-

стому композиту, и абсолютной проникающей способности $L/L_{0Cu} = \sqrt{\rho_{cp}/\rho_{Cu}}$ по отношению к медной облицовке. Здесь ρ_{cp} — средняя плотность разуплотняющейся струи; ρ_0 — начальная плотность беспористого композита; ρ_{Cu} — плотность монолитной меди.

Влияние на проникающую способность струи (на абсолютную по отношению к медной монолитной струе) доли активируемой части реакционноспособной добавки в композите показано на рис. 4, а. Если активируется вся твердая добавка (для композита Cu(90 %)/C(10 %) $\delta = 0,1$), то это очень быстро приводит к разуплотнению композитной струи. При этом значительно уменьшается и проникающая способность. Если реакционноспособная добавка составляет $\delta = 0,01$, то проникающая способность кумулятивной струи уменьшается примерно на 20...25 %. Если энергосвободой охватывается 1 % добавки ($\delta = 0,001$), то снижение проникания мало и определяется изначальным уменьшением плотности композита Cu(90 %)/C(10 %) за счет включения относительно легких добавок.

Изменение проникающей способности при динамическом разуплотнении или компактировании композитных кумулятивных струй Cu(90 %)/C(10 %) с долей реакционноспособной добавки $\delta = 0,001$ показано на рис. 4, б. Для приведенного примера композита Cu(90 %)/C(10 %) с массовой долей активируемой части добавки в нем $\delta = 0,001$, с энергосвободой за время $\Delta t = 0,1$ мкс время его начала изменяется в пределах $t = 0...30$ мкс. Чем позднее начинается энергосвобода, тем более сильно оно влияет на струю. Если энергосвобода при $\Delta t = 0$ изменяет проникающую способность струи очень незначительно, то при $t = 30$ мкс оно влияет на струю очень сильно. Чувствительность проникающей способности композитной струи ко времени начала энергосвободы зависит от других параметров струи, например от массы. Это проиллюстрировано на рис. 4, в, где проникающая способность композитной струи показана для случая на порядок большей активируемой части реакционноспособной добавки $\delta = 0,01$.

Проникающая способность разуплотняющейся композитной струи Cu(90 %)/C(10 %) изменяется в зависимости от времени выделения энергии Δt и при одинаковом времени начала этого процесса $t = 10$ мкс (рис. 4, г). Проникающая способность струи снижается тем быстрее, чем быстрее происходит в ней энергосвобода.

Заключение. Математическое моделирование многофазной многокомпонентной (композитной) кумулятивной струи показывает сложную картину ее поведения. Дальнейшее уточнение модели предполагает в первом приближении отход от баротропных уравнений состояния компо-

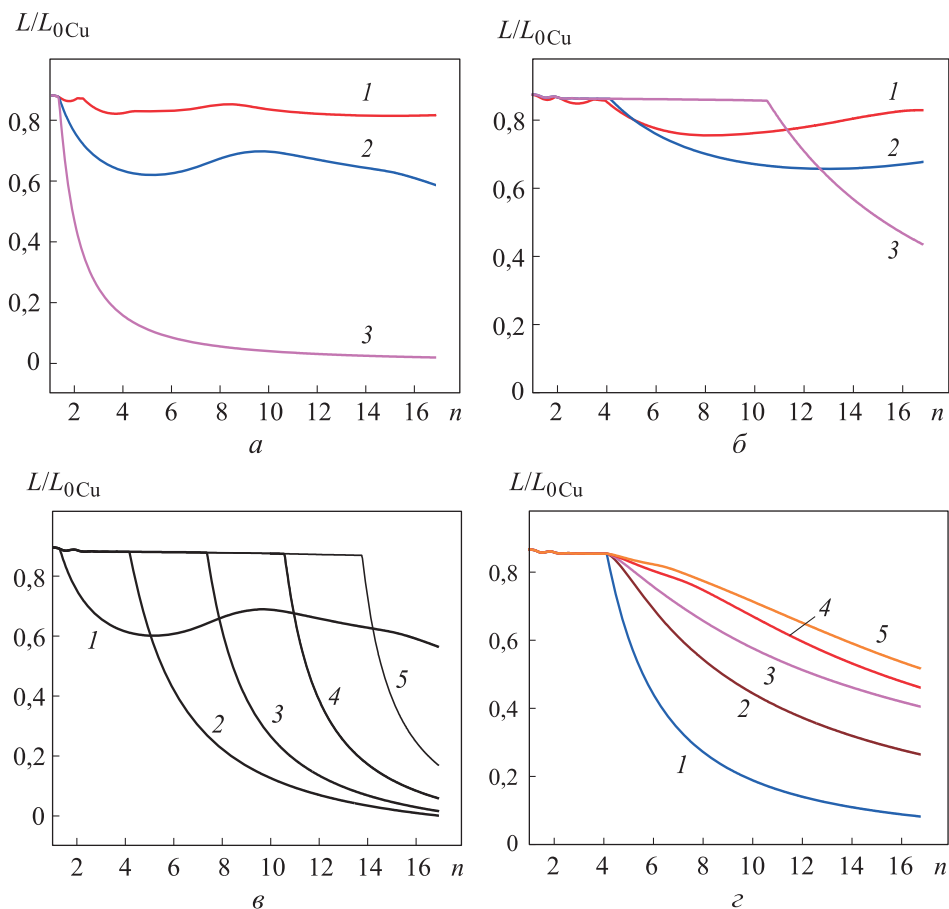


Рис. 4. Изменение проникающей способности:

a — в зависимости от доли активируемой части реакционноспособной добавки в композите $\delta = 0,001$ (1), 0,01 (2) и 0,1 (3) (полная активация); *б* — при динамическом разуплотнении или компактировании композитной кумулятивной струи Cu(90 %)/C(10 %) с долей реакционноспособной добавки $\delta = 0,001$, активируемой в различные моменты t за время $\Delta t = 0,1$ мкс (1 — $t = 0$; 2 — $t = 10$ мкс; 3 — $t = 30$ мкс); *в* — разуплотняющейся струи Cu(90 %)/C(10 %) с массовой долей реакционноспособной добавки $\delta = 0,01$ в зависимости от времени t начала выделения энергии и при фиксированном времени выделения $t = 0,1$ мкс (1 — $t = 1$ мкс; 2 — $t = 10$ мкс; 3 — $t = 20$ мкс; 4 — $t = 30$ мкс; 5 — $t = 40$ мкс); *г* — разуплотняющейся струи Cu(90 %)/C(10 %) в зависимости от времени выделения энергии активной добавкой Δt и при фиксированном времени начала энерговыделения $t = 10$ мкс (1 — $\Delta t = 1$ мкс; 2 — $\Delta t = 5$ мкс; 3 — $\Delta t = 10$ мкс; 4 — $\Delta t = 20$ мкс; 5 — $\Delta t = 30$ мкс)

ментов и переход к уравнениям состояния калорического типа, а также учет большего числа фаз — возможных составляющих композита струи. Это будет способствовать более глубокому пониманию процесса и совершенствованию разработки кумулятивных зарядов с порошковыми композитными облицовками.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Быков Ю.А., Воркина Т.Е. Порошковые композиционные материалы для беспестовых облицовок кумулятивных зарядов перфораторов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1994, № 6, с. 27–29.
- [2] Быков Ю.А., Воркина Т.Е. Разработка материалов для беспестовых порошковых облицовок кумулятивных зарядов перфораторов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 1994, № 1, с. 25–31.
- [3] Быков Ю.А., Воркина Т.Е. Влияние параметров порошков и порошковых облицовок на их рабочие характеристики. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 1994, № 3, с. 23–27.
- [4] Glenn L.A., Chase J.B., Barker J., et al. Experiments in support of pressure enhanced penetration with shaped charge perforators. *18th Int. Symp. Ballistics*. Lawrence Livermore National Laboratory, 1999.
- [5] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Особенности поведения в свободном полете кумулятивных струй из композитных порошковых облицовок. *Оборонная техника*, 2007, №3-4, с. 38–53.
- [6] Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М. и др. Влияние сжимаемости и прочности материала кумулятивных струй на особенности их инерционного растяжения в свободном полете. *ПМТФ*, 1997, т. 38, № 2, с. 10–18.
- [7] Круцкевич М.А., Бабкин А.В. Градиентное растяжение кумулятивной струи из композитного материала. *Сб. докл. VIII Всерос. конф. молод. учен. и спец. «Будущее машиностроения России»*. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, с. 818–821.
- [8] Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М. и др. Особенности инерционного растяжения кумулятивных струй в свободном полете. *ПМТФ*, 1997, т. 38, № 2, с. 3–9.
- [9] Орленко Л.П., ред. Физика взрыва. Т. 1, 2. М., ФИЗМАТЛИТ, 2004.
- [10] Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.
- [11] Селиванов В.В., Колпаков В.И., Клименко А.В. Высокоскоростное взаимодействие фторопластосодержащих ударников с преградами из титанового и алюминиевого сплавов. *Химическая физика*, 2008, т. 27, № 2, с. 66–74.

Бабкин Александр Викторович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Медельцев Антон Александрович — студент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Загрядцкий Филипп Сергеевич — ассистент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Круцкевич Максим Алексеевич — инженер-конструктор ПАО «Туполев» (Российская Федерация, 105005, Москва, набережная Академика Туполева, д. 17).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бабкин А.В., Медельцев А.А., Загрядцкий Ф.С. и др. Математическое моделирование поведения композитной кумулятивной струи с инертными и реакционно-способными составляющими. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2019, № 5, с. 19–34. DOI: 10.18698/1812-3368-2019-5-19-34

**MATHEMATICAL SIMULATION OF THE BEHAVIOR
OF A CUMULATIVE JET WITH INERT AND REACTIVE
COMPONENTS**

A.V. Babkin¹

A.A. Medeltsev¹

F.S. Zagryadtskiy¹

M.A. Krutzkevich²

pc-os@bmstu.ru

medeltsev@hotmail.com

zagr-filipp@yandex.ru

makc.krutzkevich@gmail.com

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² PJSC “Tupolev”, Moscow, Russian Federation

Abstract

The purpose of the research was to investigate the processes associated with the free flight of a cumulative jet formed from a composite liner of a cumulative charge. We mathematically simulated the process from the perspective of continuum mechanics using numerical methods for solving the corresponding equations. The cumulative jet was simulated in the quasi-two-dimensional nonstationary approximation as a high-gradient cylindrical compressible elastoplastic or liquid rod. The material of the jet was considered as a one-speed three-phase medium. The compressibility of each phase was described by its inherent barotropic dependence of pressure on density. The resulting pressure in a multiphase mixture of particles of the cumulative jet, considered as a composite material, was determined on the basis of the additivity condition of the volumes. When assessing the composition of the jet, we determined the initial concentrations of the components using a software package for thermo-dynamic simula-

Keywords

Numerical simulation, cumulation, liner, composite, jet, penetration

tion of chemically reacting systems. To find the numerical solution of the multi-phase, i.e., composite, jet extension problem, we used a finite-difference method based on Neumann — Richtmyer scheme. The numerical analysis of the process under study was carried out on the example of a laboratory cumulative charge. Within the research, we found the characteristic features and possible variations in the behavior of the jet depending on the presence of the components of the composite liner, i.e., matrix, inert and reactive additives, and their properties. Finally, we estimated the change in the penetrating power of the jet compared to the reference variant of the cumulative liner of a homogeneous single-phase monolithic material

Received 07.11.2018

© Author(s), 2019

REFERENCES

- [1] Bykov Yu.A., Vorkina T.E. Powder composite materials for slugless shaped charges perforators. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1994, no. 6, pp. 27–29 (in Russ.).
- [2] Bykov Yu.A., Vorkina T.E. Developing materials for slugless shaped charges perforators. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 1994, no. 1, pp. 25–31 (in Russ.).
- [3] Bykov Yu.A., Vorkina T.E. Powder and powder shaped charges effect on its operating characteristics. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 1994, no. 3, pp. 23–27 (in Russ.).
- [4] Glenn L.A., Chase J.B., Barker J., et al. Experiments in support of pressure enhanced penetration with shaped charge perforators. *18th Int. Symp. Ballistics*. Lawrence Livermore National Laboratory, 1999.
- [5] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. Behavioral features of shaped charge free flying jets made of composite materials. *Oboronnaya tekhnika*, 2007, no. 3-4, pp. 38–53 (in Russ.).
- [6] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., et al. Effect of shaped-charge jet compressibility and strength on the characteristics of their inertial stretching in free flight. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1997, vol. 38, iss. 2, pp. 177–184.
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02467898>
- [7] Krutskovich M.A., Babkin A.V. [Gradient stretching of composite cumulative jet]. *Sb. dokl. VIII Vseros. konf. molod. uchen. i spets. "Budushcheye mashinostroyeniya Rossii"* [Proc. VIII Russ. Conf. of Young Scientists and Specialists "Future of Machine Building in Russia"]. BMSTU Publ., 2015, pp. 818–821 (in Russ.).
- [8] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., et al. Characteristics of inertially stretching shaped-charge jets in free flight. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1997, vol. 38, iss. 2, pp. 171–176. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02467897>

[9] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva*. Т. 1, 2 [Explosion physics. Vol. 1, 2]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004.

[10] Belov G.V., Trusov B.G. *Termodinamicheskoe modelirovanie khimicheski reagiruyushchikh sistem* [Thermodynamic modeling of chemically reacting systems]. Moscow, BMSTU Publ., 2013.

[11] Selivanov V.V., Kolpakov V.I., Klimenko A.V. High-velocity interaction of teflon-containing impactors with targets made of titanium and aluminum alloys. *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2008, vol. 2, iss. 1, pp. 97–104.

DOI: <https://doi.org/10.1134/S1990793108010156>

Babkin A.V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of High Precision Flying Devices, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Medeltsev A.A. — Student, Department of High Precision Flying Devices, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Zagryadtskiy F.S. — Assistant, Department of High Precision Flying Devices, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Krutskevich M.A. — Engineer-Constructor, PJSC “Tupolev” (Academician Tupolev naberezhnaya 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Babkin A.V., Medeltsev A.A., Zagryadtskiy F.S., et al. Mathematical simulation of the behavior of a cumulative jet with inert and reactive components. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2019, no. 5, pp. 19–34 (in Russ.). DOI: 10.18698/1812-3368-2019-5-19-34