

УДК 62-213.34; 004.942

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРПУСА КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ САМОДЕЛЬНЫХ ВЗРЫВНЫХ УСТРОЙСТВ НА ЕГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

С.Д. ВОЙТЕНКО, инж. (ЦНИИ вооружения и военной техники Вооруженных сил Украины, г. Киев),
С.Ю. МИЛОКОСТ, инж., **Ю.М. СИДОРЕНКО**, канд. техн. наук
(НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Приведены результаты компьютерных исследований процесса деформирования открытых толстостенных цилиндров со срезанной торцевой частью под действием внутреннего импульсного нагружения продуктами детонации заряда взрывчатого вещества. Описаны различия в характере деформирования цилиндра при изменении его полной длины и угла среза торцевой части.

Наведено результати комп'ютерних досліджень процесу деформування відкритих товстостінних циліндрів із зрізаною торцевою частиною під дією внутрішнього тиску продуктів детонації заряду вибухової речовини. Описано відмінності у характері деформування циліндра при зміні його повної довжини та кута зрізу торцевої частини.

The results of computer investigations of deformation process of opened thick-walled cylinders with a sheared edge part under the action of internal pulsed loading of charge detonation products of an explosive are given. The differences in character of cylinder deformation in change of its full length and shear angle of edge part are described.

Одним из наиболее распространенных мест совершения террористических актов с применением самодельных взрывных устройств (СВУ) стал транспорт, особенно авиация. Поэтому для защиты пассажиров от терроризма с применением СВУ Международной организацией гражданской авиации ИКАО было принято решение об обязательной установке на бортах самолетов, рассчитанных на перевозку более 30 пассажиров, специальных средств локализации обнаруженных на них СВУ (27-я поправка к шестому разделу Чикагской конвенции) [1].

В работе [2] рассмотрены некоторые аспекты процесса функционирования одного из вариантов корпуса контейнера обезвреживания СВУ на борту самолета АН-148. Изучен характер процесса деформирования медного и стального открытых цилиндров с различной толщиной стенки, составляющих основу конструкции контейнера. Установлено, что наименьшую массу в 24,2 кг имеет стальной ци-

линдр с толщиной стенки 10 мм. При этом степень его расширения под действием внутреннего давления продуктов детонации (ПД) приблизительно составляет 98 % допустимого значения.

Как указывалось в работе [2], рассматриваемый вариант контейнера предполагает его поперечное размещение в задней части фюзеляжа самолета (багажное отделение). При этом форма цилиндров была принята открытой для дополнительного сброса в атмосферу избыточного давления ПД при срабатывании помещенного в контейнер СВУ. Учитывая, что поперечная форма фюзеляжа или дополнительного аэродинамического обтекателя является округлой, то жесткое крепление к ним корпуса контейнера (цилиндра) повлияет на форму его торцевых частей. Принимая во внимание эти особенности крепления контейнера, на схеме его корпуса потребуется ввести еще один геометрический параметр — угол α ,

© С.Д. ВОЙТЕНКО, С.Ю. МИЛОКОСТ, Ю.М. СИДОРЕНКО, 2009

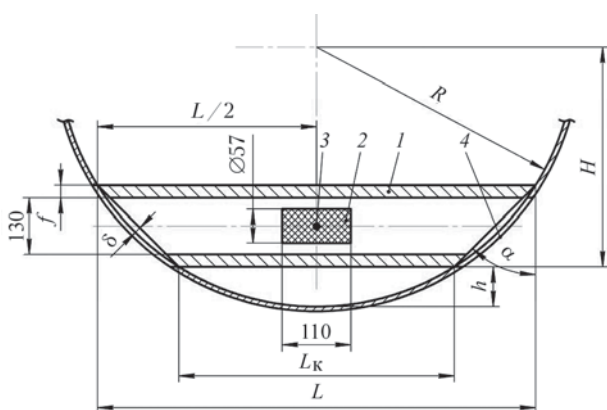


Рис. 1. Схема контейнера обезвреживания СВУ на борту самолета: 1 – цилиндрический корпус; 2 – заряд ВВ; 3 – точка инициирования заряда ВВ; 4 – обтекатель

который определяет положение секущих плоскостей (рис. 1).

Характеристики цилиндрического корпуса контейнера, имеющего длину $L = 700$ мм и толщину стенки $t = 20$ мм, в зависимости от угла α приведены в табл. 1. Значения угла α , отличные от нуля, приводят к тому, что у цилиндра 1 условно появляется вторая короткая образующая L_k . Из таблицы видно, что увеличение угла среза α до 60° приводит к уменьшению значения длины L_k приблизительно в 7 раз до $L_k = 111$ мм. Следовательно, задачу настоящего исследования можно сформулировать следующим образом – установить степень влияния значения α (формы торцов корпуса контейнера) на характер деформирования корпуса контейнера обезвреживания СВУ.

Для решения этой задачи в качестве заряда взрывчатого вещества (ВВ) использовали тринитротолуол массой 400 г, плотностью $\rho = 1630$ кг/м³ и скоростью детонации $D = 6930$ м/с [2, 3]. Из анализа практики проведения террористических актов на борту са-

молета с применением СВУ следует, что заряд массой 400 г и более в тротиловом эквиваленте может практически полностью его уничтожить. Заряд ВВ представлял собой сплошной цилиндр с диаметром основания 54 мм и длиной образующей 110 мм. Точка инициирования заряда ВВ 3 располагалась в центре заряда (рис. 2, см. 3-ю с. обложки). В качестве материала корпуса контейнера была выбрана среднеуглеродистая сталь с плотностью $\rho = 7850$ кг/м³, модулем упругости $E = 200$ ГПа, коэффициентом Пуассона $\mu = 0,241$ и пределом текучести $\sigma_T = 875$ МПа.

Поставленную задачу решали численно с использованием программы ANSYS/LS-DYNA. Для описания движения деформируемых сред использовали лагранжевый подход. Поведение материала корпуса описывали моделью идеально упругопластической среды [4–7]. Поведение ПД заряда ВВ описывали уравнением состояния Джонса–Уилкинса–Ли [3].

Очевидно, чтобы численно исследовать процесс расширения корпуса контейнера под действием внутреннего давления ПД, схема которого представлена на рис. 1, 2, необходимо использовать трехмерный подход (3D) для описания поведения сплошных сред. Как известно, такая постановка задачи по сравнению с двухмерной (2D) при одинаковой степени дискретизации пространства имеет более высокие требования к техническим ресурсам компьютера, а также значительно большую продолжительность расчета. Например, если решать задачу процесса расширения корпуса цилиндра с отсутствующими срезами торцевой части ($\alpha = 0^\circ$) под действием внутреннего давления ПД, то наличие осевой симметрии всей конструкции позволит вместо 3D подхода использовать 2D подход. В слу-

Таблица 1. Основные геометрические характеристики контейнера

α , град	L_k , мм	R , мм	H , мм	h , мм	δ , мм	M , кг
0	700	356	85	271	10	51,8
15	609	350	173	177	11,2	48,4
30	504	361	258	103	13,6	44,5
45	360	394	350	44	18,8	39,2
60	111	440	436	4	34,2	30

чае, если сохранить размеры расчетных элементов, длительность расчета снижается приблизительно в 1500 раз. Поэтому каждый раз, когда инженеры рассматривают сложные задачи, требующие для своего решения 3D алгоритмы, обязательно предпринимается попытка нахождения путей упрощения геометрии конструкции, которые в дальнейшем позволят использовать более экономичные 2D алгоритмы.

Если внимательно проанализировать конструктивные особенности корпуса контейнера, можно сделать вывод о том, что уменьшение длины короткой образующей L_k в первом приближении эквивалентно уменьшению полной длины цилиндра L , у которого угол среза $\alpha = 0^\circ$. Поэтому проведены расчеты процесса деформации цилиндра различной длины ($L = 150...700$ мм) в 2D постановке. Кадры компьютерного моделирования представлены на рис. 3. В качестве оценки конструкции на работоспособность был принят деформационный критерий прочности:

$$b_f \leq [b_f],$$

где $b_f \leq b/b_0$ — максимальный относительный радиус расширения наружной поверхности цилиндра; b — текущий радиус расширения; b_0 — начальный радиус наружной поверхности цилиндра; $[b_f]$ — допустимое значение относительного радиуса расширения ($[b_f] = 1,6$ — сталь [6]).

Результаты расчетов, приведенные в табл. 2, показывают, что радиальное перемещение наружной и внутренней поверхностей цилиндра сохраняет свои значения при уменьшении длины цилиндра до 400 мм. При этом значение коэффициента запаса прочности цилиндра по радиальным деформациям составляет 31 %. Аналогичный эффект наблюдается и с максимальными значениями радиальной скорости перемещения указанных поверхностей. Все это позволяет сделать предположение, что уменьшение длины цилиндра до указанного значения не влияет на его характеристики прочности. Учитывая, что рассматриваемая схема контейнера по обезвреживанию СВУ предполагает его использование

на борту самолета, любое сокращение длины его корпуса приведет к желаемому авиаконструкторами эффекту — сокращению общей массы конструкции. По данным табл. 2 уменьшение длины цилиндра до 400 мм приводит к снижению его массы на 43 %.

Принимая во внимание достаточно большие значения коэффициента запаса прочности, дополнительно были проведены расчеты процесса деформации цилиндра под действием внутреннего давления ПД с переменной не только длиной L , но и толщиной стенки $t = 20, 15$ и 10 мм. Соответствующие значения масс цилиндра переменной толщины t и длины L представлены в табл. 3.

Результаты расчета коэффициента запаса прочности различных вариантов корпусов в 2D постановке обобщены и представлены в табл. 4.

Данные расчетов показывают, что практически все варианты цилиндров, которые деформируются в указанных выше условиях нагружения, сохраняют свою целостность. Исключение составляют варианты с толщиной стенки $t = 10$ мм и длиной $L = 150...400$ мм. При этом следует отметить, что для всех вариантов длин L при уменьшении толщины стенки с 20 до 15 мм значение коэффициента запаса прочности снижается на 23...25 %. Дальнейшее уменьшение толщины стенки до 10 мм приводит к падению указанного коэффициента уже на 62...65 %.

Кроме того, обращает на себя внимание повторение описанной выше тенденции сохранения постоянным своего значения коэффициентом запаса прочности в диапазоне длин контейнера $L = 400...700$ мм при различных значениях толщины стенки контейнера корпуса t .

Объяснением такого результата может стать то, что основные события в процессе деформирования цилиндра (движение и соударение достаточно сильных ударных волн сжатия и волн разгрузки в стенке цилиндра) сосредоточены в небольшой центральной зоне L^* .

В свою очередь влияние торцевых волн разгрузки, которые стремятся распространить свое влияние в эту зону, оказывается не-

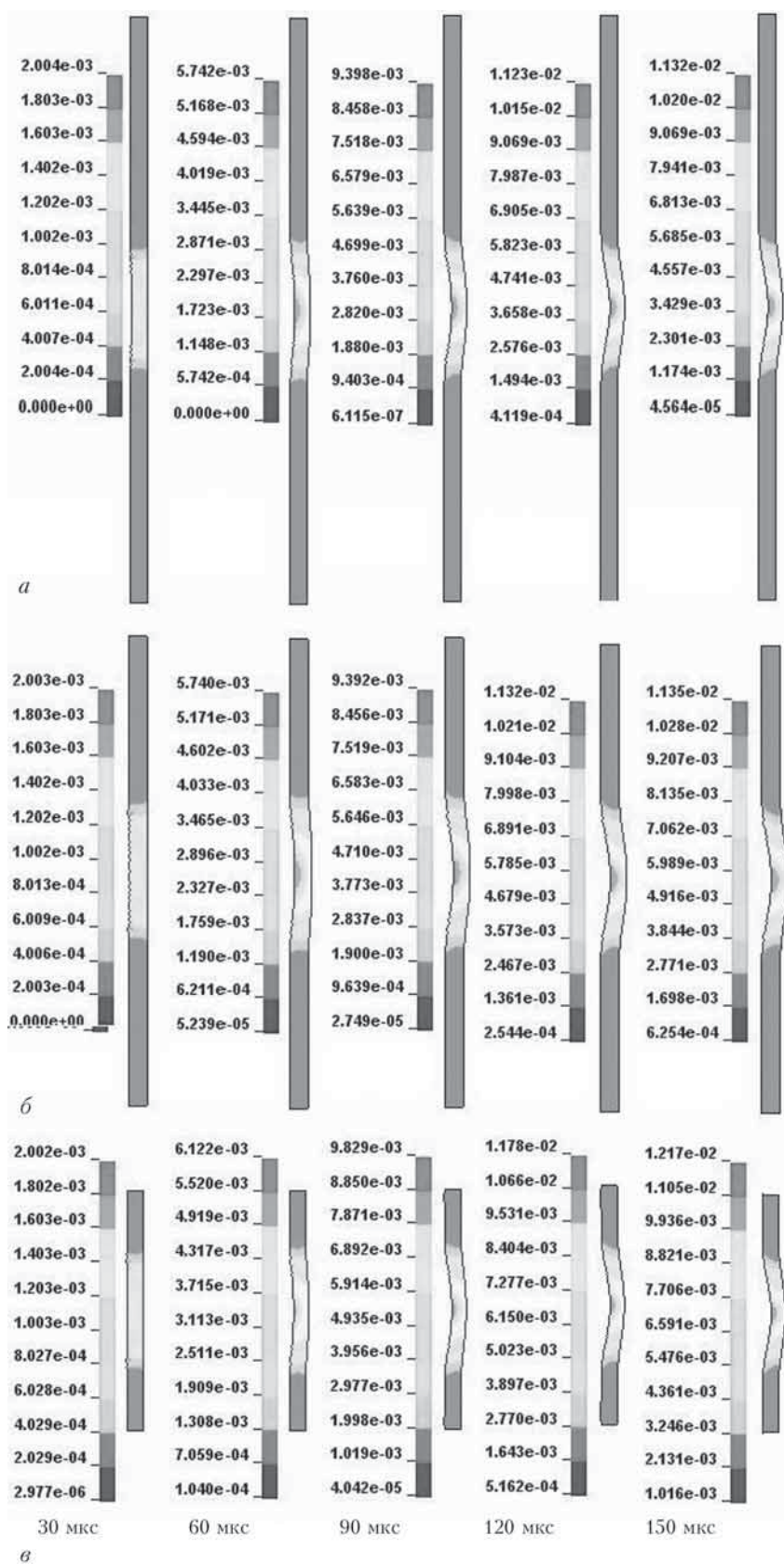


Рис. 3. Процесс деформирования стального цилиндра различной длины с толщиной стенки 20 мм (суммарное перемещение, м): а – $L = 700$; б – 500; в – 300 мм

Таблица 2. Результаты расчета процесса деформирования корпуса контейнера различной длины в 2D постановке

Параметр	Длина корпуса контейнера L , мм						
	700	600	500	400	300	200	150
Максимальное радиальное перемещение поверхности dR , мм:							
наружной	9	9	9	9,2	9,4	10,1	10,8
внутренней	11,5	11,5	11,5	12,1	12,2	12,8	13,1
Максимальная радиальная скорость перемещения поверхности, м/с							
наружная	124	124	124	122	122	126	128
внутренняя	156	156	156	161	161	162	160
Уменьшение толщины стенки цилиндра, мм	2,5	2,5	2,5	2,9	2,8	2,7	2,3
Минимальная толщина стенки после деформирования, мм	17,5	17,5	17,5	17,1	17,2	17,3	17,7
Время достижения цилиндром максимальной степени расширения, мкс	133	131	134	140	157	158	160
Запас прочности цилиндра по деформациям $(1 - b_f/[b_f])100\%$	31	31	31	31	30	30	30
Масса корпуса контейнера, кг	51,8	44,4	37	29,6	22,2	14,8	11,1

Таблица 3. Масса контейнера (кг) при различной длине и толщине стенки

Толщина стенки контейнера t , мм	Длина корпуса контейнера L , мм						
	150	200	300	400	500	600	700
20	11,1	14,8	22,2	29,6	37	44,4	51,8
15	8	10,7	16,1	21,4	26,8	32,2	37,5
10	5,2	6,9	10,4	13,8	17,3	20,1	24,2

Таблица 4. Коэффициенты запаса прочности (%) различных вариантов

Толщина стенки контейнера t , мм	Длина корпуса контейнера L , мм						
	150	200	300	400	500	600	700
20	30	30	31	31	31	31	31
15	–	21	24	24	24	24	24
10	–	–3	–2	3	4	5	5

значительным или можно считать практически отсутствующим ввиду своей большой удаленности от точки детонации заряда ВВ. Подтверждением высказанного предположения могут служить кадры компьютерного моделирования, изображающие итоговое состояние цилиндров различной толщины (рис. 4, табл. 5).

Результаты компьютерного моделирования показывают, что значение зоны деформирования для различных вариантов геометрии цилиндров практически пропорционально увеличивается с уменьшением толщины стен-

ки t . Средние итоговые значения ширины зоны $L^* = 208$ мм для цилиндров с толщиной стенки 10 мм, 180 мм для $t = 15$ мм и 160 мм для $t = 20$ мм. Таким образом, на 1 мм толщины стенки t уменьшение ΔL^* в среднем составляет 4...5 мм.

Кроме того, данные табл. 5 свидетельствуют о том, что ширина зоны L^* при фиксированном значении толщины t практически не изменятся. Тогда полученные результаты моделирования процесса деформирования цилиндров различной длины и толщины стенки

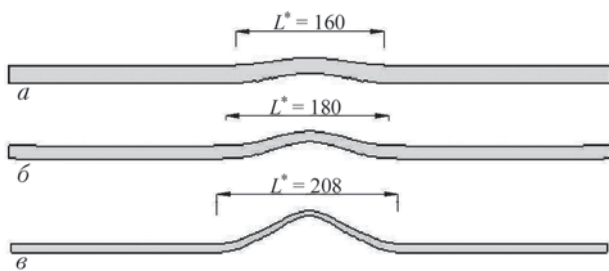


Рис. 4. Состояние цилиндров длиной $L = 700$ мм различной толщины в конце процесса деформирования: $a - t = 20$; $b - 15$; $c - 10$ мм

в 2D постановке дают право предположить, что аналогичное моделирование в 3D постановке цилиндра со срезанными под углом α торцевыми поверхностями также не будет оказывать существенного влияния на процесс его деформирования. Такое предположение основано на том, что в основном значения короткой образующей усеченного цилиндра (см. табл. 1) больше значений ширины зоны деформирования L^* (табл. 5). Поэтому края цилиндра будут находиться на достаточно большом расстоянии от точки инициирования заряда ВВ.

Для подтверждения или опровержения выказанного предположения дополнительно проведено компьютерное моделирование процесса расширения цилиндра со срезанными торцевыми поверхностями в 3D постановке.

Таблица 5. Ширина зоны деформирования L^* (мм) для различных вариантов корпусов контейнеров

Толщина стенки контейнера t , мм	Длина корпуса контейнера L , мм				
	300	400	500	600	700
20	164	156	156	160	160
15	176	176	184	180	180
10	188	208	208	208	208

Однако ввиду значительно большей своей продолжительности варианты геометрии цилиндра с толщинами стенки $t = 10$ и 15 мм не рассматривались.

Некоторые кадры компьютерного моделирования процесса деформирования цилиндра с усеченными под углом 45° торцевыми поверхностями в 3D постановке представлены на рис. 5 (см. 3-ю с. обложки), а результаты расчета в трехмерной постановке — в табл. 6.

Результаты моделирования подтверждают высказанное ранее предположение о несущественном влиянии угла среза α торцевых поверхностей стального цилиндра длиной 700 мм и толщиной стенки 20 мм. При различных значениях угла α значение коэффициента запаса прочности корпуса по дефор-

Таблица 6. Результаты расчета процесса деформирования корпуса контейнера со срезанными торцами под углом α в 3D постановке

Параметр	Угол среза α , град			
	15	30	45	60
Длина короткой образующей, мм	609	504	360	110
Максимальное радиальное перемещение поверхностей на большей образующей dR , мм:				
наружное	8,3	8,2	8,4	8,7
внутреннее	11	11,1	10,9	11,3
Максимальное радиальное перемещение поверхностей на короткой образующей dR_k , мм:				
наружное	8,3	8,2	8,2	8,6
внутреннее	12,2	11,9	11,9	11,1
Максимальная радиальная скорость перемещения поверхностей, м/с:				
наружное	150	145	145	150
внутреннее	112	110	110	115
Уменьшение толщины стенки на длинной образующей, мм	2,7	2,9	2,5	2,6
Уменьшение толщины стенки на короткой образующей, мм	3,9	3,7	3,7	2,5
Время достижения максимальной степени расширения, мкс	126	126	128	135
Запас прочности по деформациям $(1 - b_f/[b_f])100\%$	27	27	27	27

мациям имеет достаточно большое значение (27 %). Даже у конструкции цилиндра с углом $\alpha = 60^\circ$, у которого длина короткой образующей по данным табл. 1 является меньше ширины зоны L^* , не наблюдается существенного увеличения значения степени радиального расширения. Это можно объяснить тем, что после детонации заряда ВВ продукты детонации, пройдя в осевом направлении небольшой путь, равный $L_k/2$, начинают свое истечение в атмосферу. При этом внутреннее давление в ПД начинает падать значительно быстрее по сравнению с вариантами цилиндра с меньшими углами α и тем самым на деформирование цилиндра идет меньшая часть энергии взрыва ВВ.

Обращают на себя внимание особенности поведения ПД при выходе их за пределы цилиндра. На рис. 6 представлены зависимости изменения значений радиальной компоненты скорости движения узла расчетной сетки, находящегося в ПД (см. точка А на рис. 2). Из рисунка видно, что в течение первых 30 мкс все четыре зависимости радиальной компоненты скорости ведут себя практически одинаково. На графиках наблюдается резкое увеличение значения v_R до 4000 м/с с последующим резким спадом функций до нуля и переходом их в верхнюю полуплоскость с достижением значения в 2000 м/с. Данное явление объясняется первоначальным резким разгоном ПД после прохождения детонационного фронта по заряду ВВ. В дальнейшем ПД подходят к внутренней поверхности металлического цилиндра и отражаются от нее в сторону оси симметрии конструкции. Последующее расширение ПД сопровождается повторным увеличением значения их радиальной компоненты скорости и изменением направления движения снова в сторону внутренней поверхности цилиндра. Однако наличие достаточно высокого значения осевой компоненты скорости движения ПД приводит к тому, что после этого первого отражения между зависимостями v_R начинают наблюдаться некоторые расхождения. Для варианта конструкции цилиндра с углом среза $\alpha = 60^\circ$ в отличие от вариантов с другими значениями

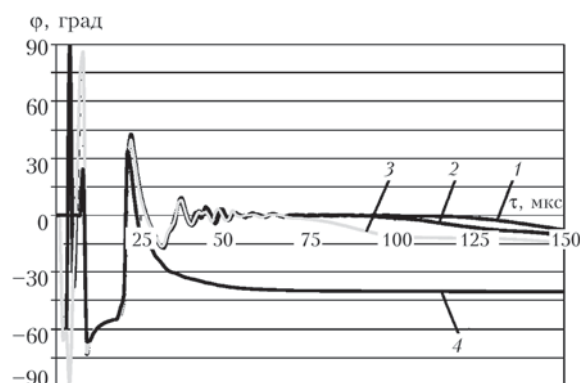


Рис. 6. Распределение радиальной v_R компоненты скорости движения фронта истекающих в атмосферу ПД в зависимости от угла среза торца корпуса: 1 — $\alpha = 15^\circ$; 2 — 30° ; 3 — 45° ; 4 — 60°

α наблюдается дальнейшее плавное увеличение значения v_R . Это связано с тем, что рассматриваемый узел расчетной сетки больше не встречает на своем пути препятствие в виде стального контейнера и начинает свое свободное движение наружу в атмосферу. Для вариантов $\alpha = 45, 30$ и 15° на графиках видны новые характерные пики, соответствующие повторному отражению ПД от внутренней поверхности цилиндра. Причем их количество зависит от того, какой путь проходят ПД вдоль короткой образующей усеченного цилиндра L_k . При этом различие в значениях данной компоненты скорости к 150 мкс достигает 300 и более процентов ($v_R \approx 3500$ м/с для $\alpha = 60^\circ$ и 1000, 800, 600 м/с для $\alpha = 45, 30, 15^\circ$ соответственно). Такая разница в значениях и поведении зависимостей v_R при различных α станет следствием возникновения отличий и в поведении функции угла φ . Условимся углом φ называть угол, на который ПД отклоняются от оси симметрии конструкции во время их выхода за пределы цилиндра. Значение данного параметра можно определить с помощью формулы

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{v_R}{v_Z} \right),$$

где v_Z — осевая компонента скорости движения ПД.

Рассчитанная зависимость изменения во времени значений данного угла при различных α представлена на рис. 7. Из рисунка

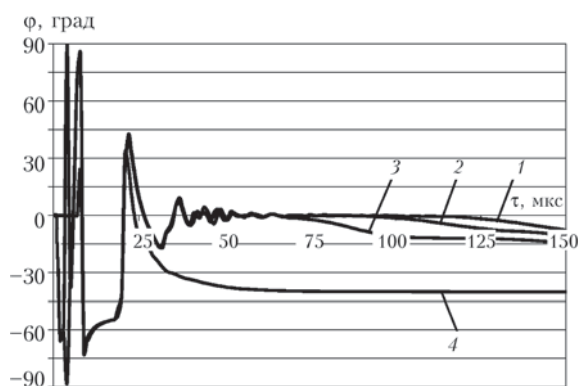


Рис. 7. Распределение значений полного угла отклонения ПД от оси симметрии в зависимости от угла среза торца корпуса: 1 — $\alpha = 15^\circ$; 2 — 30° ; 3 — 45° ; 4 — 60°

видно, что зависимость угла φ имеет те же характерные участки, аналогичные зависимости v_R (см. рис. 6). Следует отметить, что значения полного угла, на который отклоняются ПД во время своего истечения за пределы усеченных цилиндров к 150 мкс, распределились следующим образом: для $\alpha = 60^\circ$ данное значение является наибольшее и составляет порядка 40° ; для $\alpha = 45, 30$ и 15° значения φ практически одинаковые и находятся в диапазоне $8...12^\circ$.

Кроме того, представляет интерес информация об изменении значений данной величины внутри полного угла отклонения φ . Для этого весь процесс истечения ПД в атмосферу был представлен в векторной форме (рис. 8). Из рисунка видно, что существенное увеличение значения угла φ для варианта цилиндра с углом среза торцевых поверхностей $\alpha = 60^\circ$ имеет локальный характер. Под углом 40° к оси симметрии двигается относительно небольшое количество ПД. Основная масса истекающих ПД сосредоточена в достаточно малом угле, приблизительно равным $10...12^\circ$. Причем данное значение практически одинаково для всех трех вариантов цилиндров, представленных на рис. 8.

Данный факт можно объяснить следующим образом. Очевидно, что причиной отклонения потока газа от оси симметрии конструкции является наличие в нем внутреннего давления. Однако данные расчетов показывают, что достаточно высокое значение соответствующей величины сохраняется лишь до 20 мкс. В свою очередь, за это время фронт

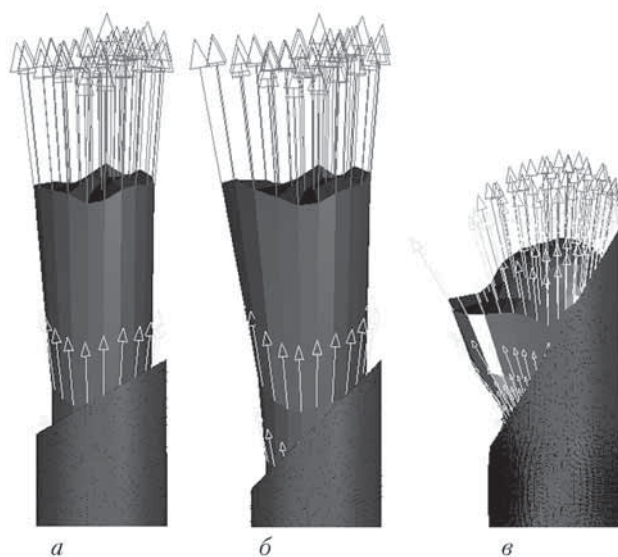


Рис. 8. Процесс истечения ПД за пределы корпусов, усеченных под углом $\alpha = 30^\circ$ (а), 45° (б) и 60° (в)

ПД успевает подойти только к короткому краю цилиндра, торцы которого срезаны под углом $\alpha = 60^\circ$. Если учесть тот факт, что к этому времени осевая компонента массовой скорости v_Z набирает $70...75\%$ своего максимального значения, то становится понятным, что в последующие моменты времени ПД продолжают преимущественно осевое движение в силу своей большой инертности.

Выводы

1. Уменьшение длины стального цилиндра L при фиксированном значении толщины стенки t не приводит к кардинальному изменению процесса его деформирования.
2. Уменьшение толщины стенки t цилиндра при фиксированном значении его длины L сопровождается увеличением зоны деформирования L^* , которая составляет при $t = 20, 15, 10$ мм соответственно 160, 180 и 208 мм.
3. Угол среза торцевых поверхностей цилиндра α практически не влияет на процесс его деформирования, так как его края находятся на достаточно большом расстоянии от точки инициирования заряда ВВ.
4. Увеличение значения угла среза α до 60° приводит к тому, что поток ПД при выходе за пределы усеченного цилиндра максимально отклоняется от осевого направления движения на угол в 40° . Однако основная масса


истекающего в атмосферу газа при всех рассмотренных значениях α отклоняется от оси симметрии на один и тот же угол в 10...12°.

5. Для стального цилиндра длиной 700 мм и толщиной стенки 20 мм можно рекомендовать значение угла среза его торцевых частей $\alpha = 45...50^\circ$. Данный вариант конструкции при сохранении значения коэффициента запаса прочности в 27...30 % имеет наименьшее значение массы 35...40 кг и более компактные размеры обтекателя, если придать ему форму окружности радиуса R . 🐼

1. ИКАО, Поправка 27 к приложению 6. Часть 1, Гл. 13, март 2002 г., Монреаль (Канада).
2. Войтенко С.Д., Тищенко А.А., Сидоренко Ю.М. Напряженно-деформированное состояние пустоте-

лых цилиндров при нагружении внутренним давлением // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2008. — № 2. — С. 51–59.

3. Dobratz V.M. LLNL explosive handbook. Properties of chemical explosives and explosive simulants. — Livermore, 1981. — 257 p.
4. Численные методы в задачах физики взрыва и удара: Учебник для вузов / А.В. Бабкин, В.И. Колпаков, В.Н. Охитин и др. / Под ред. В.В. Селиванова. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. — Т. 3. — 516 с.
5. Рудаков К.М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій: Навч. посібник. — К.: НТУУ «КПІ», 2007. — 379 с.
6. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. — 3-е изд., перераб. — В 2 т. — М.: Физматлит, 2002. — Т. 2. — 656 с.
7. Колобанова А.Е., Селиванов В.В. Основы динамики разрушения оболочек: Учеб. пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. — 98 с.



**Interservice/Industry Training,
Simulation & Education Conference**

Train to Fight – Fight to Win

November 30 – December 3, 2009 | Orlando, FL

**Конференция по методам взаимодействия родов войск при
моделировании условий боевых действий**

30 ноября – 3 декабря 2009 г., США, Орландо, Флорида