

УДК 622.235.53

## СТРУЕОБРАЗОВАНИЕ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КУМУЛЯЦИИ

Е. Ю. Потанина, В. Л. Литвинов, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский

*Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, Российская Федерация*

**Аннотация.** Кумуляция цилиндрических оболочек с образованием струи – труднодостижимый процесс. С помощью гидродинамической модели и численного моделирования исследовано кумулятивное струеобразование при обжатии цилиндрических оболочек. Предложен и обоснован способ улучшения струеобразования в цилиндрической кумуляции; нормализации температуры в зоне струеобразования с помощью трубки малого диаметра из тугоплавкого ниобия внутри основной облицовки; обозначен критический фактор в зоне струеобразования. Выдвинуты предложения по улучшению кумулятивного струеобразования в цилиндрической кумуляции.

**Ключевые слова:** цилиндрическая кумуляция, обжатие цилиндрических оболочек, взрывное метание, гидродинамическая теория кумуляции, высокотемпературные явления.

**Для цитирования:** Потанина Е. Ю., Литвинов В. Л., Гуськов А. В., Милевский К. Е. Струеобразование в цилиндрической кумуляции // Аэрокосмическая техника и технологии. 2023. Т. 1. № 2. С. 43–57.

---

## JETTING IN CYLINDRICAL CUMULATION

E. Yu. Potanina, V. L. Litvinov, A. V. Guskov, K. E. Milevsky

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation*

**Abstract.** Jetting in cylindrical cumulation is an elusive process. The paper investigates cumulative jetting during the compression of cylindrical shells by means of a hydrodynamic model and numerical simulation. A method for improving jetting in cylindrical cumulation and normalizing the temperature in the jet formation zone - using a small diameter tube inside the main cladding made of refractory ni-obium – has been proposed and substantiated. The critical factor in the jet formation zone is out-lined. Thus, suggestions were made to improve cumulative jetting in cylindrical cumulation.

**Keywords:** cylindrical cumulation, cylindrical shell compression, explosive throwing, hydrodynamic theory of cumulation, high-temperature phenomena.

**For citation:** Potanina E. Yu., Litvinov V. L., Guskov A. V., Milevsky K. E. Jetting in cylindrical cumulation. *Aerospace Engineering and Technology*. 2023. Vol. 1. No. 2, pp. 43–57.

## Введение

**Ц**илиндрический кумулятивный заряд (КЗ) представляет конструкцию из трубчатого цилиндрического заряда взрывчатого вещества (ВВ) с трубчатой металлической облицовкой внутри. В практическом применении цилиндрическая кумуляция еще не нашла своего применения. Однако этот процесс представляет интерес для исследования, так как имеет ряд особенностей, которые могут стать преимуществом перед коническими КЗ.

Одно из преимуществ цилиндрической кумуляции – возможность создания кумулятивной струи (КС) с низким градиентом скорости по длине. При обжатии конусной облицовки формируется струя, участки которой имеют различные скорости. Головная часть струи движется с большей скоростью, чем хвостовая часть и пест, поскольку малая часть облицовки у вершины обжимается большим количеством ВВ, в то время как часть облицовки у основания (более массивная) – меньшим [1]. В цилиндрическом КЗ коэффициент наполнения – отношение массы элемента облицовки к массе ВВ, метающего этот элемент облицовки, – постоянен по длине заряда (рис. 1) [1].

Одним из способов повышения массы КС является увеличение размеров облицовки. В конической кумуляции увеличение размеров кумулятивной воронки влечет за собой увеличение диаметра заряда, в то время как в цилиндрической кумуляции массу облицовки можно повысить удлинением облицовки без увеличения диаметра [2].

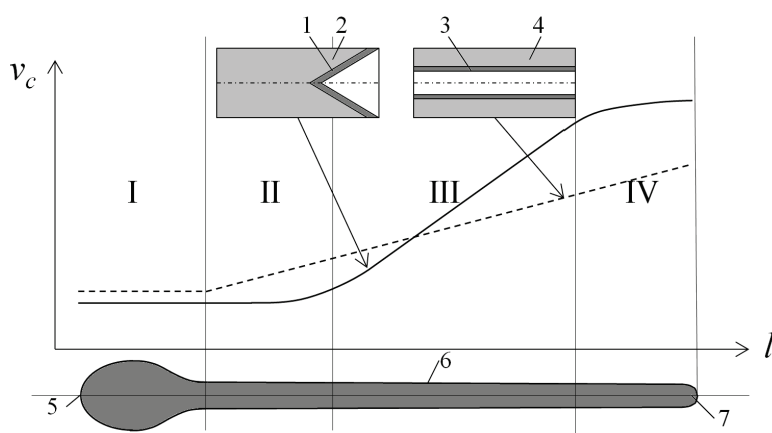


Рис. 1. Распределение скоростей КС для конического (1, 2) и цилиндрического КЗ (3, 4)

1 – конусная облицовка; 2, 4 – ВВ; 3 – цилиндрическая облицовка;

5 – пест; 6 – КС; 7 – головная часть КС

Области: I – формирование песта; II – нарастание скорости струи;

III – линейное возрастание скорости струи; IV – снижение прироста скорости струи

Цилиндрическая кумуляция обладает существенным недостатком – при обжатии металлической оболочки высокобризантиным ВВ кумуляция проходит без образования струи. Отсутствие струеобразования авторы [3, 4] объясняют следующими факторами: нагрев материала облицовки до высоких температур;

влияние сжимаемости материала облицовки [3]; неидеальная симметричность процесса.

Влияние сжимаемости материала облицовки отражено в известных критериях струеобразования [4–6]. Один из них [5] формулируется следующим образом: если точка соударения при обжати кумулятивной облицовки (КО) движется со скоростью, не превышающей объемной скорости звука в материале облицовки, то формируются КС. Поскольку для цилиндрической КО скорость точки соударения равна скорости детонации в заряде ВВ, то КС, согласно этому критерию, сформируется в случае, если скорость детонации заряда ВВ не превышает объемную скорость звука в материале облицовки:

$$D < c_0. \quad (1)$$

При обжати медной трубки высокобризантным ВВ этот критерий не выполняется, поскольку объемная скорость звука в меди ( $c_0 = 4,6$  км/с) значительно ниже характерной для высокобризантных ВВ скорости детонации ( $D = 8$  км/с).

Условия сформулированного критерия выполнены в эксперименте, описанном авторами [7], по обжатию цилиндрической дюралюминиевой трубки ( $c_0 = 5,5$  км/с) шашкой аммонита 6ЖВ ( $D = 3,5$  км/с). На рентгенограмме (рис. 2) видна образовавшаяся КС.

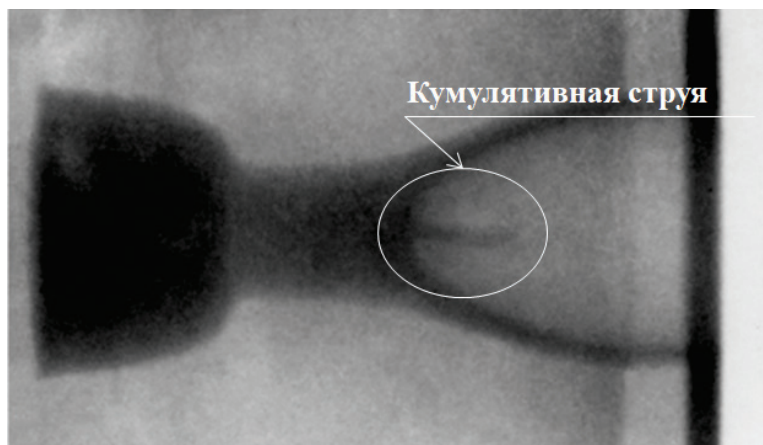


Рис. 2. Рентгенограмма обжати алюминиевой цилиндрической облицовки аммонитом 6ЖВ

В работах [8, 9] исследовалось обжатие керамических (корундовых) трубок цилиндрическим зарядом ВВ ТГ-40. При постановке эксперимента, аналогичного описанному, объемная скорость звука в материале облицовки выше скорости детонации ВВ. В результате при обжати керамической цилиндрической оболочки образуется струя в виде высокоскоростного потока дисперсных частиц.

Приведенные эксперименты свидетельствуют о том, что при выполнении критерия (1) образуется КС. Однако на основе полученных результатов нельзя утверждать, что при невыполнении этого условия струеобразование невозможно. Результаты работы [10] показывают, что выполнение критерия (1) обяза-

тельно. Также представлено, что КЗ можно создать, поместив в трубчатую цилиндрическую шашку ВВ (ТГ-40) цилиндрическую медную трубку, соответствующую внутреннему диаметру шашки, толщина стенки которой увеличивается в направлении распространения фронта детонационной волны. Можно использовать цилиндрическую медную трубку с постоянной толщиной стенки, помещенную в коническую шашку ВВ (ТГ-40), в которой фронт детонации распространяется от основания конуса к его вершине. В этом случае образуется КС, несмотря на невыполнение критерия (1).

Известен [4] более точный критерий струеобразования, учитывающий ударно-волновые процессы в зоне струеобразования, но и он не может являться исчерпывающим, потому что основан на плоской модели. При этом известно, что конические течения невозможны без образования струи [11].

Кумулятивные заряды не обладают идеальной осевой симметрией в силу технологических и других факторов, поэтому сложно найти границу струеобразования. Таким образом, можно сказать, что цилиндрическая кумуляция заслуживает более глубокого изучения.

Актуальность работы обусловлена тем, что устройство цилиндрической кумуляции можно использовать для разгона мелких частиц до больших скоростей ( $\approx 10$  км/с), что позволяет исследовать высокоскоростное взаимодействие мелких частиц с противометеоритной защитой космических аппаратов [12]. Также благодаря ряду характерных особенностей цилиндрической кумуляции, она обладает высоким потенциалом практического применения по использованию кумулятивного эффекта как для решения технологических задач в промышленности и военных целях, так и в научных задачах физики взрыва. Такое устройство может выступать как гиперзвуковой ускоритель частиц, который широко используется при исследовании высокоскоростного взаимодействия частиц с конструкцией.

Практическая значимость работы состоит в том, что приведен не только анализ исследуемого процесса, в ходе которого выявлены его слабые места, но и предложены конструктивные решения, позволяющие достичь нормального функционирования устройства цилиндрической кумуляции.

Научная новизна заключена в обосновании целесообразности применения нового элемента конструкции («холодный» лайнер), предложенного в работе.

### **Гидродинамическая теория кумуляции при схождении цилиндрической оболочки к оси**

Формирование КС при косом соударении пластин, метаемых продуктами детонации или при взрывном обжати осесимметричных металлических облицовок, впервые объяснила гидродинамическая теория кумуляции, основанная на модели идеальной несжимаемой жидкости [1]. Математические зависимости этой теории справедливы и для цилиндрической кумуляции:

$$M_J = M \sin^2 \frac{\alpha}{2}; \quad (2)$$

$$E_J = \frac{MV_0^2}{2} \cos^2 \frac{\alpha}{2}, \quad (3)$$

где  $M_J$  – масса струи;  $M$  – масса сходящейся облицовки;  $\alpha$  – угол схлопывания;  $E_J$  – кинетическая энергия КС;  $V_0$  – скорость обжатия КО.

Рассмотрим стационарную схему образования КС (рис. 3) [13].

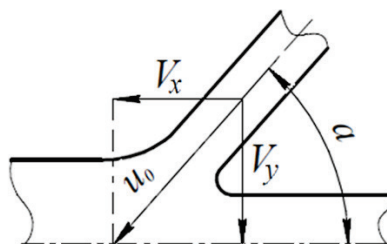


Рис. 3. Схема процесса образования струи

$u_0$  – скорость потока материала облицовки;  $V_x$  – горизонтальная скорость потока;  $V_y$  – радиальная (вертикальная) скорость потока;  $\alpha$  – угол схлопывания

В задачах цилиндрической кумуляции, где цилиндрическая облицовка метается скользящей детонационной волной к оси, горизонтальная скорость  $V_x$  постоянна и равна скорости детонации заряда ВВ. Для высокобризантных ВВ на основе тротил-гексогена скорость детонации  $D \approx 8$  км/с (в дальнейших расчетах скорость детонации равна 8 км/с). Радиальная (вертикальная) скорость  $V_y$  может изменяться в широком диапазоне в зависимости от коэффициента наполнения и металлической способности ВВ.

Из схемы процесса образования струи (рис. 3) геометрически определяется зависимость угла схлопывания от радиальной (вертикальной) скорости:

$$\alpha = \arctg \left( \frac{V_y}{V_x} \right) = \arctg \left( \frac{V_y}{D} \right). \quad (4)$$

На рис. 4 представлены зависимости кинетической энергии струи  $E_J$  и доли отдачи материала облицовки в струю от  $V_y$ , построенные по зависимостям (2) и (3) с учетом (4).

С увеличением радиальной скорости схлопывания оболочки  $V_y$  масса струи  $M_J$  (рис. 4, а) и кинетическая энергия струи  $E_J$  растут (рис. 4, б). Такой эффект наблюдается из-за увеличения угла схлопывания  $\alpha$ . В цилиндрической кумуляции наблюдаются малые углы схлопывания, при которых образуются тонкие и неустойчивые струи. В данном случае повышение радиальной скорости метания  $V_y$  влечет и увеличение угла схлопывания, что должно положительно сказываться на процессе струеобразования.

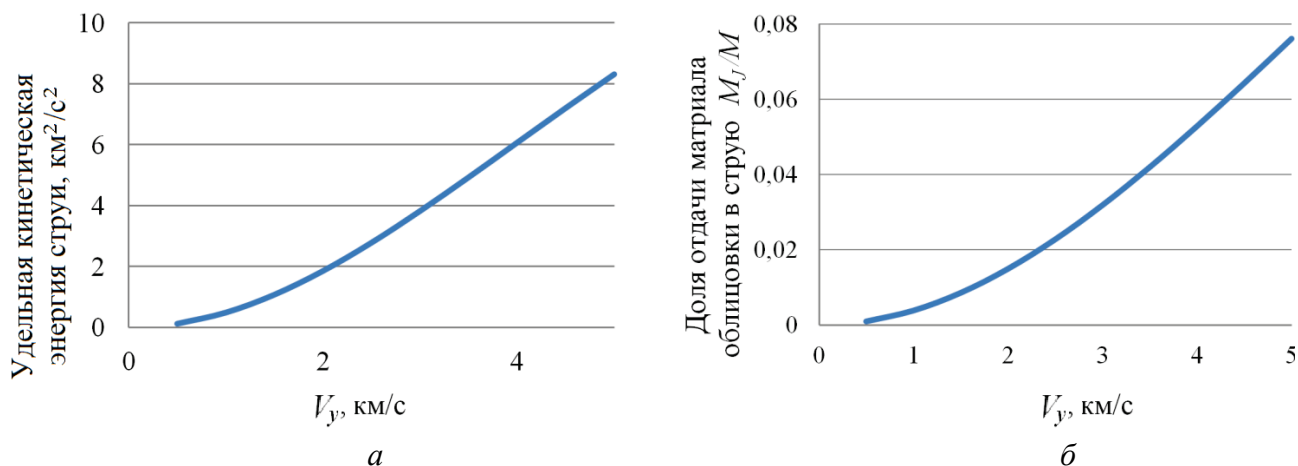


Рис. 4. Зависимости кинетической энергии струи от радиальной (вертикальной) скорости схлопывания  $E_j(V_y)$  (а) и доли отдачи материала облицовки в струю от радиальной (вертикальной) скорости схлопывания  $M_j/M(V_y)$  (б)

### Численное моделирование схождения цилиндрической оболочки к оси

Для сравнения с теоретическими расчетами по гидродинамической теории проведено численное моделирование в программном комплексе Ansys Autodyn. Начальные условия для численного моделирования соответствовали начальным условиям для теоретического расчета по гидродинамической теории. Расчетная область схематично показана на рис. 5. С правой стороны (граница  $\tau$ ) из выделенной области  $a-a$  входит поток материала облицовки с горизонтальной скоростью  $V_x = 8 \text{ км}/\text{с}$ ; вертикальная скорость  $V_y$  менялась в разных постановках от 1 до 4  $\text{км}/\text{с}$ , шаг в 1  $\text{км}/\text{с}$ . Варьирование скорости проводилось для исследования зависимости параметров струи от скорости метания оболочки. Внутренний радиус  $r$  постоянен и равен 15 мм, внешний радиус  $R$  изменялся от 17 до 21 мм с шагом в 2 мм в разных постановках, чтобы выявить влияние толщины облицовки на отдачу материала в струю.

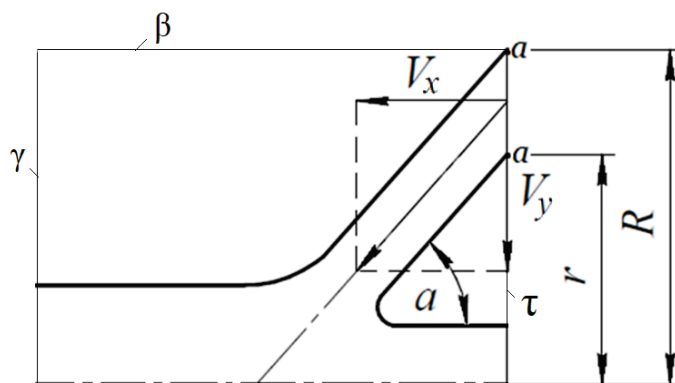


Рис. 5. Постановка задачи

Моделирование приводилось в двухмерной осесимметричной постановке на неподвижной эйлеровой сетке. Границы  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\tau$  открытые, со свободным выходом материала, кроме области  $a-a$  (участок входа потока материала облицовки) нижняя граница – ось симметрии. Пространственное разрешение составляло 25 ячеек сетки на 1 см.

Изначально в качестве материала оболочки выбрана медь, так как КО из меди формируют высокоплотные сплошные монолитные струи, обладающие высокой пробивной способностью. Также медь чаще всего используют при изготовлении КО [14].

При численном моделировании использовалось уравнение состояния меди в форме Tillotson, учитывающее температурные эффекты при высоких скоростях деформации и переход материала в другое фазовое состояние [13]. Расчетная область в некоторый момент времени для постановки с вертикальной скоростью  $V_y = 2$  км/с и внешнем радиусом  $R = 21$  мм представлена на рис. 6.

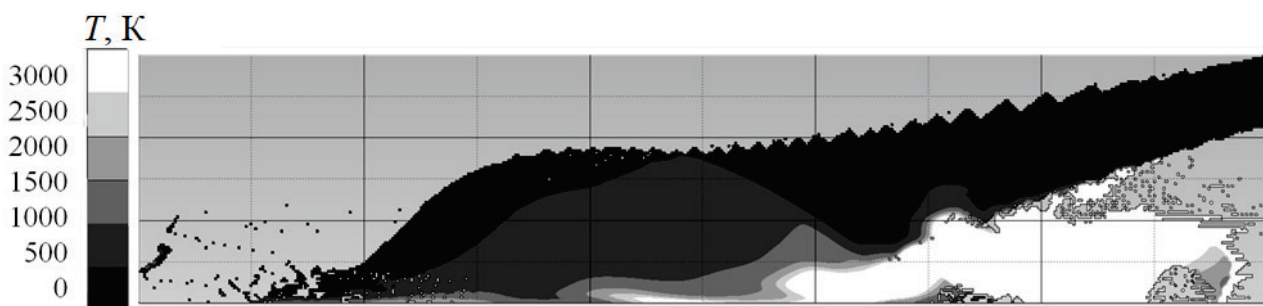


Рис. 6. Изопалитра температур при сжатии к оси медной оболочки

В области соударения температура меди достигает 3000 К, что превышает температуру кипения меди (температура плавления – 1358 К, кипения – 2835 К). В таком случае струя не образуется, происходит фазовый взрыв и, вследствие этого образуются полости в песе [4]. Такие высокие температуры медь приобретает из-за большой интенсивности и скорости деформации. Испарение меди на оси наблюдалось во всех постановках: с разными вертикальными скоростями ( $V_y = 1-4$  км/с) и внешними радиусами ( $R = 17-21$  мм).

При сжатии оболочки к оси происходят высокотемпературные эффекты, которые препятствуют струеобразованию. Поэтому в качестве материала облицовки стоит выбирать тугоплавкие материалы с высокой температурой плавления и кипения [5, 13, 15].

Для дальнейшего исследования струеобразования численным методом в качестве материала КО выбран тугоплавкий ниобий (температура плавления – 2467 К, кипения – 4742 К). В расчете ниобий моделировался по модели Джонсона–Кука, которая позволяет оценить температурные эффекты при высоких скоростях деформации, но при температурах ниже температуры фазовых переходов. Соответственно переход вещества в другое агрегатное состояние данная

модель не учитывает, поэтому моделирование проводилось для оценки температуры в зоне струеобразования «снизу».

Расчетная область в некоторый момент времени для постановки с вертикальной скоростью  $V_y = 2$  км/с и внешним радиусом  $R = 21$  мм представлена на рис. 7.

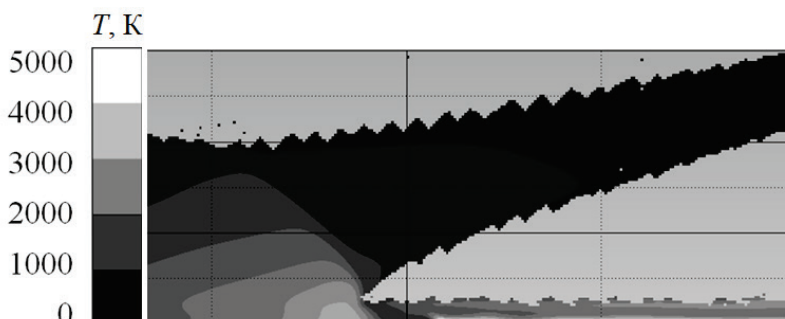


Рис. 7. Изопалитра температур при схождении к оси ниобиевой оболочки

На оси симметрии материал достигает температуры кипения, но модель Джонсона–Кука для материала не учитывает фазовый переход вещества, поэтому в расчетной области на рис. 7 нет испарений, как на рис. 6.

Проведенный численный расчет с материалом облицовки (ниобий) позволяет оценить количество материала, которое уходит в струю. Если считать, что плотность материала в струе не меняется, то получим:

$$\frac{M_J}{M} = \frac{S_J}{S}, \quad (5)$$

где  $S_J$  – площадь поперечного сечения струи;  $S$  – площадь поперечного сечения облицовки, метаемой к оси.

На основе данных численного моделирования и вычисления по гидродинамической теории построена диаграмма (рис. 8). Результаты численного моделирования соответствуют результатам теоретического расчета по гидродинамической теории. Площадь поперечного сечения облицовки незначительно влияет на долю отдачи материала КО в струю.

Задачи, моделируемые в Ansys Autodyne, идеально симметричны, в реальном эксперименте существуют погрешности при изготовлении облицовки и заряда, соответственно идеальная симметрия невозможна, поэтому тонкие струи могут быть неустойчивы. Можно предположить, что в таких задачах существует критический диаметр струи, являющийся минимальным диаметром устойчивой струи.

Из зависимости доли отдачи материала облицовки в струю от радиальной скорости схлопывания можно сделать вывод, что с увеличением радиальной скорости метания увеличивается масса струи, ее диаметр. Согласно выдвинутым предположениям, при увеличении диаметра струи повышается стабильность процесса.



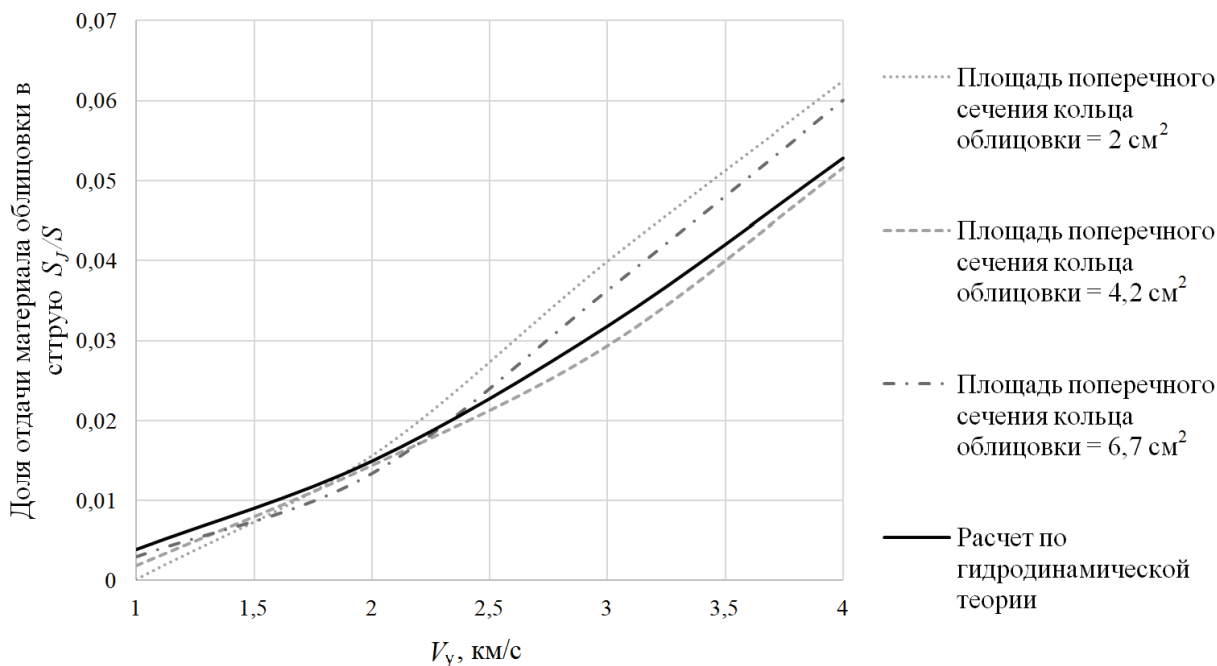


Рис. 8. Зависимость доли отдачи материала облицовки в струю от радиальной скорости схлопывания

### Температура материала облицовки в области соударения и в струе

В работе [4] показано, что при схлопывании цилиндрической оболочки к оси в результате диссипации кинетической энергии происходит нагрев облицовки. Значительное выделение тепла наблюдается перед фазой остановки оболочки, и в момент остановки вся кинетическая энергия переходит в тепло. Предполагается, что снижение температуры в зоне соударения возможно за счет уменьшения пластического деформирования облицовки при схлопывании.

В настоящей работе предлагается использовать «холодный» лайнер – трубку малого диаметра, которая находится внутри цилиндрической КО большего диаметра. Кумулятивная струя будет образована из материала «холодного» лайнера (рис. 9).

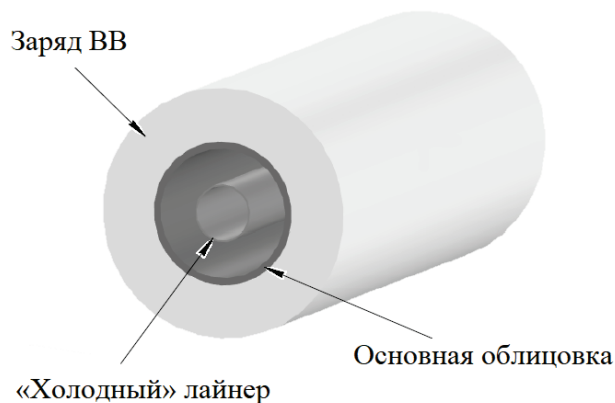


Рис. 9. Схема цилиндрического КЗ с «холодным» лайнером

Материал основной облицовки, перемещаясь к оси и деформируясь, сильно разогревается из-за высоких пластических деформаций. Обжимая «холодный» лайнер, основная цилиндрическая облицовка передает ему импульс, т. е. скорость, необходимую для струеобразования. Из-за малого начального диаметра «холодный» лайнер не претерпевает больших пластических деформаций, как облицовка, поэтому не так сильно нагревается. Малое время процесса схлопывания исключает значительный нагрев «холодного» лайнера путем теплопередачи от основной облицовки. Таким образом, предполагается, что стоит ожидать уменьшение температуры в области соударения.

Аналогично предыдущим задачам поставлена задача о втекании материала основной облицовки и «холодного» лайнера в расчетную область (рис. 10).

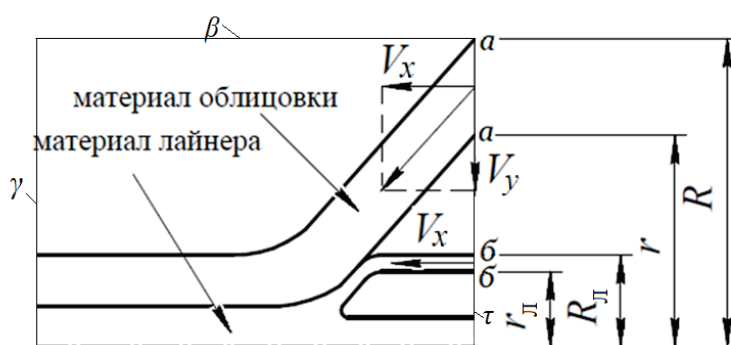


Рис. 10. Постановка задачи

С правой стороны из области  $a-a$  на ось симметрии входит поток материала облицовки с  $V_x = 8$  км/с;  $V_y = 3$  км/с;  $r = 15$  мм;  $R = 21$  мм (рис. 10). Кроме потока материала основной облицовки в расчетную область входит материал «холодного» лайнера из области  $b-b$ , поток материала задается с  $V_x = 8$  км/с,  $V_y = 0$  км/с.

Моделирование приводилось в двухмерной осесимметричной постановке на неподвижной эйлеровой сетке. Границы  $\beta$ ,  $\tau$ ,  $\gamma$  открытые, со свободным выходом материала, кроме областей  $a-a$  (участок, откуда идет поток материала основной облицовки) и  $b-b$  (участок, откуда идет поток материала «холодного» лайнера), нижняя граница – ось симметрии. Пространственное разрешение составляло 25 ячеек сетки на 1 см. Таким образом, на расчетной области моделируется процесс схождения основной облицовки и «холодного» лайнера к оси, а также взаимодействие этих потоков.

Радиус и толщина «холодного» лайнера различны в нескольких постановках. С одной стороны, «холодный» лайнер не должен приобретать больших деформаций – чем меньше его радиус, тем будет меньше его температура. С другой стороны, «холодный» лайнер должен «успеть», схлопываясь к оси, приобрести скорость и не мешать потоку материала струи, т. е. обладать достаточным радиусом. Таким образом, должно существовать оптимальное значение радиуса «холодного» лайнера.

Горизонтальная и вертикальная скорости потока материала цилиндрической облицовки, внешний радиус и толщина облицовки остаются постоянными. На рис. 11 изображена расчетная область для постановки задачи с внешним радиусом «холодного» лайнера  $R_{\text{Л}} = 6$  мм и внутренним радиусом  $r_{\text{Л}} = 4,8$  мм.

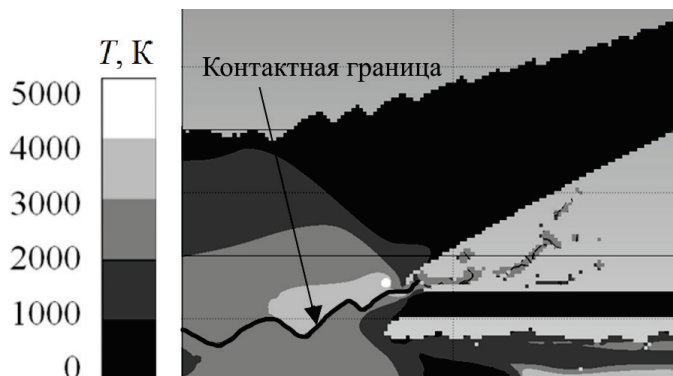


Рис. 11. Расчетная область для постановки задачи

Температура в струе и зоне соударения заметно снизилась по сравнению с предыдущими постановками – она не превышает температуру кипения материала. Этот расчет демонстрирует, что использование «холодного» лайнера является действенным способом снижения температуры в зоне соударения и струе. Также «холодный» лайнер не препятствует струеобразованию. Его масса мала, поэтому не наблюдается значительного уменьшения радиальной скорости из-за прочностных и инерциальных свойств материала. Струя образуется из материала «холодного» лайнера, доля его выхода в струю составляет 0,46.

## Заключение

Представлены расчеты по гидродинамической теории и численное моделирование задач цилиндрической кумуляции, проведено их сравнение и сделан вывод, что результаты расчетов по гидродинамической модели и численного моделирования хорошо согласуются.

С ростом радиальной скорости метания с 1,5 до 3,5 км/с доля отдачи материала облицовки в струю увеличивается в четыре раза. Таким образом, увеличиваются ее диаметр и устойчивость процесса. Численное моделирование показало, что критичным является температура в зоне соударения и струе.

При схождении к оси материал облицовки испытывает интенсивные деформации, вследствие чего температура в нем может превышать температуру кипения. В таком случае происходит фазовый взрыв, который исключает струеобразование. Использование в качестве материала облицовки тугоплавкого ниобия не решает данную проблему.

Предложен путь по снижению температуры в зоне струеобразования: использование нового конструктивного элемента – «холодного» лайнера, являющегося трубкой малого диаметра, которая помещается внутрь основной облицовки.

Основная облицовка, обжимая «холодный» лайнер, успевает придать ему скорость, необходимую для струеобразования. При этом сам лайнер из-за малого диаметра не претерпевает больших деформаций, и, следовательно, имеет более низкую температуру при схлопывании, чем облицовка. Целесообразно применять «холодный» лайнер из тугоплавкого материала.

Дальнейшие исследования по улучшению кумулятивного струеобразования в цилиндрической кумуляции будут нацелены на изучение способов увеличения радиальной скорости схождения оболочки.

### Библиографический список

1. Средства поражения и боеприпасы: Учебное пособие / А. В. Бабкин, В. А. Велданов, Е. Ф. Грязнов [и др.]; под общ. ред. В. В. Селиванова. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 984 с.
2. Разгон трубки в задаче цилиндрической кумуляции / А. В. Гуськов, В. Л. Литвинов, К. Е. Милевский, Е. Ю. Потанина // XXIII Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона (НПО – 2022)», 20–22 апреля 2022, Новосибирск, Россия. – Новосибирск: НГТУ, 2022. – Т. 2. – С. 189–194.
3. Взаимодействие ударных волн в условиях пространственной симметрии / А. В. Гуськов, В. Л. Литвинов, К. Е. Милевский, Е. Ю. Потанина // Труды 18-й Всероссийской научно-технической конференции «Проектирование систем вооружения боеприпасов и измерительных комплексов», 30 сентября – 1 октября 2021, Нижний Тагил, Россия. – Нижний Тагил: НТИ УрФУ, 2022. – С. 81–88.
4. Тришин Ю. А. Физика кумулятивных процессов: Монография. – Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2005. – 324 с.
5. Генерация гиперскоростных потоков частиц при взрывном обжатии керамических трубок / И. А. Балаганский, Л. А. Мерзиевский, В. Ю. Ульяницкий [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2018. – Т. 54. – № 1. – С. 132–138.
6. Титов В. М. Возможные режимы гидродинамической кумуляции при схлопывании облицовок // Доклады АН СССР. – 1979. – Т. 247. – № 5. – С. 1082–1084.
7. Тришин Ю. А. О некоторых физических проблемах кумуляции // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т. 41. – № 5. – С. 10–26.
8. Generation of Hypervelocity Particle Flows by Explosive Compression of Ceramic Tubes / I. A. Balaganskii, L. A. Merzhievskii, V. Y. Ul'yanitskii [et al.] // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2018. – Vol. 54. – № 1. – Pp. 119–124.
9. Analysis of material flow fields under explosive collapse of two-layer metal/ceramic tubes / I. A. Balagansky, I. Batraev, V. Ulianitsky [et al.] // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – Vol. 156. – 12 p. – <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103929>
10. Fast jets from collapsing cylinders / W. S. Koski, F. A. Lucy, R. G. Shreffler, E. J. Willig // Journal of Applied Physics. – 1952. – Vol. 23. – Pp. 1300–1305.
11. Забабахин Е. И. Явления неограниченной кумуляции / Е. И. Забабахин, И. Е. Забабахин; отв. ред. Я. Б. Зельдович). – М.: Наука, 1988. – 171 с.
12. Сысоев А. А. Анализ физических аспектов взаимодействия высокоскоростных микрочастиц с элементами противометеоритной защиты с использованием механохимически активных веществ / А. А. Сысоев, В. И. Колпаков // Инженерный вестник. – 2014. – № 11. – С. 9.
13. Физика взрыва: в 2 т. Т. 2 / Под ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд., перераб. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2022. – 656 с.

14. Минин И. В. Мировая история развития гомулятивных боеприпасов / И. В. Минин, О. В. Минин // XXIV Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона (НПО – 2023)», 23–25 апреля 2003, Новосибирск, Россия. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – С. 51–52.

15. Балаганский И. А. Влияние воздуха на процесс взрывного обжатия двухслойной корундо-ниобиевой трубки / И. А. Балаганский, А. В. Шек // XXIII Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона (НПО – 2022)», 20–22 апреля 2022, Новосибирск, Россия. – Новосибирск: НГТУ, 2022. – Т. 2. – С. 31–34.

**Дата поступления:** 04.04.2023

**Решение о публикации:** 10.04.2023

### **Контактная информация:**

ПОТАНИНА Елена Юрьевна – учебный мастер (Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20), potanina.2017@stud.nstu.ru

ЛИТВИНОВ Василий Леонидович – студент (Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20), vasilylitvinov1998@mail.ru

ГУСЬКОВ Анатолий Васильевич – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой (Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20), a.guskov@corp.nstu.ru

МИЛЕВСКИЙ Константин Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент (Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20), milevskij@corp.nstu.ru

---

## **References**

1. Babkin A. V., Veldanov V. A., Gryaznov E. F. et al. Sredstva porazheniya i boyepriпасы: Uchebnoye posobiye [Means of Destruction and Ammunition: Training Manual]. Under general editorship of V. V. Selivanov. Moscow: N. E. Bauman Moscow State Technical University, 2008, 984 p. (In Russian)

2. Guskov A. V., Litvinov V. L., Milevsky K. E., Potanina E. Yu. Razgon trubki v zadache tsilindricheskoy kumulyatsii [Tube acceleration in the problem of cylindrical cumulation]. XXIII Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya “Nauka. Promyshlennost”. Oborona (NPO – 2022) [23th All-Russian Scientific and Technical Conference “Science. Industry. Defense (NPO – 2022)”. April 20–22, 2022, Novosibirsk, Russia. Novosibirsk: NSTU, 2022. Vol. 2, pp. 189–194. (In Russian)

3. Guskov A. V., Litvinov V. L., Milevsky K. E., Potanina E. Yu. Vzaimodeystviye udarnykh voln v usloviyakh prostranstvennoy simmetrii [Interaction of shock waves under conditions of spatial symmetry]. Trudy 18-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Proyektirovaniye sistem vooruzheniya boyepriпасov i izmeritel’nykh kompleksov” [Proceedings of the 18th All-Russian Scientific and Technical Conference “Design of weapon systems of ammunition and measuring

complexes”]. September 30 – October 1, 2021, Nizhny Tagil, Russia. Nizhny Tagil: STI (branch) UFU, 2022, pp. 81–88. (In Russian)

4. Trishin Yu. A. Fizika kumulyativnykh protsessov: Monografiya [Physics of Cumulative Processes: Monograph]. Novosibirsk: Publishing House of Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2005, 324 p. (In Russian)

5. Balagansky I. A., Merzhievsky L. A., Ulyanitsky V. Yu. et al. Generatsiya giperskorostnykh potokov chastits pri vzryvnom obzhatii keramicheskikh trubok [Generation of hypervelocity particle flows during explosive compression of ceramic tubes]. *Physics of Combustion and Explosion*. 2018. Vol. 54. No. 1, pp. 132–138. (In Russian)

6. Titov V. M. Vozmozhnyye rezhimy gidrodinamicheskoy kumulyatsii pri skhlopyvanii oblitsovok [Possible hydrodynamic cumulation modes during the collapse of linings]. *USSR AS Papers*. 1979. Vol. 247. No. 5, pp. 1082–1084. (In Russian)

7. Trishin Yu. A. O nekotorykh fizicheskikh problemakh kumulyatsii [About some physical problems of cumulation]. *Applied Mechanics and Technical Physics*. 2000. Vol. 41. No. 5, pp. 10–26. (In Russian)

8. Balaganskii I. A., Merzhievskii L. A., Ul’yanitskii V. Y. [et al.]. Generation of Hypervelocity Particle Flows by Explosive Compression of Ceramic Tubes. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2018. Vol. 54. No. 1, pp. 119–124.

9. Balagansky I. A., Batraev I., Ulianitsky V. [et al.]. Analysis of material flow fields under explosive collapse of two-layer metal/ceramic tubes. *International Journal of Impact Engineering*. 2021. Vol. 156, 12 p. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103929>

10. Koski W. S., Lucy F. A., Shreffler R. G., Willig E. J. Fast jets from collapsing cylinders. *Journal of Applied Physics*. 1952. Vol. 23, pp. 1300–1305.

11. Zababakhin E. I., Zababakhin I. E. Yavleniya neogranichennoy kumulyatsii [Phenomena of unlimited cumulation]; resp. ed. Ya. B. Zeldovich. Moscow: Nauka, 1988, 171 p. (In Russian)

12. Sysoyev A. A., Kolpakov V. I. Analiz fizicheskikh aspektov vzaimodeystviya vysokoskorostnykh mikrochastits s elementami protivometeoritnoy zashchity s ispol’zovaniyem mekhanokhimicheskii aktivnykh veshchestv [Analysis of the physical aspects of the interaction of high-speed microparticles with elements of anti-meteorite protection using mechanochemically active substances]. *Engineering Bulletin*. 2014. No. 11, p. 9.

13. Fizika vzryva: v 2 t. T. 2 [Physics of explosion: in 2 vols. Vol. 2] / Edited by L. P. Orlenko. 3-e izd., pererab. [Ed. 2, revised]. Moscow: FIZMATLIT, 2022, 656 p. (In Russian)

14. Minin I. V., Minin O. V. Mirovaya istoriya razvitiya rumulyativnykh boyepripasov [World history of the development of cumulative ammunition]. XXIV Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya “Nauka. Promyshlennost’. Oborona (NPO – 2023)” [24th All-Russian Scientific and Technical Conference “Science. Industry. Defense (NPO – 2023)”. April 23–25, 2003, Novosibirsk, Russia. Novosibirsk: NSTU, 2003, pp. 51–52. (In Russian)

15. Balaganskiy I. A., Shek A. V. Vliyaniye vozdukha na protsess vzryvnogo obzhatiya dvukhsloynoy korundo-niobiyevoy trubki [Effect of air on the process of explosive compression of a two-layer corundum-niobium tube]. XXIII Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya “Nauka. Promyshlennost’. Oborona (NPO – 2022)” [23th All-Russian Scientific and Technical Conference “Science. Industry. Defense (NPO – 2022)”. April 20–22, 2022, Novosibirsk, Russia. Novosibirsk: NSTU, 2022. Vol. 2, pp. 31–34. (In Russian)

**Date of receipt:** April 4, 2023

**Publication decision:** April 10, 2023

### Contact information:

Elena Yu. POTANINA – Education Master (Novosibirsk State Technical University, Russian Federation, 630073, Novosibirsk, pr. Karla Marxa, 20), [potanina.2017@stud.nstu.ru](mailto:potanina.2017@stud.nstu.ru)

Vasiliy L. LITVINOV – Student (Novosibirsk State Technical University, Russian Federation, 630073, Novosibirsk, pr. Karla Marxa, 20), vasiliylitvinov1998@mail.ru

Anatoly V. GUSKOV – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department (Novosibirsk State Technical University, Russian Federation, 630073, Novosibirsk, pr. Karla Marxa, 20), a.guskov@corp.nstu.ru

Konstantin E. MILEVSKY – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor (Novosibirsk State Technical University, Russian Federation, 630073, Novosibirsk, pr. Karla Marxa, 20), milevskij@corp.nstu.ru