

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ МЕДНОЙ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ ПРИ ЕЕ РАСТЯЖЕНИИ

УДК 539.89+537.53

В. В. Сильвестров, Н. Н. Горшков

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева,
630090 Новосибирск

Данные по глубине внедрения вращающейся кумулятивной струи использованы для оценки прочности материала медной струи, формируемой из «низкой» конической оболочки с углом при вершине 120° , по отношению к действию центробежных сил. Полученное значение $0,07\text{--}0,15$ ГПа близко к величине статического предела текучести деформированной меди. Прочность материала, оцениваемая по длине фрагментов, на которые разрушается невращающаяся струя при разрыве за счет осевого градиента скорости, достигает $1\text{--}1,5$ ГПа при скорости деформирования $\approx 2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$.

При формировании кумулятивной струи материал облицовки в области кумулятивного узла подвергается действию высоких динамических давлений. На этой стадии, как правило, прочность материала струи незначительна и широко используется гидродинамическое приближение [1, 2]. Далее при формировании собственно струи ее материал за счет осевого градиента скорости подвергается механической деформации растяжения, достигающей сотен–тысячи процентов, со скоростью деформирования $\sim 10^4\text{--}10^5 \text{ с}^{-1}$. Ряд наблюдаемых эффектов (например, разрыв струи на отдельные кусочки конечной длины, устойчивость струи в определенных пределах к действию центробежных сил при вращении, отклонения скорости струи, а в отдельных случаях и формы струи от расчетных значений и профилей, полученных на основе гидродинамических численных расчетов) связывается с конечной прочностью материала струи [1, 3].

В процессе формирования струи в материале кумулятивной облицовки, с одной стороны, происходит накопление динамических дефектов, способствующих упрочнению материала, а с другой стороны, материал за счет деформирования нагревается до достаточно высоких температур, достигающих $400\text{--}700 \text{ }^\circ\text{C}$ [4, 5], что способствует отжигу дефектов и разупрочнению материала струи. Таким образом, сказать заранее о величине прочности материала струи на основе, например, статических значений прочности весьма трудно, и требуется экспериментальное подтверждение тех или иных имеющихся представлений.

В настоящее время существует, по-видимому, только два способа получения информации о прочности материала кумулятивной струи σ_j [3]. В первом используется факт разрушения струи на отдельные фрагменты за счет осевого градиента скорости. По величине градиента скорости и линейному размеру кусочков оценивается прочность материала струи. Простой метод анализа данных по разрушению струи предложен в [6], где для медной струи, формируемой из полусферической выемки в металле, получено значение $\sigma_j \approx 1,1$ ГПа при скорости деформирования $\dot{\epsilon} \sim (1\text{--}4) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. При численном

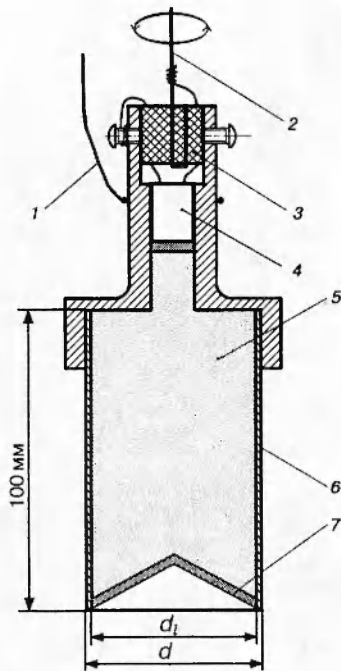


Рис. 1. Схема кумулятивного заряда для постановки опытов с вращением:

1 — скользящий контакт, 2 — подвеска из рояльной проволоки, 3 — изолятор, 4 — электродетонатор, 5 — ВВ, 6 — стальная оболочка, 7 — коническая облицовка

описании продольного расстояния между областями отдельных перетяжек в медной растягивающейся струе используются значения $\sigma_j = 0,2-0,3$ ГПа при $\dot{\epsilon} \sim 10^5$ с⁻¹ [3]. Более высокие значения прочности (1,4–2,4 ГПа) потребовались при численном моделировании формирования малоградиентных кумулятивных струй из меди и никеля [7].

Во втором способе используются данные, получаемые при исследовании вращающихся кумулятивных зарядов и позволяющие оценить прочность материала струи по отношению к действию центробежной силы. Например, в [3, 4] для вращающейся медной струи приведено значение $\sigma_j \simeq 0,1$ ГПа. Эта величина существенно ниже вышеуказанных, по-видимому, за счет более низкой (близкой к нулю) скорости деформирования: если не рассматривать утонения струи за счет осевого растяжения, материал струи в радиальном направлении практически покоится до разрушения струи.

Следует отметить работу [8], выполненную на высоком техническом уровне, в которой прочность медной струи оценивается путем сравнения расчетного профиля струи в области перетяжки на определенный момент времени с экспериментальным профилем, определенным в прецизионных опытах. Для струи, формируемой из полусферической оболочки диаметром 160 мм, выполненной из высококачественной безкислородной мелкозернистой меди типа ОФНС, получено значение $\sigma_j \simeq 0,1$ ГПа.

Все указанные результаты получены для различных конструкций кумулятивных зарядов. Основная цель этой работы — получить оценку прочности σ_j материала медной кумулятивной струи, образующейся при взрывном обжати одного и того же «низкого» конического лайнера, используя оба метода феноменологической оценки: по разрушению струи при вращении кумулятивного заряда и по разрыву струи на отдельные фрагменты за счет осевого градиента скорости.

Постановка экспериментов. Использовался цилиндрический заряд, заключенный в 1,5-миллиметровую стальную оболочку с внешним диаметром $d = 45$ мм (рис. 1). В качестве взрывчатого вещества (ВВ) применялся заряд из литого состава ТНТ/гексоген 50/50

Таблица 1

$\Delta V/\Delta l_j, 10^4 \text{ с}^{-1}$	1,8	1,7	2,0
$\delta_i \pm 1, \text{ мм}$	5,4	7,8	8,3
$\sigma_z, \text{ ГПа}$	0,9	1,2	1,5

с диаметром, равным диаметру лайнера $d_l = 42 \text{ мм}$, и длиной 100 мм . Конический кумулятивный лайнер изготавливался на токарном станке из отожженной технической меди М2; толщина облицовки 2 мм , угол при вершине 120° . При помощи импульсного рентгенографирования определены скорость и размеры отдельных элементов струи, характер ее разрушения при растяжении на поздних стадиях процесса и при вращении с угловой скоростью $N \leq 1000 \text{ об/с}$. Определялась глубина внедрения L кумулятивной струи в преграду из мягкой стали.

При взрывном деформировании «низкого» конуса формируется кумулятивная струя в так называемом режиме «обратной кумуляции» [9], при котором большая часть материала лайнера переходит в струю (до 80 % массы облицовки по оценкам на основе рентгенограмм). При этом образуется относительно низкоскоростная толстая струя, аналогичная струям, возникающим при схлопывании полусферических оболочек.

Характеристики невращающегося кумулятивного заряда. Скорости головной части кумулятивной струи, хвоста и песта равны соответственно $4,2 \pm 0,2$, $1,8 \pm 0,2$ и $1,5 \pm 0,1 \text{ км/с}$. При помощи свинцовых меток толщиной $0,1\text{--}0,2 \text{ мм}$, нанесенных на внутреннюю поверхность конуса [10], определено скоростное распределение $V(l_j)$ в этой струе в момент времени $t = 80 \text{ мкс}$ от подрыва (рис. 2); здесь l_j — расстояние от головы струи. В этот момент длина струи достигает 100 мм , распределение скорости близко к линейному и средний градиент скорости $\Delta V/l_j \approx 240 \text{ (м/с)/см}$. Струя имеет форму, близкую к вытянутому конусу с диаметром в голове $1,5 \text{ мм}$, а в хвосте $\sim 8 \text{ мм}$. Диаметр струи на полудлине $d_j \approx 3,5\text{--}4 \text{ мм}$.

К моменту $t = 110\text{--}120 \text{ мкс}$ струя растягивается до 140 мм , и с головы струи начинается ее разрушение на отдельные фрагменты длиной δ_i . В этот момент скорости головы и хвоста струи практически не отличаются от вышеуказанных, и оценка градиента скорости дает $\Delta V/l_j \approx 160 \text{ (м/с)/см}$. В трех опытах по рентгенограммам, полученным при $t = 140\text{--}150 \text{ мкс}$, были измерены скорость V_i и длина отдельных фрагментов δ_i для первой половины струи (от ее головы) (табл. 1). Таким образом, частично восстановлено скоростное распределение (на рис. 2 отрезки 2 — данные одного из опытов). Полученное значение градиента скорости $180 \pm 20 \text{ (м/с)/см}$ близко к оценке среднего градиента по разнице значений скоростей головы и хвоста струи и длине струи перед началом разрушения.

Границы отдельных фрагментов струи не несут следов утонения за счет перетяжек и направлены под углом к оси струи, что указывает на хрупкое разрушение «обратной» струи при растяжении. Линейный размер $8\text{--}12$ фрагментов, на которые струя разрушается, изменяется от 3 до 10 мм при среднем размере $\delta_i = 5\text{--}8 \text{ мм}$. Картина разрушения очень похожа на ту, которая реализуется при разрыве струй, формируемых из полусферической выемки в блоке металла в работе [6]. Отметим, что характер разрушения качественно отличается от наблюдаемого для струй из высококачественной меди, которые разрушаются из-за развития пластических перетяжек [8]. Связано это, по-видимому, с тем, что, как хорошо известно, физико-механические характеристики материала лайнера (размер

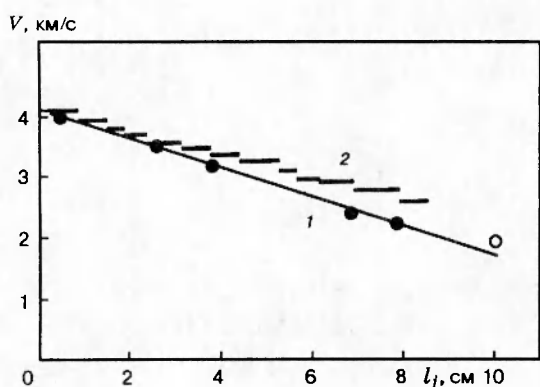


Рис. 2

Рис. 2. Распределение скорости вдоль струи:

1 — $t = 80$ мкс (темные точки — метод свинцовых меток, светлая — хвост струи); 2 — $t = 150$ мкс (струя «сложена» из отдельных фрагментов)

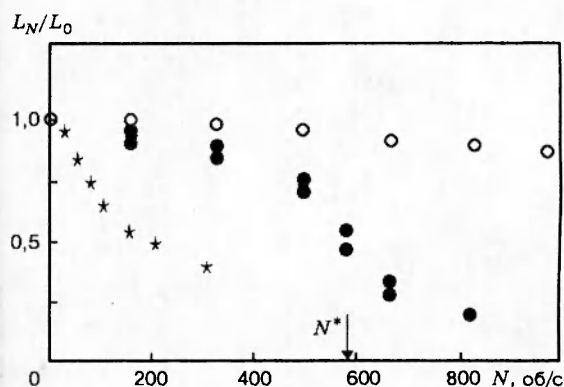


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость относительной глубины внедрения от скорости вращения:

темные точки — «низкий» конус из меди, светлые — из никеля; звездочки — «высокий» конус из стали [12]

зерна, примеси, характер термообработки материала) и способ изготовления облицовки существенно влияют на пластичность материала в кумулятивной струе и на характер ее разрушения при высокоскоростном растяжении (см., например, [11]).

Оптимальное фокусное расстояние для рассматриваемого заряда составляет $3d$. Максимальная глубина внедрения $L_0 = 145 \pm 5$ мм ($L_0/d = 3,2$). Диаметр практически цилиндрической каверны довольно велик (≈ 12 – 14 мм), причем входное отверстие пробойны пестом не «забито»: при «обратной кумуляции» за счет высокой скорости песта практически вся масса оболочки расходится при формировании пробойны. При увеличении фокусного расстояния до $6d$ относительная глубина внедрения уменьшается до $L/d = 2,8$. Отметим, что при использовании более мощного ВВ (сплава ТНТ/октоген 34/66) оптимальное фокусное расстояние увеличивается до $4d$, а глубина пробития достигает $L_0/d = 3,8$.

Влияние вращения. Все опыты с вращением выполнены при расстоянии заряд-преграда, равном $3d$. Зависимость относительной глубины внедрения L_N/L_0 от N приведена на рис. 3. В диапазоне $N \leq 500$ об/с значение L_N/L_0 уменьшается на 30%, причем существенно медленнее, чем для «высоких» конусов с углом при вершине 44° [12]. Диаметр пробойны при росте N последовательно уменьшается. При повышении скорости вращения до 600–900 об/с глубина пробития резко уменьшается ($\leq d$). Меняется и характер поражения на мишени: если при $N \leq 500$ об/с образуется одна глубокая пробойна, то при $N \geq 580$ об/с на поверхности мишени наблюдается несколько относительно неглубоких каверн, окружающих центральную.

На рентгенограммах «вращающейся» струи видно, что под действием центробежной силы процесс формирования струи значительно замедляется. В те же моменты времени ее длина меньше, чем для невращающейся струи, диаметр растёт, уменьшаются скорости головы и хвоста струи. Но при $N \leq 500$ об/с струя вплоть до взаимодействия с мишенью сохраняет свою целостность. При более высоких скоростях вращения струя разрушается на отдельные фрагменты с характерным размером от 1 до 3 мм и происходит интен-

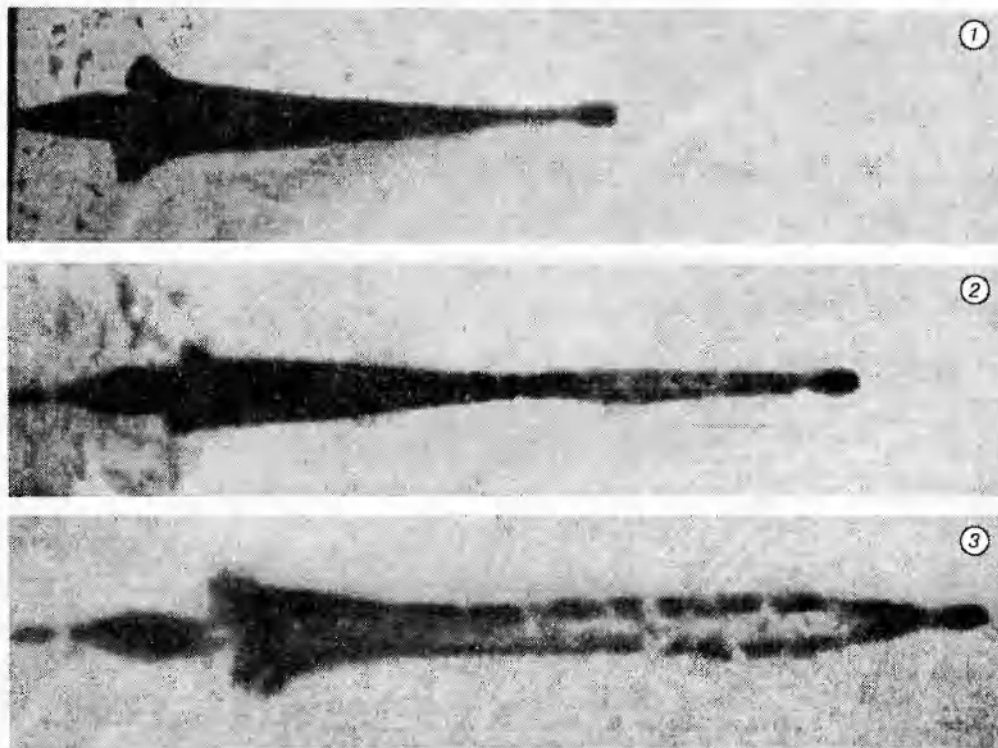


Рис. 4. Рентгенограммы вращающейся медной струи (670 об/с)
 t , мкс: 1 — 55, 2 — 70, 3 — 84

сивный разброс элементов струи в радиальном направлении со скоростью $\sim 120\text{--}170$ м/с (рис. 4). Критическая скорость вращения для рассматриваемого кумулятивного заряда, при которой происходит разрушение струи до взаимодействия с мишенью, составляет $N^* \simeq 580$ об/с. Разрушение струи, визуальное фиксируемое по рентгенограммам, происходит на 70–65-й микросекунде при $N \simeq 580\text{--}670$ об/с. В момент времени 60–55 мкс, предшествующий началу разрушения, струя представляет собой конус длиной 80–70 мм и диаметром основания $d_0 = 12 \pm 0,5$ мм. Диаметр струи, измеряемый на ее полудлине, составляет $d_j = (3,8\text{--}5,4) \pm 0,8$ мм.

Оценка прочности струи по величине критической скорости вращения. Предположим, что для вращающегося кумулятивного заряда при схлопывании оболочки вся масса лайнера переходит в струю, струя вращается как единое целое с угловой скоростью N_j и угловой момент импульса сохраняется. Эти предположения достаточно сильные, так как за счет внутреннего трения часть углового момента импульса теряется, и вполне вероятно, что отдельные части струи прокручиваются относительно друг друга. Однако учесть количественно эти эффекты не представляется возможным. Поэтому получаемые ниже оценки N_j завышены, а значения прочности материала струи, возможно, занижены. При этих предположениях

$$N_j = \frac{5}{3} \left(\frac{d_l}{d_0} \right)^2 N \simeq 20,4N. \quad (1)$$

Материал вращающейся кумулятивной струи находится в сложно-напряженном деформированном состоянии, определяемом совместным действием осевой силы растяжения,

Таблица 2

d_j , мм	σ_r , ГПа при N , об/с		
	500	580*	670
3,8	0,056	0,075	0,10
4,6	0,082	0,11	0,147
5,4	0,113	0,152	0,203

обусловленной наличием градиента скорости вдоль струи, и центробежной силы, величина которой зависит от скорости вращения и переменного диаметра струи. Для оценки механических напряжений пренебрежем действием осевой силы и будем считать струю *длинным твердым сплошным стержнем* с диаметром, равным диаметру струи на ее полудлине d_j . В этом случае максимальное напряжение (азимутальное или радиальное) составляет [13]

$$\sigma_{\max} = \frac{3 - 2\mu}{32(1 - \mu)} \rho N^{*2} d_j^2, \quad (2)$$

где $\mu = 0,34$ — коэффициент Пуассона для меди. Принимая $d_l = 42$ мм, $d_j = 3,8-5,4$ мм, получим оценку напряжения σ_r во вращающейся «цилиндрической» медной струе (табл. 2).

При критической скорости вращения величина напряжений составляет 0,07–0,15 ГПа. Логично предположить, что действующее напряжение близко к пределу прочности на разрыв для материала струи. Полученное значение совпадает с оценками прочности материала струи $\sigma_r \sim 0,1$ ГПа для вращающейся медной струи, формируемой из «высокого» конуса с углом при вершине 44° [3, 4], и для невращающейся медной струи, формируемой при схлопывании полусферической оболочки [8]. Во всех этих случаях прочность материала струи определяется по отношению к радиальной действующей силе при скорости деформирования, близкой к нулю, $\dot{\epsilon} \simeq 0$, точнее, много меньшей реализуемой при осевом растяжении струи.

Среднее значение прочности $\sigma_r \simeq 0,11$ ГПа близко к величине статического предела текучести $\sigma_y = 0,07$ ГПа для деформированной меди. Отсюда следует качественный вывод:

$$N^* \sim \sqrt{\sigma_y}, \quad (3)$$

и N^* будет увеличиваться при использовании более прочных материалов для лайнера. Это заключение подтверждается данными для зарядов с аналогичными кумулятивными облицовками из никеля с $\sigma_y \simeq 0,2$ ГПа, для которых значение критической скорости вращения существенно увеличивается (см. рис. 3): даже при скорости вращения до 970 об/с (предельная скорость вращения для используемого стенда) кумулятивная струя из никеля не разрушается, относительное уменьшение глубины каверны в стальной преграде составляет 17%, и на мишени наблюдается одна каверна. Для никеля критическая скорость вращения по оценке составляет по меньшей мере

$$N_{Ni}^* \sim \sqrt{\sigma_{y, Ni} / \sigma_{y, Cu}} N_{Cu}^* \simeq 1015 \text{ об/с}$$

(не учтен тот факт, что в случае никеля образуются более короткие и более толстые струи, $L_0 = 2,3d$). Эти данные подтверждают качественную зависимость (3) и косвенно — правильность оценки прочности медной струи по отношению к действию центробежной силы.

Оценка прочности струи по размеру и скорости фрагментов. Использовался метод оценки прочности материала кумулятивной струи σ_z , физические условия применения которого подробно проанализированы в [6]. Здесь отметим лишь, что метод основан на трех основных предположениях:

- при осевом растяжении струя разрывается на куски максимальной длины δ , при которой кинетическая энергия куска T в системе центра масс еще не превосходит работы его растяжения A до предела прочности, т. е. $T \leq A$;
- разрушение струи на отдельные фрагменты является хрупким, и работа деформирования материала струи до предела прочности определяется выражением $A = \sigma_z^2 / 2E\rho$, где ρ , E — плотность и модуль Юнга материала струи;
- вдоль струи существует линейное распределение скорости, а струя рвется на куски длиной δ примерно с одинаковой разностью скоростей на границах кусков Δv , очевидным образом связанной с градиентом скорости $\Delta v \simeq (dv/dl)\delta$.

При этих предположениях удельная кинетическая энергия продольного относительно движения частей отдельного куска определяется как $T = (\Delta v)^2 / 24$. Из приведенных выражений следует оценка прочности материала струи

$$\sigma_z \geq \sqrt{\frac{E\rho}{12}} \left(\frac{dv}{dl} \right) \bar{\delta}. \quad (4)$$

Прочность кумулятивной струи σ_z при ее растяжении в осевом направлении со скоростью деформирования $\dot{\epsilon} \sim 2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ (за счет градиента скорости струи по ее длине) оценивалась по среднему размеру кусочков δ , на которые струя рвется (в опытах без вращения), и по характерной величине градиента скорости вдоль струи. В последней строке табл. 1 приведены результаты такой оценки, получено существенно большее значение $\bar{\sigma}_z \sim 0,9\text{--}1,5 \text{ ГПа}$, близкое к аналогичным результатам для струи из полусферической полости в металле [6] и к данным для откольной прочности меди при близкой скорости деформирования [14].

Выводы. Ввиду ряда упрощающих предположений, оценки прочности материала кумулятивной медной струи верны с точностью до коэффициента порядка единицы. Однако разница в значениях σ ; при различных скоростях деформирования, реализуемых при радиальном и осевом растяжениях струи, достигает 10–20 раз. Это позволяет уверенно утверждать, что несмотря на то, что материал кумулятивного лайнера подвергается интенсивному пластическому деформированию в области кумулятивного узла и в материале происходит интенсивное накопление дислокаций, при растяжении наблюдается сильная зависимость прочности материала медной кумулятивной струи от скорости деформирования. С этой точки зрения струя проявляет свойства, характерные для твердого металла исходной кумулятивной облицовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Физика взрыва** / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. М.: Наука, 1975.
2. **Кинеловский С. А., Тришин Ю. А.** Физические аспекты кумуляции // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 5. С. 26–39.
3. **Walters W. P.** Fundamentals of Shaped Charges. High Velocity Impact Dynamics / J. F. Zukas (Ed.). New York — London: John Wiley and Sons Inc., 1990. Ch. 11.

4. Von Holle W. G., Trimble J. J. Shaped charge temperature measurement // Proc. 6th Symp. on Detonation. 1976. P. 691–699.
5. Пай В. В., Кузьмин Г. Е. Экспериментальное определение температуры металлической струи // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 3. С. 92–95.
6. Михайлов А. Н., Трофимов В. С. Определение прочности меди при распаде кумулятивной струи // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 5. С. 132–136.
7. Van Thiel M., Levatin J. A. Jet formation experiments and computational with a Lagrange code // J. Appl. Phys. 1980. V. 51, N 12. P. 6107–6114.
8. Karpp R. R., Hull L. M., Price M. I. A technique for estimating the strength of materials in stretching shaped-charge jets // 15th Int. Symp. on Ballistics, May 21–24, 1995: Proceedings. 1995. V. 2. P. 175–182.
9. Титов В. М. Возможные режимы гидродинамической кумуляции при схлопывании облицовки // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247, № 5. С. 1082–1084.
10. Горшков Н. Н. Применение гидродинамической теории для описания формирования струи при «обратной» кумуляции // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 5. С. 130–132.
11. Lichtenberger A. Ductile behavior of some materials in shaped charge jet // Metallurgical and Materials Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena (EXPLOMET '95). Elsevier Science, 1995. P. 463–470.
12. Singh S. Penetration of rotating shaped charges // J. Appl. Phys. 1960. V. 31, N 3. P. 156–159.
13. Справочник машиностроителя / Под ред. С. В. Серенсена. М.: ГНТИМЛ, 1962. Т. 3, гл. 7.
14. Paisley D. L., Warnes R. H., Kopp R. A. Laser-driven flat plates impacts to 100 GPa with sub-nanosecond pulse duration and resolution for material property studies // Shock Compression of Condensed Matter-1991. Woodbury, New York: AIP Press, 1992. P. 825–828.

Поступила в редакцию 5/II 1996 г.
