

УДК 623.4.082.6

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ С ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМИ ОБЛИЦОВКАМИ ДЕГРЕССИВНОЙ ТОЛЩИНЫ

С. В. Фёдоров¹, С. В. Ладов¹, Я. М. Никольская¹, А. Е. Курепин²,
К. С. Колобов²

¹Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва
sergfed-64@mail.ru

²ГосНИИмаш им. В. В. Бахирева, 606002 Дзержинск

Проведены экспериментальные исследования функционирования кумулятивных зарядов с медными полусферическими облицовками дегрессивной (уменьшающейся от вершины к основанию) толщины, определялись скорость головной части формируемых кумулятивных струй, глубина пробития ими наборной преграды из стальных дисков и размеры пробитых в дисках отверстий. Полученные в экспериментах данные по увеличению скорости и снижению массы головных участков кумулятивных струй, происходящих с увеличением разницы в толщинах полусферической облицовки в вершине и у основания, хорошо согласуются с результатами численного моделирования, проводившегося в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред. По результатам экспериментов зафиксировано усиление влияния на функционирование данных зарядов технологических погрешностей изготовления, устраняющее или значительно ограничивающее прирост пробивного действия. Для одного из вариантов облицовок дегрессивной толщины получено увеличение средней по двум опытам глубины пробития преграды на 7.5 % по отношению к облицовке постоянной толщины.

Ключевые слова: кумулятивный заряд, кумулятивная струя, полусферическая облицовка, дегрессивная толщина, пробивное действие, массово-скоростное распределение, энергоскоростное распределение, численное моделирование.

DOI 10.15372/FGV20200512

ВВЕДЕНИЕ

Для формирования металлических кумулятивных струй (КС) используют облицовки в основном конической или полусферической формы [1, 2]. Высокие конические облицовки (угол раствора в пределах 90°) часто имеют прогрессивную (возрастающую от вершины к основанию) толщину, что позволяет увеличить скорость головной части формируемой ими КС и, соответственно, пробивное действие струи. Кумулятивные заряды с медными высокими коническими облицовками прогрессивной толщины в случае прецизионной технологии их изготовления обеспечивают глубину пробития высокопрочной стальной преграды до 10 диа-

метров заряда при скорости головной части КС на уровне 10 км/с [1].

В случае высокой конической облицовки формирование КС происходит в результате последовательного схлопывания элементов облицовки на ее оси от вершины к основанию [3, 4]. При взрывном обжати полусферических облицовок реализуется иной механизм струеобразования, связанный с одновременным участием в этом процессе материала сразу всей облицовки и схожий с формированием КС из низких конических облицовок при углах раствора $110 \div 140^\circ$ [5]. По скорости головной части кумулятивные струи, формируемые полусферическими облицовками постоянной толщины, примерно вдвое уступают струям из высоких конических облицовок прогрессивной толщины [6, 7]. Примерно в таком же соотношении находятся и глубины пробития преграды указанными зарядами при одном и том же диаметре зарядов. При этом заряды с полусферическими облицовками имеют преимущество по

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках базовой части государственного задания по разделу «Инициативные научные проекты» (код проекта 9.5330.2017 БЧ).

© Фёдоров С. В., Ладов С. В., Никольская Я. М.,
Курепин А. Е., Колобов К. С., 2020.

диаметру пробиваемого в преграде отверстия, чем и определяется область их применения: они используются в тех случаях, когда необходимо пробить преграду относительно небольшой толщины с образованием пробоины возможно большего диаметра [8].

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Результаты численного моделирования [9, 10] свидетельствуют, что придание полусферической облицовке дегрессивной (уменьшающейся от вершины к основанию) толщины приводит к увеличению скорости формируемой КС. Причиной такого увеличения является усиление эффекта сферической кумуляции, заключающегося в резком перераспределении кинетической энергии материала во внутренний слой облицовки при ее сферически-симметричном обжати [11]. Дегрессивность толщины как раз и обеспечивает условия для обжатия полусферической облицовки, более близкого к сферически-симметричному, вследствие выравнивания скорости метания элементов облицовки по ее образующей.

Как показывают расчеты, скорости головной части КС из полусферических облицовок дегрессивной толщины могут не только достичь уровня, обеспечиваемого высокими коническими облицовками, но и превзойти его. Если для конических облицовок предельно возможная скорость компактной (недиспергированной) КС ограничивается условием нормального струеобразования [12, 13] (для формирования компактной КС необходимо, чтобы скорость движения материала облицовки к точке контакта на оси симметрии в системе отсчета, связанной с этой точкой, была дозвуковой), то для полусферических облицовок указанное ограничение должно сниматься. Как уже отмечалось, механизм формирования КС из полусферических облицовок отличен от механизма, реализующегося при обжати высоких конических, и не связан с соударением элементов облицовки на ее оси. Материал вершинной части полусферической облицовки под действием давления продуктов детонации уже изначально приобретает движение вдоль оси и дополнительно ускоряется натекающим на него с боков материалом периферийной части облицовки. В пользу возможности формирования из полусферических облицовок дегрессивной толщины компактных КС со скоростью, большей, чем

в случае высоких конических облицовок, свидетельствуют результаты численных расчетов [9], с использованием в качестве материала облицовки модельной среды, не способной оказывать сопротивление всестороннему растяжению.

Платой за увеличение скорости КС при переходе от постоянной к дегрессивной толщине полусферической облицовки является уменьшение массы струи, особенно ее высокоскоростной головной части. Важную информацию о свойствах КС дают массово-скоростные распределения, характеризующие массу участков струи с различной скоростью [14]. В работах [9, 15] на основании данных численного моделирования проведен анализ массово-скоростных распределений для КС, формируемых различными облицовками. Он показал, что в случае полусферы с дегрессивной разнотолщинностью, обеспечивающей примерно такую же скорость «головы» струи, что и конус с углом раствора 60° прогрессивной толщины, плотность массово-скоростного распределения для головного участка КС (характеризующая массу струи, приходящуюся на единичный интервал скоростей) оказывается втрое ниже значения, полученного для конической облицовки, при одном и том же диаметре заряда. Это при том, что КС из полусферы постоянной толщины по плотности массово-скоростного распределения в головной части более чем в десять раз превосходит КС из рассматриваемого конуса. Преимущество в плотности массово-скоростного распределения КС из конуса с углом раствора 60° над КС с той же скоростью «головы» из полусферы дегрессивной толщины сохраняется для участков струй со скоростями выше 7 км/с. В диапазоне скоростей $3 \div 7$ км/с более массивной была, напротив, КС из полусферической облицовки дегрессивной толщины. Что касается полной массы сравниваемых струй, то она приблизительно одинакова и меньше примерно на 30 % массы КС из полусферической облицовки постоянной толщины.

Малая «массивность» головных участков КС должна отрицательно сказываться на глубине пробития преграды струей, так как ведет к уменьшению диаметра входного участка пробоины [16]. Это снижает вероятность беспрепятственного движения по пробитому каналу последующих участков КС, которые вследствие технологических погрешностей изготов-

ления кумулятивных зарядов в реальной ситуации всегда в той или иной степени отклоняются от строго соосного следования друг за другом [17]. Отрицательное влияние малого входного диаметра пробойны на глубину проникновения КС усиливается с увеличением расстояния от заряда до преграды, так как в этом случае входящие в пробойну элементы КС, на которые она уже может успеть распасться после стадии инерционного удлинения [18–20], сместятся на большее расстояние от оси заряда вследствие бокового дрейфа [21, 22]. В случае же «задевания» стенок пробойны будет происходить преждевременное «срабатывание» элементов КС без вклада в общую глубину проникания струи [23, 24]. По отмеченным причинам пробивное действие зарядов с полусферическими облицовками дегрессивной толщины должно сильно зависеть от точности их изготовления [25].

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проверки расчетных данных [9, 15] по формированию КС из полусферических облицовок дегрессивной толщины были проведены экспериментальные исследования функционирования кумулятивных зарядов с подобными облицовками. Схема зарядов представлена на рис. 1. Макет включал в себя заряд взрывчатого вещества (ВВ) 5 цилиндрической формы диаметром $d_0 = 90$ мм и высотой $h_0 = 144$ мм в тонкостенном корпусе 4 из стеклотекстолита (с толщиной стенки 1 мм). В качестве ВВ использовался высокобризантный состав на основе октогена, масса ВВ составляла 1.53 кг. С торцов заряд ВВ был закрыт верхней 3 (из алюминиевого сплава АМг-6) и нижней 7 (из текстолита) торцевыми крышками. В верхней торцевой крышке имелось углубление цилиндрической формы для установки дополнительной шашки 2 из флегматизированного гексогена диаметром 20 мм и высотой 20 мм, массой около 18 г, с гнездом под электродетонатор 1. Макеты зарядов комплектовались полусферическими облицовками 6 из меди марки М1 пяти вариантов, различавшихся соотношением толщин δ_1/δ_2 в вершине и у основания (рис. 2). Наружная поверхность облицовок всех вариантов была полусферической с радиусом $R_s = 35$ мм. Толщина в вершине во всех случаях составляла $\delta_1 = 2.5$ мм, толщина же у основания δ_2 принимала значения 2.5, 2.0,

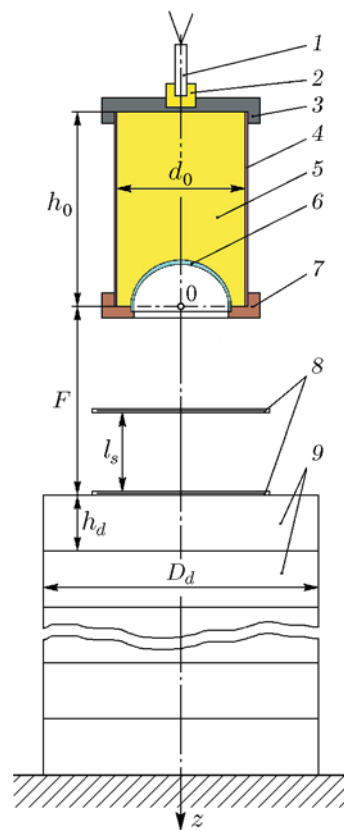


Рис. 1. Схема экспериментов с макетами кумулятивных зарядов:

1 — электродетонатор, 2 — дополнительная шашка ВВ, 3 — верхняя торцевая крышка, 4 — корпус, 5 — заряд ВВ, 6 — полусферическая кумулятивная облицовка, 7 — нижняя торцевая крышка, 8 — электроконтактные датчики, 9 — стальные диски наборной преграды

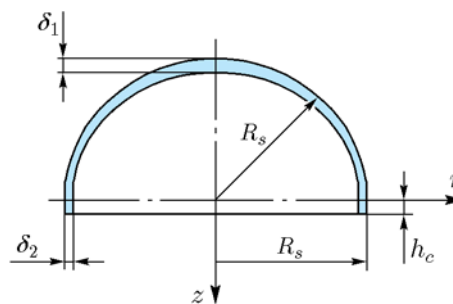


Рис. 2. Схема полусферических кумулятивных облицовок

1.5, 1.0 и 0.7 мм. Внутренняя поверхность облицовок в вариантах с дегрессивной толщиной (при $\delta_2 < \delta_1$) представляла собой поверхность полуэллипсоида вращения, слегка сплюснутого вдоль оси симметрии, с экваториальной полу-

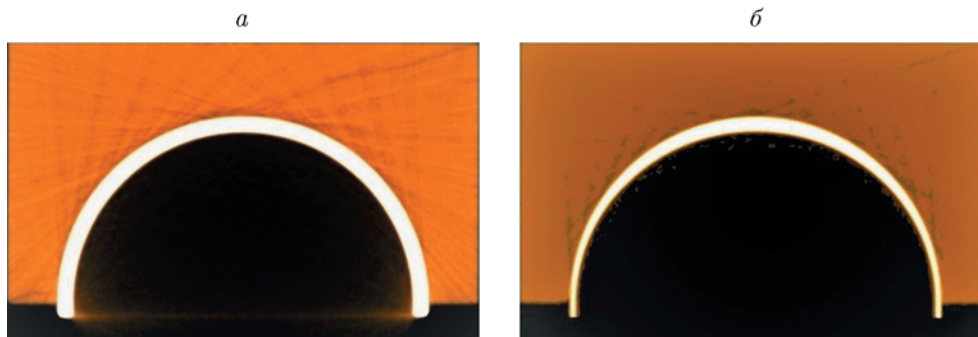


Рис. 3. Томограммы нижних шашек ВВ с полусферической облицовкой постоянной толщины 2.5 мм (а) и с облицовкой с соотношением толщин в вершине и у основания 2.5 мм/0.7 мм (б) в продольных вдоль оси заряда сечениях

осью $R_s - \delta_2$ и полярной полуосью $R_s - \delta_1$. В основании у всех вариантов облицовок имелась короткая цилиндрическая часть высотой $h_c = 2.5$ мм с внешним радиусом, равным радиусу R_s внешней полусферической поверхности, и с толщиной δ_2 (см. рис. 2). Она использовалась для фиксации облицовок в нижней торцевой крышке макета заряда, имевшей соответствующую цилиндрическую выемку (см. рис. 1).

Облицовки вытачивались из медных кругов диаметром 80 мм и высотой 50 мм на токарном станке с числовым программным управлением. Соосность внутренней и наружной поверхностей облицовок контролировалась по разности толщин стенки в цилиндрической части облицовки в различных продольных сечениях. Возможности используемого оборудования обеспечивали разброс этой толщины в пределах 0.03 мм. Снаряжение макетов кумулятивных зарядов осуществлялось раздельно-шашечным методом посредством соединения лаком четырех шашек ВВ, полученных холодным прессованием. Нижняя шашка имела кумулятивную выемку полусферической формы, в которую также на лаке клеивалась облицовка. Отсутствие зазоров между ВВ и облицовкой контролировалось при помощи рентгеновской томографии. Примеры изображений, полученных при рентгенографическом контроле, приведены на рис. 3.

В экспериментах определялись скорость головной части КС и глубина пробития стальной преграды. Преграда была наборной и состояла из отдельных кругов 9 из стали марки 10 диаметром $D_d \approx 200$ мм и толщиной $h_d = 40$ мм (см. рис. 1). Зазор между торцевыми поверхностями двух соседних кругов не

превышал 1 мм. Расстояние от основания заряда ВВ с кумулятивной выемкой до лицевой поверхности преграды составляло $F = 230$ мм. Вертикальность и соосность установки макетов кумулятивного заряда и преграды проверялись по отвесу или пузырьковому уровню с точностью $\pm 1^\circ$. Определение скорости головной части КС осуществлялось с помощью электроконтактных датчиков 8, один из которых размещался на лицевой поверхности преграды, а другой был удален от нее на расстояние $l_s = 105$ мм (см. рис. 1). Для регистрации сигналов с электроконтактных датчиков использовался цифровой осциллограф Testronix.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Перед проведением экспериментов было выполнено численное моделирование формирования КС из всех пяти вариантов полусферических облицовок в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред в постановке и по методу, изложенным в [9, 26]. На рис. 4 формирование КС проиллюстрировано полями плотностей материала и распределениями его осевой скорости v_z вдоль оси симметрии (осевая координата z отсчитывается от основания заряда ВВ с кумулятивной выемкой, см. рис. 1). Приведенные картины струйных течений соответствуют указанным на них моментам времени от момента инициирования заряда. Видно, что с увеличением разницы толщин облицовки δ_1 и δ_2 скорость формируемой КС возрастает, а диаметр ее головного участка уменьшается. При этом распределения скорости v_z практически по всей длине КС во всех

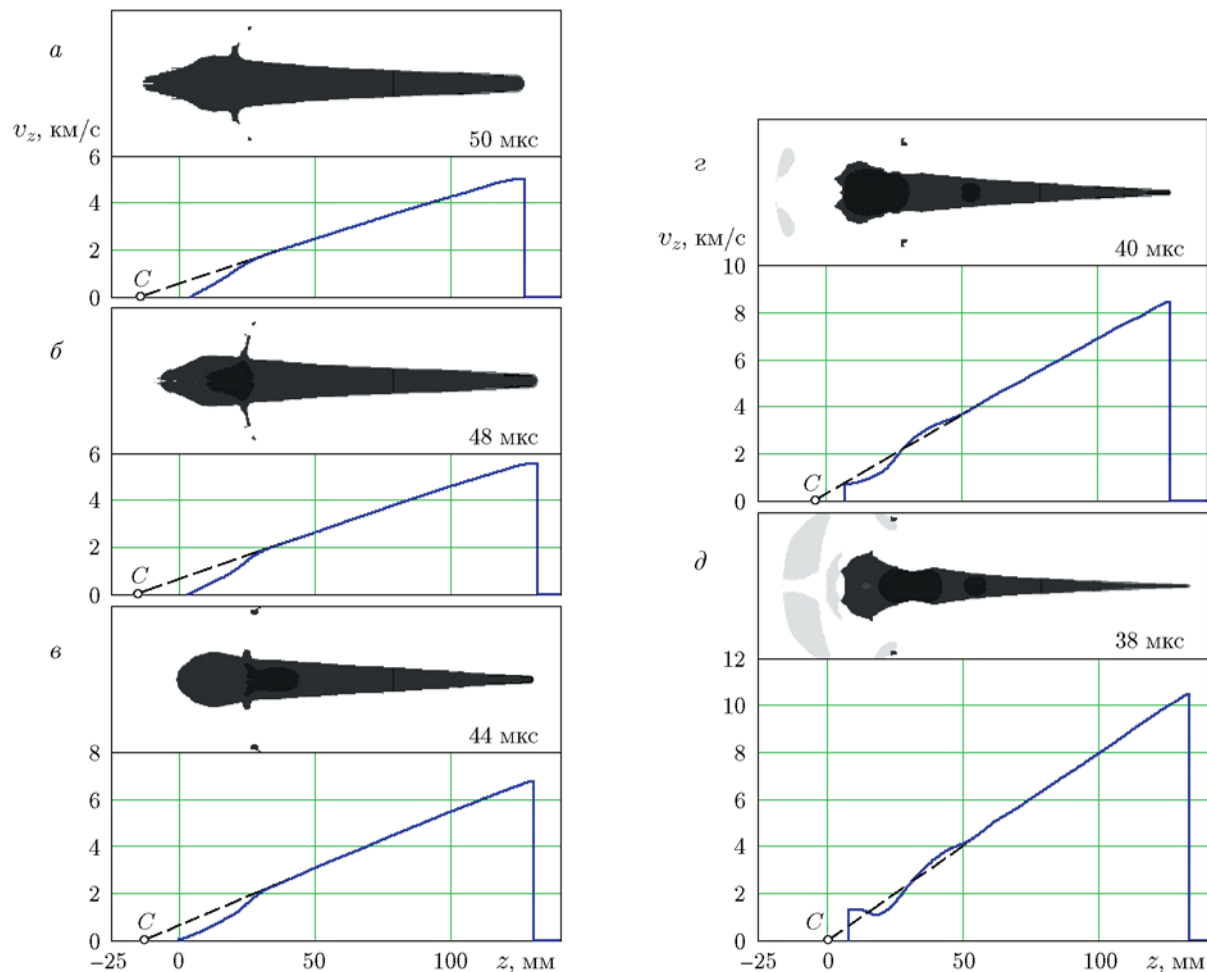


Рис. 4. Формирование кумулятивных струй из полусферических облицовок с различным соотношением толщин в вершине и у основания по результатам численного моделирования:

a — 2.5 мм/2.5 мм, *б* — 2.5 мм/2.0 мм, *в* — 2.5 мм/1.5 мм, *г* — 2.5 мм/1.0 мм, *д* — 2.5 мм/0.7 мм

случаях являются линейными. Очевидно, линейными они останутся и в дальнейшем процессе инерционного удлинения струй.

Если обозначить скорость головной части КС v_{jh} , то скоростным распределениям для КС в моменты времени, более поздние по отношению к указанным на рис. 4, будут отвечать прямые линии, проведенные через точку со значением скорости v_{jh} и координатой z_{jh} , соответствующей текущему положению «головы» струи, и фиктивную неподвижную точку на оси z , в которой $v_z = 0$. Последней на скоростных распределениях на рис. 4 соответствует точка C , являющаяся точкой пересечения с осью z воображаемых продолжений линейных участков графиков $v_z(z)$ (продолжения даны на рис. 4 штриховыми линиями). При линейном распре-

делении скорости ее градиент $\dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z}$, характеризующий скорость деформирования КС, остается постоянным по длине струи в процессе ее инерционного удлинения. С использованием значения z_C , соответствующего координате точки C , текущее значение $\dot{\epsilon}_z$ в зависимости от текущей координаты «головы» КС z_{jh} может быть вычислено как

$$\dot{\epsilon}_z = \frac{v_{jh}}{z_{jh} - z_C}. \quad (1)$$

Записанное соотношение для определения скорости деформирования КС $\dot{\epsilon}_z$ потребуется в дальнейшем при анализе экспериментальных данных.

По результатам численного моделирования были рассчитаны также плотности массово-скоростного q и энергоскоростного $w =$

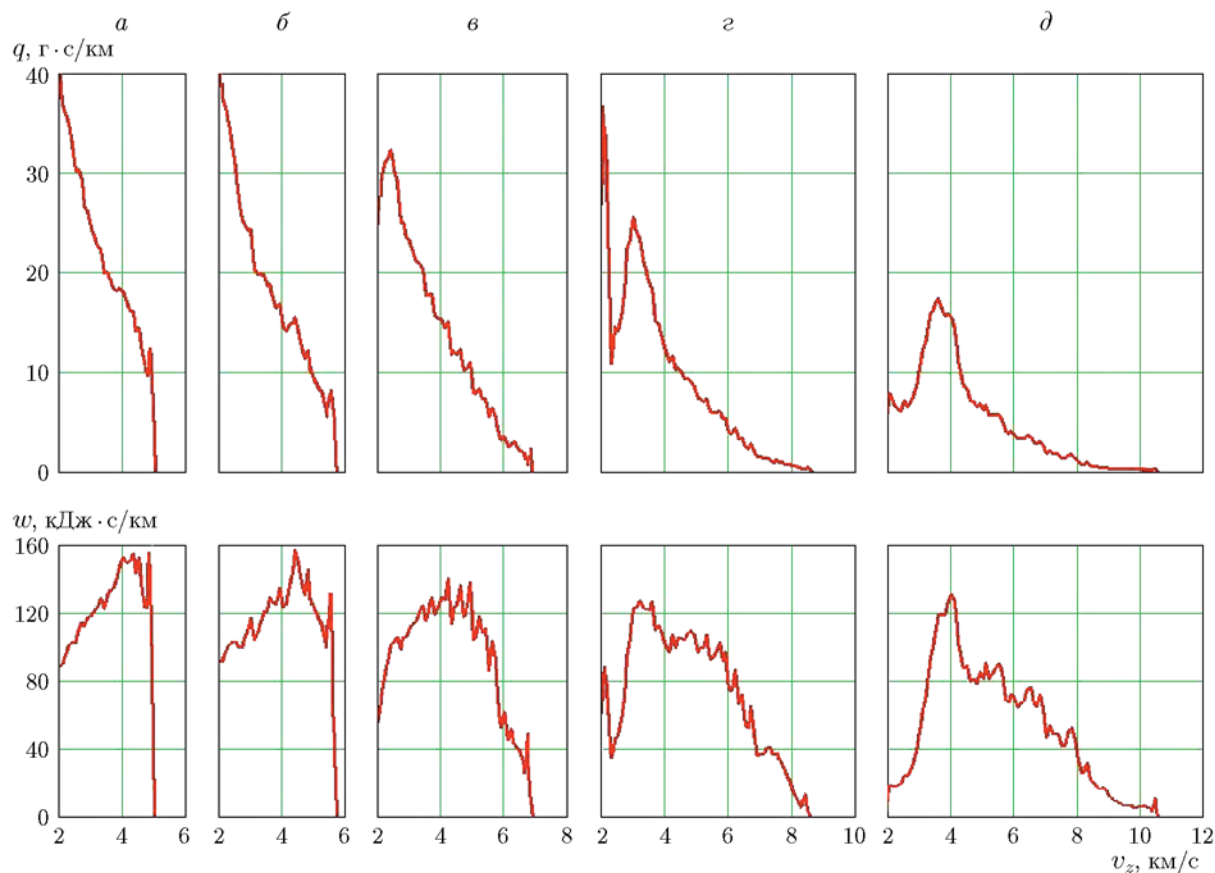


Рис. 5. Плотности массово-скоростного и энергоскоростного распределений для кумулятивных струй из полусферических облицовок с различным соотношением толщин в вершине и у основания по результатам численного моделирования:

a — 2.5 мм/2.5 мм, *б* — 2.5 мм/2.0 мм, *в* — 2.5 мм/1.5 мм, *г* — 2.5 мм/1.0 мм, *д* — 2.5 мм/0.7 мм

$0.5qv_z^2$ распределений, характеризующие соответственно массу и кинетическую энергию струи, приходящиеся на единичный интервал скоростей. Зависимости q и w от скорости участка струи v_z для КС, сформированных из облицовок с различным соотношением толщин δ_1/δ_2 в вершине и у основания, приведены на рис. 5 (при определении значений q и w рассматривались участки КС со скоростью выше 2 км/с). Видно, как с увеличением разницы толщин облицовки δ_1 и δ_2 резко снижаются плотности массово-скоростного и энергоскоростного распределений для головного участка КС.

Что касается изменения плотности массово-скоростного распределения q по длине КС, то в случаях облицовки постоянной толщины 2.5 мм/2.5 мм и облицовки с соотношением толщин $\delta_1/\delta_2 = 2.5$ мм/2.0 мм значение q монотонно возрастает от «головы»

к «хвосту» КС (рис. 5, *a, б*). При $\delta_1/\delta_2 = 2.5$ мм/1.5 мм, 2.5 мм/1.0 мм и 2.5 мм/0.7 мм на кривых $q(v_z)$ появляются локальные максимумы, соответствующие скоростям 2.5, 3.0 и 3.5 км/с (рис. 5, *в–д*).

Отметим, что плотности энергоскоростных распределений $w(v_z)$, приведенные на рис. 5, для КС из всех вариантов облицовок имеют локальные максимумы в диапазоне скоростей 3.5 ÷ 4.5 км/с. Для КС из облицовки постоянной толщины 2.5 мм/2.5 мм максимальной кинетической энергией обладают участки со скоростью ≈ 4.5 км/с при скорости «головы» струи ≈ 5.1 км/с (рис. 5, *a*). При переходе к облицовкам дегрессивной толщины с увеличением их разнотолщинности скорость головной части КС возрастает, вследствие чего максимум кинетической энергии отодвигается в сторону хвостовых участков струи тем значительнее, чем больше различие толщин δ_1 и δ_2 . Так, в

Таблица 1

Расчетные характеристики кумулятивных струй,
формируемых из различных полусферических облицовок

δ_1/δ_2 , мм/мм	M_l , г	M_j , г	M_j/M_l	W_j , кДж	v_{jh} , м/с	q_{jh} , г·с/км
2.5/2.5	161	68	0.42	392	5 100	12.0
2.5/2.0	142	68	0.48	418	5 700	8.3
2.5/1.5	121	67	0.52	460	6 700	2.3
2.5/1.0	100	62	0.62	499	8 500	0.4
2.5/0.7	88	47	0.53	458	10 600	0.2

Таблица 2

Экспериментальные скорости головной части кумулятивных струй и глубины пробития
стальной преграды для кумулятивных зарядов с различными полусферическими облицовками

δ_1/δ_2 , мм/мм	v_{jh} , м/с			L , мм		
	опыт 1	опыт 2	среднее значение	опыт 1	опыт 2	среднее значение
2.5/2.5	4 910	4 890	4 900	321	334	327.5
2.5/2.0	5 200	5 250	5 225	313	331	322.0
2.5/1.5	6 440	6 350	6 395	319	318	318.5
2.5/1.0	7 900	9 030	8 465	363	341	352.0
2.5/0.7	11 700	10 200	10 950	290	215	252.5

случае облицовки с наибольшей разнотолщиной 2.5 мм/0.7 мм скорость головной части КС примерно 10.6 км/с, а плотность энергоскоростного распределения максимальна для участка со скоростью около 4 км/с (рис. 5, д).

Результаты численного моделирования обобщены в табл. 1, где для всех рассматриваемых вариантов облицовок приведены масса облицовки M_l (при ее определении не учитывалась масса цилиндрического буртика высотой h_c , имевшего технологическое назначение, см. рис. 2), масса сформированной КС M_j , отношение масс струи и облицовки M_j/M_l , кинетическая энергия КС W_j (при определении значений M_j и W_j учитывались только участки КС со скоростью выше 2 км/с), скорость головной части КС v_{jh} и плотность массово-скоростного распределения в «голове» струи q_{jh} . Видно, что при уменьшении толщины облицовки в основании δ_2 от 2.5 до 1.0 мм происходит увеличение как относительного выхода материала облицовки в струю M_j/M_l , так и кинетической энергии струи W_j . Дальнейшее же уменьшение δ_2 от 1.0 до 0.7 мм приводит к снижению обоих этих параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Было проведено десять опытов — по два опыта с каждым вариантом облицовки. В табл. 2 представлены результаты по скорости головной части формируемых КС v_{jh} (погрешность определения скорости не превышала нескольких процентов) и общей глубине пробития наборной стальной преграды L . Из сравнения данных табл. 1 и 2 по скорости v_{jh} видно, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с полученными в экспериментах (максимальное расхождение между средними по двум опытам и расчетными значениями v_{jh} составило $\approx 9\%$).

Несмотря на существенное возрастание скорости головной части КС из полусферических облицовок дегрессивной толщины, ощутимого прироста в глубине пробития стальной преграды кумулятивными зарядами с такими облицовками в экспериментах не зафиксировано. Напротив, средняя по двум опытам глубина пробития в случае облицовок с соотношением толщин 2.5 мм/2.0 мм, 2.5 мм/1.5 мм и 2.5 мм/0.7 мм оказалась ниже, чем в случае облицовки постоянной толщины 2.5 мм/2.5 мм

(см. табл. 2). Если при $\delta_1/\delta_2 = 2.5 \text{ мм}/2.0 \text{ мм}$ и $2.5 \text{ мм}/1.5 \text{ мм}$ снижение было незначительным (менее 3 %) и фактически укладывалось в диапазон естественного разброса глубины пробития, то при $\delta_1/\delta_2 = 2.5 \text{ мм}/0.7 \text{ мм}$ оно составило почти 23 %.

Прирост глубины пробития был получен только в случае облицовки с соотношением толщин $2.5 \text{ мм}/1.0 \text{ мм}$ (см. табл. 2): по результатам двух опытов превышение составило 7.5 % по сравнению с облицовкой постоянной толщины $2.5 \text{ мм}/2.5 \text{ мм}$. Этот факт хорошо коррелирует с данными проведенного численного моделирования, согласно которым КС именно из облицовки $2.5 \text{ мм}/1.0 \text{ мм}$ обладает наибольшей кинетической энергией (см. табл. 1).

Полученные в экспериментах результаты по глубине пробития макетов кумулятивных зарядов с полусферическими облицовками дегрессивной толщины подтверждают высказывавшееся выше предположение об усилении влияния на эти результаты технологических погрешностей изготовления заряда ВВ и облицовки вследствие резкого снижения «массивности» (диаметра) головного участка формируемой КС, сопровождающего увеличение его скорости. Известно, что влияние технологических погрешностей проявляется не только через снижение глубины пробития заряда, но и через увеличение ее разброса [1, 21]. В выполненной серии экспериментов (по два опыта на каждый вариант облицовки) максимальное различие глубин пробития зафиксировано в случае облицовок с наибольшей степенью дегрессивности толщины: 6.3 % от среднего значения при $\delta_1/\delta_2 = 2.5 \text{ мм}/1.0 \text{ мм}$ и почти 30 % при $\delta_1/\delta_2 = 2.5 \text{ мм}/0.7 \text{ мм}$ (см. табл. 2). На рис. 6, где приведен вид входного отверстия от КС в верхнем диске наборной преграды (см. рис. 1) в опыте 2 с облицовкой разнотолщинностью $2.5 \text{ мм}/0.7 \text{ мм}$ (см. табл. 2), четко зафиксировано обусловленное неточностями изготовления макета кумулятивного заряда «непопадание» хвостовых участков струи в канал, пробитый головным участком.

Усиление влияния технологических погрешностей при увеличении степени дегрессивности толщины полусферической облицовки отразилось также на разбросе в экспериментах скоростей головной части КС: 1 130 и 1 500 м/с для облицовок с соотношением толщин соответственно $2.5 \text{ мм}/1.0 \text{ мм}$ и $2.5 \text{ мм}/0.7 \text{ мм}$ по



Рис. 6. Входное отверстие от кумулятивной струи в верхнем диске наборной преграды, полученное в одном из опытов при разнотолщинности полусферической облицовки $2.5 \text{ мм}/0.7 \text{ мм}$

результатам двух опытов (см. табл. 2), что значительно выше, чем в опытах с остальными вариантами облицовок, в которых разброс скорости «головы» струи не превышал 100 м/с. Как уже отмечалось, увеличение скорости КС, формируемых полусферическими облицовками дегрессивной толщины, происходит за счет того, что их обжатие приближается к сферически-симметричному, в результате чего усиливается эффект сферической кумуляции. Чем ближе процесс обжатия к сферически-симметричному, тем «чувствительнее» он становится к асимметриям, вносимым неточностями изготовления облицовки и заряда ВВ. Этим и объясняется увеличение разброса скоростей головной части КС из облицовок с высокой степенью дегрессивности толщины.

Следует отметить, что возможности использовавшегося технологического оборудования не позволяли обеспечить точность изготовления макетов кумулятивных зарядов с полусферическими облицовками на уровне, соответствующем прецизионным зарядам. Так, например, как отмечалось выше, допуск на разнотолщинность полусферических облицовок в перпендикулярных их оси сечениях составлял 0.03 мм, в то время как для прецизионных зарядов с коническими облицовками он в $2 \div 3$ раза ниже [1]. Очевидно, переход к прецизионной технологии изготовления кумулятивных зарядов с полусферическими облицовками дегрессивной толщины может дать более ощути-

Таблица 3

Диаметры пробития стальных дисков наборной преграды кумулятивными зарядами с различными полусферическими облицовками и рассчитанные на их основе массовые характеристики головных частей кумулятивных струй

δ_1/δ_2 , мм/мм	d_{pi} , мм							μ_{jh} , 10^{-3} г/мм	d_{jh} , мм	q_{jh} , г·с/км
	1	3	5	6	7	8	9			
2.5/2.5	40	30.5	16	14.5	14.5	13.5	13	334	6.9	15.6
2.5/2.0	37	26	15	16	15.5	13	13.5	255	6.0	11.3
2.5/1.5	26	24.5	16	16.5	12.5	13	—	84.4	3.5	3.1
2.5/1.0	18.5	22.5	21.5	21.5	22.5	14	10	21.1	1.7	0.54
2.5/0.7	14	19	23	23.5	13.5	10	—	7.2	1.0	0.14

мый прирост их пробивного действия, обусловленный возрастанием скорости головной части КС.

Был проведен анализ поперечных размеров отверстий, пробитых КС в дисках наборной преграды. Диаметр пробойны в преграде зависит от кинетической энергии элементов КС, участвовавших в ее образовании [1]. Поэтому по изменению глубины пробойны можно судить о распределении кинетической энергии по длине струи. Диаметры входных отверстий d_{pi} в дисках преграды $i = 1, 3, 5-9$, пронумерованных последовательно начиная с верхнего (см. рис. 1), пробитых КС из облицовок с различной толщиной в вершине и у основания в одном из двух опытов, представлены в табл. 3. При отклонении формы отверстий от цилиндрической в качестве диаметра использовалось среднее значение между максимальным и минимальным поперечными размерами отверстия, измеренными во взаимно перпендикулярных направлениях. Приведенные в табл. 3 данные соответствуют следующим номерам опытов в табл. 2: опыт 2 для $\delta_1/\delta_2 = 2.5$ мм/1.5 мм и 2.5 мм/1.0 мм, опыт 1 для всех остальных соотношений δ_1/δ_2 . Для этих же опытов на рис. 7 представлен вид входных отверстий от КС в 1, 3, 5, 6 и 7-м дисках преграды.

Из табл. 3 и рис. 7 видно, как диаметр входного отверстия в первом диске преграды монотонно снижается с увеличением различия толщин δ_1 и δ_2 , что позволяет отследить происходящее при этом уменьшение кинетической энергии головного участка КС, которое было зафиксировано ранее в ходе численного моделирования (см. рис. 5). Сопоставляется с результатами расчетов и распределение размеров про-

битых отверстий по последующим дискам преграды. Для КС из облицовки постоянной толщины 2.5 мм/2.5 мм и с соотношением толщин 2.5 мм/2.0 мм максимум расчетной плотности энергоскоростного распределения лежит в области головных участков (см. рис. 5, а, б). Соответственно, при пробитии такими КС наборной преграды максимальный размер имеет входное отверстие в первом диске, а в последующих дисках размеры монотонно уменьшаются с ростом номера диска i , т. е. с удалением дисков от лицевой поверхности преграды вглубь (см. табл. 3, рис. 7, а, б). При переходе к облицовкам большей разнотолщинности наибольший диаметр пробойны приходится уже не на первый, а на один из находящихся за ним дисков, так как у формируемых при этом КС, вследствие повышения скорости их головной части, максимум кинетической энергии оказывается смещенным в сторону хвостовых участков струи (см. рис. 5, в-д). Если для облицовки с разнотолщиностью 2.5 мм/1.5 мм отверстие в третьем диске преграды примерно сравнивается по входному диаметру с отверстием в первом, то в случае облицовок с соотношением толщин 2.5 мм/1.0 мм и 2.5 мм/0.7 мм диаметр пробойны в третьем диске больше, чем в первом (см. табл. 3, рис. 7, в-д). При разнотолщинности облицовки 2.5 мм/1.0 мм размер входных отверстий от КС примерно одинаков в дисках с третьего по седьмой, а при 2.5 мм/0.7 мм максимальный диаметр пробойны приходится на шестой диск. Характерно, что в отличие от первого диска размер входного отверстия от КС в пятом и шестом дисках не уменьшается монотонно с увеличением различия толщин облицовки, а, напротив, принимает максимальные значения в случае облицовок с наибольшей



Рис. 7. Входные отверстия в 1, 3, 5, 6 и 7-м (сверху вниз) стальных дисках наборной преграды, полученные от кумулятивных струй из полусферических облицовок с различным соотношением толщин в вершине и у основания:

а — 2.5 мм/2.5 мм, *б* — 2.5 мм/2.0 мм, *в* — 2.5 мм/1.5 мм, *г* — 2.5 мм/1.0 мм, *д* — 2.5 мм/0.7 мм

дегрессивностью толщины (2.5 мм/1.0 мм и 2.5 мм/0.7 мм). В седьмом диске преграды контрастно выделяется по размеру отверстие, пробитое КС из облицовки с соотношением толщин 2.5 мм/1.0 мм (см. табл. 3, рис. 7,г).

Заслуживает внимания еще одна интересная особенность воздействия на преграду зарядов с облицовками, имеющими наибольшую разницу толщин δ_1 и δ_2 (2.5 мм/1.0 мм и

2.5 мм/0.7 мм). Во всех четырех опытах с этими зарядами на лицевой поверхности первого диска преграды на входные отверстия от КС наложились отпечатки, имеющие форму блюдцеобразных кратеров, которые получены от удара массивных, но относительно низкоскоростных (по сравнению со скоростью КС) тел. Наиболее отчетливо это проявилось в случае облицовки с соотношением

толщин 2.5 мм/0.7 мм: отпечаток имел диаметр около 35 мм и глубину до $5 \div 7$ мм (см. рис. 6, рис. 7, *д*). При разнотолщинности 2.5 мм/1.0 мм отпечаток менее выражен, его диаметр $23 \div 25$ мм, а глубина $2 \div 3$ мм (рис. 7, *з*). При использовании остальных вариантов полусферических облицовок подобных следов ударного воздействия на лицевой поверхности первого диска преграды не наблюдалось. Для объяснения отмеченного эффекта обратимся к результатам численных расчетов, приведенным на рис. 4. Видно, что с увеличением разницы толщин облицовки всё более выраженным становится формирование массивного образования (песта) в хвостовой части струйного течения. Если при $\delta_1/\delta_2 = 2.5 \text{ мм}/2.5 \text{ мм}$, $2.5 \text{ мм}/2.0 \text{ мм}$ и $2.5 \text{ мм}/1.5 \text{ мм}$ в хвостовых частях течений сохраняется положительный градиент скорости (как и по длине КС) и явно выраженного песта не прослеживается (см. рис. 4, *а–в*), то при дальнейшем увеличении разницы толщин δ_1 и δ_2 скорость хвостовых частей течений возрастает и они становятся безградиентными, с формированием утонения, отделяющего КС от песта (см. рис. 4, *з, д*). Для облицовки с соотношением толщин 2.5 мм/1.0 мм скорость формирующегося безградиентного песта находится на уровне 700 м/с и возрастает примерно вдвое при переходе к облицовке с разнотолщинностью 2.5 мм/0.7 мм. Как представляется, зафиксированные на первом диске преграды отпечатки являются следствием удара этих пестов, размер которых превосходит размер входных отверстий от КС.

Зная диаметры входных отверстий в первом диске преграды d_{p1} , можно оценить массовые характеристики головных частей КС, сформировавшихся в опытах кумулятивными зарядами с различными вариантами полусферических облицовок. Полагая, что элемент КС произвольной малой длины Δl со скоростью v_z и плотностью материала ρ_j в соответствии с гидродинамической теорией проникания [1, 2] формирует в преграде плотностью ρ_t участок пробоины длиной $\Delta l \sqrt{\rho_j/\rho_t}$ и объемом, пропорциональным кинетической энергии элемента струи [1], нетрудно установить взаимосвязь между погонной массой μ (массой единицы длины) элемента КС в момент его проникания в преграду и диаметром d_p сформированного им участка пробоины:

$$\mu = A_V \frac{\pi d_p^2}{2v_z^2} \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}}, \quad (2)$$

где A_V — удельная работа вытеснения материала преграды.

На стадии инерционного деформирования КС погонная масса участков струи μ непрерывно уменьшается вследствие их удлинения [18]. Значения μ и плотности массово-скоростного распределения q для различных участков КС в любой момент их инерционного растяжения связаны между собой соотношением

$$\mu = q \dot{\epsilon}_z, \quad (3)$$

позволяющим рассчитать плотность массово-скоростного распределения для головного участка струи q_{jh} при известной его погонной массе μ_{jh} . При этом для определения скорости деформирования $\dot{\epsilon}_z$ в равенстве (3) необходимо дополнительно привлечь зависимость (1), базирующуюся на установленном по результатам численного моделирования факте линейности распределения скорости по длине КС, формируемых различными полусферическими облицовками (см. рис. 4). Для получения значения $\dot{\epsilon}_z$ в момент взаимодействия головной части КС с преградой координата «головы» струи z_{jh} в (1) должна быть положена равной расстоянию F от основания заряда ВВ с кумулятивной выемкой до лицевой поверхности преграды (см. рис. 1). Из рис. 4 видно, что для КС, формируемых из различных облицовок, точка C на оси заряда, через которую проходят графики распределения скорости КС в различные моменты времени, смещена от основания заряда в сторону отрицательных значений координаты z на расстояние $z_C \leq 15$ мм. Примерно такое абсолютное значение имеет координата z_C для КС из облицовок постоянной толщины 2.5 мм/2.5 мм и с соотношением толщин 2.5 мм/2.0 мм. При увеличении разницы толщин δ_1 и δ_2 значение $|z_C|$ уменьшается, приближаясь к нулевому в случае облицовки с соотношением толщин 2.5 мм/0.7 мм (см. рис. 4). Учитывая оценочный характер проводимых расчетов, значением z_C по сравнению с $z_{jh} = F$ в знаменателе соотношения (1) можно пренебречь (при $|z_C| \leq 15$ мм и реализованном в экспериментах расстоянии $F = 230$ мм это дает относительную погрешность в определении $\dot{\epsilon}_z$ менее 7 %). С учетом сделанных замечаний для оценки по результатам экспериментов

плотности массово-скоростного распределения в «голове» КС q_{jh} для струй, формируемых всеми вариантами облицовок, может быть использована единая зависимость

$$q_{jh} = \frac{\mu_{jh}F}{v_{jh}}, \quad (4)$$

вытекающая из соотношения (3) с учетом выражения (1), в котором $z_{jh} = F$ и $z_C = 0$.

Погонная масса головного участка КС μ_{jh} в момент его взаимодействия с преградой рассчитывалась по зависимости (2), в которой полагалось $d_p = d_{p1}$, $v_z = v_{jh}$, при плотностях материалов струи $\rho_j = 8900$ кг/м³ (медь) и преграды $\rho_t = 7800$ кг/м³ (сталь) и удельной работе вытеснения материала стальной преграды $A_V = 3 \cdot 10^9$ Дж/м³, принятой с учетом данных [1]. По найденному значению μ_{jh} далее вычислялись плотность массово-скоростного распределения для головного участка КС q_{jh} согласно (4), а также его диаметр $d_{jh} = 2\sqrt{\mu_{jh}/(\pi\rho_j)}$ в момент взаимодействия с преградой.

Характеристики головных частей КС μ_{jh} , d_{jh} и q_{jh} , оцененные на основании экспериментальных данных по диаметру d_{p1} входного отверстия от КС в первом диске наборной преграды и по скорости v_{jh} «головы» струи, приведены в табл. 3 (расчеты выполнены для тех же опытов с каждым вариантом облицовки, данные которых по диаметру пробития d_{pi} дисков преграды представлены в табл. 3). С увеличением разницы толщин облицовки δ_1 и δ_2 значения этих характеристик резко снижаются. Примечательно, что определенные при численном моделировании (см. табл. 1) и оцененные на основании данных экспериментов (см. табл. 3) значения плотностей массово-скоростных распределений в «голове» КС q_{jh} неплохо коррелируют между собой. То, что экспериментальные значения q_{jh} для всех, за исключением одного, вариантов облицовок оказались на 30 ÷ 40 % выше полученных при численном моделировании, является вполне объяснимым. Экспериментальная оценка q_{jh} базировалась на соотношении (3), справедливом, как указывалось выше, при равномерном удлинении КС. Его использование предполагало, что инерционное деформирование головного участка КС с непрерывным снижением его погонной массы μ_{jh} происходит вплоть до момента взаимодействия с преградой. В реальной

ситуации время инерционного удлинения КС ограничено, по его истечении происходит распад струи на отдельные безградиентные элементы, погонная масса которых уже не изменяется [19, 20]. Следовательно, завышенные относительно численных расчетов результаты экспериментального оценивания плотности массово-скоростных распределений для головных участков КС q_{jh} могут быть объяснены тем, что в опытах выделение недеформирующихся элементов в «голове» струи происходило до взаимодействия с преградой. Получение более точной оценки q_{jh} по данным опытов возможно, если будет известна координата «головы» КС в момент ее перехода в дискретное состояние. Тогда значение этой координаты (меньшее расстояние до преграды F) надлежит использовать вместо F в соотношении (4).

Небезынтересной является физическая интерпретация результата по диаметрам пробоин в дисках преграды от КС из облицовки с соотношением толщин 2.5 мм/1.0 мм, давшей наибольшую по двум опытам глубину пробития (см. табл. 3 и рис. 7,з) В опыте с этой облицовкой диаметр пробоины, зафиксированный в третьем диске преграды, оставался практически неизменным вплоть до седьмого. Из соотношения (2) следует, что квадрат диаметра отверстия, пробиваемого в преграде участком КС, пропорционален погонной кинетической энергии (энергии единицы длины) этого участка в момент проникания. В процессе удлинения струи погонная кинетическая энергия ее участков убывает по тому же закону (3), что и погонная масса, при замене в нем плотности массово-скоростного распределения q на плотность энергоскоростного распределения w . Удлинение участков КС к моменту начала проникания возрастает от головных участков к хвостовым, что связано с увеличением от «головы» к «хвосту» струи, во-первых, коэффициента предельного удлинения участков и, во-вторых, времени их движения до дна формируемой в преграде каверны. Неизменность диаметра пробоины на значительной части ее длины, зафиксированная в опыте с облицовкой с разнотолщинностью 2.5 мм/1.0 мм, означает, что для участков КС, формирующих эту пробоину, их удлинение в момент проникания оказывается синхронизированным с энергоскоростным распределением $w(v_z)$ для струи (см. рис. 5,з) в том смысле, что обеспечивает

снижение погонной кинетической энергии различных участков в момент проникания до одного и того же значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают основные особенности формирования КС полусферическими облицовками дегрессивной толщины, установленные при численном моделировании. С увеличением дегрессивности толщины полусферических облицовок растет скорость головной части формируемых КС при одновременном резком снижении массивности (диаметра) головных участков. Как следствие, для кумулятивных зарядов с полусферическими облицовками дегрессивной толщины усиливается влияние на их функционирование технологических погрешностей изготовления облицовки и заряда, нивелирующее или полностью устраняющее прирост пробивного действия КС. Поэтому при проведении дальнейших исследований зарядов с полусферическими облицовками дегрессивной толщины необходим переход к прецизионной технологии их изготовления.

Направление дальнейших исследований может быть также связано с переходом от полусферических облицовок дегрессивной толщины к полуэллипсоидальным, у которых полярная полуось несколько превышает экваториальную. Как предсказывают расчетные данные [15], при использовании таких облицовок возможно увеличить массу головных участков формируемой КС при сохранении их скорости на уровне, обеспечиваемом высокими коническими облицовками.

Авторы выражают благодарность О. В. Свирскому за полезную дискуссию по вопросу «соревнования конуса и полусферы» в кумуляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Физика** взрыва: в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е, испр. — М.: Физматлит, 2004. — Т. 2.
2. **Walters W. P., Zukas J. A.** Fundamentals of Shaped Charges. — New York: Wiley, 1989.
3. **Chou P. C., Flis W. J.** Recent developments in shaped charge technology // Propell., Explos., Pyrotech. — 1986. — V. 11, N 4. — P. 99–114.
4. **Shekhar H.** Theoretical modelling of shaped charges in the last two decades (1990–2010): A review // Centr. Eur. J. Energ. Mater. — 2012. — V. 9, N 2. — P. 155–185.
5. **Титов В. М.** Возможные режимы гидродинамической кумуляции при схлопывании облицовки // Докл. АН СССР. — 1979. — Т. 247, № 5. — С. 1082–1084.
6. **Chou P. C., Ciccarelli R. D., Walters W. P.** The formation of jets from hemispherical-liner warheads // Proc. 7th Int. Symp. on Ballistics. — The Hague, Netherlands, 1983.
7. **Hornemann U., Holzwarth A.** Characteristics of shaped charges with hemispherical liners // Propell., Explos., Pyrotech. — 1993. — V. 18, N 5. — P. 282–287.
8. **Chuan Yu, Yanjin T., Chengli Yan, Fabo Li, Yulin G., Ming Z., Wang B., Panhai X., Liangzong Li.** Applied research of shaped charge technology // Int. J. Impact Eng. — 1999. — V. 23, N 1(2). — P. 981–988.
9. **Федоров С. В.** Численное моделирование формирования кумулятивных струй полусферическими облицовками дегрессивной толщины // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 5. — С. 116–130.
10. **Selivanov V. V., Fedorov S. V., Nikolskaya Ya. M., Ladov S. V.** Compact element formation for the modeling of the high-velocity impacts of particles onto spacecraft materials and construction elements in earth conditions // Acta Astronaut. — 2017. — V. 135, N 10. — P. 34–43.
11. **Федоров С. В.** О реализации принципа импlosion в кумулятивных зарядах с полусферическими облицовками дегрессивной толщины // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественн. науки. — 2017. — № 3. — С. 71–92.
12. **Кинеловский С. А., Тришин Ю. А.** Физические аспекты кумуляции // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 5. — С. 26–40.
13. **Kelly R. J., Curtis J. P., Cowan K. G.** An analytic model for the prediction of incoherent shaped charge jets // J. Appl. Phys. — 1999. — V. 86, N 3. — P. 1255–1265.
14. **Hancock S. L.** Jet penetration for a class of cumulative mass profiles // Int. J. Impact Eng. — 1999. — V. 23, N 1(1). — P. 353–363.
15. **Ладов С. В., Никольская Я. М., Федоров С. В.** Численный анализ формирования кумулятивных струй зарядами с коническими и полусферическими облицовками переменной толщины // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 4. — С. 103–107.
16. **Szendrei T.** Analytical model of crater formation by jet impact and its application to calculation of penetration curves and hole profiles // Proc. 7th Int. Symp. on Ballistics. — The Hague, Netherlands, 1983. — P. 575–583.
17. **Ayisit O.** The influence of asymmetries in shaped charge performance // Int. J. Impact Eng. — 2008. — V. 35, N 12. — P. 1399–1404.
18. **Бабкин А. В., Ладов С. В., Маринин В. М., Федоров С. В.** Особенности инерционного растяжения кумулятивных струй в свобод-

- ном полете // ПМТФ. — 1997. — Т. 38, № 2. — С. 3–9.
19. **Walters W. P., Summers R. L.** A review of jet breakup time models // Propell., Explos., Pyrotech. — 1993. — V. 18, N 5. — P. 241–246.
 20. **Petit J.** Breakup of copper shaped-charge jets: experiment, numerical simulations, and analytical modeling // J. Appl. Phys. — 2005. — V. 98, N 12. — 123521.
 21. **Свирский О. В., Власова М. А., Торопова Т. А., Нечаев А. И., Крутяков В. А.** Пробивная способность кумулятивных зарядов на больших фокусных расстояниях // V Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: ВНИИЭФ, 2003. — С. 473–477.
 22. **Xiao Q.-Q., Huang Z.-X., Zu X.-D., Jia X.** Influence of drift velocity and distance between jet particles on the penetration depth of shaped charges // Propell., Explos., Pyrotech. — 2016. — V. 41, N 1. — P. 76–83.
 23. **Cornish R., Mills J. T., Curtis J. P., Finch D.** Degradation mechanisms in shaped charge penetration // Int. J. Impact Eng. — 2001. — V. 26, N 1-10. — P. 105–114.
 24. **Svirsky O. V., Vlasova M. A., Korotkov M. I., Krutyakov V. A., Toropova T. A.** The analytical model ATOS-M for computing of the shaped charge jet penetration parameters // Int. J. Impact Eng. — 2003. — V. 29, N 1-10. — P. 683–690.
 25. **Свирский О. В., Власова М. А.** О пробивной способности кумулятивных зарядов с конической и полусферической облицовками // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 6. — С. 115–119.
 26. **Фёдоров С. В.** О возможности «отсечки» лидирующего высокоскоростного участка металлической струи при взрыве кумулятивного заряда в аксиальном магнитном поле // Боеприпасы и высокоэнерг. конденсир. системы. — 2008. — № 2. — С. 73–80.
-

*Поступила в редакцию 20.09.2019.
После доработки 23.10.2019.
Принята к публикации 06.11.2019.*