

УДК 623.4.082.6

# АНАЛИЗ ПРОБИВНОГО ДЕЙСТВИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ С ПОЛУСФЕРИЧЕСКОЙ И ПОЛУЭЛЛИпсоИДНОЙ ОБЛИЦОВКАМИ ДЕГРЕССИВНОЙ ТОЛЩИНЫ

С. В. Фёдоров<sup>1</sup>, С. В. Ладов<sup>1</sup>, О. В. Свирский<sup>2</sup>, М. А. Власова<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

Проведен расчетный сравнительный анализ пробивного действия кумулятивных зарядов с медными облицовками в форме конуса прогрессивной толщины с углом раствора  $60^\circ$ , равнотолщинной полусферы, полусферы и полуэллипсоида дегрессивной (уменьшающейся от вершины к основанию) толщины. Полярная полуось полуэллипсоидной облицовки несколько превышала экваториальную. Параметры формируемых кумулятивных струй определялись на основании численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред, а глубина пробития ими стальной преграды — на основании инженерной методики, учитывающей влияние точности изготовления зарядов. Параметры облицовок дегрессивной толщины были подобраны так, чтобы скорость головной части формирующихся из них струй была близка к скорости, обеспечиваемой конической облицовкой. При этом пробивное действие кумулятивного заряда с полусферической облицовкой дегрессивной толщины оказалось существенно ниже, чем у заряда с конической облицовкой, который, в свою очередь, незначительно уступал по максимальной глубине пробития заряду с полуэллипсоидной облицовкой. Обсуждаются физические причины полученных результатов.

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

DOI 10.15372/FGV20210511

## ВВЕДЕНИЕ

В кумулятивных зарядах (КЗ), формирующих при взрыве высокоскоростные металлические струи и применяемых для пробития различных преград, в основном используются облицовки конической (с углами раствора менее  $90^\circ$ ) или полусферической формы [1, 2]. Конические облицовки часто имеют прогрессивную (увеличивающуюся от вершины к основанию) толщину, а применяемые на практике полусферические — постоянную.

Кумулятивные заряды с коническими облицовками имеют преимущество по скорости формируемой ими кумулятивной струи (КС) и по глубине пробития ею преграды, уступая по диаметру пробиваемого в преграде отверстия. В случае прецизионной технологии изготовления современные КЗ с медными коническими облицовками прогрессивной толщины,

оснащенные линзовым узлом для формирования сходящейся детонационной волны, обеспечивают глубину пробития гомогенной преграды из высокопрочной стали на уровне 10 диаметров заряда при скорости головной части КС на уровне 10 км/с [1–4]. Для КЗ с полусферическими облицовками постоянной толщины указанные параметры пробития и скорости КС примерно вдвое ниже [5–7].

## ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Исследования последних лет [8, 9] показывают, что переход от постоянной к дегрессивной (уменьшающейся от вершины к основанию) толщине полусферических кумулятивных облицовок позволяет поднять скорость формируемых ими струй в отсутствие их диспергирования не только до уровня, обеспечиваемого коническими облицовками, но и превышающего его. Увеличение скорости КС достигается за счет того, что взрывное обжатие полусфериче-

ской облицовки дегрессивной толщины происходит в режиме, более близком к сферическим симметричному, что усиливает проявление эффекта сферической кумуляции [9]. Одновременно с увеличением скорости существенно снижается масса головных участков струй. Отмеченные особенности формирования КС из полусферических облицовок дегрессивной толщины первоначально были выявлены на основании результатов численного моделирования [8, 10] и впоследствии получили экспериментальное подтверждение [11–13].

Однако увеличение скорости КС при использовании полусферических облицовок дегрессивной толщины до уровня, обеспечиваемого высокими коническими облицовками, как было показано в [14], может не дать такого же повышения и пробивного действия. Причина этого заключается в отмеченном выше факте резкого снижения массы головных участков КС из полусферических облицовок дегрессивной толщины. Количественную информацию о массе участков КС с различной скоростью и об их предельном удлинении дают массово-скоростные распределения [15]. Их анализ на основании данных численного моделирования [8, 16] показал, что в случае полусферы дегрессивной толщины с разницей толщин в вершине и у основания, обеспечивающей примерно такую же скорость «головы» струи, что и конус прогрессивной толщины, плотность массово-скоростного распределения для головного участка КС (характеризующая массу струи, приходящуюся на единичный интервал скоростей) оказывается в несколько раз ниже значения, полученного для конической облицовки при одном и том же диаметре КЗ. Малая «массивность» головного участка КС должна отрицательно сказываться на пробивном действии КЗ [14], так как ведет к уменьшению диаметра входного участка пробойны [17] со снижением вероятности беспрепятственного движения по нему последующих участков струи, которые из-за погрешностей изготовления заряда в реальной ситуации всегда в той или иной степени отклоняются от строго соосного следования друг за другом [18–21].

Как показало численное моделирование [16], проблема «тонкости» головных участков КС из полусферических облицовок дегрессивной толщины может быть решена при переходе к полуэллипсоидным облицовкам дегрессивной толщины, у которых полярная полуось

несколько превышает экваториальную. Численные расчеты предсказывают, что при использовании таких облицовок можно увеличить массу головных участков формируемой КС до значений, не только не уступающих коническим облицовкам, но и превосходящих их, причем при сохранении скорости «головы» струи на уровне, обеспечиваемом коническими облицовками. Это дает основания рассчитывать также и на возможность повышения пробивного действия до уровня КЗ с коническими облицовками.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ пробивного действия КЗ с конической, полусферической и полуэллипсоидной облицовками, проводившийся расчетным путем. Геометрические и кинематические параметры КС из разных облицовок определялись по результатам численного моделирования в двумерной осесимметричной постановке. Пробивное действие КС рассчитывалось на основании инженерной методики ATOS-M [22], учитывающей влияние технологических погрешностей изготовления КЗ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В расчетах были рассмотрены КЗ с четырьмя облицовками: конической прогрессивной толщины (рис. 1, *a*), полусферической постоянной толщины (рис. 1, *b*), полусферической дегрессивной толщины (рис. 1, *в*) и полуэллипсоидной дегрессивной толщины (рис. 1, *г*). Во всех случаях КЗ был цилиндрическим с диаметром  $d_0 = 100$  мм и высотой  $h_0 = 150$  мм. Характеристики взрывчатого вещества соответствовали высокобризантным составам: плотность  $1740$  кг/м<sup>3</sup>, скорость детонации  $8600$  м/с. Материалом облицовок во всех случаях являлась медь. Параметры рассматриваемой конической облицовки при принятом диаметре заряда выбирались соответствующими используемым в современных КЗ с глубиной пробития стальной преграды до  $10d_0$ : угол раствора  $2\alpha = 60^\circ$ ; внутренний диаметр основания  $d_c = 90$  мм; толщина в вершине  $\delta_1 = 1.4$  мм и у основания  $\delta_2 = 2.6$  мм (см. рис. 1, *a*). Предполагалось, что КЗ с конической облицовкой оснащен линзовым узлом, что при проведении численного моделирования учитывалось заданием иницирования заряда по кольцу. Радиус наружной поверхности полусферических облицовок постоянной и дегрессивной толщины

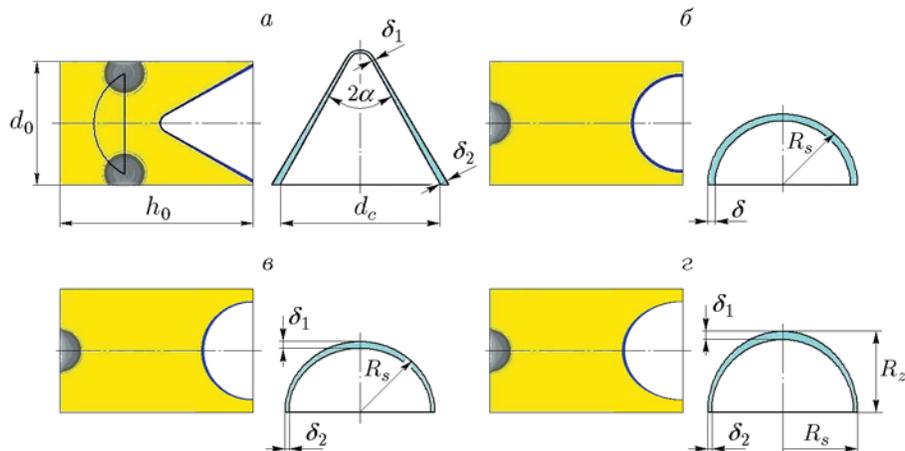


Рис. 1. Схемы КЗ с различными облицовками:

*a* — коническая облицовка, *б* — равнотолщинная полусферическая, *в* — полусферическая дегрессивной толщины, *г* — полуэллипсоидная дегрессивной толщины

был одинаковым —  $R_s = 40$  мм (см. рис. 1, б, в). Такое же значение  $R_s = 40$  мм имела и экваториальная полуось наружной поверхности полуэллипсоидной облицовки, размер ее полярной полуоси  $R_z = 47$  мм (см. рис. 1, г). Толщина равнотолщинной полусферической облицовки составляла  $\delta = 2.4$  мм и совпадала с толщиной в вершине  $\delta_1 = 2.4$  мм полусферической и полуэллипсоидной облицовок дегрессивной толщины. Толщина же последних у основания принята равной  $\delta_2 = 1.0$  мм для полусферической облицовки и  $\delta_2 = 0.6$  мм для полуэллипсоидной. У полусферической облицовки дегрессивной толщины внутренняя поверхность являлась поверхностью полуэллипсоида вращения с экваториальной полуосью  $R_s - \delta_2$  и полярной полуосью  $R_z - \delta_1$ . У полуэллипсоидной облицовки обе ограничивающие ее поверхности были поверхностями полуэллипсоидов вращения с экваториальными и полярными полуосями  $R_s, R_z$  для наружной поверхности и  $R_s - \delta_2, R_z - \delta_1$  для внутренней. Заряды с полусферическими и полуэллипсоидной облицовками предполагались безлинзовыми, и точка их инициирования размещалась в центре торца заряда, противоположного кумулятивной выемке (см. рис. 1, б–г).

Численное моделирование формирования КС из различных облицовок осуществлялось в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред в постановке и по методу, изложенным в [8, 23, 24]. Рис. 2–5 полями плотностей материала облицовки и распределениями его осевой скорости  $v_z$  на оси симмет-

рии в последовательные моменты времени иллюстрируют формирование КС из различных облицовок. Отсчет времени ведется от момента начала распространения сходящейся детонационной волны от края линзы для заряда с конической облицовкой и от момента инициирования зарядов с остальными вариантами облицовок, осевая координата  $z$  отсчитывается от основания зарядов с кумулятивной выемкой.

Анализируя данные рис. 2–5, следует обратить внимание прежде всего на различие механизмов формирования КС из конической облицовки и из облицовок полусферической и полуэллипсоидной форм. В случае конической облицовки формирование участков КС с различной скоростью происходит в результате последовательного от вершины к основанию схлопывания на оси симметрии элементов облицовки. При этом четко прослеживается часть конической облицовки, которая уже схлопнулась и сформировала свой участок струи, и часть облицовки, еще не схлопнувшаяся (рис. 2). При взрывном обжатии полусферических и полуэллипсоидной облицовок реализуется иной механизм струеобразования, связанный с практически одновременным сжатием к оси всего материала облицовки, так что в процессе формирования КС существует промежуток времени, когда материал уже почти всей облицовки «собрался в комок», а струи вне его еще нет. Такой конфигурации течения соответствует интервал времени  $28 \div 32$  мкс в случае равнотолщинной полусферической облицовки (рис. 3),  $26 \div 28$  мкс в случае полусферической облицов-

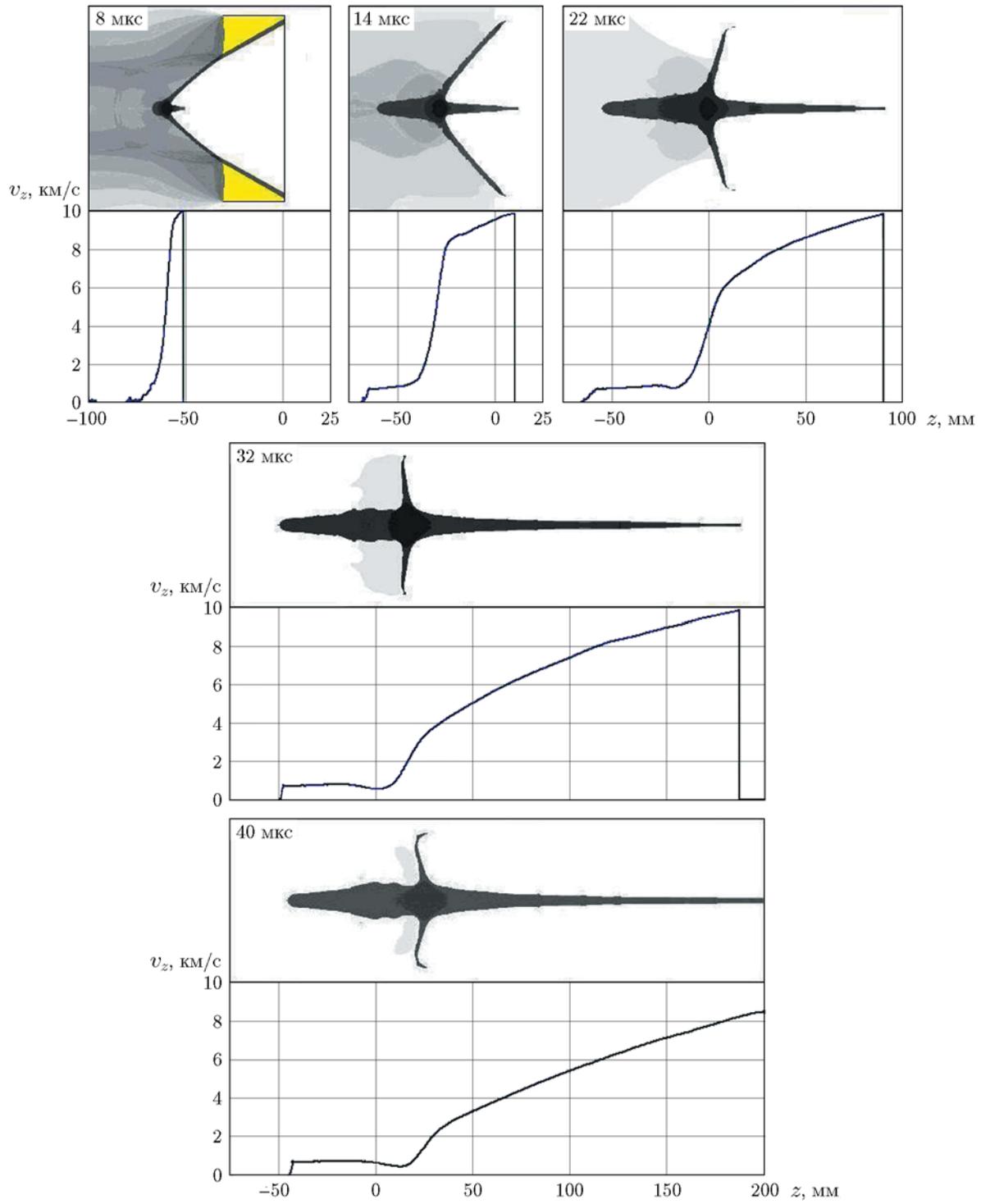


Рис. 2. Формирование КС из конической облицовки

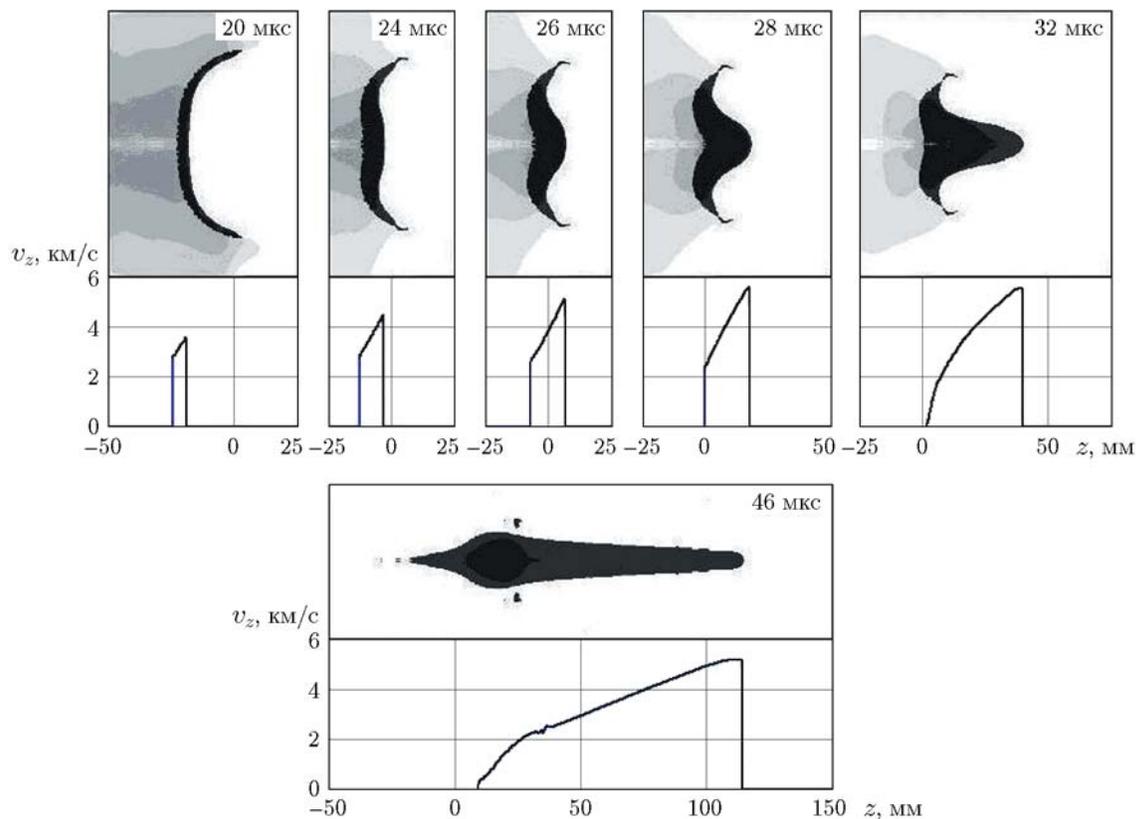


Рис. 3. Формирование КС из равнотолщинной полусферической облицовки

ки депрессивной толщины (рис. 4) и  $24 \div 26$  мкс в случае полуэллипсоидной облицовки (рис. 5).

Выражаясь образно, механизм формирования КС из конической облицовки можно назвать «революционным», а из полусферических и полуэллипсоидной облицовок — «эволюционным». Основным признаком «революционного» формирования КС из конической облицовки является образование элементов КС при соударении элементов облицовки на оси, в результате чего резко изменяются направление и скорость движения материала части облицовки, переходящей в струю. Процесс соударения при определенных условиях может сопровождаться формированием в облицовке ударной волны в точке соударения, что нарушает нормальный режим струеобразования, приводя к диспергированию формирующейся струи [25, 26]. Реализация данного эффекта ограничивает максимальную скорость недиспергированной КС при схлопывании конической облицовки. В случае полусферических и полуэллипсоидной облицовок формирование КС носит характер натекания материала периферийной части облицовки на материал вершинной ча-

сти, скорость которого уже изначально (при метании продуктами детонации) направлена вдоль оси заряда, так что само понятие точки соударения с резким изменением направления движения материала облицовки в данном случае отсутствует. Из полусферических и полуэллипсоидной облицовок практически сразу формируется вся КС, локализуясь первоначально в «собирающейся в комок» облицовке. Схождение материала полусферических и полуэллипсоидной облицовок к оси с превращением в компактные образования, содержащие в своем составе всю КС, носит постепенный (деформационный) характер. По этой причине формирование КС из указанных облицовок может быть охарактеризовано как эволюционное. Оно протекает без каких-либо коллизий ударно-волнового характера, и это позволило в [8, 13] высказать предположение, что при использовании полусферической и близких к ней по форме облицовок упоминавшиеся выше ограничения на максимальную скорость недиспергированной КС, существующие для конических облицовок, могут отсутствовать. По крайней мере, в пользу этого предположения свиде-

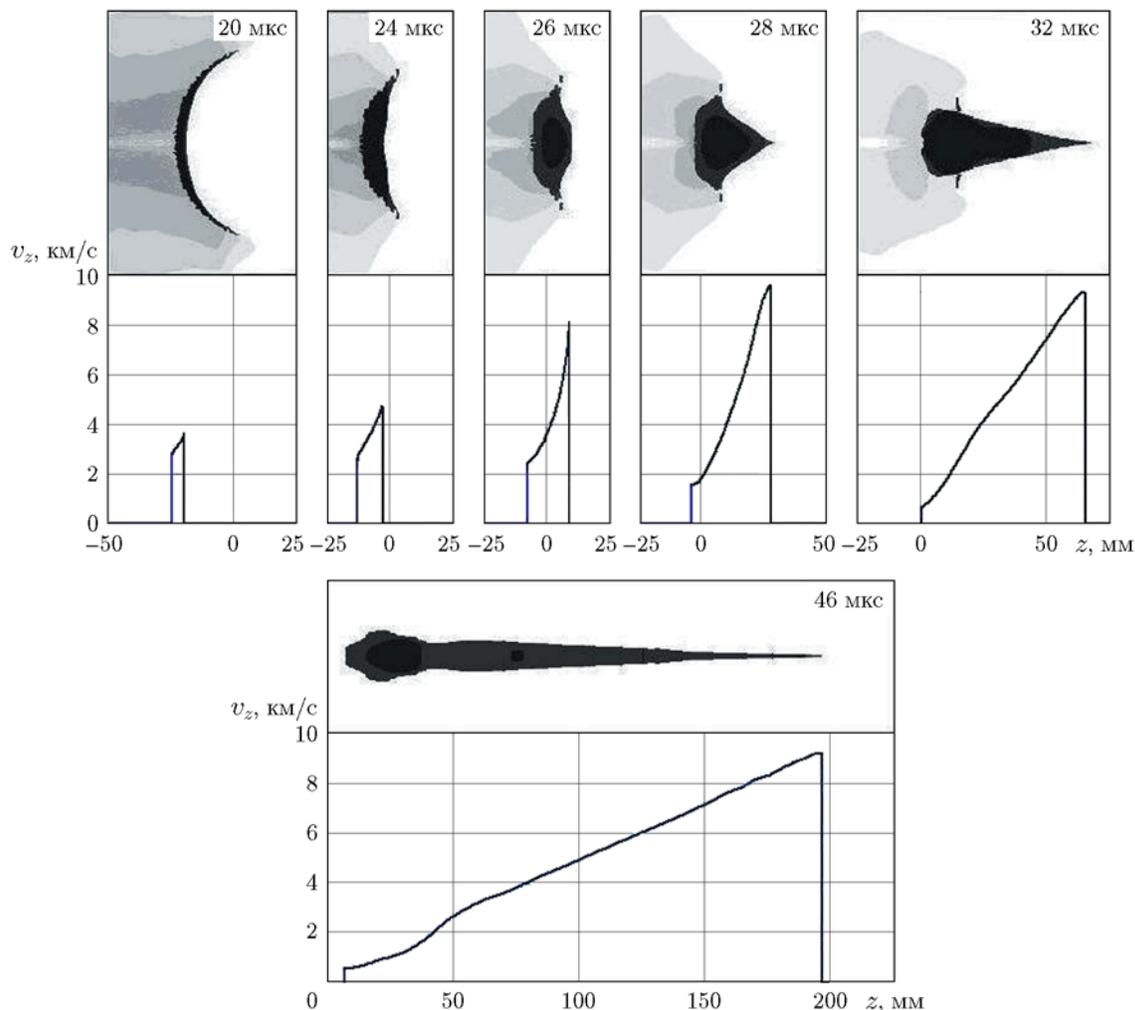


Рис. 4. Формирование КС из полусферической облицовки дегрессивной толщины с соотношением толщин в вершине и у основания 2.4 мм/1.0 мм

тельствуют результаты численных расчетов, проводившихся в [8] с использованием для материала облицовки модели среды, не способной оказывать сопротивления всестороннему растяжению.

Как видно из рис. 2, головная часть КС, сформировавшаяся из материала вершины рассматриваемой конической облицовки примерно в момент времени  $t = 8$  мкс, имеет скорость  $v_{jh} \approx 10$  км/с, что близко к предельно возможному значению для получения компактной (недиспергированной) струи из меди в случае использования конических облицовок. Из полусферической облицовки постоянной толщины формируется КС со значительно более толстой головной частью, чем у струи из конуса, но и со значительно меньшей скоростью «головы» —  $v_{jh} \approx 5.3$  км/с (см. рис. 3). Переход от по-

стоянной к дегрессивной толщине полусферической облицовки приводит к увеличению скорости головной части КС. Разницу толщин в вершине и у основания полусферической облицовки дегрессивной толщины подбирали таким образом, чтобы скорость «головы» формируемой КС  $v_{jh} \approx 9.3$  км/с была близка к скорости «головы» струи из конуса (см. рис. 4). При этом из сравнения рис. 2 и 4 видно, что головной участок КС из полусферы дегрессивной толщины заметно тоньше головного участка струи из конуса при примерно одинаковых скоростях.

Сравнительный анализ формирования КС по данным рис. 3 и 4 наглядно демонстрирует физическую причину увеличения скорости КС при придании полусферической облицовке дегрессивной толщины, о которой говорилось выше и которая связана с реализацией прин-

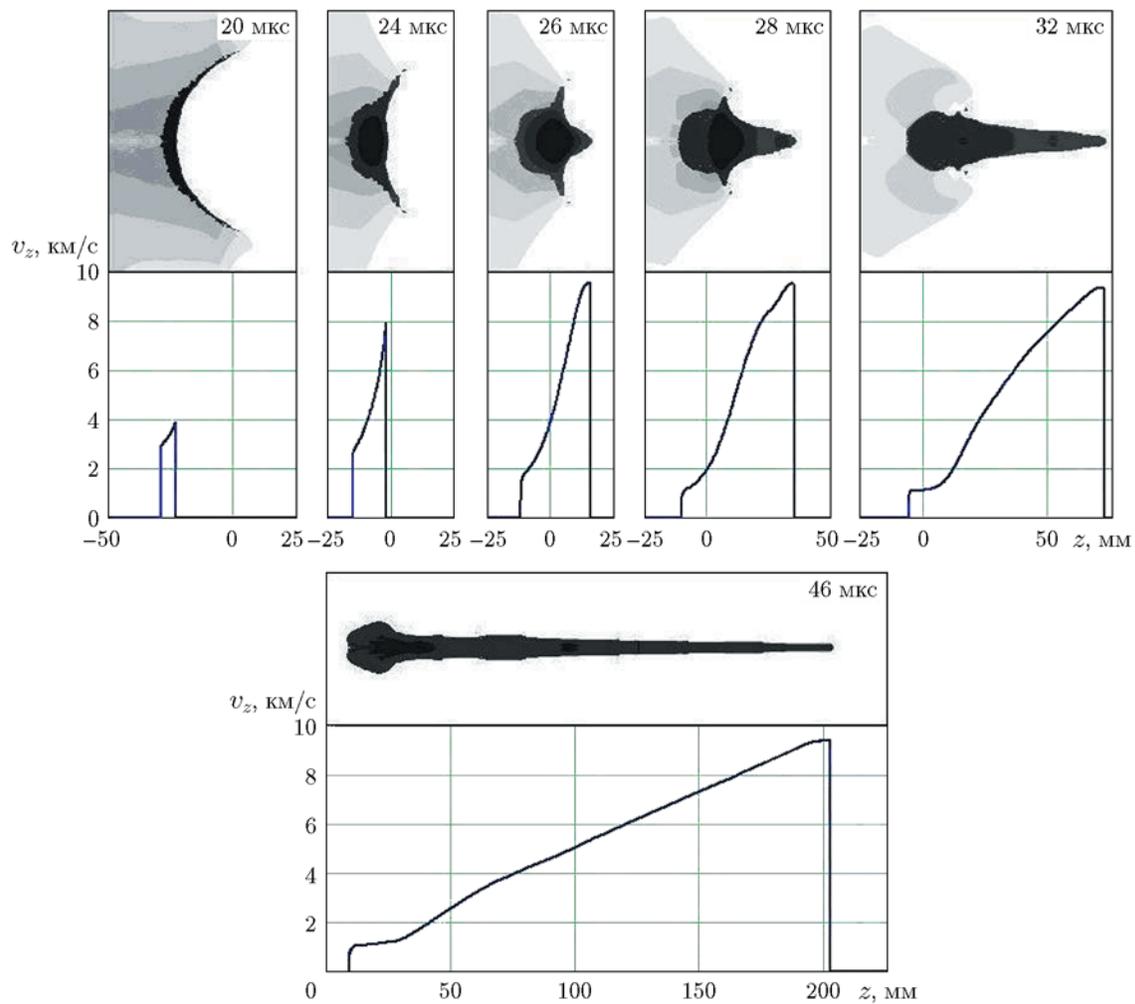


Рис. 5. Формирование КС из полуэллипсоидной облицовки дегрессивной толщины с соотношением толщин в вершине и у основания 2.4 мм/0.6 мм

ципа имплозии за счет создания условий для сферически-симметричного обжатия облицовки [9]. В случае полусферы постоянной толщины эти условия нарушаются вследствие более высокой скорости метания вершины облицовки и ее опережающего движения, приводящего к «выворачиванию» облицовки, о чем свидетельствует вогнутость формы ее тыльной поверхности в процессе обжатия (см. рис. 3). При обжатии полусферы дегрессивной толщины скорость метания ее элементов вдоль образующей выравнивается и прогиба тыльной поверхности не наблюдается (см. рис. 4).

Параметры рассматривавшейся полуэллипсоидной облицовки дегрессивной толщины (соотношение полярной и экваториальной полуосей и соотношение толщин в вершине и у основания) были также выбраны из условия

формирования КС примерно с той же, что и у струи из конуса, скоростью «головы»  $v_{jh} \approx 9.4$  км/с (см. рис. 5). При этом принимались во внимание две закономерности, установленные по результатам численного моделирования. Первая из них заключается в уже отмечавшемся выше увеличении скорости головной части КС при одновременном уменьшении ее «массивности» с ростом степени дегрессивности толщины полусферической облицовки. Согласно второй закономерности, при заданной степени дегрессивности толщины увеличение полярной полуоси облицовки по отношению к экваториальной приводит к снижению скорости головного участка формируемой КС с одновременным увеличением его «массивности». Комбинируя эти два приема, можно управлять массово-скоростными параметрами

ми формируемых КС в некотором диапазоне. При подборе параметров полуэллипсоидной облицовки, схлопывание которой иллюстрирует рис. 5, сначала моделировалось взрывное обжатие полусферической облицовки дегрессивной толщины с тем же соотношением толщин в вершине и у основания ( $\delta_1 = 2.4$  мм,  $\delta_2 = 0.6$  мм) и с тем же радиусом наружной поверхности  $R_s = 40$  мм, что и экваториальный радиус наружной поверхности полуэллипсоидной облицовки. Из представленных на рис. 6 результатов этого моделирования видно, что из указанной полусферической облицовки со значительной степенью дегрессивности толщины формируется КС с очень тонкой иглоподобной головной частью, скорость которой заметно выше, чем у струи из конуса, и достигает  $v_{jh} \approx 12.9$  км/с (согласно сделанным выше замечаниям имеются основания предполагать, что радиального диспергирования материала струи при этом не происходит). Затем полусферическая облицовка с соотношением толщин в вершине и у основания 2.4 мм/0.6 мм была трансформирована в полуэллипсоидную путем увеличения полярной полуоси наружной поверхности  $R_z$  до значения, при котором скорость «головы» формируемой КС уменьшилась до уровня, обеспечиваемого конической облицовкой. Как видно из сравнения рис. 2 и рис. 5, при этом головная часть КС из полуэллипсоидной облицовки получилась более «массивной» по сравнению со струей из конической облицовки.

В количественном отношении распределе-

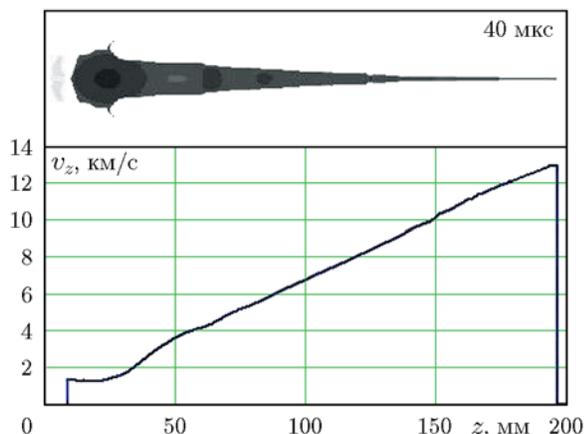


Рис. 6. Кумулятивная струя, сформировавшаяся из полусферической облицовки дегрессивной толщины с соотношением толщин в вершине и у основания 2.4 мм/0.6 мм

ние материала различных облицовок по участкам КС с различной скоростью  $v_z$  иллюстрируется кривыми плотностей массово-скоростных распределений  $q(v_z)$ , рассчитанными по результатам численного моделирования и приведенными на рис. 7 (величина  $q$  представляет собой массу струи, приходящуюся на единичный интервал скоростей). Массово-скоростные распределения рассчитывались до нижнего предела скорости струй  $v_{jt} = 2$  км/с (принимавшейся за скорость «хвоста» струи), так как участки высокоградиентных КС со скоростью ниже данного значения существенного вклада в пробивное действие по металлическим преградам, как правило, не дают [1]. Для КС из конуса и полусферы постоянной толщины значение  $q$  монотонно возрастает от «головы» струи к ее «хвосту», составляя в «голове»  $\approx 1.0$  г·с/км в первом случае и  $\approx 20.0$  г·с/км во втором. Зависимости  $q(v_z)$  для облицовок дегрессивной толщины полусферической и полуэллипсоидной форм изменяются, проходя через точку максимума при скорости чуть выше 3 км/с в случае полусферы и чуть ниже 4 км/с в случае полуэллипсоида. Что касается плотности массово-скоростных распределений в «голове» КС из указанных облицовок, то при практически равных скоростях головных частей она почти на порядок выше для струи из полуэллипсоида ( $\approx 2.5$  г·с/км вместо  $\approx 0.3$  г·с/км). Отметим, что для КС из «более дегрессивной» полусферы с соотношением толщин в вершине и у

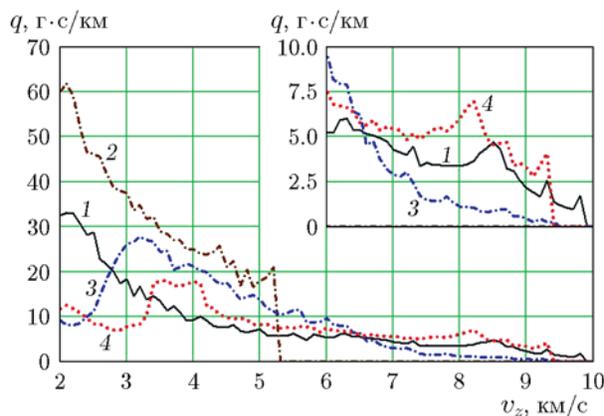


Рис. 7. Массово-скоростные распределения для КС, формируемых различными облицовками:

1 — коническая облицовка, 2 — равнотолщинная полусферическая, 3 — полусферическая дегрессивной толщины, 4 — полуэллипсоидная дегрессивной толщины

основания 2.4 мм/0.6 мм, показанной на рис. 6, значение  $q$  в «голове» составляло  $\approx 0.2 \text{ г} \cdot \text{с}/\text{км}$ .

Кумулятивная струя из полуэллипсоидной облицовки, имея в «голове» более чем двукратное превосходство по плотности массово-скоростного распределения над струей из конуса, является по сравнению с ней более «массивной» вплоть до скорости чуть менее 3.5 км/с. Кумулятивная струя из полусферы дегрессивной толщины с соотношением толщин 2.4 мм/1.0 мм со скоростью «головы», близкой к скорости струи из конуса, уступая ей более чем втрое по значению  $q$  на головном участке, является, напротив, более «массивной» в интервале скоростей  $6.5 \div 3.0 \text{ км/с}$ . На хвостовом участке при скоростях, близких к 2 км/с, «массивность» КС из конуса заметно выше по сравнению со струями из облицовок дегрессивной толщины в форме полусферы и полуэллипсоида.

Интегрирование приведенных на рис. 7 зависимостей  $q(v_z)$  по скорости струи  $v_z$  в пределах от скорости ее «хвоста»  $v_{jt} = 2 \text{ км/с}$  до скорости «головы»  $v_{jh}$  дает полную массу всей КС  $M_j$ . Для КС из конуса получено  $M_j = 72 \text{ г}$  при массе кумулятивной облицовки  $M_l = 259 \text{ г}$ , а для КС из полусферы постоянной толщины —  $M_j = 106 \text{ г}$  при  $M_l = 205 \text{ г}$  (относительный выход материала облицовок в струю составил соответственно 28 и 52 %). Для облицовок дегрессивной толщины отношение массы КС к массе облицовки возросло до 59 % в случае полусферической облицовки ( $M_j = 76 \text{ г}$  при  $M_l = 129 \text{ г}$ ) и до 57 % в случае полуэллипсоидной ( $M_j = 65 \text{ г}$  при  $M_l = 113 \text{ г}$ ).

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОБИВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Полученные в ходе численного моделирования массово-скоростные распределения  $q(v_z)$  (см. рис. 7) и распределения скорости КС по их длине  $v_z(z)$  (см. рис. 2–5) были использованы для прогнозирования пробивного действия КЗ с различными облицовками на основании инженерной методики расчета [22]. Алгоритм расчета был следующим. Струя разбивалась на отдельные участки, и для каждого из них определялось время его движения до дна каверны, формирующейся от действия КС в преграде с заданным удалением  $F$  ее лицевой поверхности от основания КЗ с кумулятивной выемкой. Если это время было меньше времени разрыва

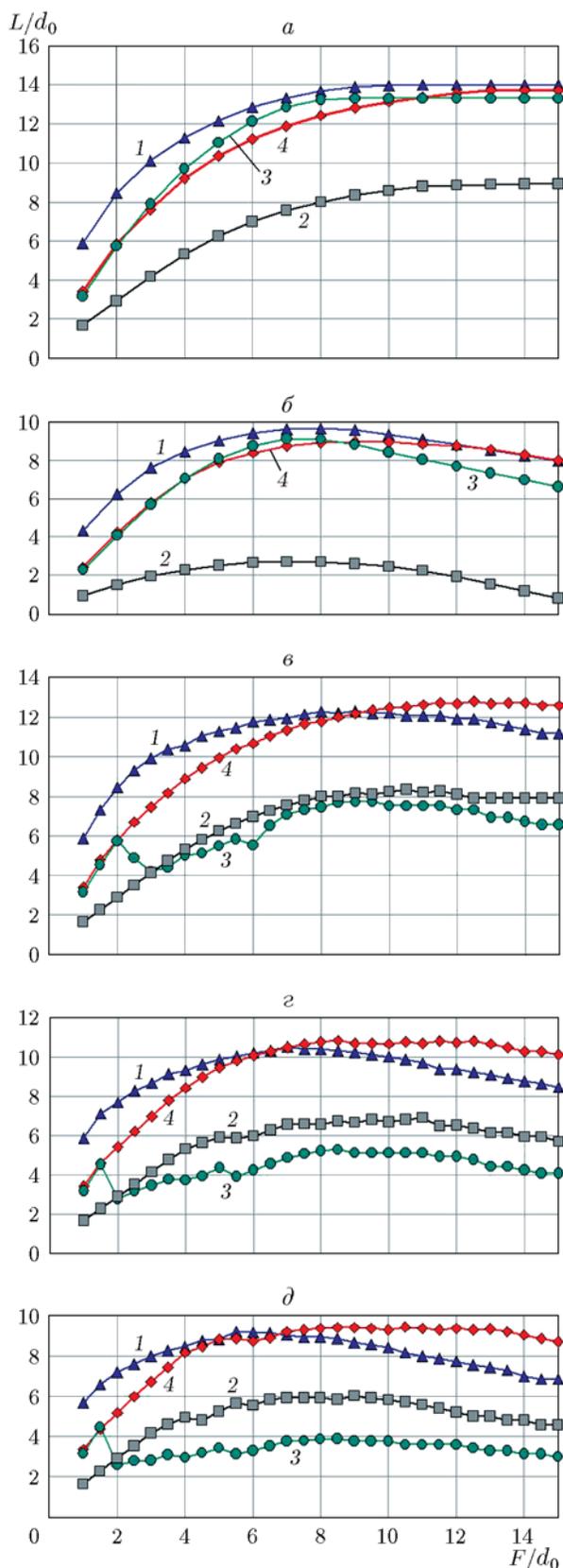
участка КС, то его длина в процессе движения предполагалась равномерно увеличивающейся при постоянном перепаде скоростей  $\Delta v_z$  между краями участка вплоть до момента начала проникания. В противном случае длина участка КС в момент начала проникания определялась его длиной в момент разрыва. При этом время разрыва участков КС рассчитывалось на основании данных [27–30]. Для определения скорости проникания и расчета с ее использованием длины участка пробоины, формируемого в преграде, привлекалось модифицированное уравнение Бернулли, включающее в себя прочностное сопротивление материала преграды [31]. Расчеты пробития КЗ с различными облицовками проводились применительно к стальной преграде средней твердости на уровне  $HV = 3.0 \div 3.2 \text{ ГПа}$ .

Технологические погрешности изготовления КЗ приводят к отклонениям движения участков КС от оси симметрии заряда. В результате замыкающие участки струи могут сталкиваться с боковыми стенками каверны, пробитой предыдущими более скоростными участками, «намазываясь» на них, и по этой причине не достигают дна каверны и не участвуют в ее дополнительном углублении [18–21]. Для учета влияния на пробитие КЗ технологических погрешностей его изготовления использовались те же два подхода, что и в работе [14]. Согласно первому из них в рассмотрение вводился предложенный в [32, 33] критерий эффективной скорости струи  $v_{eff}$ , соответствующей скорости последнего участка КС, углубляющего каверну до окончательной глубины. Эффективная скорость существенно зависит от расстояния  $F$  между зарядом и преградой. Эту зависимость брали в линейном виде

$$v_{eff} = 0.1468 \frac{F}{d_0} + 2.7439 \text{ [км/с]}, \quad (1)$$

полученном на основании обработки экспериментальных данных [34] для прецизионных КЗ с коническими облицовками.

На рис. 8,а приведены расчетные зависимости глубины пробития  $L$  КЗ с различными облицовками от их удаления от преграды  $F$  для «идеальных» зарядов, у которых все участки КС движутся строго соосно и участвуют в пробитии, а на рис. 8,б — те же зависимости, построенные по данным расчетов с использованием критерия эффективной скорости струи согласно (1). Отметим, что КЗ с кривыми про-



бития, представленными на рис. 8, *a*, можно отнести к «идеальным» лишь с некоторой степенью условности, так как параметры КС по результатам численного моделирования, как указывалось выше, определялись только в диапазоне скоростей выше  $v_{jt} = 2$  км/с. Таким образом, данные рис. 8, *a* соответствуют фактически расчетам с постоянной эффективной скоростью струи  $v_{eff} = 2$  км/с, в то время как для абсолютно «идеальных» зарядов значение  $v_{eff}$  должно определяться лишь прочностным сопротивлением материала преграды прониканию, составляя для рассматриваемой стальной преграды примерно  $1150 \div 1400$  м/с.

Как видно из рис. 8, *a*, при постоянном значении  $v_{eff} = 2$  км/с глубина пробития КЗ возрастает с их удалением от преграды, выходя при определенном значении  $F$  на постоянный уровень, соответствующий разрыву всех участков КС при достижении ими своей предельной длины, и в дальнейшем уже не изменяется. При этом предельное пробитие КЗ с конической облицовкой составляет  $14d_0$  (при  $F > 9d_0$ ), а с полусферической постоянной толщины — около  $9d_0$  (при  $F > 11d_0$ ), что значительно превышает максимальные экспериментальные данные по глубине пробития для этих зарядов. Предельные пробития условно «идеальных» КЗ с полусферической и полуэллипсоидной облицовками дегрессивной толщины и условно «идеального» КЗ с конической облицовкой близки, но при небольших расстояниях  $F < (4 \div 5)d_0$  конус пробивает заметно больше. Последнее обстоятельство связано с различием механизмов формирования КС, о котором говорилось выше. Из рис. 2 при  $t = 8$  мкс видно, что головной участок КС из конической облицовки формируется на расстоянии  $0.5d_0$  слева от основания КЗ (т. е. «внутри» заряда), в то время как согласно данным рис. 4 при  $t = 28$  мкс и

Рис. 8. Глубина пробития стальной преграды в зависимости от расстояния до нее для КЗ с различными облицовками:

1 — коническая облицовка, 2 — равнотолщинная полусферическая, 3 — полусферическая дегрессивной толщины, 4 — полуэллипсоидная дегрессивной толщины; *a* — расчет при постоянном значении  $v_{eff} = 2$  км/с; *б* — расчет при изменении  $v_{eff}$  согласно зависимости (1); *в*, *г*, *д* — расчеты при скорости дрейфа струи 8, 16 и 24 м/с соответственно

рис. 5 при  $t = 26$  мкс «выход» головных частей КС из схлопнувшихся полусферической и полуэллипсоидной облицовок наблюдается на удалении  $(0.15 \div 0.25)d_0$  справа от начального положения основания КЗ (т. е. вне зарядов). Это сокращает для КС из полусферической и полуэллипсоидной облицовок дегрессивной толщины время движения до преграды и, соответственно, уменьшает степень удлинения к моменту взаимодействия с преградой и пробивное действие по сравнению с КС из конической облицовки при примерно равных скоростях сравниваемых струй. Влияние этого эффекта проявляется отчетливо, когда расстояние до преграды невелико и сопоставимо с указанной разницей в координатах точек формирования головных частей КС.

При введении эффективной скорости струи, возрастающей с увеличением расстояния  $F$ , кривые пробития для всех КЗ приобретают при определенном значении  $F_{\max}$  экстремальную точку, соответствующую максимуму глубины пробития  $L_{\max}$  (рис. 8, б). При этом кривая пробития КЗ с конической облицовкой хорошо согласуется по значениям  $L_{\max} \approx 10d_0$  и  $F_{\max} \approx 7d_0$  с экспериментальными данными для таких КЗ в прецизионном исполнении, что и неудивительно, так как именно для них и была получена эмпирическая зависимость (1). Что касается КЗ с другими облицовками, то использование для них той же зависимости (1) для  $v_{\text{eff}}$ , как было отмечено в [14], является необоснованным. Об этом наглядно свидетельствуют результаты, полученные для КЗ с равнотолщинной полусферической облицовкой. Его расчетное максимальное пробитие  $L_{\max} \approx 2.5d_0$  при определении  $v_{\text{eff}}$  на основании (1) оказалось заметно ниже значения  $\approx 5d_0$ , достигаемого на практике [1]. Массово-скоростные распределения для КС из полусферической и полуэллипсоидной облицовок дегрессивной толщины, как и для КС из равнотолщинной полусферы, существенно отличаются от массово-скоростного распределения для КС из конической облицовки (см. рис. 7). А это означает, что кривые пробития и для КЗ с облицовками дегрессивной толщины в форме полусферы и полуэллипсоида, близкие по значению  $L_{\max}$  к кривой, соответствующей конусу, на практике могут быть вовсе и не близки, существенно отличаясь от вида, представленного на рис. 8, б,

в силу неправомерности использования для указанных зарядов тех же значений  $v_{\text{eff}}$ , что и для КЗ с конической облицовкой. Струя из полусферы дегрессивной толщины имеет заметно менее «массивную» по сравнению с КС из конуса головную часть, что должно привести к увеличению значения  $v_{\text{eff}}$ . Для КС из полуэллипсоида дегрессивной толщины с более «массивной», чем у струи из конуса, головной частью значение  $v_{\text{eff}}$ , напротив, может снизиться.

Гораздо более правдоподобный прогноз влияния точности изготовления КЗ с различными облицовками на их пробивное действие можно получить, если основываться на ином подходе, также использовавшемся в [14]. Этот подход заключается в задании для участков КС неизменной во времени боковой скорости дрейфа  $v_d$ . Расчет пробития КС прекращается в момент, когда какой-либо расчетный элемент струи смещается вбок настолько, что касается стенки каверны, пробитой впередиидущими элементами. Подобный алгоритм расчета пробивного действия КЗ реализован в используемой инженерной методике ATOS-M с возможностью задания одной и той же скорости дрейфа для всей струи в целом либо распределения этой скорости по длине струи по определенному закону [22]. Такой подход широко используется при прогнозировании пробития КЗ [35, 36] и хорошо себя зарекомендовал.

При определении диаметров участков пробоины, формируемых различными участками КС, в расчетах с заданием дрейфа струи предполагалось, что они пропорциональны произведению диаметра участка струи в момент проникания на скорость его осевого движения [37, 38] с эмпирическим коэффициентом пропорциональности, равным 0.7 с/км. Указанная взаимосвязь базируется на предположении, что объем пробиваемого в преграде канала пропорционален кинетической энергии участвовавшего в его образовании участка КС [1]. Расчеты для КЗ со всеми вариантами облицовок (см. рис. 1) были проведены с заданием постоянных для всей струи скоростей дрейфа 8, 16 и 24 м/с (рис. 8, в–д).

Из рис. 8, в, д видно, что при  $v_d = 16$  м/с максимальное пробитие  $L_{\max}$  КЗ с конической облицовкой несколько превышает уровень  $10d_0$ , соответствующий лучшим результатам современных подобных КЗ в прецизионном исполнении, а при  $v_d = 24$  м/с — несколько

ниже этого уровня. На основании этого можно заключить, что при достигаемом в настоящее время уровне точности изготовления КЗ с коническими облицовками скорость дрейфа формируемых ими КС лежит в диапазоне  $16 \div 24$  м/с. Значение  $v_d = 8$  м/с соответствует более высокому уровню прецизионности, пока еще не достигнутому, но в случае достижения позволяющему увеличить пробитие КЗ с коническими облицовками до  $12d_0$ .

Ввиду отсутствия какой-либо информации о взаимосвязи точности изготовления КЗ с другими рассматриваемыми облицовками со скоростью дрейфа образуемых ими КС, будем предполагать, что она остается такой же, как и у зарядов с конической облицовкой. Это предположение вполне коррелирует с результатами расчетов пробития, полученными для КЗ с равнотолщинной полусферической облицовкой. Как уже отмечалось, на практике считается, что такие КЗ обеспечивают глубину пробития стальной преграды до  $5d_0$  [1]. Это несколько ниже расчетных значений  $6d_0$  и примерно  $6.8d_0$ , соответствующих максимумам пробития КЗ с полусферической облицовкой постоянной толщины при  $v_d = 24$  и  $16$  м/с. Однако нет сведений, чтобы кем-либо использовались КЗ с полусферическими облицовками в прецизионном исполнении, так как их основной задачей является получение не возможно большей глубины пробития, а большого диаметра пробоины в преградах относительно небольшой толщины. Поэтому есть основания считать, что при обеспечении такой же точности изготовления КЗ с равнотолщинными полусферическими облицовками, как и у современных прецизионных КЗ с коническими облицовками, их максимальное пробитие может возрасти с  $5d_0$  до уровней, зафиксированных на рис. 8,2,д.

Введение ненулевой скорости дрейфа КС приводит к катастрофическим последствиям в отношении пробития КЗ с полусферической облицовкой дегрессивной толщины, причиной которых является отмечавшаяся выше чересчур малая «массивность» головной части струи. Уже при  $v_d = 8$  м/с максимальное пробитие этим КЗ по сравнению с условно «идеальным» зарядом (см. рис. 8,а) снижается более чем на 40 % ( $c \approx 13.3d_0$  до  $\approx 7.8d_0$ ), при  $v_d = 16$  м/с оно уже не превышает  $5.3d_0$ , а при  $v_d = 24$  м/с —  $3.9d_0$  (см. рис. 8,б–д). Характерно, что при учете дрейфа КС пробивное действие КЗ с полусферической облицовкой дегрессивной толщи-

ны при всех рассмотренных значениях  $v_d$  оказалось ниже, чем в случае КЗ с равнотолщинной полусферической облицовкой, на удалении от преграды  $F > 3d_0$ . Этот результат согласуется с данными экспериментов, проводившихся в [13] с КЗ, имевшими полусферические облицовки с различной степенью дегрессивности толщины.

Кумулятивный заряд с полуэллипсоидной облицовкой дегрессивной толщины благодаря «хорошей» головной части формируемой им КС, превосходящей по «массивности» головную часть струи из конуса, оказался способным конкурировать с КЗ с конической облицовкой по пробивному действию при различных скоростях дрейфа КС, даже несмотря на несколько меньшую скорость «головы» струи. При всех значениях  $v_d$  максимальное пробитие преграды зарядом с полуэллипсоидной облицовкой незначительно (в пределах нескольких процентов) превышало пробитие зарядом с конической облицовкой, но достигалось при этом на больших расстояниях от преграды (см. рис. 8,б–д). При  $F < (4 \div 5)d_0$  пробитие было заметно выше у КЗ с конической облицовкой из-за отмечавшегося выше смещения точки формирования «головы» КС из полуэллипсоида на  $\approx 0.65d_0$  в сторону преграды по сравнению с КС из конуса. В сравнении с КЗ с конической облицовкой заряд с облицовкой в форме полуэллипсоида дегрессивной толщины может быть охарактеризован как «дальнобойный». При  $v_d = 16$  и  $24$  м/с его пробитие на удалении  $F = 15d_0$  от преграды снижалось относительно максимального менее чем на 10 %, в то время как для КЗ с конической облицовкой это снижение составляло  $20 \div 25$  %.

По данным рис. 9 можно проследить за вкладом различных участков КС в пробитие преграды зарядами с различными облицовками при скорости дрейфа струй  $v_d = 16$  м/с на малом ( $F = 2d_0$ ) и большом ( $F = 15d_0$ ) расстояниях от преграды, а также на расстоянии  $F \approx F_{\max}$ , при котором пробитие близко к максимальному ( $F = 7d_0$  для КЗ с конической облицовкой и  $F = 8.5d_0$  для остальных КЗ). В качестве локального показателя пробивного действия КС выступает плотность  $l_p$  распределения глубина пробития — скорость струи, характеризующая глубину пробития, приходящуюся на единичный интервал скоростей. Из рис. 9 хорошо видно, как для всех КЗ с увеличением их удаления от преграды  $F$  возрастает

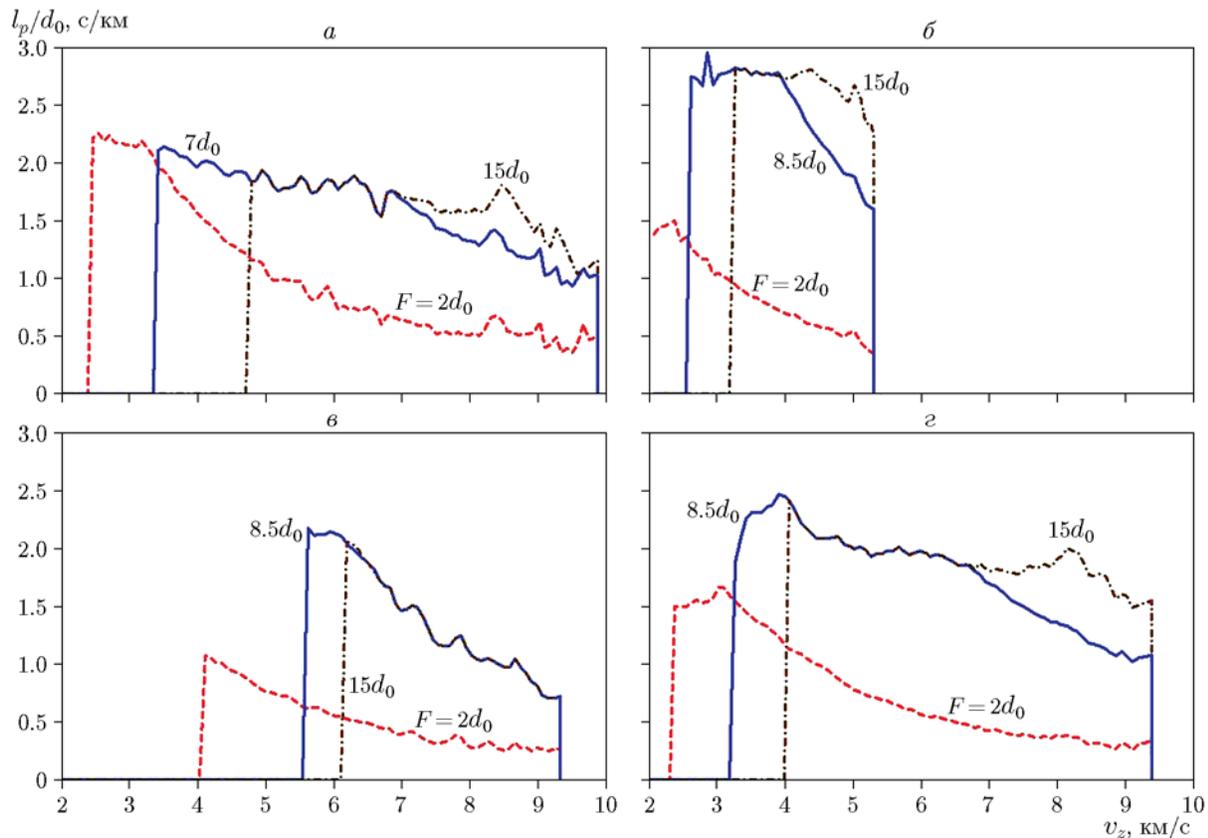


Рис. 9. Плотность распределений глубина пробития — скорость КС по результатам расчетов со скоростью дрейфа струи 16 м/с при различных удалениях КЗ с разными облицовками от преграды:

*a* — коническая облицовка, *б* — равнотолщинная полусферическая, *в* — полусферическая дегрессивной толщины, *г* — полуэллипсоидная дегрессивной толщины

эффективная скорость КС (ей соответствуют значения  $v_z$ , левее которых  $l_p/d_0 = 0$ ). Видно также, как у КС всех зарядов увеличивается локальная пробивная способность при переходе от  $F = 2d_0$  к средним удалениям, соответствующим пробитиям, близким к максимальным, что связано, очевидно, с более значительным растяжением струй. Из сравнения распределений  $l_p/d_0$  при удалениях  $F \approx F_{\max}$  и  $F = 15d_0$  для КЗ с конической, равнотолщинной полусферической и полуэллипсоидной облицовками (рис. 9, *a, б, г*) можно заключить, что головные участки формируемых ими струй на удалениях, при которых пробития близки к максимальным, продолжают проникать в неразорванном состоянии (это следует из того, что для них значения  $l_p/d_0$  возросли и при переходе от  $F \approx F_{\max}$  к  $F = 15d_0$ ). Струя из полусферической облицовки дегрессивной толщины (рис. 9, *в*) при  $F = 8.5d_0$  проникает уже в разо-

рванном по всей длине состоянии (для нее распределения  $l_p/d_0$  при  $F = 8.5d_0$  и  $F = 15d_0$  полностью накладываются друг на друга).

По распределениям  $l_p/d_0$  при  $F = 15d_0$  можно сопоставить предельную локальную пробивную способность КС разных зарядов, когда все участки струй исчерпали резервы дальнейшего удлинения, разорвавшись на отдельные безградиентные элементы. Выше всего она для КС из полусферы постоянной толщины при сосредоточении  $l_p/d_0$  в узком скоростном интервале, обусловленном невысокой скоростью «головы» струи (см. рис. 9, *б*). У КС из полуэллипсоидной облицовки предельная плотность распределения глубина пробития — скорость больше, чем у КС из конуса (см. рис. 9, *a, г*), хотя для значений  $l_p/d_0$  при  $F = 2d_0$  наблюдается противоположная картина — они выше для струи из конической облицовки, которая в силу особенностей формирования проходит

большой путь до преграды и успевает сильнее растянуться. Если основываться на массово-скоростных распределениях (см. рис. 7), можно сделать вывод о более высокой потенциальной пробивной способности участков КЗ в диапазоне скоростей  $3 \div 6.5$  км/с, сформированных из полусферической облицовки дегрессивной толщины, по сравнению с конической облицовкой. Однако эта потенциальная способность струи из полусферы дегрессивной толщины не реализуется ввиду высоких значений эффективной скорости, не позволяющих большей доле указанных участков КЗ принимать участие в пробитии, когда удаленность КЗ от преграды  $F$  достаточна для их предельного растяжения (см. рис. 9, в).

Зависимости эффективной скорости КС от расстояния между зарядом и преградой, полученные в расчетах со скоростью дрейфа струй  $16$  м/с, представлены на рис. 10. Вид этих зависимостей для разных КЗ согласуется с предварительными выводами, сделанными при анализе кривых пробития на рис. 8, б, соответствующих расчету  $v_{eff}$  по формуле (1). Как и следовало ожидать, ближе всего к эмпирической линейной зависимости (1), установленной для прецизионных КЗ с конической облицовкой, проходит кривая  $v_{eff}$ , соответствующая данному типу КЗ. Значения  $v_{eff}$  для КЗ с

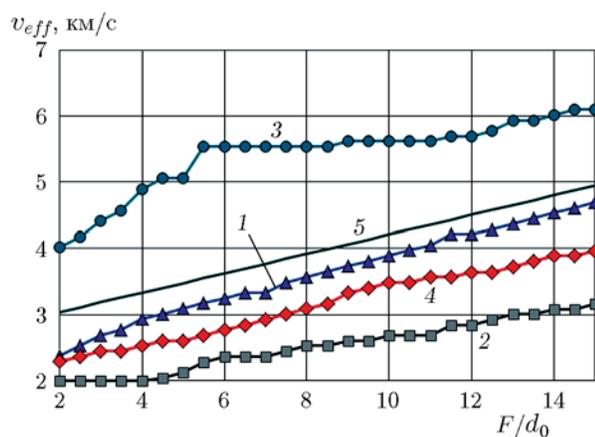


Рис. 10. Эффективная скорость КС в зависимости от расстояния до преграды для КЗ с различными облицовками по результатам расчетов со скоростью дрейфа струи  $16$  м/с:

1 — коническая облицовка, 2 — равнотолщинная полусферическая, 3 — полусферическая дегрессивной толщины, 4 — полуэллипсоидная дегрессивной толщины, прямая 5 — расчет  $v_{eff}$  по зависимости (1)

полусферической облицовкой постоянной толщины лежат существенно ниже эмпирической прямой (1), а для КЗ с облицовкой той же формы дегрессивной толщины — существенно выше. Эффективная скорость струи из полуэллипсоидной облицовки по данным расчетов с заданием ее дрейфа ниже эффективной скорости струи из конической облицовки.

Влияние точности изготовления, характеризующейся скоростью дрейфа струи, на максимальную глубину пробития КЗ с различными облицовками иллюстрирует рис. 11. Данные по снижению  $L_{max}/d_0$  с ростом значения  $v_d$  для зарядов с конической, равнотолщинной полусферической и полуэллипсоидной облицовками хорошо аппроксимируются линейными зависимостями. Для КЗ с полусферической облицовкой дегрессивной толщины уже при малых скоростях дрейфа струи наблюдается резкое снижение пробивного действия и для аппроксимации результатов расчетов  $L_{max}/d_0$  используется зависимость параболического вида. Зафиксированное на рис. 11 соотношение между пробивным действием разных КЗ находит логичное физическое обоснование, обсуждавшееся

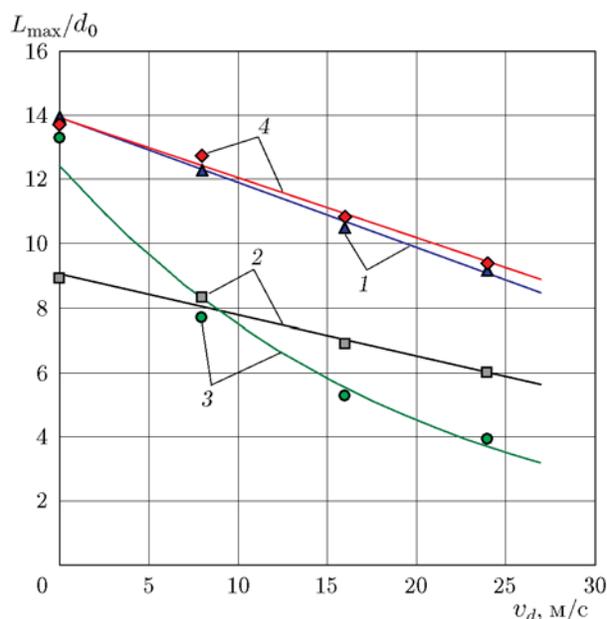


Рис. 11. Влияние скорости дрейфа КС на максимальную глубину пробития стальной преграды КЗ с различными облицовками:

1 — коническая облицовка, 2 — равнотолщинная полусферическая, 3 — полусферическая дегрессивной толщины, 4 — полуэллипсоидная дегрессивной толщины

ся выше. Это позволяет полагаться на достоверность результатов, полученных в рамках подхода с введением дрейфа КС, в отношении не только КЗ с конической и равнотолщинной полусферической облицовками, для которых они согласуются с имеющимися экспериментальными данными, но и в отношении КЗ с облицовками дегрессивной толщины в форме полусферы и полуэллипсоида, для которых экспериментальные данные отсутствуют или очень ограничены.

В целом полученные результаты еще раз подтверждают основной вывод работы [14] о том, что пробивное действие КЗ определяется не только скоростью головной части КС и предельной длиной струи, но и в значительной степени видом массово-скоростного распределения для КС.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из разных схем КЗ в настоящее время наиболее исследованными и широко применяемыми на практике являются заряды с коническими облицовками, поскольку обеспечивают наибольшую глубину пробития преграды. Для таких КЗ возможности дальнейшего увеличения их пробивного действия за счет оптимизации параметров облицовки и заряда, как представляется, близки к исчерпанию. Иное дело КЗ с другими типами облицовок, данные по которым не так систематичны и подробны. Проведенные исследования показали, что применение облицовок дегрессивной толщины полусферической и близкой к ней формы позволяет формировать КС с такой же скоростью «головы», как и у КС из конических облицовок. Для КЗ с облицовкой дегрессивной толщины в форме полуэллипсоида с полярной полуосью, несколько превышающей экваториальную, расчетный прогноз пробивного действия дал результаты, не уступающие современным КЗ с конической облицовкой, причем в отличие от последних в отсутствие линзового узла в заряде. Нельзя исключать, что дальнейшее совершенствование геометрии подобных облицовок, отличных по форме от конической, в сочетании с включением в заряд линзового узла с надлежащим управлением формой детонационного фронта может позволить получить КЗ с более высоким, чем у имеющих коническую облицовку, пробивным действием.

### 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. — N. Y.: 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. — <https://doi.org/10.1002/prep.19860110402>.
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. **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.
6. **Hornemann U., Holzwarth A.** Characteristics of shaped charges with hemispherical liners // Propell., Explos., Pyrotech. — 1993. — V. 18, N 5. — P. 282–287.
7. **Yu Ch., Tong Y., Yan Ch., Li F., Gui Y., Zhang M., Wang B., Xie P., Li L.** Applied research of shaped charge technology // Int. J. Impact Eng. — 1999. — V. 23, N 1, pt 2. — P. 981–988. — [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(99\)00140-2](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(99)00140-2).
8. **Федоров С. В.** Численное моделирование формирования кумулятивных струй полусферическими облицовками дегрессивной толщины // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 5. — С. 116–130. — DOI: 10.15372/FGV20160511.
9. **Федоров С. В.** О реализации принципа имплозии в кумулятивных зарядах с полусферическими облицовками дегрессивной толщины // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. — 2017. — № 3(72). — С. 71–92. — DOI: 10.18698/1812-3368-2017-3-71-92.
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. — <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.10.025>.
11. **Федоров С. В., Ладов С. В., Никольская Я. М., Баскаков В. Д., Бабурин М. А., Курепин А. Е., Горбунков А. А., Пирозерский А. С.** Формирование потока высокоскоростных частиц кумулятивными зарядами с облицовкой типа полусфера — цилиндр дегрессивной толщины // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 4. — С. 122–125. — DOI: 10.15372/FGV20170412.
12. **Selivanov V. V., Fedorov S. V., Nikolskaya Ya. M., Ladov S. V.** Research of the explosive formation of a compact element for meteoroids fragments and space debris modeling // Ac-

- ta Astronaut. — 2019. — V. 163. — P. 84–90. — <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.005>.
13. **Федоров С. В., Ладов С. В., Никольская Я. М., Курепин А. Е., Колобов К. С.** Расчетно-экспериментальное исследование функционирования кумулятивных зарядов с полусферическими облицовками дегрессивной толщины // Физика горения и взрыва. — 2020. — Т. 56, № 5. — С. 116–129. — DOI: 10.15372/FGV20200512.
  14. **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. — DOI: 10.15372/FGV20190616.
  15. **Hancock S. L.** Jet penetration for a class of cumulative mass profiles // Int. J. Impact Eng. — 1999. — V. 23, N 1, pt 1. — P. 353–363. — [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(99\)00086-X](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(99)00086-X).
  16. **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. — DOI: 10.15372/FGV20190413.
  17. **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.
  18. **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: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. — С. 473–477.
  19. **Ayisit O.** The influence of asymmetries in shaped charge performance // Int. J. Impact Eng. — 2008. — V. 35, N 12. — P. 1399–1404. — <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.07.027>.
  20. **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. — <https://doi.org/10.1002/prep.201500051>.
  21. **Cornish R., Mills J. T., Curtis J. P., Finch D.** Degradation mechanisms in shaped charge jet penetration // Int. J. Impact Eng. — 2001. — V. 26, N 1-10. — P. 105–114. — [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00072-0](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00072-0).
  22. **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. — <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2003.10.015>.
  23. **Федоров С. В., Велданов В. А., Смирнов В. Е.** Численный анализ влияния скорости и прочности удлиненных ударников из высокоплотного сплава на глубину их проникания в стальную преграду // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. — 2015. — № 1. — С. 65–83. — DOI: 10.18698/0236-3941-2015-1-65-83.
  24. **Федоров С. В.** О возможности «отсечки» лидирующего высокоскоростного участка металлической струи при взрыве кумулятивного заряда в аксиальном магнитном поле // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. — 2008. — № S2. — С. 73–80.
  25. **Кинеловский С. А., Тришин Ю. А.** Физические аспекты кумуляции // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 5. — С. 26–40.
  26. **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. — <https://doi.org/10.1063/1.370879>.
  27. **Walters W. P., Summers R. L.** A review of jet breakup time models // Propell., Explos., Pyrotech. — 1993. — V. 18, N 5. — P. 241–246. — <https://doi.org/10.1002/prep.19930180502>.
  28. **Chou P. C., Grudza M., Liu Y. F., Ritman Z.** Shaped charge jet breakup formula with metal anisotropy // Proc. 13th Int. Symp. on Ballistics, Stockholm, Sweden, 1992. — V. 2. — P. WM/489–496.
  29. **Curtis J. P., Moyses M., Arlow A. J., Kowan K. G.** A break-up model for shaped charge jets // Proc. 16th Int. Symp. on Ballistics, San Francisco, USA, 1996. — V. 2. — P. WM/369–377.
  30. **Hennequin E.** Modelling of the shaped charge jet break-up // Propell., Explos., Pyrotech. — 1996. — V. 21, N 4 — P. 181–185. — <https://doi.org/10.1002/prep.19960210404>.
  31. **Алексеевский В. П.** К вопросу о проникании стержня в преграду с большой скоростью // Физика горения и взрыва. — 1966. — Т. 2, № 2. — С. 99–106.
  32. **Hirsch E.** The natural spread and tumbling of the shaped charge jet segments // Propell., Explos., Pyrotech. — 1981. — V. 6, N 4. — P. 104–111. — <https://doi.org/10.1002/prep.19810060406>.
  33. **Held M.** Penetration cutoff velocities of shaped charge jets // Propell., Explos., Pyrotech. — 1988. — V. 13, N 4. — P. 113–119. — <https://doi.org/10.1002/prep.19880130405>.
  34. **Boeka D., Hancock S., Ouye N.** Cutoff velocity in precision shaped charge jets // Proc. 19th Int. Symp. on Ballistics, Interlaken, Switzerland, 2001. — V. 3. — P. 1471–1478.
  35. **Moyses M.** Penetration by shaped charge jets with varying off-axis velocity distributions // Proc. 17th Int. Symp. on Ballistics, Midrand, South Africa, 1998. — V. 2. — P. 413–420.

36. **Hancock S. L.** An extension of the umin model for cutoff of high precision jets // Int. J. Impact Eng. — 2001. — V. 26, N 1-10. — P. 289–298.
37. **Murphy M. J.** Survey of the influence of velocity and material on the projectile energy/target hole volume relationship // Proc. 10th Int. Symp. on Ballistics, San Diego, CA, USA, 1987. — V. 2.
38. **Held M.** Theoretical optimum jet diameter profile for maximum penetration // Proc. 17th Int. Symp. on Ballistics, Midrand, South Africa, 1998. — V. 2. — P. 259–265.

*Поступила в редакцию 08.10.2020.*

*Принята к публикации 19.02.2021.*

---