

## АНАЛИЗ ОСЕВОГО ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ РИФЛЕННЫХ КУМУЛЯТИВНЫХ ОБЛИЦОВОК

С.С. Рассоха

С.В. Ладов

А.В. Бабкин

rassokha@list.ru

sm4-2009@mail.ru

pc-os@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Выполнен анализ осевого вращательного движения рифлених кумулятивных облицовок с помощью численных методов и аналитического подхода. Показано, что причиной возникновения такого вращательного движения является зависимость давления на границе раздела облицовки и продуктов детонации нагружающего взрывчатого вещества от угла наклона фронта проходящей косой ударной волны. На основании зависимости давления от угла падения ударной волны построена модель, позволяющая определить угловую скорость вращения рифленой кумулятивной облицовки. Изучено влияние свойств материала облицовки, размеров ее поперечного сечения на угловую скорость вращения. Полученные результаты удовлетворительно совпадают с известными экспериментальными данными

### Ключевые слова

*Кумулятивный заряд, кумулятивная струя, рифленая облицовка, косая ударная волна, вращение, спин-компенсация*

Поступила в редакцию 19.04.2016  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

---

Известно, что кумулятивные заряды (КЗ), вращающиеся вокруг своей оси симметрии с частотой в диапазоне от 10 до  $10^3$  об/с, пробивают отверстия меньшей глубины, чем при отсутствии вращения [1–3].

Причина этого эффекта заключается в следующем [2, 3]. Образование кумулятивной струи (КС) происходит в процессе схлопывания кумулятивной облицовки (КО) — движения в радиальном направлении к оси симметрии. При этом уменьшаются ее наружный радиус и осевой момент инерции. В силу закона сохранения кинетического момента это приводит к значительному увеличению начального вращения, струя раскручивается до частоты  $\sim 10^5$  об/с.

Возникающие под действием столь большой угловой скорости силы инерции превышают прочностной предел материала струи, что ведет к ее разрушению на мелкие элементы. В результате струя представляет собой поток частиц с уменьшающейся со временем средней плотностью, который пробивает преграду значительно меньшей толщины, чем монолитная КС.

В связи с негативным влиянием вращения на КС предложено несколько способов уменьшения этого влияния, объединенных понятием «спин-компенсация» [1–11]. Одним из таких способов является использование КО с боковой поверхностью специально профилированной формы — рифлених облицовок.

Цель такого профилирования заключается в закрутке КО в сторону, противоположную собственному вращению заряда, что уменьшает результирующее вращение КС и увеличивает глубину пробиваемой преграды.

Все многообразие рифленых КО в работе [3] разбито на пять классов по форме и наличию наружного и внутреннего рифлений: наружное рифление обращено в сторону взрывчатого вещества, внутреннее — выполнено на обращенной в сторону оси симметрии свободной поверхности облицовки. Наибольший интерес представляют облицовки, у которых рифление выполнено на наружной и внутренней боковых поверхностях, поскольку они позволяют компенсировать наибольшую угловую скорость собственного вращения КЗ.

Геометрические размеры поперечного сечения такой облицовки можно охарактеризовать шестью параметрами [3] (рис. 1):  $T$  — толщина заготовки;  $a$  — высота рифления;  $R$  — радиус наружной поверхности облицовки;  $\psi$  — угол выступающей поверхности рифления;  $\delta$  — так называемый индексный угол;  $n$  — число рифлений в окружном направлении.

Ранее было предложено несколько гипотез, объясняющих возникновение вращения рифленой КО и образующейся из нее КС [3–7]. Центральное место занимает идея о действии двух механизмов, именуемых как «толстый–тонкий» и «транспортный» [3].

Данные гипотезы являются качественными и не позволяют установить какие-либо количественные зависимости, характеризующие процесс закрутки рифленых КО. Кроме того, они даже на качественном уровне не позволяют объяснить некоторые экспериментальные факты, приведенные в работе [3].

В частности, загадочно выглядит полученная в [3] зависимость угловой скорости КС от индексного угла  $\delta$ , приведенная на рис. 2. При увеличении этого угла угловая скорость КС уменьшается и в определенный

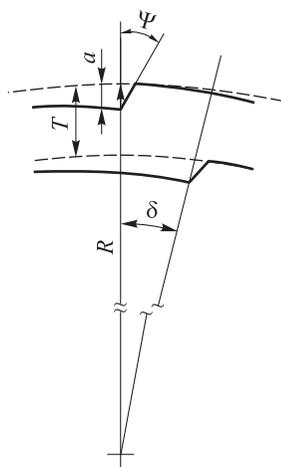


Рис. 1. Геометрические размеры поперечного сечения облицовки с наружным и внутренним рифлениями [3]

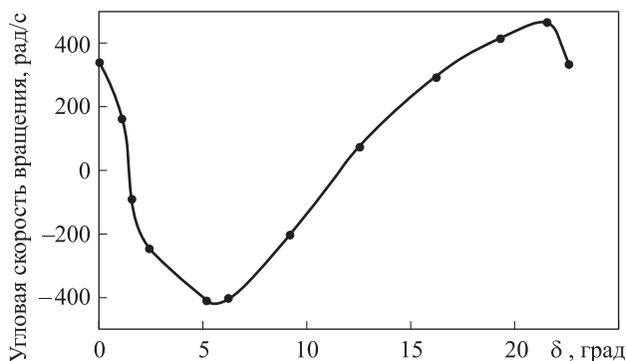


Рис. 2. Зависимость компенсируемой угловой скорости от индексного угла  $\delta$  [3]

момент становится равной нулю, затем меняет свой знак с положительного на отрицательный и далее возвращается к первоначальному значению с обратным изменением знака. Так же загадочно, с точки зрения этих гипотез, выглядит зависимость компенсируемой угловой скорости от числа рифлений  $n$  [3].

Все это в совокупности подтолкнуло к изучению возникновения вращательно-го движения в рифленных КО и к получению аналитических зависимостей, которые бы позволили оценить угловую скорость вращения таких КО и КС.

Основной метод, используемый в настоящей работе при изучении рифленных облицовок, — метод численного моделирования. Решение выполнялось в программной среде ANSYS-LS-DYNA [12, 13].

На начальном этапе исследований для упрощения анализа вместо рифленой облицовки рассматривалось тело гребенчатой формы, у которого гребенка располагалась на поверхности, обращенной в сторону взрывчатого вещества (ВВ).

Численный анализ возникновения поперечного движения в таком теле при действии на него взрывной нагрузки показал, что поперечная скорость начинает возрастать в момент выхода детонационной волны на поверхность раздела взрывчатое вещество–гребенчатое тело.

По всей видимости, при пересечении косой ударной волной поверхности раздела сред на этой поверхности возникает давление, значение которого зависит от угла подхода ударной волны [14]. Данная зависимость приводит к возникновению силы, сообщающей всему телу поперечную скорость.

В значительной мере этот вывод совпадает с «транспортной» гипотезой, высказанной в работе [3].

Следующим этапом анализа вращения рифленных КО стало численное моделирование их схлопывания, т. е. был выполнен переход от поперечного движения плоского гребенчатого тела к более сложному движению, возникающему в рифленой КО, обладающей симметрией поворота.

Геометрически расчетная схема решаемой задачи представляет собой сечение КЗ, состоящего из корпуса, ВВ и КО, плоскостью, перпендикулярной оси симметрии заряда. Размеры облицовки в задаче были выбраны максимально близкими к использованным в экспериментальной работе [3], а именно:  $a = 0,25$  мм;  $T = 1$  мм;  $\psi = 30^\circ$ ;  $n = 16$ ;  $R = 15$  мм;  $\delta = 6^\circ$ .

Все приведенные далее расчеты однотипны относительно использованной сетки, начальных и граничных условий, моделей материалов, а также численного метода решения.

Расчетная область представляет собой квадрат со стороной 84 мм, разбитый на элементы размером  $0,1 \times 0,1$  мм.

В начальный момент времени все материалы покоились. Детонация инициировалась по внешней цилиндрической поверхности ВВ, прилегающей к корпусу.

На внешних границах расчетной области задавалось условие свободного вытекания материалов.

В качестве модели материала медной облицовки и алюминиевого корпуса использовали модель упругопластического тела с упрочнением

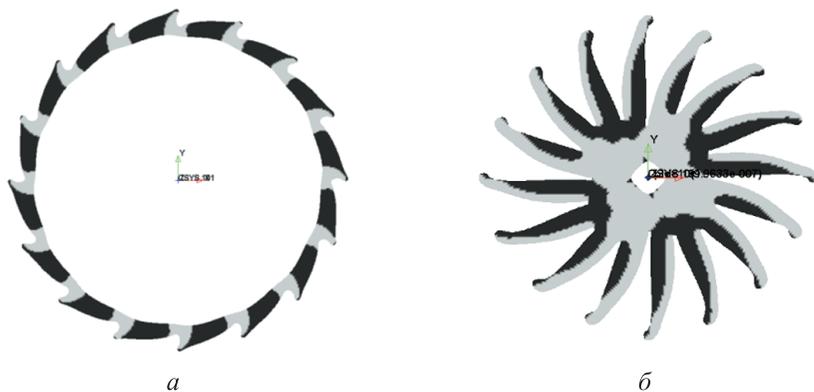
(\*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC), для моделирования ВВ — традиционную модель \*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN с уравнением состояния \*EOS\_JWL. Считалось, что все деформируемые тела находятся в вакууме [12].

Одной из особенностей численного изучения схлопывания рифленых облицовок в настоящей работе является то, что предметом интереса служит закрутка не всей облицовки целиком, а лишь ее струеобразующего слоя. Он представляет собой часть материала на внутренней поверхности облицовки, из которого в дальнейшем образуется КС [15]. Определение струеобразующего слоя происходит в момент схлопывания, когда материал облицовки достигает оси симметрии. В сечении облицовки выделяется круг с центром на оси симметрии такого радиуса, чтобы внутри него лежал материал массой, равной массе КС в данном сечении.

Дополнительно необходимо отметить, что в общем случае угловые скорости закрутки облицовки в целом вокруг оси симметрии и ее струеобразующего слоя не совпадают. Они могут различаться как по значению, так и по направлению.

Характерным примером такого эффекта может служить облицовка с одно-сторонним рифлением, обращенным в сторону ВВ. Как следует из результатов численных расчетов, в процессе обжата продуктами детонации такая облицовка в целом приобретает отрицательную угловую скорость (рис. 3, а, преимущественно черный цвет — вращение по часовой стрелке). При этом струеобразующий слой, как видно на рис. 3, б, вращается в обратную сторону с положительной угловой скоростью (серый цвет — против часовой стрелки).

Из рис. 3 следует несколько выводов. Один из них заключается в том, что в облицовке образуется две группы зон, угловая скорость в которых направлена в противоположном друг к другу направлении. Вызвано это, очевидно, наличием наружного рифления. Давление продуктов детонации, действующее по нормали, стремится закрутить материал облицовки, прилежащий к разным сторонам одного рифления, в противоположные стороны. Данный вывод близок к гипотезе «толстый–тонкий» [3].



**Рис. 3.** Распределение угловой скорости в сечении рифленой КО в процессе ее схлопывания:

*a* — начало схлопывания; *б* — завершение схлопывания; черные области — отрицательная угловая скорость; серые области — положительная угловая скорость

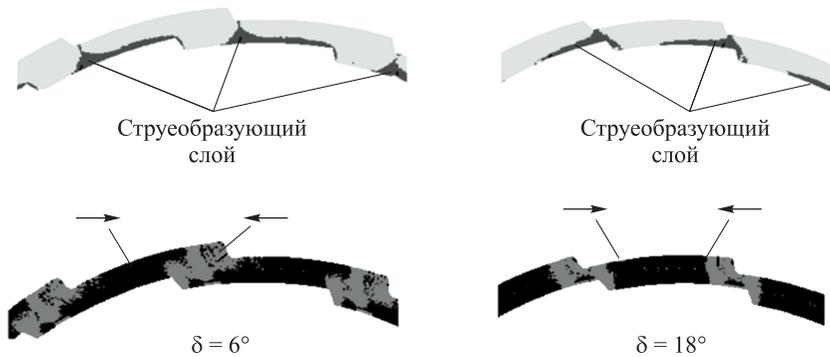
Другой — при движении к оси симметрии разные участки облицовки в зависимости от их толщины имеют различную радиальную скорость. Как следует из теории Гарни [1, 15, 16], скорость метаемого элемента возрастает с уменьшением его массы. Соответственно более тонкие участки движутся быстрее к оси, чем более толстые и таким образом формируют струеобразующий слой, а значит, КС. При этом угловая скорость участков, сформировавших струеобразующий слой, может быть противоположна угловой скорости остальных участков облицовки.

Этот эффект можно качественно объяснить разнонаправленностью угловых скоростей струи и облицовки (см. рис. 3).

Еще один вывод заключается в том, что угловая скорость КС немонотонно зависит от индексного угла для облицовок с двусторонним рифлением (см. рис. 2). Внутреннее рифление, выборочно уменьшая толщину, играет роль локального ускорителя, который увеличивает радиальную скорость участков облицовки с тем или иным знаком угловой скорости.

Поясим на примере. Рассмотрим два значения индексного угла:  $6^\circ$  и  $18^\circ$ , которые в соответствии с рис. 2 имеют противоположные по знаку значения угловой скорости.

При изменении  $\delta$  от  $6^\circ$  до  $18^\circ$  происходит утонение участков облицовки, которые имеют то или иное направление угловой скорости. Иными словами, внутреннее рифление, выборочно изменяя толщину определенного участка облицовки, служит своего рода принудительным струеобразователем из этого участка (рис. 4).



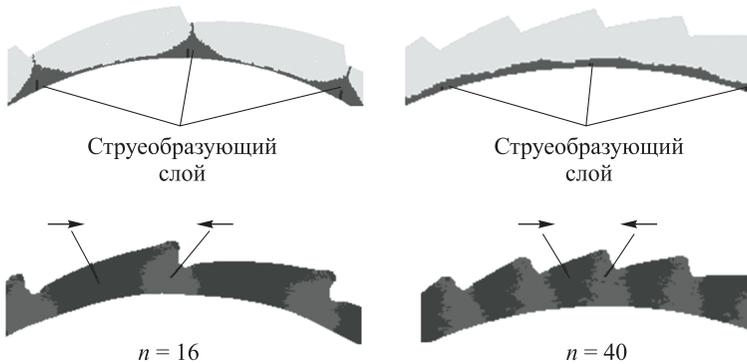
**Рис. 4.** Соответствие распределения массы струеобразующего слоя (верхняя часть рисунка, темно-серый цвет) и направления вращения в поперечном сечении рифленной облицовки (нижняя часть рисунка) для значений индексного угла  $\delta = 6^\circ$  и  $18^\circ$

Так, для  $\delta = 6^\circ$ , как следует из наложения левого верхнего и нижнего изображений (см. рис. 4), струя будет преимущественно вращаться по часовой стрелке, т. е.  $\omega$  будет иметь отрицательный знак. Для значения же индексного угла  $\delta = 18^\circ$  вращение струи будет направлено против часовой стрелки, т. е.  $\omega$  положительно, что хорошо согласуется с рис. 2.

Еще одним проявлением эффекта струеобразующего слоя является зависимость угловой скорости вращения облицовки от числа рифлений  $n$ . Она представляет собой немонотонную кривую, схожую с синусоидой и изменяющую знак при увеличении числа рифлений (рис. 5, для облицовок с внешним рифлением).

Ее также можно качественно объяснить, если наложить распределение массы струеобразующего слоя в сечении на распределение угловой скорости (рис. 6).

Например, для показанного на рис. 6 случая ( $n = 16$ ) струеобразующий слой (следовательно, и струя) формируется из участков, преимущественно вращающихся против хода часовой стрелки.

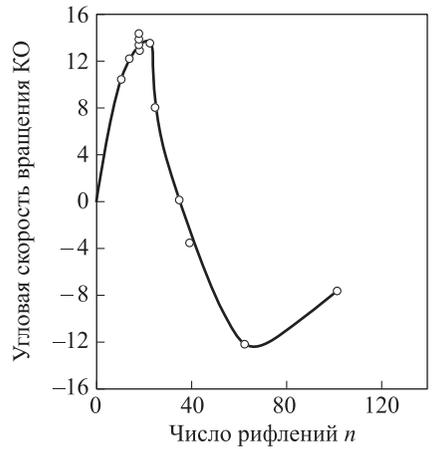


**Рис. 6.** Распределение массы струеобразующего слоя (верхняя часть рисунка, темно-серый цвет) и направление вращения в поперечном сечении рифленой облицовки (нижняя часть рисунка) для рифлений  $n = 16$  и  $40$

С увеличением числа рифлений до  $n = 40$  (см. рис. 6) неравномерность струеобразующего слоя сглаживается, и он стремится к традиционной для гладких облицовок кольцевой форме. Поэтому все большую роль начинают играть участки КО, которые вращаются по ходу часовой стрелки. Именно это перераспределение масс струеобразующего слоя и приводит к уменьшению значения угловой скорости струи и изменению ее знака.

Руководствуясь качественными соображениями, изложенными ранее, предпринята попытка получить соотношения для скорости вращения КС, образованной из рифленой КО в произвольном плоском сечении.

Предварительно оценивается угловая скорость вращения сечения рифленой облицовки вокруг ее оси симметрии.



**Рис. 5.** Зависимость компенсируемой угловой скорости от числа рифлений  $n$  [3]

Учитывая закон изменения кинетического момента, можно записать выражение для угловой скорости сечения облицовки относительно ее оси симметрии:

$$\omega = \frac{M\Delta t}{I},$$

где  $M$  — момент сил, действующих на облицовку в сечении от продуктов детонации, рассматриваемый относительно оси симметрии облицовки;  $\Delta t$  — время действия давления продуктов детонации;  $I$  — момент инерции сечения облицовки, представляемого как тонкий кольцевой слой, относительно оси симметрии облицовки.

Момент инерции  $I$  может быть вычислен как

$$I = M_{об}R^2 = 2\pi RT\rho R^2,$$

где  $M_{об}$  — масса сечения облицовки;  $R$  — наружный радиус облицовки;  $T$  — толщина облицовки;  $\rho$  — плотность материала облицовки.

Время действия момента сил  $\Delta t$  можно оценить как

$$\Delta t = \frac{R}{V_{об}},$$

где  $V_{об}$  — радиальная скорость облицовки, вычисленная по теории Гарни в предположении того, что вся энергия ВВ расходуется на метание оболочки.

Момент сил в сечении можно записать так:

$$M = (p_l(\alpha) - p_r(\beta))anR,$$

где  $p_l(\alpha)$ ,  $p_r(\beta)$  — давления на левой и правой наклонных поверхностях единичного рифления;  $a$  — высота рифления;  $\alpha$ ,  $\beta$  — углы наклона боковых поверхностей рифления;  $n$  — число рифлений (ребер).

Тогда угловая скорость КО  $\omega$  может быть вычислена по уравнению:

$$\omega = \left(\frac{n}{2\pi}\right) \left(\frac{\Delta p(\alpha, \beta)}{\rho_{об}V_{об}}\right) \left(\frac{a}{R}\right) \left(\frac{R}{T}\right) \frac{1}{R}, \quad (1)$$

где  $\Delta p(\alpha, \beta) = p_l(\alpha) - p_r(\beta)$  — разность давлений на боковых поверхностях единичного рифления.

Число ребер  $n$  связано с высотой рифления  $a$  и с углами наклона боковых поверхностей рифления  $\alpha$  и  $\beta$  приближенным соотношением:

$$n = \frac{2\pi R}{a \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} \right)}. \quad (2)$$

Значение угла  $\beta$  можно вычислить, исходя из угла  $\psi$  (см. рис. 1), по следующей формуле:

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \beta. \quad (3)$$

Представленная зависимость (1) схожа с формулой, полученной в [3], как результат аппроксимации экспериментальных данных по спин-компенсации рифленых облицовок.

Зависимости (1)–(3) позволяют определить угловую скорость вращения КО в целом. Попытаемся на их основе вычислить угловую скорость струи, образованной из облицовки с заданными размерами поперечного сечения относительно оси симметрии облицовки.

Для этого воспользуемся приближенным подходом, основанным на законе сохранения кинетического момента [15]. Из него следует, что увеличение угловой скорости происходит пропорционально отношению квадрата радиуса облицовки к квадрату радиуса струи. При среднем радиусе струи  $R_{стр}$  увеличение ее угловой скорости составит  $(R/R_{стр})^2$  раз.

Радиус струи  $R_{стр}$  может быть определен через относительную массу струи  $\delta_m$ , представляющую собой отношение масс струи и облицовки в сечении, следующим образом:

$$(R_{стр})^2 = (R^2 - (R - T)^2) \delta_m.$$

Корректность построенной модели (1)–(3) проверялась путем сравнения результатов, полученных с ее использованием, с результатами, вытекающими из численного моделирования, и экспериментальными данными [3].

Исследовалась зависимость угловой скорости струеобразующего слоя от двух групп определяющих параметров: геометрических размеров сечения рифленой облицовки и механических свойств модели материала облицовки.

Рассматривалось сечение КЗ плоскостью, перпендикулярной оси симметрии. Результаты исследования влияния параметров КЗ на закрутку КО таковы.

Первым определяющим параметром является высота ребра  $a$ .

Согласно экспериментальным данным, высота ребра линейно влияет на угловую скорость струеобразующего слоя [3]. Это подтверждается результатами численного моделирования: при увеличении в 2 раза высоты ребра угловая скорость также увеличивается в 2 раза. Аналогичный результат получается из аналитических зависимостей (1)–(3), из которых следует, что угловая скорость КС приближенно линейно зависит от высоты рифления.

Вторым определяющим параметром, влияние которого анализировалось, стала толщина КО в поперечном сечении  $T$ .

Угловая скорость КС, согласно экспериментальным данным, зависит от толщины облицовки приблизительно обратно пропорционально ее квадрату [3]. Из результатов численного расчета следует, что угловая скорость вращения при увеличении толщины уменьшается по зависимости, лежащей между минус первой и минус второй степенями толщины, но все же ближе к минус первой. Подобный же

характер зависимости угловой скорости струеобразующего слоя от толщины облицовки следует из представленной модели.

Третьим параметром является угол наклона боковой поверхности ребра по отношению к радиусу  $\psi$ .

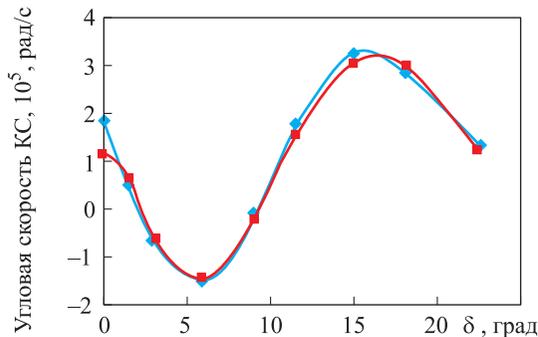
Угол наклона боковой поверхности ребра до  $30^\circ$  почти не оказывает влияния на угловую скорость. С ростом угла до значений, превышающих  $30^\circ$ , его влияние, согласно [3], возрастает. Из результатов численных и аналитических расчетов следует, что если угол наклона не превышает  $30^\circ$ , то его влияние на вращение струи незначительно. При дальнейшем увеличении происходит значительное уменьшение угловой скорости.

Четвертый параметр — радиус наружной поверхности КО в поперечном сечении  $R$ .

При расчете зависимости угловой скорости вращения струеобразующего слоя от радиуса облицовки нужно учитывать тот факт, что в эксперименте [3] высота рифления  $a$  прямо пропорционально зависела от радиуса  $R$ , в то время как толщина облицовки  $T$  оставалась постоянной. Экспериментальная зависимость угловой скорости вращения от радиуса наружной поверхности облицовки носит характер, зависящий линейно от наружного радиуса облицовки [3]. Аналитические зависимости (1)–(3), а также результаты численного расчета, с учетом факта зависимости  $a$  от  $R$ , также свидетельствуют о приближенно пропорциональной зависимости угловой скорости струеобразующего слоя от радиуса.

Пятый параметр — угол перекрытия ребер на внутренней и наружной поверхностях, или индексный угол  $\delta$ .

Частично обсуждение зависимости угловой скорости закрутки облицовки от этого параметра было проведено ранее. Экспериментальная зависимость угловой скорости от индексного угла приведена на рис. 2. Она имеет следующую особенность. Для двух значений индексного угла ( $1,5^\circ$  и  $11,5^\circ$ ) компенсируемая угловая скорость равна нулю. Результаты численного моделирования демонстрируют схожую зависимость угловой скорости от индексного угла (рис. 7). При этом компенсируемая угловая скорость равна нулю для значений угла  $2,5^\circ$  и  $9,5^\circ$ .



**Рис. 7.** Численная зависимость угловой скорости струеобразующего слоя рифленой облицовки от индексного угла  $\delta$  и аппроксимация этой зависимости:

— — аппроксимация; — — численный расчет

К сожалению, предложенная модель не учитывает влияние индексного угла, поскольку не принимает во внимание влияние внутреннего рифления на перераспределение угловой скорости струеобразующего слоя. В связи с этим была построена аппроксимация численной зависимости угловой скорости струеобразующего слоя  $\omega_j$  от индексного угла следующего вида:

$$\omega_j = A_1 (B_1 - j_1(C_1\delta)), \tag{4}$$

где  $A_1, B_1, C_1$  — числовые параметры;  $j_1(x) = \frac{\sin(x)}{x^2} - \frac{\cos(x)}{x}$  — сферическая функция Бесселя 1-го порядка. График зависимости (4) приведен на рис. 7.

Шестой параметр — число ребер в окружном направлении  $n$ .

Экспериментальная зависимость угловой скорости струи от числа ребер  $n$  носит сложный характер (см. рис. 5) [3]. Максимальное значение угловой скорости наблюдается при числе ребер  $n$  в диапазоне от 12 до 20. С дальнейшим ростом  $n$  компенсируемая частота меняет знак и стремится к нулю.

Зависимость угловой скорости от числа ребер  $n$ , полученная численно (рис. 8), качественно напоминает экспериментальную (см. рис. 5). Ее максимум наблюдается для числа ребер  $n = 10$ . С увеличением  $n$  угловая скорость меняет знак и стремится к нулю.

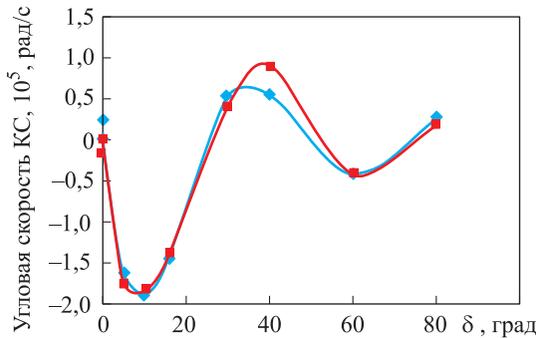


Рис. 8. Численная зависимость угловой скорости струеобразующего слоя рифленой облицовки от числа ребер в окружном направлении и аппроксимация этой зависимости (кривые, см. рис. 7)

Для учета влияния струеобразующего слоя на угловую скорость струи  $\omega_j$  по аналогии с индексным углом построена зависимость, аппроксимирующая результаты численного расчета:

$$\omega_j = A_2 j_1(B_2 n), \tag{5}$$

где  $A_2, B_2$  — числовые параметры. График данной зависимости приведен на рис. 8.

Другой группой параметров, определяющих закрутку струеобразующего слоя КО, служат величины, описывающие свойства ее материала: плотность  $\rho_{об}$ , модуль Юнга  $E$ , предел текучести  $\sigma_t$ , модуль упругости  $E_t$ .

Согласно численному расчету, угловая скорость вращения струеобразующего слоя убывает обратно пропорционально корню четвертой степени из плотности материала КО, а как следует из представленной модели, — обратно пропорционально корню второй степени из плотности (скорость облицовки  $V_{об}$  обратно пропорциональна корню квадратному из плотности материала облицовки). В целом аналитическая и численная зависимости близки и хорошо согласуются друг с другом.

Из численных расчетов следует, что изменение модуля Юнга  $E$  материала облицовки в пределах двух порядков не оказывает существенного влияния на угловую скорость вращения струи.

Зависимость угловой скорости от предела текучести  $\sigma_t$  оказывается обратной: при его увеличении угловая скорость падает и при  $\sigma_t = 1200$  МПа она практически равна нулю.

Численная зависимость угловой скорости струи  $\omega_j$  от предела текучести  $\sigma_t$  может быть аппроксимирована следующей формулой:

$$\omega_j = A_3 \exp(B_3 \sigma_t^{C_3}), \quad (6)$$

где  $A_3, B_3, C_3$  — числовые коэффициенты.

Таким образом, группа аналитических и численных зависимостей (1)–(6) позволяет оценить влияние размеров поперечного сечения рифленой облицовки и свойств ее материала на угловую скорость вращения струи. На их основе получена обобщенная зависимость (7), позволяющая определить угловую скорость вращения КЗ вокруг его оси симметрии, которая может быть компенсирована рифленой облицовкой с определенной геометрией и с определенными свойствами:

$$\left( \frac{\omega R}{\sqrt{\sigma_t / \rho_{об}}} \right) = \left( \frac{114}{4\pi} \right) \left( \frac{\Delta p(\alpha, \beta)}{\rho_{об} V_{об}^2} \right) \left( \frac{V_{об}}{\sqrt{\sigma_t / \rho_{об}}} \right) \left( \frac{a}{R} \right) \left( \frac{R}{T} \right) \delta_m^{0,1} \times \\ \times (0,25 - j_1(21,7\delta)) (j_1(0,25n^{0,89})) \left( \exp \left( -295 \left( \frac{\sigma_t}{\Delta p(\alpha, \beta)} \right)^2 \right) \right). \quad (7)$$

Диапазон изменения безразмерных комплексов, в котором справедлива представленная зависимость, следующий:

$$\frac{|\Delta p(\alpha, \beta)|}{\rho_{об} V_{об}^2} = 0 \dots 0,66; \quad \frac{V_{об}}{\sqrt{\sigma_t / \rho_{об}}} = 47 \dots \infty; \quad \frac{a}{R} = 0,017 \dots 0,05; \quad \frac{R}{T} = 1,67 \dots 30;$$

$$\delta_m = 0 \dots 1; \quad n = 5 \dots 80; \quad \delta = 0 \dots 2\pi / n; \quad \frac{\sigma_t}{\Delta p(\alpha, \beta)} = 0 \dots 3.$$

На рис. 9 приведены значения коэффициента детерминации ( $R^2$ ) для каждого из рассматриваемых параметров как мера точности полученной аппроксимации. Значения данного параметра близки к единице, что свидетельствует о хорошей точности полученной зависимости (7).

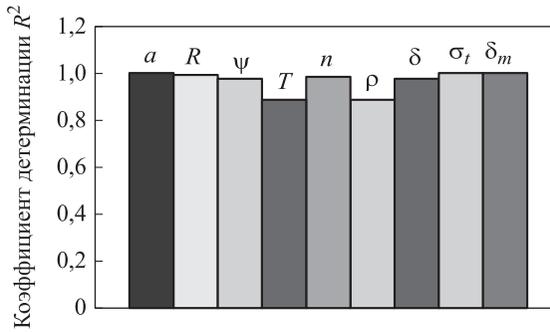


Рис. 9. Значения  $R^2$  для каждого параметра зависимости (7)

По результатам анализа вращательного движения рифленых КО вокруг оси симметрии можно сделать следующие выводы.

Путем численного моделирования и с помощью построенной модели исследовано возникновение поперечного движения в плоском теле гребенчатой формы при его импульсном нагружении. Показано, что причиной такого движения является зависимость давления на границе раздела взрывчатое вещество–облицовка от угла наклона фронта подходящей косоугольной ударной волны к этой границе.

На основании зависимости давления от угла наклона ударной волны и с использованием результатов численного моделирования построена обобщенная зависимость, позволяющая определить угловую скорость вращения КЗ, которая может быть компенсирована рифленой КО. Проанализировано влияние размеров поперечного сечения такой облицовки на параметры ее закрутки. Для всех определяющих параметров имеется удовлетворительное совпадение с известными экспериментальными данными.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Walters W.P., Zukas J.A. Fundamentals of shaped charges. N.Y.: John Wiley and Sons, 1989. 398 p.
2. Koch A., Jaggy P., Jaun W., Haller F. Study of spin-compensated shaped charges // Proc. 19th Int. symp. on ballistics. Interlaken (Switzerland), 2001. P. 1501–1508.
3. Eichelberger R.J. Spin compensation // Critical Review of Shaped Charge Information: Ballistic Research Laboratories Report № 905. Maryland: Aberdeen Proving Ground, 1959. 347 p.
4. 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.
5. Cox C.M. Warhead mechanisms study // Ballistic Research Laboratories Report № DA-33-019-ORD-3697. Maryland: Aberdeen Proving Ground, 1964. 147 p.
6. Experiments and simulations of spinning shaped charges with fluted liners / M.E. Kipp, R.R. Martinez, E.S. Hertel, E.L. Baker, B.E. Fuchs, C.L. Chin // Proc. 18th Int. Symp. on Ballistics. San-Antonio (USA). 1999. P. 499–506.

7. Бабкин А.В., Рассоха С.С., Ладов С.В., Одинцов В.А. Рифленые кумулятивные облицовки и спин-компенсация. Часть 1 // Изв. РАРАН. 2013. № 2. С. 113–125.
8. Бабкин А.В., Рассоха С.С., Ладов С.В., Одинцов В.А. Рифленые кумулятивные облицовки и спин-компенсация. Часть 2 // Изв. РАРАН. 2013. № 3. С. 87–92.
9. Смеликов В.Г. Устойчивость ограниченной кумуляции: сб. науч.-техн. статей. М.: Студия «Этника», 2016. 120 с.
10. Смеликов В.Г., Середа Н.В., Лопатникова Т.В., Плотников А.А. «Устойчивая» кумуляция и сверхпластичность, вращение кумулятивных струй из облицовок, изготовленных ротационной вытяжкой // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. 2014. № 1. С. 32–77.
11. Rassokha S.S., Ladov S.V., Kubyshkina G.A., Babkin A.V. Performance calculation of shaped charges with shear-formed liners // Journal of Applied Mechanics. 2013. Vol. 80. № 3. P. 031703. DOI: 10.1115/1.4023340
12. Боеприпасы. Т. 1 / А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов, Н.А. Имховик, И.Ф. Кобылкин, В.И. Колпаков, С.В. Ладов, Л.П. Орленко, В.Н. Охитин, А.Г. Ришняк / под общ. ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 512 с.
13. LS-DYNA keyword user's manual. 2015. Vol. I, II. Livermore Software Technology Corporation, 1381 p.
14. LS-DYNA Theory Manual. 2015. Livermore Software Technology Corporation, 865 p.
15. Селиванов В.В., Кобылкин И.Ф., Новиков С.А. Взрывные технологии. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 520 с.
16. Физика взрыва. Т. 2 / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум, Н.А. Имховик, И.Ф. Кобылкин, В.И. Колпаков, С.В. Ладов, В.А. Одинцов, Л.П. Орленко, В.Н. Охитин, В.В. Селиванов, В.С. Соловьев, К.П. Станюкович, В.П. Челышев, Б.И. Шехтер / под ред. Л.П. Орленко. В 2 т. М.: Физматлит, 2004. 656 с.

**Рассоха Сергей Сергеевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Ладов Сергей Вячеславович** — канд. техн. наук, чл.-корр. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Бабкин Александр Викторович** — д-р техн. наук, чл.-корр. РАЕН, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

#### **Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Рассоха С.С., Ладов С.В., Бабкин А.В. Анализ осевого вращательного движения рифленых кумулятивных облицовок // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 6. С. 74–88. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-6-74-88

## ANALYSIS OF FLUTED LINERS AXIAL ROTATION

S.S. Rassokha

rassokha@list.ru

S.V. Ladov

sm4-2009@mail.ru

A.V. Babkin

pc-os@bmstu.ru

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

### Abstract

The purpose of this work was to analyze the fluted liners axial rotation by numerical and analytical methods. The study revealed that pressure at the border between the liner and the products of detonation depends on the pitch angle of the oblique shock wave front. This is the cause for the rotation. According to the pressure dependence on the angle between the shock wave and the liner surface, we estimated the angular velocity of the shaped charge jet. Influence of the liner material properties and cross-section dimensions on jet angular velocity also was evaluated. The results are in good agreement with known experimental data

---

### Keywords

*Shaped charge, shaped charge jet, fluted liner, oblique shock wave, rotation, spin-compensation*

## REFERENCES

- [1] Walters W.P., Zukas J.A. Fundamentals of shaped charges. N.Y., John Wiley and Sons, 1989. 398 p.
- [2] Koch A., Jaggy P., Jaun W., Haller F. Study of spin-compensated shaped charges. *Proc. 19th Int. Symp. on Ballistics*. Interlaken (Switzerland), 2001. P. 1501–1508.
- [3] Eichelberger R.J. Spin compensation. *Critical Review of Shaped Charge Information: Ballistic Research Laboratories Report № 905*. Maryland, Aberdeen Proving Ground, 1959. 347 p.
- [4] 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.
- [5] Cox C.M. Warhead mechanisms study. *Ballistic Research Laboratories Report № DA-33-019-ORD-3697*. Maryland, Aberdeen Proving Ground, 1964. 147 p.
- [6] Kipp M.E., Martinez R.R., Hertel E.S., Baker E.L., Fuchs B.E., Chin C.L. Experiments and simulations of spinning shaped charges with fluted liners. *Proc. 18th Int. Symp. on Ballistics*. San-Antonio (USA), 1999. Pp. 499–506.
- [7] Babkin A.V., Rassokha S.S., Ladov S.V., Odintsov V.A. Fluted liners and spin-compensation. Part 1, 2. *Izvestia RARAN*, 2013, no. 2, pp. 113–125 (in Russ.).
- [8] Babkin A.V., Rassokha S.S., Ladov S.V., Odintsov V.A. Fluted liners and spin-compensation. Part 2. *Izvestia RARAN*, 2013, no. 3, pp. 87–92 (in Russ.).
- [9] Smelikov V.G. Ustoichivost ogranichennoi kumulyacii [Stability of confined cumulation]. Moscow, Etnika Publ., 2016. 120 p.
- [10] Smelikov V.G., Sereda N.V., Lopatnikova T.V., Plotnikov A.A. “Stable” cumulation and superplasticity, spinning of shear-formed shaped charge jets. *Boepripasi i visokoenergeticheskie kondensirovannii sistemi*, 2014, no. 1, pp. 32–77 (in Russ.).

- [11] Rassokha S.S., Ladov S.V., Kubyshkina G.A., Babkin A.V. Performance calculation of shaped charges with shear-formed liners. *Journal of applied mechanics*, 2013, vol. 80, no. 3, pp. 031703. DOI: 10.1115/1.4023340
- [12] Babkin A.V., Veldanov V.A., Gryaznov E.F., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Orlenko L.P., Okhitin V.N., Rishnyak A.G., Selivanov V.V. *Boeripasi. T.1 [Ammunition. Vol. 1]*. Moscow: BMSTU Publ., 2016. 512 p.
- [13] LS-DYNA Keyword User's Manual. Vol. I, II. 2015. Livermore software technology corporation. 1381 p.
- [14] LS-DYNA Theory Manual. 2015. Livermore software technology corporation. 865 p.
- [15] Selivanov V.V., Kobylkin I.F., Novikov S.A. *Vzrivnie tehnologii [Explosive technologies]*. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 520 p.
- [16] Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Odintsov V.A., Orlenko L.P., Okhitin V.N., Selivanov V.V., Soloviev V.S., Stanukovich K.P., Chelishev V.P., Shekhter B.I. *Fizika vzriva. T.2 [Physics of the explosion. Vol. 2]*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 656 p.

**Rassokha S.S.** — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of High-Precision Aircraft Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Ladov S.V.** — Cand. Sci. (Eng.), corresponding member of RANS, Assoc. Professor of High-Precision Aircraft Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Babkin A.V.** — Dr. Sci. (Eng.), corresponding member of RANS, Professor of High-Precision Aircraft Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Rassokha S.S., Ladov S.V., Babkin A.V. Analysis of Fluted Liners Axial Rotation. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 6, pp. 74–88. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-6-74-88