

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РИФЛЕННЫХ ОБЛИЦОВОК В КУМУЛЯТИВНЫХ СНАРЯДАХ К 30-ММ НАРЕЗНОМУ ОРУДИЮ

С.С. Рассоха, А.В. Бабкин, С.В. Ладов, В.А. Одинцов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

e-mail: rassokha@list.ru; pc-os@bmstu.ru; sm4-2009@mail.ru

Приведены результаты анализа одного из технических решений в области боеприпасной техники — малокалиберного кумулятивного снаряда М789 к нарезной 30-миллиметровой пушке М230 вертолета “Апач”. Анализ проведен в свете идеи спин-компенсации — противодействия негативному влиянию собственного вращения боеприпаса на его пробивное действие за счет создания условий для проявления вращательных эффектов противоположной (компенсирующей) направленности. Для анализа использованы инженерная методика расчета действия вращающихся кумулятивных зарядов, зарубежные литературные источники по спин-компенсации и рифленным облицовкам, численное моделирование схлопывания и закручивания рифленных облицовок кумулятивных зарядов.

Keywords: кумуляция, кумулятивный заряд, кумулятивная струя, рифленая облицовка, вращение, спин-компенсация, проникание.

ON UTILIZATION OF FLUTED LINERS IN SHAPED CHARGES FOR THE 30-MM RIFLED GUN

S.S. Rassokha, A.V. Babkin, S.V. Ladov, V.A. Odintsov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: rassokha@list.ru; pc-os@bmstu.ru; sm4-2009@mail.ru

Results of the analysis of a technical solution in the field of weapon technology (30-mm small-caliber round M789 to the Apache Longbow M230 gun) are given. The analysis was performed in the context of spin-compensation idea: counteraction to the negative effect of the shaped charge spinning on the jet penetration depth by means of creation of conditions for arising of opposite-directed spinning effects. The engineering technique to estimate a performance of the spinning shaped charges, the foreign literature devoted to spin-compensation and fluted liners, and the numerical modeling of collapsing and self-spinning of fluted liners of the shaped charges were used for the analysis.

Keywords: Munroe effect, shaped charge, shaped charge jet, fluted liner, spinning, spin-compensation, penetration.

Малокалиберный кумулятивный снаряд М789 входит в боекомплект нарезной 30-мм пушки М230 Chain Gun вертолета “Апач” [1]. В боекомплекте всего 1200 таких выстрелов.

При выстреле из пушки М230 снаряду М789 сообщается очень большое вращение — 1000 об/с или 60000 об/мин [2]. При функционировании у цели происходит дальнейшее усиление вращательных эффектов [3]. Струеобразующий слой схлопывающейся кумулятивной облицовки раскручивается примерно в 50–100 раз за счет уменьшения момента инерции. После формирования кумулятивной струи

вследствие ее растяжения в свободном полете и продолжения уменьшения момента инерции возможна еще примерно 10-кратная раскрутка струи. Результирующее вращение имеет критически большое значение для сохранения целостности струи и полноценного кумулятивного действия [4], даже с учетом того, что предполагаемой типовой целью для снаряда М789 является легко бронированная техника, а толщина преодолеваемой брони составляет 25–50 мм под углом 60° [1]. Подобные соображения послужили основой для формирования мнения у ряда специалистов о непервоочередности и неперспективности создания кумулятивного боеприпаса (БП) малого калибра для нарезных орудий с таким интенсивным начальным вращением.

Судя по фактам, авторы кумулятивного снаряда М789 этой точки зрения не разделяли. Снаряд создавался в рамках концепции так называемой спин-компенсации — противодействия негативному влиянию на пробивное действие кумулятивных БП их собственного траекторного вращения за счет создания условий для проявления вращательных эффектов противоположной (компенсирующей) направленности [5, 6].

Существуют два основных способа спин-компенсации. Первый — это так называемая самозакрутка схлопывающейся кумулятивной облицовки и формируемой струи противоположно собственному вращению БП. Достигается это с помощью раскатных кумулятивных облицовок за счет приобретаемой ими в процессе ротационной вытяжки анизотропии свойств [5–8]. Этот способ более подходит для БП с относительно невысокими частотами вращения — порядка нескольких десятков оборотов в секунду (противотанковые управляемые ракеты, гранаты к ручным противотанковым гранатометам).

Второй из известных способов спин-компенсации также связан с закруткой облицовки и струи противоположно собственному вращению боеприпаса. Однако в этом случае эффект вращательного противодействия достигается за счет использования кумулятивных облицовок особой формы — так называемых *fluted liners* — рифленых, или ребристых, облицовок [5, 6, 9]. Кумулятивный боеприпас М789 к пушке М230 калибром 30 мм вертолета “Апач” был создан американскими исследователями именно за счет использования такой рифленой облицовки.

Для оценки значимости создания малокалиберного кумулятивного БП и его наличия в боекомплекте вертолета приведем следующую цепочку причинно-следственных взаимосвязей и рассуждений.

Известно [10], что сопоставимый с “Апачем” отечественный вертолет Ми-28 вооружен нарезной пушкой 2А42, заимствованной из БМП-2, и также 30-миллиметрового калибра. Масса пушки 2А42

составляет 114 кг. Артиллерийский боекомплект “Ми-28” не имеет кумулятивного БП, но включает в себя осколочно-фугасный снаряд и бронебойный составной снаряд ударно-кинетического действия с подкалиберным сердечником с начальной скоростью 1100 м/с. Боекомплект пушки “Апач” такого высокоскоростного снаряда ударно-кинетического действия не имеет. Начальная скорость выстрела из пушки М230 кумулятивным снарядом М789 составляет 800 м/с, масса пушки М230 — 45 кг. Пушка 2А42 является более тяжелой по сравнению с М230 не только по причине неспециализированности и заимствования с БМП-2. Большая масса пушки обусловлена и необходимостью обеспечения больших внутрибаллистических параметров и более высокой начальной скорости выстрела. В такой ситуации более легкая специализированная пушка вертолета “Апач” позволяет обеспечить превосходство по числу выстрелов в боекомплекте. Таким образом, одним из важнейших последствий создания малокалиберного кумулятивного БП М789 является то, что боекомплект пушки вертолета “Апач” в несколько раз превосходит боекомплект сопоставимого отечественного вертолета “Ми-28” [10]. Значимость же этого факта в деле обеспечения эффективности боевого применения вертолетов очевидна.

В предлагаемой статье будут даны оценки основных параметров функционирования быстровращающегося малокалиберного кумулятивного снаряда типа М789, рассмотрены особенности работы рифленых облицовок, явление их контрзакрутки против собственного вращения БП, спин-компенсационные возможности различной направленности.

Ввиду отсутствия точных данных по конструктивным параметрам снаряда М789, будем опираться на известный 25-мм кумулятивный заряд из флегматизированного гексогена с высокой кумулятивной облицовкой (угол раствора 23°) [4]. Приведем сначала оценки пробивного действия этого заряда в зависимости от частоты его собственного вращения, свойств материала облицовки, наличия дополнительной преграды между зарядом и основной преградой.

Оценки сделаны с помощью предложенной ранее инженерной методики расчета параметров функционирования вращающихся кумулятивных зарядов [3]. В ее основе — известная методика расчета невращающихся кумулятивных зарядов [11], дополненная учетом ряда особенностей поведения растягивающихся кумулятивных струй [12] и выявленными критериями их разрушения при быстром вращении [13]. Из ряда возможных видов разрушения вращающейся струи [4] в качестве основного и определяющего принималось центробежное разрушение

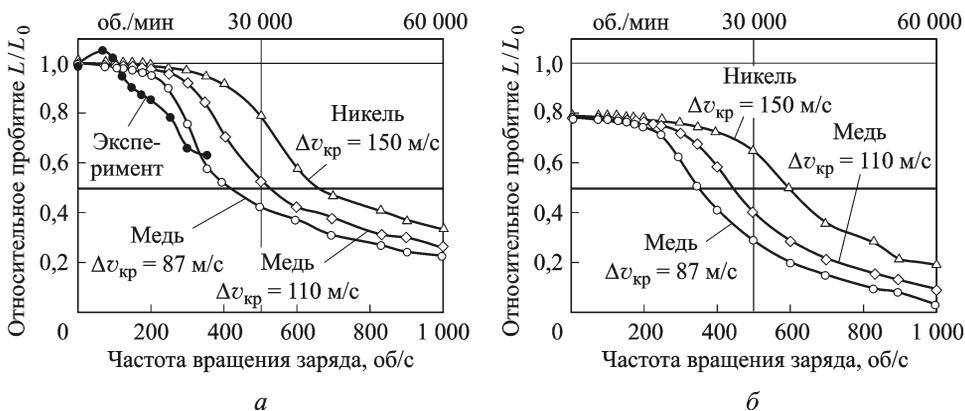


Рис. 1. Расчетное прогнозирование пробивного действия вращающегося кумулятивного заряда:

a — без учета взрывателя; *б* — с учетом взрывателя согласно [2]; \circ — экспериментальные данные [4]; \square — медь, критическая скорость $\Delta v_{кр} = 87$ м/с; \diamond — медь, $\Delta v_{кр} = 110$ м/с; Δ — никель, $\Delta v_{кр} = 150$ м/с

— радиальный разлет материала струи, начинающийся с определенного момента, приводящий к разуплотнению струи и к уменьшению ее пробивной способности [5].

На рис. 1 показаны результаты расчетов. Фокусное расстояние заряда принималось равным 15... 25 мм [1, 4]. Считалось (рис. 1, *a*), что действие происходит непосредственно по основной преграде с указанного фокуса. В отсутствие вращения расчетная глубина пробития L_0 составила около 100 мм; учитывалось (рис. 1, *б*) наличие в реальном снаряде головного взрывательного устройства с осевой протяженностью 55 мм [1]. В расчете оно учитывалось как дополнительная однородная преграда со средней плотностью $0,9$ г/см³, свойственной радиоэлектронной аппаратуре [14]. В обоих случаях под глубиной пробития L понималось пробитие основной преграды. Толстой горизонтальной линией на обоих рисунках показан требуемый уровень пробития для снаряда М789 — 50 мм по ходу: все, что ниже этой линии, не удовлетворяет требованиям к пробивной способности снаряда.

Как было показано раньше и как это видно на рис. 1, пробивное действие в условиях вращательной динамики очень сильно зависит от свойств материала облицовки, характеризующихся значением критической скорости струи $\Delta v_{кр} = 0,65 \sqrt{Y_0/\rho}$, где Y_0 — динамический предел текучести, ρ — плотность [12]. Чем больше динамическая прочность, тем выше противодействие центробежному разрушению струи, и этот фактор с точки зрения влияния на пробитие оказывается сильнее и преодолевает побочное в данном случае негативное влияние повышения прочности на коэффициент предельного удлинения кумулятивной струи. Приведенные на рис. 1 значения критической скорости для меди М0 (87 м/с) и никеля (150 м/с) взяты из работы [15], критическая

скорость 110 м/с более соответствует меди М1 согласно экспериментальным данным [11].

Из рис. 1 следует, что облицовки из меди с различным значением критической скорости могут давать различие в пробивном действии до 25 %. А превосходство по пробитию динамически более прочного никеля — более чем в 2 раза. Расчет предсказывает, что при не слишком больших частотах вращения от 0 до 350...400 об/с все рассмотренные варианты материалов кумулятивной облицовки соответствуют предъявляемым требованиям: пробитие основной преграды превышает 50 мм ($L/L_0 > 0,5$). Одновременно из расчета следует, что при высоких частотах вращения 600...1000 об/с ни один из вариантов не является проходным. При рабочей частоте вращения снаряда М789 $n = 1000$ об/с даже динамически относительно высокопрочный никель цепляет основную преграду лишь на 20 мм. Пробитие же основной преграды зарядом с любой из медных облицовок и вовсе мало — менее 10 мм.

Проведенные расчетные оценки не только подтверждают объективную необходимость использования спин-компенсационных мероприятий в снаряде М789, но и ориентируют относительно количественных параметров спин-компенсации, которые следует обеспечить. Так, для никелевой облицовки необходимая спин-компенсация должна характеризоваться показателем 400 об/с, так чтобы при противодействии рабочей частоте $n = 1000$ об/с условия функционирования снаряда были бы эквивалентны вращению с частотой не более 600 об/с (см. рис. 1, б). С точки зрения изготовления рифленых кумулятивных облицовок никель, видимо, будет уступать меди — более дешевой, более технологичной, менее дефицитной. Конечно, медь в условиях массового производства будет предпочтительнее по технологико-экономическим показателям. Однако медные облицовки должны быть компенсированы в 1,5 раза больше — на 600 об/с с обеспечением эквивалентной частоты не более 400 об/с.

В какой мере возможно обеспечить спин-компенсацию в 600 об/с при использовании рифленых медных облицовок для кумулятивного снаряда калибром 30 мм? В ранних зарубежных основополагающих работах [5] с помощью рифленых облицовок достигалась спин-компенсация 210 об/с для снаряда калибра 57 мм. При этом достаточно оптимистично прогнозировалась возможность спин-компенсации собственного вращения до 1000 об/с. Однако в более поздних работах спин-компенсационные достижения более скромны. Например, в работе [16] вращающийся заряд калибром 40 мм компенсировался на частоте 250 об/с. По-видимому, наивысшая из приведенных в доступной литературе компенсирующая частота составляет 450 об/с

так же, как и для 40-миллиметрового кумулятивного заряда [17]. Что касается рассматриваемого кумулятивного снаряда М789 калибром 30 мм, его спин-компенсационные характеристики не опубликованы. Их можно оценить, ориентируясь на сделанный в работе [5] вывод об обратной пропорциональности компенсирующей частоты масштабному фактору, а также опираясь на самую оптимистичную экспериментальную информацию по спин-компенсации с помощью рифленых лайнеров: $n = 450/30 \cdot 40 = 600$ об/с. Это как раз та минимальная спин-компенсация, которую нужно обеспечить в снаряде М789 с помощью медной рифленой кумулятивной облицовки для того, чтобы он удовлетворил требованиям по пробитию.

Таким образом, судя по оценкам, спин-компенсация в снаряде М789 не парирует негативное влияние собственного вращения снаряда полностью (оно слишком велико для этого), а только частично, минимально необходимо и близко к пределу достижимого сегодня. Можно ли достичь большего? Если это возможно, то что для этого нужно? Какой должна быть конструкция рифленой облицовки в других представляющих практический интерес случаях?

Ответ на эти вопросы, очевидно, можно найти в области изучения механизма работы кумулятивных зарядов с рифлеными облицовками. И хотя внимание этим вопросам уделялось еще в фундаментальных работах [5] в виде выделения эффектов толстый-тонкий и транспортный, полной и даже принципиальной ясности нет до сих пор [18].

Приведем некоторые результаты численного моделирования работы кумулятивного заряда с рифленой кумулятивной облицовкой.

Численное моделирование процесса схлопывания рифленой кумулятивной облицовки было выполнено в двумерной плоской постановке методом SPH в программе LS-DYNA (версия: ls971s R5.0, распространитель: ANSYS, Inc.) [19, 20].

Традиционно выделяется пять возможных типов рифленых облицовок в зависимости от формы их поперечного сечения (рис. 2) [5].

Моделировалось схлопывание третьего, четвертого и пятого типов облицовок согласно классификации [5], поскольку первый и второй тип представляют меньший интерес с практической и научной точек зрения.

В качестве модели материала облицовки использовалась модель идеального упругопластического тела с пределом текучести $\sigma_T = 200$ МПа. В качестве модели ВВ использовалась модель среды с уравнением состояния в форме JWL [12, 19, 20] и с вариантом мгновенной детонации.

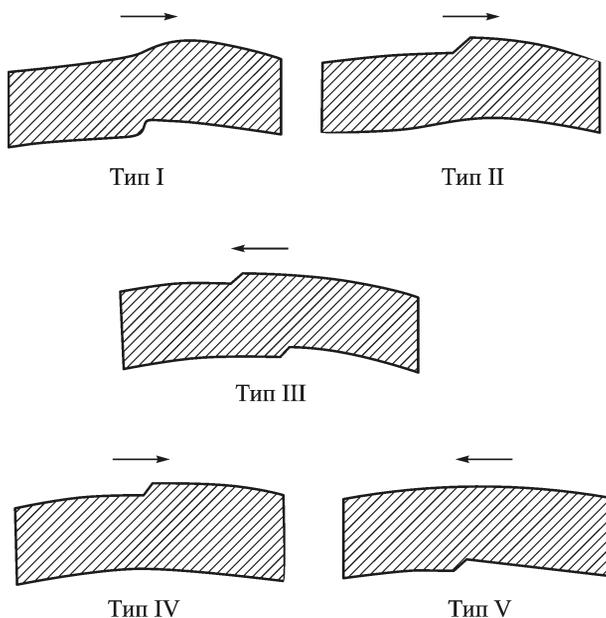


Рис. 2. Типология рифленых облицовок в зависимости от формы поперечного сечения [5]

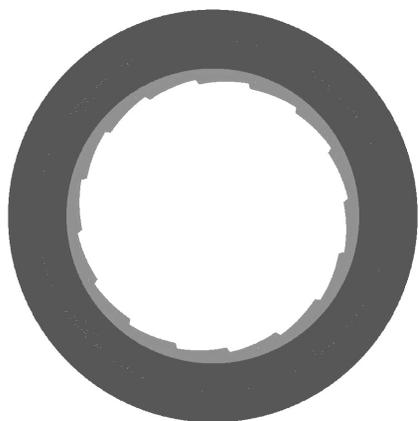


Рис. 3. Геометрическая модель рассчитываемой задачи

Геометрическая модель облицовки пятого типа и ВВ для рассчитываемой задачи представлена на рис. 3.

В процессе схлопывания рифленая облицовка приобретает вращательное движение под действием нагрузки продуктов детонации. При этом может вращаться как вся облицовка целиком в одну сторону, так и отдельные ее части в противоположные стороны. Например, для облицовок пятого типа характерно, что их часть, прилегающая к внутренней поверхности и переходящая впоследствии в струю (струеобразующий слой), вращается в одну сторону, а остальная облицовка — в противоположную.

На рис. 4 приведены распределения угловой скорости для облицовок трех типов для трех стадий ее схлопывания. Темные и светлые

Размеры сечения кумулятивного заряда были выбраны в соответствии с данными, приведенными в работе [5]. Радиус взрывчатого вещества ($R_{ВВ}$) составлял 21 мм; внешний радиус облицовки (по вершинам выступов, R) — 15 мм; толщина облицовки (T) — 1,5 мм; глубина оребрения (a) — 0,5 мм; угол наклона оребрения (ψ) 30° ; число ребер (n) 16; угол перекрытия ребер (для облицовки третьего типа [5]) $7,2^\circ$.

Геометрическая модель облицовки

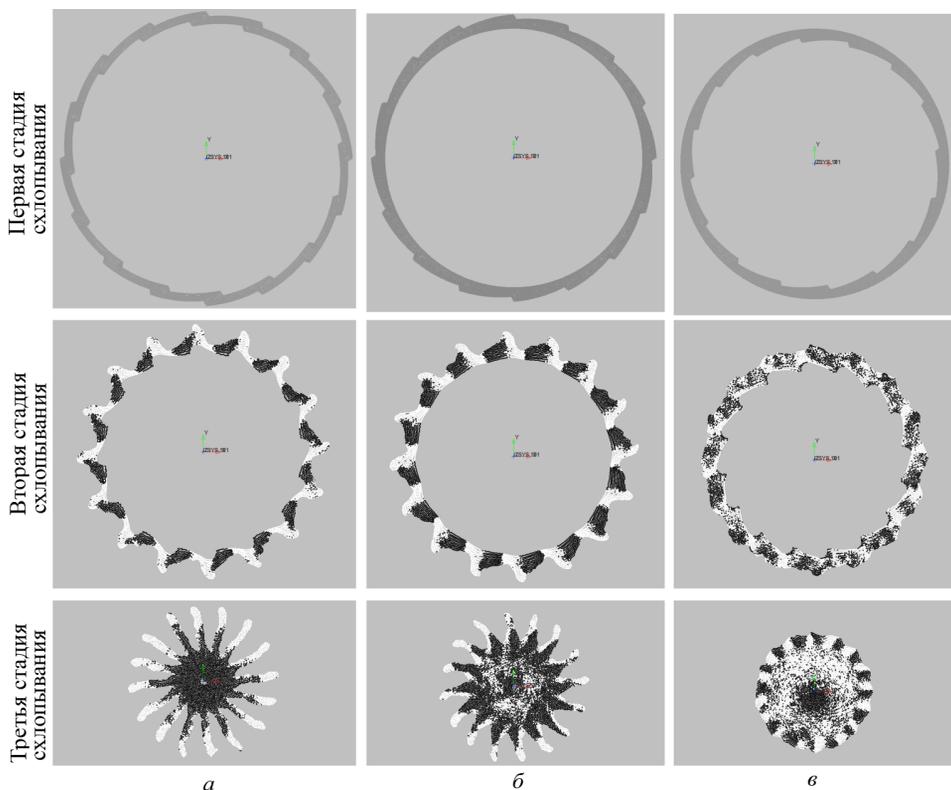


Рис. 4. Распределение угловой скорости по толщине облицовки третьего (*а*), четвертого (*б*) и пятого (*в*) типов для трех стадий ее схлопывания

участки на рис. 4 обозначают области кумулятивной облицовки, вращение которых направлено по ходу часовой стрелки и против.

Из этих рисунков следует, что на начальном этапе различные части облицовки вращаются в разные стороны (светлые и темные зоны). В дальнейшем, устанавливается равновесное состояние (баланс скоростей подводится в соответствии с законом изменения момента импульса), для которого характерно преобладание окружной компоненты скорости одного знака в струеобразующем слое — так называемая раскрутка струеобразующего слоя.

Также отметим качественное различие в процессах схлопывания облицовок с оребрением на наружной и внутренней поверхностях. В первом случае на внешней поверхности происходит развитие неустойчивости Релея–Тейлора под действием инерционных сил на границе раздела сред, что выражается в появлении удлиняющихся рукавов. Во втором случае, наоборот, происходит подавление этой неустойчивости вследствие того, что ускорение на границе облицовка–продукты детонации направлено в противоположную сторону, если сравнивать с наружным рифлением.

Анализируя количественные различия характеристик процесса схлопывания трех типов облицовок можно сделать следующие основные выводы.

Во-первых, на наш взгляд, действует несколько механизмов приобретения вращения такими облицовками. Так, облицовки с орebrением на внешней поверхности в целом приобретают вращение за счет отталкивания от продуктов детонации. Это подтверждается тем фактом, что продукты детонации приобретают такой же результирующий момент импульса, что и вся облицовка, но направленный в противоположную сторону. Облицовки же с рифленой внутренней поверхностью и гладкой наружной в целом не вращаются. В них происходит перераспределение угловой скорости по толщине облицовки таким образом, что струеобразующий слой вращается в одну сторону, а остальная часть облицовки вращается в противоположную сторону.

Во-вторых, значение и направление угловой скорости струеобразующего слоя совпадают для всех трех типов облицовок. Данный факт противоречит данным, приведенным в работе [5]. Одной из возможных причин этого может служить используемое приближение мгновенной детонации. Это гипотеза подтверждается тем, что для случая сходящейся детонационной волны направление вращения струеобразующего слоя для облицовки пятого типа изменяется на противоположное и, таким образом, совпадает с указанным в [5]. Следовательно, направление вращения струеобразующего слоя облицовок пятого типа зависит от режима ее нагружения детонационной волной. Этот факт невозможно объяснить в рамках качественной модели, предложенной в [5].

В третьих, угловая скорость вращения струеобразующего слоя, вычисленная для облицовок трех типов значительно отличается по абсолютному значению, совпадая при этом (для варианта мгновенной детонации) по направлению. Струеобразующие слои трех рассмотренных типов облицовок вращаются по ходу часовой стрелки (отрицательное значение угловой скорости) (рис. 5).

Струеобразующий слой облицовок четвертого и пятого типов, вращается с усредненной угловой скоростью 15 000... 20 000 рад/с. В то же время струеобразующий слой облицовок третьего типа вращается с угловой скоростью порядка 180 000 рад/с, что приблизительно, на порядок больше. Пока до конца непонятно, чем обусловлено такое резкое увеличение угловой скорости, но этот факт также не находит своего объяснения в рамках качественной модели [5].

Исходя из полученного значения закрутки струеобразующего слоя облицовок третьего типа (180 000 рад/с или 30 000 об/с) можно приблизительно оценить компенсируемую такой облицовкой угловую ско-

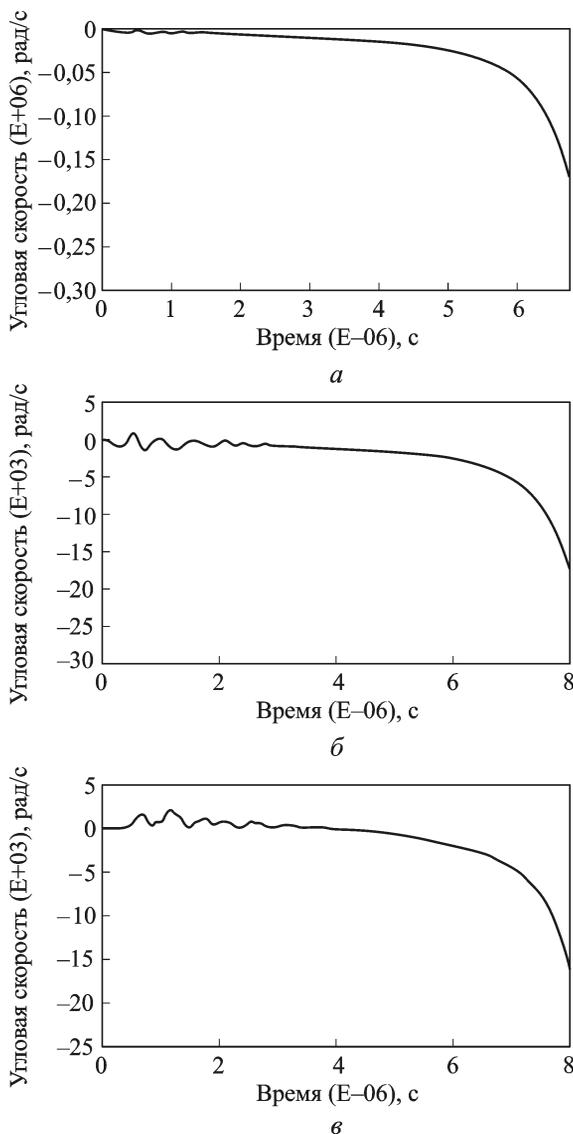


Рис. 5. Зависимость от времени угловой скорости струеобразующего слоя для облицовки третьего (а), четвертого (б) и пятого (в) типов

рость вращения кумулятивного заряда. В процессе схлопывания радиус облицовки уменьшается приблизительно в 10 раз. Как следует из закона сохранения момента импульса, угловая скорость возрастает пропорционально квадрату радиуса. Таким образом, компенсируемая угловая скорость составит $30\,000/100 \approx 300$ об/с. Это значение, как следует из приведенных ранее данных, приблизительно совпадает с полученной экспериментально оценкой и недостаточно для компенсации собственного вращения малокалиберных кумулятивных снарядов. Из этого можно сделать вывод, что, скорее всего, рифленые облицовки сами по себе, без каких-то дополнительных мер не способны

противостоять огромной угловой скорости вращения малокалиберных снарядов.

В целом, стоит отметить, что процесс изучения рифленых облицовок содержит множество вариантов развития. Поэтому в качестве возможного направления дальнейших исследований можно указать на недостаточную изученность влияния геометрических размеров облицовки и механических свойств ее материала на угловую скорость вращения кумулятивной струи. Частные зависимости, приведенные в работе [5], представляют интерес, но не позволяют обосновать выбор конструкции кумулятивной воронки для противодействия вращению заряда с заданной угловой скоростью вращения. Также отсутствует возможность обоснованно определить верхний предел угловой скорости снаряда, компенсируемый с помощью рифленых облицовок.

Кроме того, открытым остается вопрос о причинах, вызывающих вращение рифленых облицовок. Качественная теория Эйчельбергера [5] не может объяснить зависимость направления вращения облицовок пятого типа от глубины оребрения [16] и режима нагружения детонационной волной. Следовательно, она нуждается в уточнении.

Таким образом, в настоящей статье описаны результаты численного моделирования схлопывания рифленых кумулятивных облицовок под действием расширяющихся продуктов детонации. На качественном уровне описан процесс эволюции поля угловых скоростей в трех типах облицовок. Обнаружена зависимость направления вращения струеобразующего слоя от режима нагружения детонационной волной. Даны приблизительные количественные оценки угловой скорости вращения кумулятивной струи, образующейся из рифленых облицовок трех типов. Показано, что применение только рифления облицовок без каких-либо дополнительных мер не позволит полностью компенсировать собственное вращение малокалиберного снаряда. Таким образом, в работе оценена совокупность обстоятельств, связанных с использованием рифленых облицовок в малокалиберных кумулятивных снарядах к нарезным орудиям. Возможно, этот принцип создания кумулятивных боеприпасов будет применим и в других случаях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Apache AH-64D Longbow*. http://www.tonyrogers.com/weapons/ah64_gun_firing.htm
2. *Geaney J.T.* M759 30mm fuze sensitivity improvements // Proc. of the 53rd Annual Fuze Conference. Lake Buena Vista, 2009.
3. *Бабкин А.В., Рассоха С.С., Ладов С.В.* Методика расчета параметров функционирования вращающихся кумулятивных зарядов // Оборонная техника. 2010. № 1–2. С. 23–30.

4. Дубовской М.А. Особенности формирования струи во вращающихся кумулятивных зарядах и оценка возможности повышения бронебойного действия кумулятивных боеприпасов: Дисс... канд. техн. наук; 20.02.21 / Науч.-исслед. ин-т № 24 Гос. ком. по оборонной технике Совмина СССР. М., 1964. 178 с.
5. Eichelberger R.J. Spin compensation. Critical Review of Shaped Charge Information. Ballistic Research Laboratories Report No. 905/ Edited by L. Zernov.-Maryland: Aberdeen Proving Ground, 1959, 347 p.
6. Simon J., DiPersio R., Eichelberger R.J. Shaped charge performance with linear fluted liners. Ballistic Research Laboratories Memorandum Report № 1231. Maryland: Aberdeen Proving Ground, 1954, 38 p.
7. Chou P.C., Segletes S.B. Jet rotation resulting from anisotropy of shaped-charge liners / Proc. of the 11th International Symp. on Ballistics. Brussell, 9–11 May, 1989, vol. II, pp. 37–46.
8. Held M. Spinning jets from shaped charges with flow turned liners // Proc. of the 12th International Symp. on Ballistics. San Antonio, Texas, USA, Oct. 30–Nov. 1, 1990, vol. III, pp. 37–46.
9. Walters W.P., Zucas J.A. Fundamentals of shaped charges. N.Y.: John Wiley and Sons, 1989. 398 p.
10. Распашин М. Боевые возможности вертолета Ми-28Н преувеличены. Poleмика // Независимое военное обозрение. № 9. 2009. С. 15.
11. Маринин В.М., Бабкин А.В., Колпаков В.И. Методика расчета параметров функционирования кумулятивного заряда // Оборонная техника. 1995. № 4. С. 34–49.
12. Физика взрыва: в 2 т. / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум и др.; ред. Л.П. Орленко. Т. 2. М.: Физматлит, 2002. 656 с.
13. Бабкин А.В., Рассоха С.С., Ладов С.В. О центробежном разрушении градиентных стержней // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. Спец. вып. “Актуальные проблемы развития ракетно-космической техники и систем вооружения”. С. 182–195.
14. Варламов Р.Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. радио, 1975. 351 с.
15. Свирский О.В., Власова М.А. Рейтинговая оценка металлов по перспективности их применении в облицовках кумулятивных зарядов // Изв. РАРАН. 2006. № 3 (48). С. 83–88.
16. Study of spin-compensated shaped charges / A. Koch, P. Jaggy, W. Jaun and F. Haller // Proc. 19th Int. Symp. on Ballistics. Interlaken (Switzerland), 2001, pp. 1501–1508.
17. Cox C.M. Warhead mechanisms study. Ballistic Research Laboratories Report No. DA-33-019-ORD-3697. Maryland: Aberdeen Proving Ground, 1964, 147 p.
18. Study of spin-compensated shaped charges / A. Koch, P. Jaggy, W. Jaun and F. Haller // Proc. 19th Int. Symp. on Ballistics. Interlaken (Switzerland), 2001, pp. 1501–1508.
19. Hallquist J.O. LS-DYNA Theory manual. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2006, 680 p.
20. LS-DYNA keyword user’s manual. Volume I, II. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2012.

Статья поступила в редакцию 21.11.2012