

УДК 623.4.082.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ОРЕБРЕННЫХ КУМУЛЯТИВНЫХ ОБЛИЦОВОК

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

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,  
105005 Москва, Россия

E-mails: rassokha@list.ru, sm4-2009@mail.ru, pc-os@bmstu.ru

Исследуется вращательное движение оребренных кумулятивных облицовок. Показано, что основное влияние на вращение кумулятивной струи оказывают положение струеобразующего слоя и распределение окружной скорости в сечении облицовки. Предлагаемая методика позволяет получить оценку средней угловой скорости струи с учетом размеров оребренной кумулятивной облицовки и свойств ее материала. Показано, что полученные результаты согласуются с известными экспериментальными данными.

Ключевые слова: оребренная кумулятивная облицовка, кумулятивная струя, вращение.

DOI: 10.15372/PMTF20190402

Кумулятивные облицовки (КО) представляют собой тонкостенные металлические оболочки вращения, из которых образуется кумулятивная струя (КС). Для формирования КС широко используются оболочки, имеющие гладкую боковую поверхность. Вместе с тем существуют так называемые оребренные облицовки, боковая поверхность которых состоит из чередующихся выступов и впадин [1].

На рис. 1 показано сечение облицовки с внешним оребрением плоскостью, перпендикулярной ее оси симметрии. Важным параметром, определяющим вращение КС, является также количество ребер в окружном направлении  $n$ .

При обжати оребренных КО продуктами детонации образуется высокоскоростная КС, которая вращается вокруг своей оси со средней угловой скоростью  $\omega_{КС}$ .

Как известно, вращение кумулятивного заряда приводит к уменьшению глубины его проникания в преграду [3–6]. Чем больше угловая скорость, тем меньше глубина проникания. При использовании оребренных облицовок образуется вращающаяся струя. В случае вращения КС и облицовки в противоположных направлениях средняя угловая скорость струи уменьшается, что приводит к увеличению глубины пробития.

В работах [7–9] проведено исследование вращения КС при наличии выступов и впадин на внешней поверхности облицовки. В работе [9] на основе результатов численного моделирования процесса схлопывания оребренной оболочки показано, что на вращение КС оказывают влияние распределения радиальной  $v_r$  и окружной  $v_\theta$  компонент скорости КО при ее движении к оси симметрии вследствие давления продуктов детонации на внешнюю поверхность.

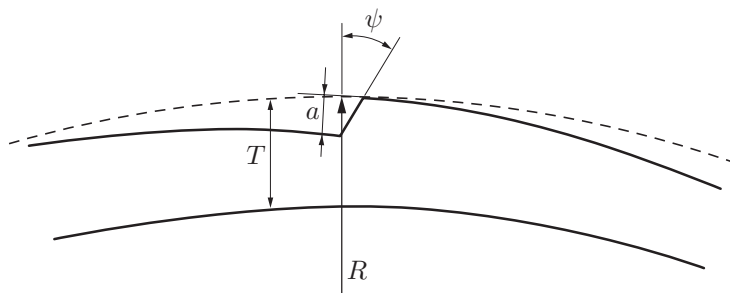


Рис. 1. Поперечное сечение оребренной облицовки с внешним оребрением [2]:  
 $a$  — высота оребрения;  $\psi$  — угол между боковой поверхностью оребрения и радиальным направлением;  $T$  — толщина КО;  $R$  — внешний радиус облицовки

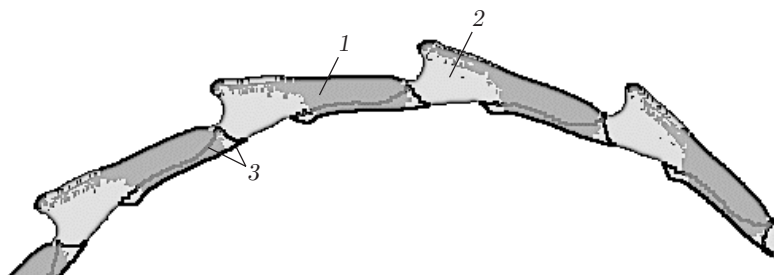


Рис. 2. Распределение окружной скорости и форма струеобразующего слоя в процессе схлопывания оребренной облицовки:  
 1 — материал КО, вращающийся против часовой стрелки; 2 — материал КО, вращающийся по часовой стрелке; 3 — границы струеобразующего слоя

Особенностью распределения радиальной скорости  $v_r$  является его неравномерность. Вследствие переменной толщины участки облицовки движутся с различной скоростью: более тонкие — быстрее, толстые — медленнее. Это приводит к тому, что КС образуется из тех частей КО, радиальная скорость которых больше. При обжатии оболочки возникает слой, из которого образуется КС. Этот слой называется струеобразующим. В сечении КО плоскостью, перпендикулярной оси симметрии, в случае гладких облицовок струеобразующий слой представляет собой кольцевую область, прилегающую к внутренней поверхности. В случае оребренных облицовок форма слоя является более сложной и зависит от размеров КО.

На рис. 2 показаны часть сечения оребренной КО в процессе схлопывания, струеобразующий слой и распределение окружной скорости материала оболочки  $v_\theta$ . Видно, что струеобразующий слой представляет собой периодическую структуру, при этом максимальные значения радиальной скорости  $v_r$  соответствуют минимальным значениям толщины КО. Знак угловой скорости КС  $\omega_{КС}$  определяется направлением вращения области КО, составляющей большую часть слоя. В случае облицовки, представленной на рис. 2, образовавшаяся КС будет вращаться против часовой стрелки.

Величина угловой скорости КС  $\omega_{КС}$  определяется суммарным моментом импульса, которым обладает рассматриваемый струеобразующий слой. При использовании предлагаемой методики для определения суммарного момента импульса облицовка разбивается с постоянным шагом на множество элементов в окружном направлении  $\theta$ . Для каждого элемента вычисляется его полная масса  $m_{КО}(\theta)$ , зависящая от толщины облицовки, масса КС в элементе  $m_{КС}(\theta)$  и окружная скорость  $v_\theta(\theta)$ .

Отношение массы КС к полной массе элемента вычислялось по формуле, в которой учитывается форма струеобразующего слоя (см. рис. 2):

$$m_{КС}(\theta)/m_{КО}(\theta) = A e^{-k|\theta-\theta_0|}. \quad (1)$$

В (1)  $A$  — нормировочный параметр, вычисляемый с учетом того, что в соответствии с гидродинамической теорией кумуляции [1, 10] доля материала КО, переходящего в КС, равна  $\sin^2(\alpha/2)$ ;  $\alpha$  — половина угла при вершине облицовки.

Коэффициент  $k$  определяет скорость изменения толщины струеобразующего слоя при изменении окружной координаты  $\theta$ . Из результатов численных расчетов [9] следует, что с увеличением предела текучести материала КО  $\sigma_T$  толщина струеобразующего слоя изменяется в окружном направлении более плавно, следовательно, значение  $k$  уменьшается. Поэтому для расчета использовалась зависимость вида  $k = C_1/(\sigma_T + C_2)^2$ , где  $C_1, C_2$  — постоянные величины.

Координата  $\theta_0$ , в которой толщина струеобразующего слоя максимальна, совпадает с координатой, в которой толщина КО минимальна.

Распределение окружной составляющей скорости КО  $v_\theta$  вычислялось по формуле, следующей из теории Гарни в случае цилиндрической симметрии [1, 10] и модифицированной с учетом изменения угла  $\beta$  между внешней поверхностью оребренной КО и окружным направлением:

$$v_\theta(\theta) = BD \sqrt{\frac{2m_{ВВ}(\theta)}{2m_{КО}(\theta) + m_{ВВ}(\theta)}} \cos(\alpha) \sin(\beta). \quad (2)$$

Здесь  $B$  — числовой коэффициент, учитывающий энергию Гарни [10] и неравномерность распределения окружной скорости  $v_\theta$  по толщине рассматриваемого элемента;  $D$  — скорость детонации взрывчатого вещества (ВВ);  $m_{ВВ}$  — масса ВВ, необходимая для метания рассматриваемого элемента облицовки.

Коэффициент  $B$  в зависимости (2) определялся по известной скорости метания традиционной КО с гладкой боковой поверхностью ( $\beta = 0^\circ$ ) на основе заданных величин  $D, m_{ВВ}, m_{КО}, \alpha$ .

В формуле (2) в качестве одного из параметров вместо угла  $\psi$  (см. рис. 1) используется угол наклона поверхности оребренной КО  $\beta$ . Различие данных величин заключается в том, что  $\beta$  определяет угол между оребренной поверхностью и окружным направлением, а  $\psi$  — угол между оребренной поверхностью и радиальным направлением. Следовательно,  $\psi = \pi/2 - \beta$ .

С использованием полученных распределений  $m_{КС}(\theta), v_\theta(\theta)$  и с учетом формы КО определялась угловая скорость КС в сечении, перпендикулярном оси симметрии КО, равная отношению суммарного кинетического момента струеобразующего слоя к моменту инерции КС. Принималось, что КС имеет форму плоского диска, масса которого равна массе КС  $m_{КС}(\theta)$  в рассматриваемом сечении.

Для оценки корректности предложенной методики проведено сравнение полученных на ее основе результатов с экспериментальными данными [2].

С использованием рассматриваемой методики определялась средняя по длине КС угловая скорость  $\omega_{КС}$ , а также зависимости  $\omega_{КС}$  от параметров поперечного сечения  $\psi, a, T$  (см. рис. 1).

На рис. 3 представлены экспериментальная и рассчитанная по предлагаемой методике зависимости средней угловой скорости КС от высоты оребрения  $a$ . И в эксперименте, и в расчете угловой скорости по предлагаемой методике имеет место линейная зависимость  $\omega_{КС}$  от высоты оребрения.

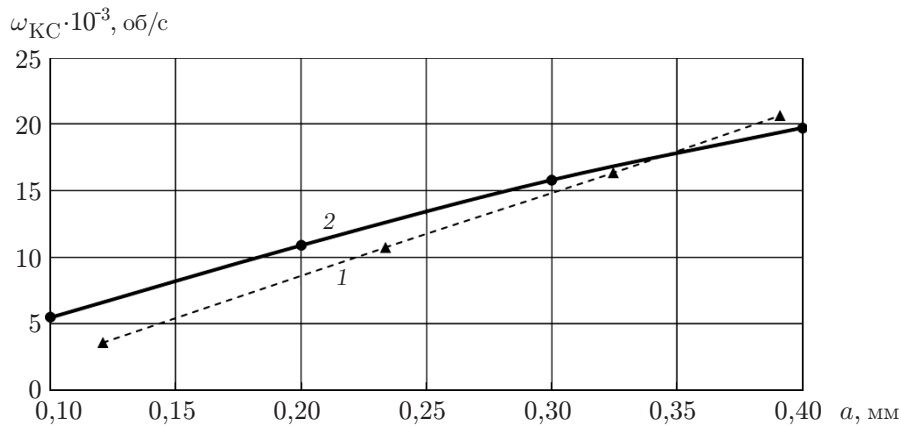


Рис. 3. Экспериментальная (1) и рассчитанная по предлагаемой методике (2) зависимости средней угловой скорости КС от высоты оребрения облицовки

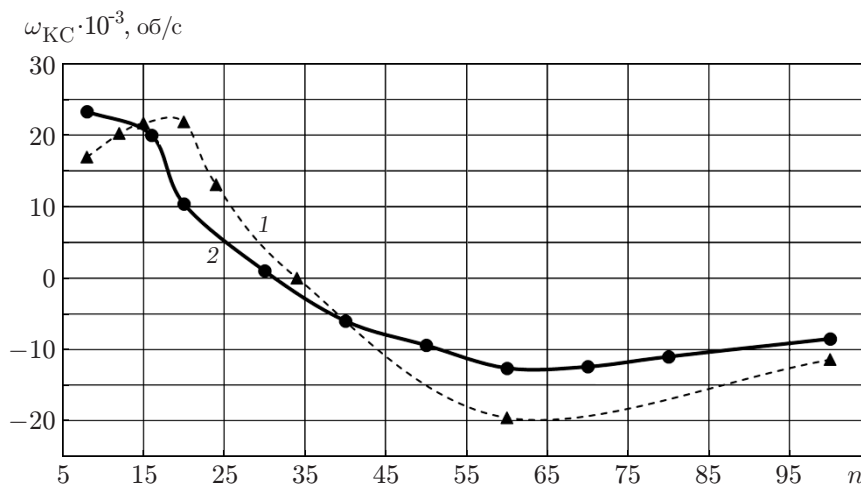


Рис. 4. Экспериментальная (1) и рассчитанная по предлагаемой методике (2) зависимости средней угловой скорости КС от числа ребер в окружном направлении

На рис. 4 приведены зависимости средней угловой скорости КС  $\omega_{KC}$  от числа ребер  $n$  в окружном направлении, полученные с помощью предлагаемой методики и экспериментально.

Следует отметить, что при числе ребер  $n \approx 30$  знак угловой скорости КС изменяется. Это явление может быть объяснено тем, что при увеличении  $n$  внутри струеобразующего слоя возрастает число областей с окружной скоростью  $v_\theta$ , направление которой противоположно направлению вращения струи, вследствие уменьшения расстояния между соседними боковыми поверхностями каждого ребра.

Таким образом, предложена методика расчета угловой скорости кумулятивной струи, образующейся из оребренной облицовки. Полученные с использованием этой методики зависимости средней угловой скорости струи от параметров поперечного сечения облицовки удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Walters W. P.** Fundamentals of shaped charges / W. P. Walters, J. A. Zukas. N. Y.: John Wiley and Sons, 1989.
2. **Simon J., DiPersio R., Eichelberger R. J.** Shaped charge performance with linear fluted liners: Report / Ballistic Res. Lab. N 1231. Maryland: Aberdeen Proving Ground, 1954.
3. **Дубовской М. А.** Особенности формирования струи во вращающихся кумулятивных зарядах и оценка возможности повышения бронебойного действия кумулятивных боеприпасов: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1964.
4. **Свирский О. В., Биткин В. Ф., Васильев М. Л. и др.** Проверка влияния “допороговых” скоростей углового вращения заряда на пробивную способность и параметры кумулятивной струи // Сб. ст. 5-й Науч. конф. Волж. регион. центра РАН, Саров, 5–7 июня 2007 г.: В 2 т. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2008. Т. 1. С. 381–387.
5. **Свирский О. В., Биткин В. Ф., Бычкова Н. В. и др.** Влияние скорости углового вращения заряда и технологии изготовления облицовок на пробивную способность и параметры кумулятивной струи // Сб. ст. 8-й Науч. конф. Волж. регион. центра РАН, Саров, 4–6 июня 2013 г.: В 2 т. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2014. Т. 1. С. 359–363.
6. **Бабкин А. В., Рассоха С. С., Ладов С. В.** О центробежном разрушении градиентных стержней // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. 2010. № 5. С. 182–195.
7. **Бабкин А. В., Рассоха С. С., Ладов С. В., Одинцов В. А.** Рифленые кумулятивные облицовки и спин-компенсация. Ч. 1 // Изв. РАН. 2013. № 2. С. 113–125.
8. **Бабкин А. В., Рассоха С. С., Ладов С. В., Одинцов В. А.** Рифленые кумулятивные облицовки и спин-компенсация. Ч. 2 // Изв. РАН. 2013. № 3. С. 87–92.
9. **Rassokha S. S., Ladov S. V., Babkin A. V.** Numerical analysis of corrugated shells rotation // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 894, N 1. 012140.
10. **Андреев С. Г.** Физика взрыва: В 2 т. Изд. 3-е, испр. / С. Г. Андреев, А. В. Бабкин, Ф. А. Баум и др. М.: Физматлит, 2004. Т. 2.

*Поступила в редакцию 2/X 2018 г.,  
после доработки — 25/XII 2018 г.  
Принята к публикации 29/IV 2019 г.*