

# РАЗРАБОТКА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ОКОН ВЗРЫВОЗАЩИТНОЙ КАМЕРЫ

*А. В. Чапаев, М. А. Сырунин, А. П. Цой, В. Ю. Мельцас*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

При проведении радиографических исследований физических и механических свойств материалов, подвергаемых воздействию интенсивных динамических нагрузок, создаваемых нагружающими устройствами с использованием взрывчатых веществ (ВВ), используются взрывозащитные камеры (ВЗК) для защиты окружающей среды и экспериментального оборудования от воздействия продуктов взрыва (ПВ) и осколков. Стальные стенки ВЗК ослабляют и рассеивают радиографическое излучение, распространяющееся от источника через объект исследования на регистрирующую систему, что снижает качество полученного изображения. Было предложено ввести в конструкцию ВЗК радиографические окна, которые позволили без снижения прочности камеры уменьшить эффект рассеивания радиографического излучения. При введении в конструкцию радиографических окон дополнительных газодинамических устройств еще сильнее снижается динамическая нагрузка, что позволяет уменьшить толщину герметизирующих крышек радиографических окон для получения более качественных изображений [1].

В докладе приведены результаты разработки и сравнительных испытаний нескольких видов устройств, снижающих газодинамическую нагрузку на крышки радиографических окон ВЗК. Проведены расчеты газодинамической нагрузки на крышки радиографических окон при использовании этих устройств по программе ДИАДА-2D [2]. Сделаны оценки эквивалентного статического давления на крышки, исходя из экспериментально полученных остаточных прогибов.

Разработано и испытано пять следующих газодинамических устройств.

1) Устройство, выполненное в виде цилиндрической оболочки с внутренним диаметром 100 мм (диаметр оболочки совпадает с диаметром окна в стенке ВЗК) и длиной 252 мм. Такое устройство позволяет удалить крышку от заряда ВВ и увеличивает объем полости, в которой локализуются ПВ.

2) Устройство отличается от устройства 1 тем, что внутри цилиндрической оболочки установлены четыре дросселя. Дроссель, представляющий собой стальную пластину с отверстием диаметром 60 мм, отсекает часть газодинамического потока. Кроме того, газодинамический поток, пройдя через отверстие дросселя, попадет в полость с большим проходным сечением и, расширяясь, разгружается, за счет чего падает давление и скорость газов в потоке.

3) Газодинамическое устройство отличается от двух предыдущих тем, что имеет ступенчатое цилиндрическое расширение внутреннего диаметра со 100 до 300 мм с длиной расширенной части канала 250 мм (рис. 1). В данном устройстве газодинамический поток, пройдя через окно ВЗК цилиндрической формы с диаметром проходного отверстия 100 мм, попадает в цилиндрический канал диаметром 300 мм и разгружается. Кроме того, часть разгрузившегося газодинамического потока отсекается, перед тем как воздействовать на крышку, так как должен пройти еще и через цилиндрический канал с проходным сечением диаметром 100 мм. Поле обзора радиографических окон в такой конструкции не уменьшается. Кроме того, по сравнению с предыдущими двумя газодинамическими устройствами, увеличивается объем объемной полости, в которой локализуются ПВ.

4) Газодинамическое устройство отличается от устройства 3 длиной расширенной части, которая составляет 500 мм (рис. 1).

5) Газодинамическое устройство отличается от устройства 4 тем, что в середине расширенной части канала установлен дроссель с отверстием диаметром 100 мм (рис. 1). В данной конструкции применены все технические решения, использовавшиеся в устройствах 1–4, которые позволяют снизить газодинамическую и квазистатическую нагрузку на крышки, не уменьшая, при этом, диаметр поля обзора радиографических окон.

Проведена серия испытаний из шести опытов. Схема постановки опытов приведена на рис. 2. Опыты проводились в одной ВЗК, в которой взрывом зарядов ВВ сферической формы массой ~180 и 270 г ТЭ создавались нагрузки и проверялась эффективность применения пяти вариантов газодинамических устройств по снижению нагрузок на герметизирующие крышки. Во всех опытах использовались одинаковые плоские крышки из сплава АМц с толщиной рабочей части 4 мм. В каждом опыте испытывались по два варианта устройств. После испытания проводились обмеры крышек, определялся максимальный остаточный прогиб.

В табл. 1 приведен порядок проведения опытов, основные исходные данные испытаний: тротильный эквивалент заряда ВВ, начальное давление воздуха в камере, варианты газодинамических устройств и результаты испытаний (остаточный прогиб крышек).

Рис. 1

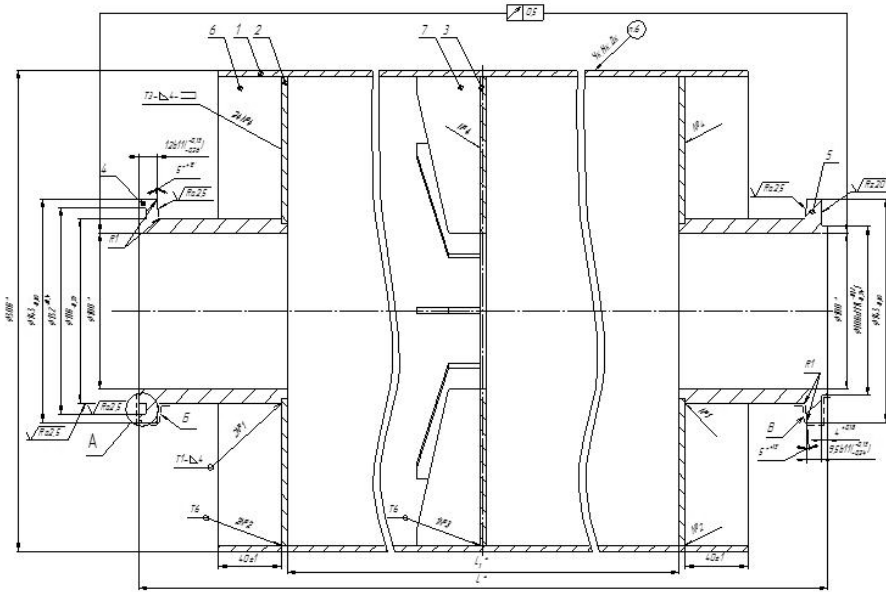
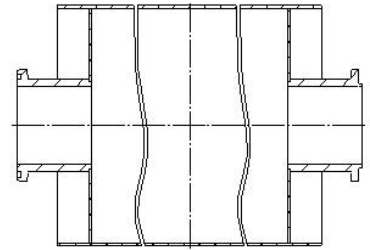


Рис. 2/1/2)  
Сопоставит с рис. 1



Обозначение	Рис.	L, мм	L <sub>1</sub> , мм	Масса, кг
4.021/1/2) & 09.76.00E	1	680	520	29
-01	2	680	520	26,2
-02	2	440	280	23,6

Рис. 1. Газодинамические устройства 3–5

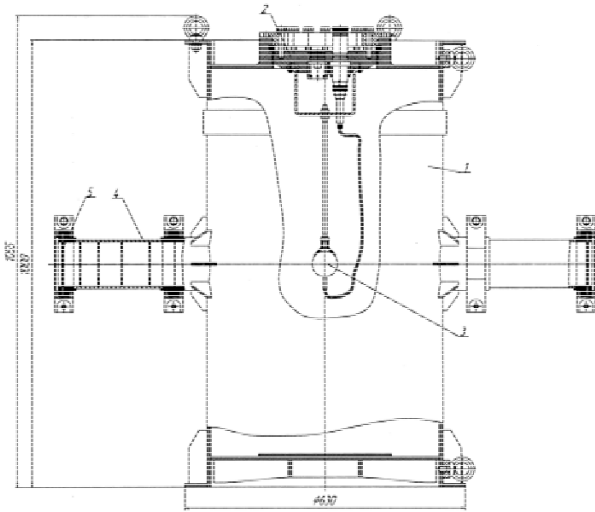


Рис. 2. Схема постановки опытов и вид экспериментальной сборки

Таблица 1

№ опыта	Заряд М <sub>ВВ</sub>	Начальное давление в камере	Газодинамическое устройство №	W <sub>ост</sub> крышки, мм
1	182 г ТЭ	Норма, 1 атм	1 (пустой прямой канал)	13,03
			2 (прямой канал с четырьмя дросселями)	5,56
2	182 г ТЭ	Вакуум, ~0,05 атм	1 (пустой прямой канал)	9,89
			2 (прямой канал с четырьмя дросселями)	4,25
3	182 г ТЭ	Норма, 1 атм	Без устройства	18,53
			3 (расширитель с L = 250 мм)	6,43
			4 (расширитель с L = 500 мм)	5,54
4	182 г ТЭ	Норма, 1 атм	5 (расширитель с L = 500 мм и дросселем)	0,66
			4 (расширитель с L = 500 мм)	6,22
5	270 г ТЭ	Норма, 1 атм	5 (расширитель с L = 500 мм и дросселем)	4,66
			4 (расширитель с L = 500 мм)	2,38
6	270 г ТЭ	Вакуум, ~0,05 атм	5 (расширитель с L = 500 мм и дросселем)	0,22

Для сравнительной оценки эффективности газодинамических устройств различной конструкции введем параметр  $K_{эф, w}$ , который равен отношению остаточного прогиба крышки, установленной без устройства, к остаточному прогибу крышки, установленной в сборе с устройством. Диаграмма  $K_{эф, w}$  приведена на рис. 3.

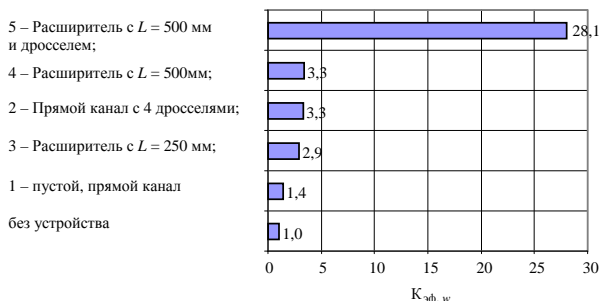


Рис. 3. Диаграмма эффективности газодинамических устройств различной конструкции при  $M_{ВВ} = 182$  г ТЭ,  $P_0 = 1$  атм

Газодинамические расчеты динамической нагрузки проводились по двумерной программе ДИАДА-2D, основанной на использовании метода С. К. Годунова [3]. В пакете программ ДИАДА-2D реализованы вычислительные алгоритмы на подвижных эйлеровых сетках. Методика позволяет адаптировать разностную сетку к особенностям геометрии задачи и течения; в частности, выделять в качестве счетных границ разрывы: контактные границы, ударные и детонационные волны.

Расчеты проведены в следующей постановке.

В центре цилиндрического зарядного отсека расположен шаровой заряд тротила массой 182 г ( $\rho_0 = 1,62$  г/см<sup>3</sup>,  $Q = 4,23$  кДж/г,  $R_{ВВ} = 2,993$  см). Полость заполнена воздухом при нормальных условиях ( $\rho_в = 0,0013$  г/см<sup>3</sup>,  $P_в = 1$  атм). Детонация ВВ – из центра заряда в начальный момент времени  $t = 0$ .

Геометрия взрывного отсека с радиографическими окнами трехмерная. Расчет динамической нагрузки на стенку радиографического окна при взрыве шарового заряда проводился в двумерной осесимметричной постановке. Для этого цилиндрическое окно располагалось по оси симметрии, а полость отсека заменялась цилиндром, расположенным также вдоль оси симметрии, объем которого равен объему (0,179 м<sup>3</sup>), а длина – диаметру (0,512 м) зарядного отсека.

Фронт детонационной волны выделялся в разрыв. Фронт УВ, распространяющейся по воздуху, выделялся в разрыв до выхода ее на ближайшую к центру взрыва стенку. Стенки отсека считались жесткими.

Цель расчетов: определение динамической нагрузки на торцевые стенки каналов радиографических окон (моделируют герметизирующие крышки) при разлете продуктов взрыва.

Для расчета ПВ и воздуха использовалось уравнение состояния гомогенной смеси ПВ и воздуха

с учетом их концентраций в каждой ячейке [4] с параметрами:  $\rho_0 = 1,62$  г/см<sup>3</sup>,  $c_0 = 0,47$  км/с,  $\gamma_0 = 1,17$ .

На рис. 4–6 приведены поля давления во фрагменте задачи на разные моменты времени, иллюстрирующие картину течения в расчете в трех вариантах газодинамических устройств (пустой прямой канал, прямой канал с четырьмя дросселями и расширитель с  $L = 500$  мм и дросселем).

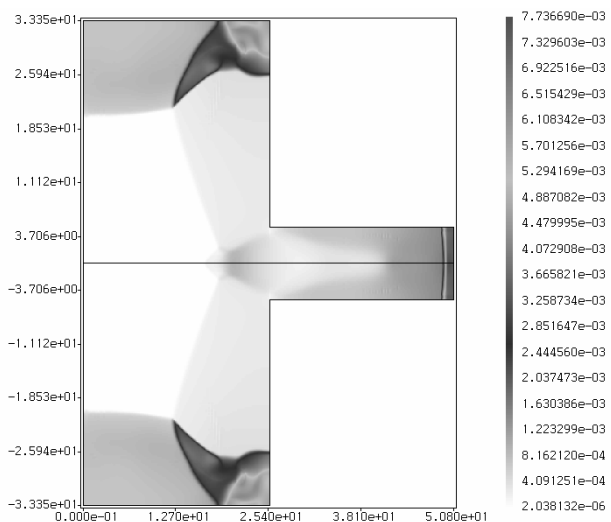


Рис. 4. Поле давления на  $t = 255$  мкс (пустой прямой канал), формирование отраженной УВ от торцевой стенки канала

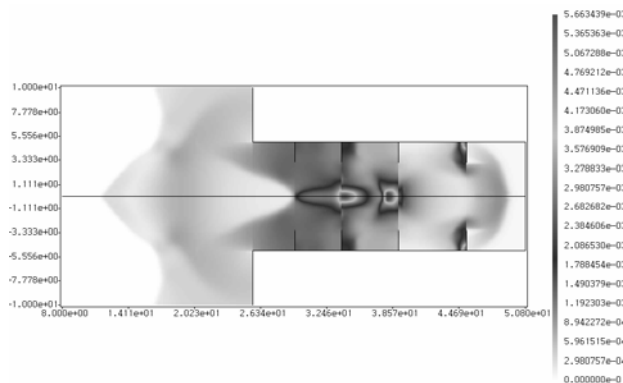


Рис. 5. Поле давления на  $t = 242$  мкс (прямой канал с четырьмя дросселями, фрагмент), выход УВ на стенку канала

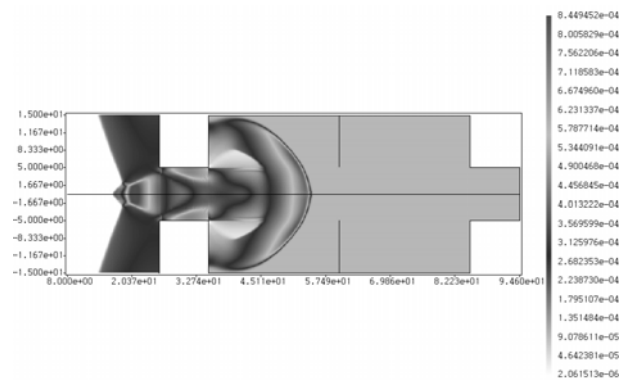


Рис. 6. Поле давления на  $t = 254$  мкс (расширитель с  $L = 500$  мм и дросселем, фрагмент), распространение прямой УВ в полости расширителя

На рис. 7 приведена зависимость среднего давления от времени на стенке канала для трех вариантов геометрии канала. Видно, что максимальное значение среднего давления на стенке составляет соответственно 140, 63, 21 атм.

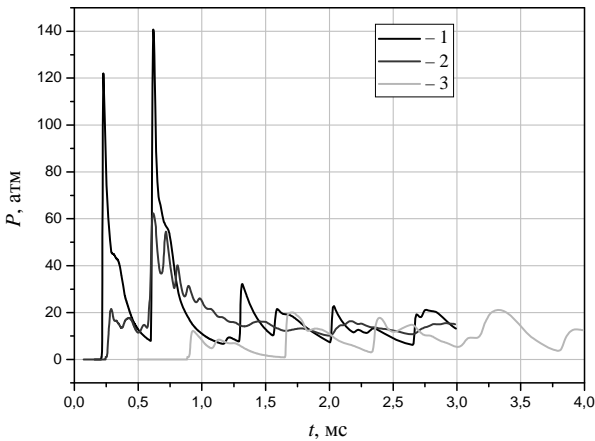


Рис. 7. Зависимость среднего давления от времени на стенке канала для трех вариантов расчета: 1 – пустой прямой канал; 2 – прямой канал с четырьмя дросселями; 3 – расширитель с  $L = 500$  мм и дросселем

Были проведены аналитические оценки эквивалентных статических нагрузок, которые вызывают остаточные прогибы крышек радиографического окна, замеренные в проведенных опытах.

Задача решалась в следующей постановке. Под действием равномерно распределенного статического давления  $P$  защемленная по неподвижному контуру круглая металлическая пластина получает остаточный прогиб  $W_{ост}$ . По известным величинам:  $W_{ост}$ , радиус пластины  $r$ , толщина пластины  $h$ , диаграмма деформирования материала пластины, требуется найти  $P$ .

В нашем случае все крышки изготовлены из сплава АМц, имеют радиус рабочей части  $r = 50$  мм и толщину  $h = 4$  мм. То есть мы имеем тонкие пластины

$\left(\frac{h}{r} = \frac{1}{12,5}\right)$ , получающие большие прогибы

$\left(W > \frac{h}{4} = 1 \text{ мм}\right)$ . В этом случае, согласно [5], уравнение для приближенных вычислений больших прогибов  $W$  в центре равномерно нагруженной давлением  $P$  круглой тонкой пластины, защемленной по неподвижному контуру, имеет следующий вид:

$$\frac{W}{h} + A \left(\frac{W}{h}\right)^3 = B \frac{P}{E} \left(\frac{r}{h}\right)^4, \quad (1)$$

где  $A = 0,471$ ,  $B = 0,171$ .

Также из [5] возьмем формулы для определения напряжений в срединной плоскости  $\sigma_r$  и напряжений изгиба в крайнем волокне  $\sigma'_r$ ,

$$\sigma_r = \alpha E \frac{W^2}{r^2}; \quad (2)$$

$$\sigma'_r = \beta E \frac{Wh}{r^2}, \quad (3)$$

где  $\alpha = 0,976$ ;  $\beta = 2,86$ . В выражениях (1)–(3)  $E$  – модуль упругости, т. е. эти уравнения, получены для линейно-упругого поведения материала пластины.

При линейном поведении материала пластины, учитывая (1)–(3), можно записать следующие зависимости давления и напряжения в центре пластины от прогиба:

$$P = \left[ \frac{W}{h} + A \left(\frac{W}{h}\right)^3 \right] \sqrt{\left[ \frac{B}{E} \left(\frac{r}{h}\right)^4 \right]}; \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_r + \sigma'_r = \alpha E \frac{W^2}{r^2} + \beta E \frac{Wh}{r^2}. \quad (5)$$

Зависимость деформации от прогиба, согласно закону Гука и с учетом (5), будет иметь следующий вид:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \alpha \frac{W^2}{r^2} + \beta \frac{Wh}{r^2}. \quad (6)$$

Отметим, что согласно (6) связь между деформацией и прогибом чисто геометрическая и не зависит от конкретных механических свойств материала пластины.

Во всех проведенных опытах крышки имели остаточные прогибы  $W_{ост}$  (см. табл. 1). Следовательно, крышки подвергались не только упругим ( $\varepsilon_y$ ), но и пластическим деформациям ( $\varepsilon_p$ ), т. е. мы можем записать следующие выражения для полной деформации и полного прогиба крышки:

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_p; \quad (7)$$

$$W = W_y + W_p. \quad (8)$$

В выражении (8)  $W_y$  и  $W_p = W_{ост}$  – упругая и пластическая составляющие полного прогиба.

Предлагаемый алгоритм расчетов покажем на примере вычисления эквивалентного статического давления на крышку 1.2, остаточный прогиб у которой составил  $W_{ост} = 5,56$  мм.

Искомое давление представим в следующем виде:

$$P = P_y + P_p, \quad (9)$$

где  $P_y$  – давление, вызывающее упругую деформацию крышки, а  $P_p$  – давление, вызывающее пластическую деформацию крышки.

Реальную диаграмму деформирования сплава АМц [6] на участке деформирования конкретной крышки аппроксимируем кусочно-линейной функцией следующего вида:

$$\sigma = \begin{cases} E_\varepsilon, & \text{при } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_y; \\ G_t(\varepsilon - \varepsilon_y), & \text{при } \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_y + \varepsilon_p, \end{cases} \quad (10)$$

где  $G_t$  – модуль упрочнения на пластическом участке деформирования крышки.

Согласно диаграмме деформирования сплава АМц, ее упругие параметры имеют следующие значения: упругая деформация  $\varepsilon_y = 0,2\%$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2} = 100$  МПа, модуль упругости  $E = 50$  ГПа.

Подставив  $\varepsilon_y$  в (6) и решив получившееся квадратное уравнение относительно  $W$ , получим значение  $W_y = 0,42$  мм. Подставив  $W_y$  и  $E$  в (4), вычислим  $P_y$ :  $P_y = 1,27$  МПа.

Пластическую деформацию крышки определим из (6), взяв вместо  $W$  остаточный прогиб  $W_{ост} = 5,56$  мм. Получим  $\varepsilon_p = 3,75\%$ .

Тогда полная деформация составит  $\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_p = 0,2 + 3,75 = 3,95\%$ .

По реальной диаграмме деформирования сплава АМц находим значение напряжения  $\sigma$ , соответствующее полученной величине полной деформации  $\varepsilon = 3,95\%$ , которое в данном случае составляет  $\sigma = 154,6$  МПа.

Модуль упрочнения  $G_t$  вычислили следующим образом:  $G_t = \frac{\sigma - \sigma_{0,2}}{\varepsilon - \varepsilon_y} = 1,436$  ГПа.

Подставив  $W_{ост}$  и  $G_t$  в (4), получим  $P_p = 0,91$  МПа.

Таким образом, искомое эквивалентное статическое давление на крышку 1.2 составляет  $P = P_y + P_p = 1,27 + 0,91 = 2,18$  МПа.

В табл. 2 приведены эквивалентные статические нагрузки, вычисленные по описанному алгоритму для крышек радиографических окон, испытанных в сборе с тестируемыми газодинамическими устройствами в опытах № 1, 3 и 4 ( $M_{ВВ} = 182$  г, начальное давление воздуха в камере – 1 атм).

Далее сравним эффективность газодинамических устройств различной конструкции по способности снижать эквивалентную статическую нагрузку. Для этого введем параметр  $K_{эф, p}$ , который равен отношению эквивалентной статической нагрузки на крышку, установленную без устройств, к нагрузке на крышку, установленной в сборе с устройством. Получив-

шиеся значения  $K_{эф, p}$  приведены в табл. 2 и на сравнительной диаграмме, показанной на рис. 8.

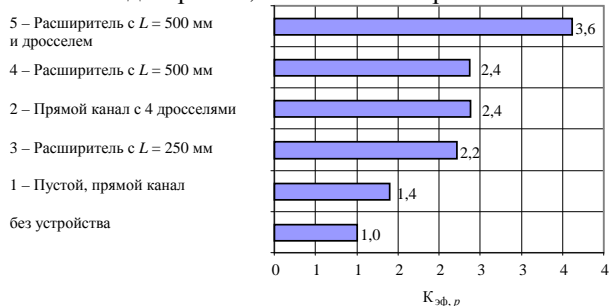


Рис. 8. Диаграмма эффективности газодинамических устройств различной конструкции по способности снижать нагрузку на крышки радиографических окон ( $M_{ВВ} = 182$  г ТЭ,  $P_0 = 1$  атм)

Сравнение  $K_{эф, p}$  и  $K_{эф, w}$  (рис. 3) показывает, что качественная картина не изменилась, что подтверждает все сделанные качественные выводы. Количественные же показатели эффективности по способности газодинамических устройств снижать нагрузку несколько снизились.

Необходимо отметить, что сравнение эффективности устройств различной конструкции по эквивалентной статической нагрузке дает более корректные количественные оценки по сравнению с оценкой по остаточному прогибу, так как при больших прогибах ( $W > \frac{h}{4}$ ) зависимость прогиба от нагрузки нелинейная.

По результатам проведенных исследований из пяти испытанных видов газодинамических устройств наиболее эффективно снижает нагрузку на крышку расширитель с  $L = 500$  мм и дросселем.

На основании двумерных газодинамических расчетах получили количественные параметры динамической нагрузки на крышку радиографического окна при использовании тестируемых устройств и выявили факторы, влияющие на величину динамической нагрузки.

Предложенный алгоритм расчета эквивалентного статического давления на крышки радиографических окон позволяет получать достаточно достоверные оценки, которые можно использовать как для сравнения эффективности устройств различной конструкции, так и для оптимизации крышек по материалу и толщине.

Таблица 2

Эквивалентное статическое давление,  $P_{ст}$

№ опыта	Газодинамическое устройство №	$W_{ост}$ , мм	$P_{ст}$ , МПа	$K_{эф, p}$
1	1 (пустой прямой канал)	13,03	3,72	1,4
	2 (прямой канал с четырьмя дросселями)	5,56	2,18	2,4
3	Без устройства	18,53	5,21	1
	3 (расширитель с $L = 250$ мм)	6,43	2,35	2,2
4	4 (расширитель с $L = 500$ мм)	5,54	2,19	2,4

Таким образом, проведенные исследования нескольких видов устройств, устанавливаемых на радиографических окнах ВЗК, показали эффективность их применения для снижения суммарного импульса давления на крышки радиографических окон ВЗК, за счет чего возможно оптимизировать конструкцию крышек и уменьшать их толщину. При этом оптимальные параметры крышек следует подбирать для конкретных конфигураций газодинамических устройств и масс зарядов ВВ в исследуемых сборках.

### Литература

1. Пат. RU 2367899 С1. Опубл. 20.09.2009. Бюл. № 26. Локализирующее устройство для радиографических исследований взрывных процессов / М. А. Сырунин, Е. Д. Вишневецкий, А. Л. Михайлов и др.

2. Пакет программ ДИАДА расчета задач газовой динамики с выделением детонационных и ударных волн. Техническое задание. ВНИИЭФ / О. М. Величко, Г. Н. Губкова, Ю. Н. Дерюгин и др. Инв. № 8/14306. Саров, 2000.

3. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.

4. Лин Э. Э., Мельцас В. Ю., Портнягина Г. Ф. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по давлению при сильном расширении продуктов взрыва в замкнутом объеме // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2003. Вып. 4. С. 266–275.

5. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластики и оболочки. М.: Наука, 1966. С. 456.

6. Авиационные материалы: Справочник в 9 томах. Т. 4. Ч. I. Книга 1. Деформируемые алюминиевые сплавы и сплавы на основе бериллия / Под ред. С. И. Кишкиной, И. Н. Фридляндера. ОНТИ, 1982. С. 35.