

УДК 539.319:534.5; 620.162:62-756.6

ВЛИЯНИЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЧАСТИ КОРПУСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ВЗРЫВНОЙ КАМЕРЫ НА ЕГО НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

А. А. Пикаревский, О. И. Стояновский

Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mail: st@kti-git.nsc.ru

Экспериментально исследовано влияние наличия экрана на напряженное состояние корпуса реальной взрывной камеры и скорость затухания его колебаний. Отмечается существенное уменьшение напряжений в экранированной части корпуса и на его полюсе, где экран не устанавливался. Показано, что использование локального экрана в виде обечайки приводит к значительному увеличению длительности колебаний корпуса, в том числе на полюсе.

Ключевые слова: взрывная камера, тензометрирование, эквивалентные напряжения, логарифмический декремент затухания, параметр затухания колебаний.

В технологических взрывных камерах (ТВК), предназначенных для обработки материалов, достаточно часто используются экраны для защиты корпуса от прямого воздействия ударных волн или металлических предметов,-metaемых при взрыве. Если при взрывах элементы детонатора повреждают один и тот же участок корпуса, то с течением времени поверхность на этом участке эрозируется и несущая способность корпуса уменьшается. В данной работе проводится экспериментальное исследование влияния наличия экрана на напряженное состояние корпуса реальной ТВК и скорость затухания его колебаний после взрыва.

1. Результаты определения максимальных напряжений. На рис. 1 приведена схема установки КВ-2М, предназначенной для выполнения технологических операций с помощью сосредоточенных или плоских зарядов взрывчатого вещества, размещаемых на рабочем столе. В полости корпуса ТВК установлены два цилиндрических экрана. С помощью тензодатчиков (методика измерений приведена в [1]), наклеиваемых на корпус ТВК (точки на рис. 1), проведено исследование напряженного состояния корпуса при наличии и отсутствии верхнего экрана (экрана 2). Продольная ось датчиков с направлением r расположена в плоскости, проходящей через вертикальную ось корпуса, а продольная ось датчиков с направлением f — перпендикулярно к ним. Несмотря на то что направления r и f равноправны на полюсах, здесь наклеивалось по два датчика для обеспечения надежности измерений.

В отличие от случая использования набора локальных экранов [2] в рассматриваемом случае в качестве верхнего экрана используется замкнутая обечайка, толщина стенки которой составляет $1/3$ толщины стенки цилиндра корпуса. Зазоры между экраном и корпусом небольшие, поэтому после нескольких подрывов пластическая деформация экрана не

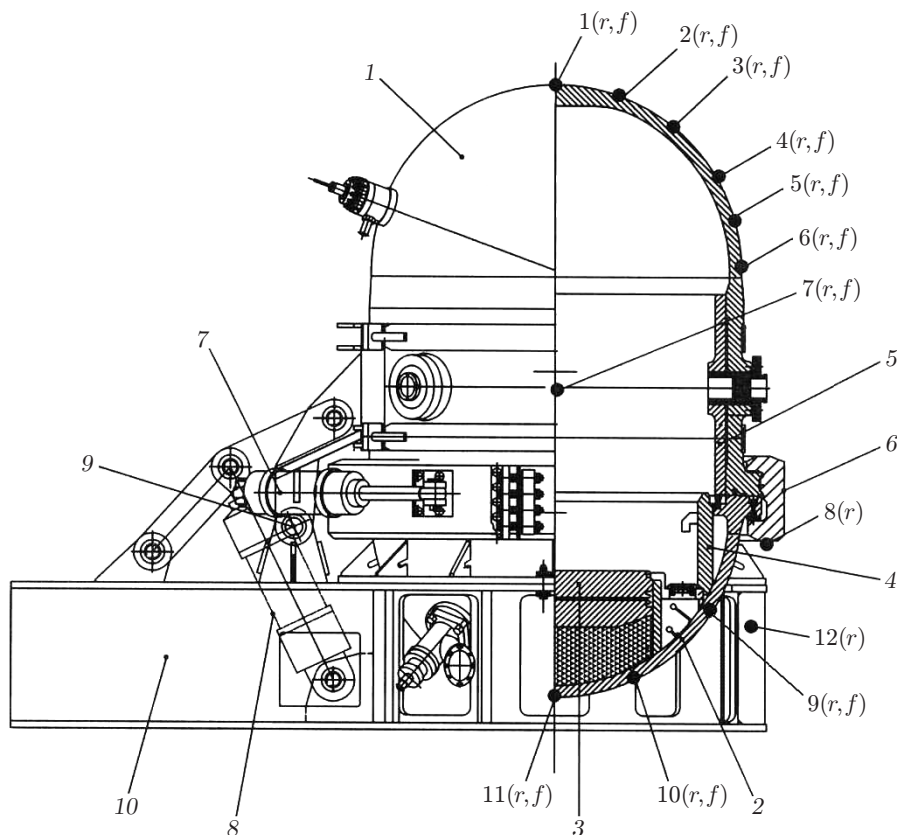


Рис. 1. Схема установки КВ-2М:

точки — места наклейки тензодатчиков; 1 — верхняя часть корпуса; 2 — нижняя часть корпуса; 3 — рабочий стол для размещения заряда; 4 — цилиндрический экран 1; 5 — цилиндрический экран 2; 6 — кольцо байонетного затвора; 7 — гидропривод байонетного затвора; 8 — гидропривод поворота корпуса 1 вокруг горизонтальной оси 9; 10 — рама

превышает 0,5 % и зазор между экраном и корпусом исчезает. Экран крепится к корпусу с помощью двух втулок, расположенных по диаметру в технологических окнах, и может быть демонтирован. Корпус имеет следующие размеры: высота — 2,285 м, диаметр цилиндрической части — 1,4 м, толщина стенок — 42 ÷ 60 мм.

В табл. 1 представлены результаты тензометрирования (максимальные значения напряжений), полученные с использованием сосредоточенного заряда массой $m = 2$ кг при наличии экрана и в его отсутствие. Данные осреднялись по 2–3 результатам измерений. В табл. 1 указаны также максимальные отклонения от средних значений напряжений. Эквивалентные напряжения σ_e вычислялись по формуле Мизеса

$$\sigma_e = (\sigma_r^2 + \sigma_f^2 - \sigma_r \sigma_f)^{1/2}. \quad (1)$$

Из табл. 1 следует, что при испытаниях в отсутствие экрана верхняя полусфера корпуса испытывает значительно бóльшие напряжения, чем при его наличии.

Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что при отсутствии экрана напряжение σ_e в точках измерений увеличивается: $\Delta\sigma_e = [(\sigma_e^0 - \sigma_e) / \sigma_e] \cdot 100$ %. Наиболее существенное увеличение напряжений σ_e происходит в точках 1(r, f), 3(r, f) и 5(r, f), где $\Delta\sigma_e = 29, 27, 12$ % соответственно. Также следует отметить увеличение значений напряжений σ_e в точке 7(r, f) на 32 %, но эти значения существенно меньше, чем в указанных выше точках. Несмотря на то что погрешность единичного измерения составляет 10 % [1], увеличение эквивалентного напряжения на полюсе (точка 1(r, f)) составляет не менее 10,7 %.

Таблица 1

Результаты тензометрирования KB-2М при наличии экрана и в его отсутствие

Датчик	При наличии экрана			В отсутствие экрана			$\Delta\sigma_r$, %	$\Delta\sigma_f$, %	$\Delta\sigma_e$, %
	σ_r , МПа	σ_f , МПа	σ_e , МПа	σ_r^0 , МПа	σ_f^0 , МПа	σ_e^0 , МПа			
1(<i>r, f</i>)	181 ± 12	166 ± 3	181 ± 15	231 ± 20	224 ± 24	233 ± 16	28	35	29
2(<i>r, f</i>)	170 ± 5	128 ± 18	150 ± 3	181 ± 11	134 ± 12	160 ± 6	6,5	5	7
3(<i>r, f</i>)	127 ± 3	99 ± 10	135 ± 20	157 ± 12	106 ± 2	171 ± 5	24	7	27
4(<i>r, f</i>)	104 ± 14	114 ± 11	177 ± 25	100 ± 7	142 ± 2	184 ± 6	-4	25	4
5(<i>r, f</i>)	117 ± 32	130 ± 11	164 ± 14	99 ± 4	165 ± 2	184 ± 6	-15	27	12
6(<i>r, f</i>)	105 ± 7	104 ± 5	128 ± 4	—	—	—	—	—	—
7(<i>r, f</i>)	50 ± 6	49 ± 1	59 ± 2	42 ± 5	62 ± 8	78 ± 10	-16	26	32
8(<i>r</i>)	-120 ± 7	—	—	-119	—	—	-1	—	—
9(<i>r, f</i>)	38 ± 3	53 ± 3	68 ± 7	52 ± 7	35 ± 8	66 ± 9	37	-34	-3
10(<i>r, f</i>)	63 ± 4	34 ± 7	55 ± 3	66 ± 15	32 ± 9	58 ± 13	5	-6	5
11(<i>r, f</i>)	81 ± 10	80 ± 14	79 ± 14	—	—	—	—	—	—
12(<i>r</i>)	34 ± 8	—	—	39 ± 9	—	—	15	—	—

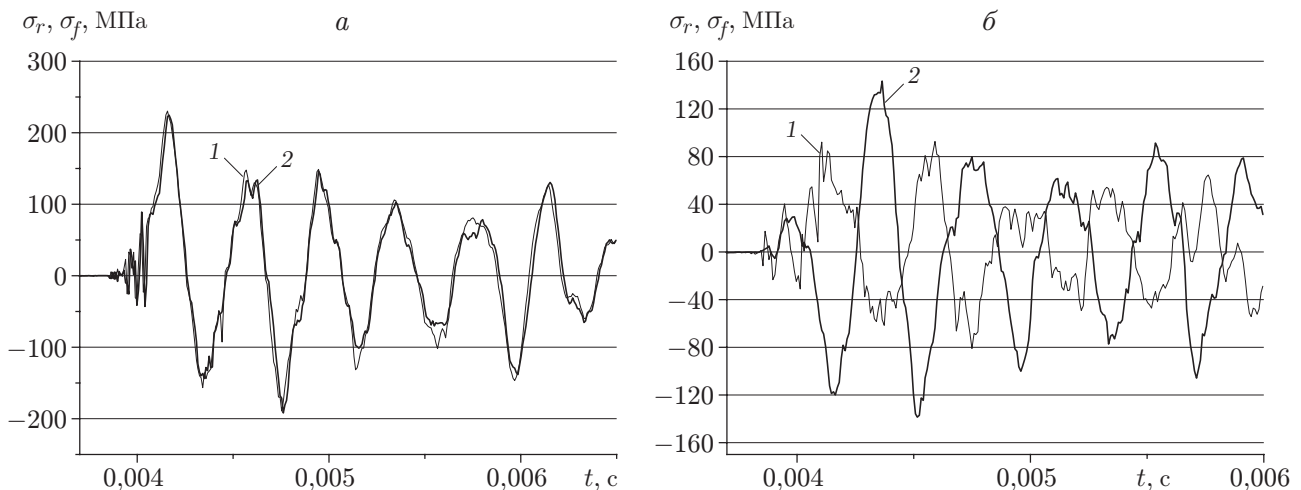


Рис. 2. Зависимости напряжений σ_r (1) и σ_f (2) от времени в отсутствие экрана:
a — в точке 1(*r, f*); *б* — в точке 4(*r, f*)

В точках 1(*r, f*) и 2(*r, f*) значение σ_e меньше или равно большему среди напряжений σ_r и σ_f . Это означает, что фазы колебаний σ_r и σ_f совпадают (рис. 2, *a*). В точках 4(*r, f*) и 5(*r, f*), в отличие от точки 3(*r, f*), с увеличением диаметра полусферы наблюдается рост напряжений σ_f , и значение σ_e становится больше максимального значения среди напряжений σ_r и σ_f , что свидетельствует об изменении значений этих напряжений в противофазе (рис. 2, *б*). Из табл. 1 следует, что указанная тенденция сохраняется и при наличии экрана.

В нижней части корпуса (датчики 9(*r, f*) и 10(*r, f*)), а также в байонетном замке (датчик 8(*r*)) влияния наличия экрана не зафиксировано. В стойках рамы (датчик 12(*r*)) в отсутствие экрана получено большее (в среднем на 15 %) значение напряжения σ_r .

В работе [1] рассматриваются два метода уменьшения напряжений на полюсах корпуса ТВК: с использованием сварного диска, толщина которого в 1,7 раза больше толщины корпуса, и с использованием конструкции горловины с плоской крышкой, толщина которой равна толщине диска. Специальная конструкция экрана также позволяет уменьшить максимальные напряжения на полюсе корпуса.

Установка экрана внутрь камеры позволила:

— уменьшить в среднем на 29 % эквивалентные напряжения на верхнем полюсе корпуса КВ-2М и увеличить (с учетом того, что эти напряжения являются наибольшими) допустимую массу заряда для ТВК;

— уменьшить на 32 % эквивалентные напряжения в середине цилиндрической части корпуса, где расположены горловины оптических люков и приварены кронштейны для поворота верхней части корпуса вместе с байонетным затвором относительно горизонтальной оси.

2. Затухание колебаний корпуса. В работах [3, 4] исследовано затухание колебаний корпуса реальных взрывных камер с помощью логарифмического декремента затухания (ЛДЗ) χ . Для ТВК, корпус которой подобен корпусу КВ-2М, получены значения ЛДЗ для основных гармоник $\chi^0 = 5 \div 11$ % [3]. Для более массивной КВГ-16 значения ЛДЗ составили $\chi^0 = 5 \div 30$ % [4].

На рис. 3,а представлена зависимость $\sigma_e(t)$ для датчиков $1(r, f)$, полученная по формуле (1). Проведена огибающая максимальных значений σ_e (кривая 1), с использованием метода наименьших квадратов построена экспоненциальная аппроксимация (кривая 3) значений напряжений

$$\sigma_e = \sigma_{e0} + \sigma_{e1} \exp(-t/t_1), \quad (2)$$

где постоянная t_1 — параметр затухания колебаний.

Результаты сравнения эквивалентных напряжений, полученных с помощью датчиков $1(r, f)$ при наличии экрана (см. рис. 3,а) и в отсутствие экрана (см. рис. 3,б), позволяют выявить особенности его влияния. На рис. 3,а видны четыре наибольших всплеска (“биения”), на рис. 3,б также четыре всплеска, но их величина меньше (за исключением первого всплеска). При наличии экрана параметр затухания $t_1 = 0,007$ с, а при его отсутствии $t_1 = 0,00218$ с, т. е. наличие экрана приводит к более медленному (в 3,1 раза (0,007/0,00218)) затуханию колебаний корпуса на верхнем полюсе.

В табл. 2 приведены результаты определения параметров затухания колебаний корпуса в местах расположения датчиков при наличии экрана и в его отсутствие при массе заряда $m = 1,0; 2,0; 2,5$ кг. При наличии экрана в верхней части корпуса (датчики $1(r, f)$,

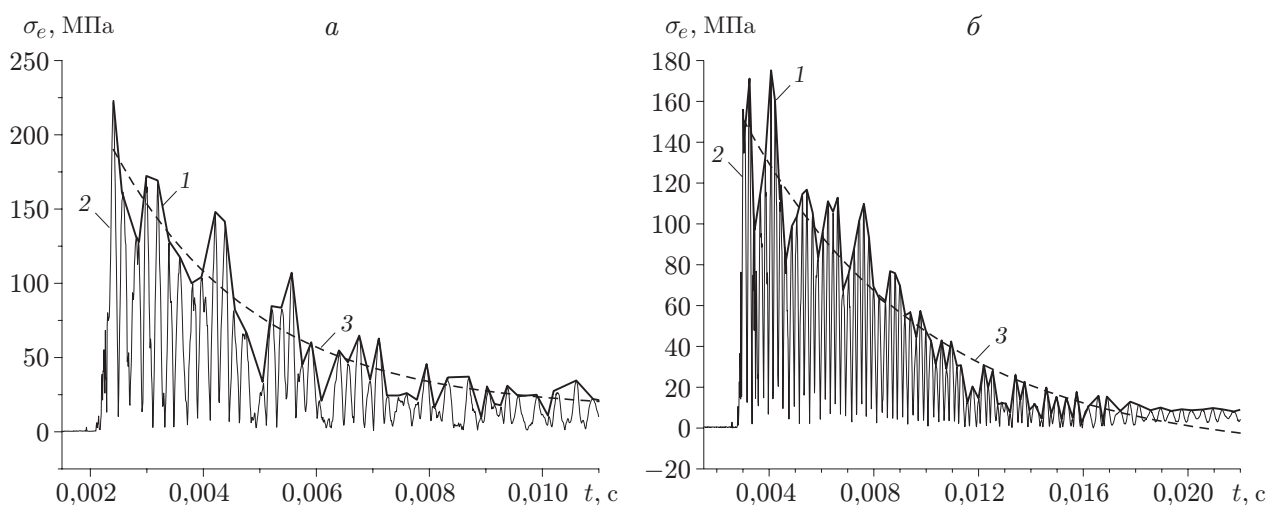


Рис. 3. Огибающая (1) эквивалентных напряжений (2) для датчиков $1(r, f)$ и ее экспоненциальная аппроксимация (3):

а — в отсутствие экрана; б — при наличии экрана

Таблица 2

Параметры затухания колебаний в точках на поверхности корпуса КВ-2М

Датчик	$t_1, \text{ с}$					
	При наличии экрана			В отсутствие экрана		
	$m = 1,0 \text{ кг}$	$m = 2,0 \text{ кг}$	$m = 2,5 \text{ кг}$	$m = 1,0 \text{ кг}$	$m = 2,0 \text{ кг}$	$m = 2,5 \text{ кг}$
$1(r, f)$	0,002 36	0,007 00	0,004 58	0,007 03	0,002 18	0,002 56
$2(r, f)$	0,002 90	0,007 15	0,004 92	0,004 97	0,002 38	0,002 03
$4(r, f)$	0,002 97	0,006 99	0,005 62	0,005 51	0,002 10	0,001 83
$5(r, f)$	0,002 74	0,006 10	—	0,005 10	0,001 93	0,001 50
$6(r, f)$	0,002 64	0,002 89	0,002 56	—	—	—
$7(r, f)$	0,002 64	0,003 12	0,002 15	—	—	—
$10(r, f)$	0,001 52	0,001 27	0,001 19	0,001 21	0,000 75	0,000 94
$11(r, f)$	0,001 37	0,001 38	0,001 22	—	—	—

$2(r, f)$, $4(r, f)$, $5(r, f)$) с увеличением массы заряда с 1 до 2 кг среднее значение параметра затухания колебаний t_1 увеличивается в 2,48 раза, а при отсутствии экрана уменьшается в 2,6 раза. При наличии экрана увеличение заряда с 2 до 2,5 кг приводит к уменьшению t_1 в среднем в 1,4 раза, а при отсутствии экрана — в 0,086 раза.

Таким образом, в исследованном диапазоне масс зарядов с увеличением массы заряда при отсутствии экрана параметр затухания колебаний t_1 уменьшается, а при наличии экрана увеличивается (при $m = 2$ кг достигаются максимальные значения).

На цилиндрической части корпуса (датчики $6(r, f)$, $7(r, f)$) при наличии экрана с увеличением массы заряда параметр затухания t_1 практически не изменяется.

Влияние верхнего экрана на затухание колебаний в нижней части корпуса (датчики $10(r, f)$, $11(r, f)$) является менее значительным: с увеличением массы заряда с 1 до 2,5 кг при наличии экрана параметр затухания колебаний t_1 уменьшается в 1,2 раза, а при отсутствии экрана — в 1,29 раза.

Влияние массы зарядов на изменение параметра затухания, по-видимому, обусловлено наличием инерционных процессов (наличие экрана приводит к увеличению массы корпуса) и скоростью передачи (рассеяния) энергии колебаний корпуса при увеличении амплитуды колебаний с увеличением массы зарядов.

Зная параметр затухания колебаний, можно оценить фактическую нагрузку на стенки корпуса, например получить экспоненциальную аппроксимацию и вычислить прочность корпуса при циклическом нагружении. Использование с этой целью ЛДЗ менее эффективно, поскольку определить декремент затухания для нескольких сравнимых по амплитуде частот (например, в нижней части корпуса КВ-2М) сложно, к тому же разные частоты затухают с различными скоростями [3, 4].

Логарифмический декремент затухания χ определяется как натуральный логарифм отношения двух последовательных амплитуд A_1 , A_2 колебаний:

$$\chi = \ln(A_1/A_2), \quad \chi^0 = \chi \cdot 100 \text{ \%}.$$

Здесь $A_1 > A_2$ при $t_2 > t_1$. В рассматриваемом случае из формулы (2) следует $\sigma_e \sim \sigma_{e1} \exp(-t/t_1)$, так как $\sigma_{e1} \gg \sigma_{e0}$. Тогда

$$\chi = \ln(\exp(\delta t/t_1)) = \delta t/t_1, \quad (3)$$

где $\delta t = t_2 - t_1$. Так как период колебаний $\delta t = T = 1/p$ (p — частота, с^{-1}), то окончательно получаем формулу связи параметра затухания колебаний и ЛДЗ

$$\chi = 1/(pt_1),$$

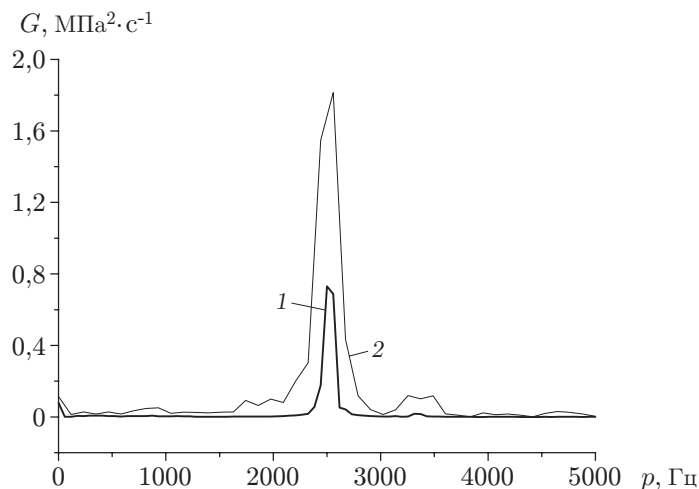


Рис. 4. Амплитудно-частотная зависимость для сигнала датчика 1(r):
1 — при наличии экрана; 2 — в отсутствие экрана

с помощью которой можно определить число колебаний n , за которое их амплитуда уменьшается в e раз:

$$n = 1/\chi = pt_1. \quad (4)$$

С помощью быстрого преобразования Фурье [5] определялась спектральная плотность $G(p)$ для сигналов $\sigma = \sigma(t)$ с датчиков. Получена качественная зависимость $G(p) \sim \sigma^2/\Delta p$. Разрешающая способность по частоте $\Delta p = 50$ Гц. В соответствии с рис. 4, на котором приведена амплитудно-частотная зависимость для датчика 1(r), на верхнем полюсе при наличии экрана и в его отсутствие наблюдаются колебания со средней частотой $p = 2515$ Гц. При $t_1 = 0,007$ с (кривая 1) из (4) получаем $n = 17,6$ ($\chi^0 = 5,7$ %). В отсутствие экрана при $t_1 = 0,00218$ с (кривая 2) получаем $n = 5,5$ ($\chi^0 = 18,2$ %). Большее значение ЛДЗ ($\chi^0 = 18,2$ %) превышает значение $\chi^0 = 11$ %, приведенное в [3]. Это различие обусловлено различием способов крепления корпуса к раме: в экспериментах [3] ТВК крепилась к раме с помощью четырех опор с амортизирующими прокладками. Последние в КВ-2М не устанавливались, при этом обеспечивалось плотное соединение кольцевого фланца корпуса с рамой (жесткое опирание), что и определило более быстрое затухание колебаний.

Заключение. Таким образом, при наличии экрана в верхней части корпуса КВ-2М, с одной стороны, максимальные эквивалентные напряжения на верхних полюсе и полусфере уменьшаются (на полюсе в среднем на 29 %), с другой — время затухания колебаний корпуса увеличивается (на верхнем полюсе — в 3,1 раза). Рассмотренный параметр t_1 затухания колебаний является обобщенной характеристикой затухания колебаний корпуса ТВК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мещеряков Ю. П., Пикаревский А. А., Стояновский О. И. Расчет максимальных напряжений в полюсах взрывной камеры для сварки взрывом при условиях реального нагружения // Изв. Волгогр. гос. техн. ун-та. 2010. № 5. С. 56–62.
2. Первухин Л. Б., Николаенко П. А., Чудновский А. Д., Казанцев А. Г. Влияние сплошных экранов на напряженное состояние оболочки, нагруженной изнутри подрывом заряда // Тез. докл. Междунар. конф. “XI Харитоновские чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны”, Саров, 16–20 марта 2009 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2009. С. 223–226.

3. Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Горшков Н. Н. Влияние окружающей заряд ВВ среды на реакцию оболочки взрывной камеры // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 2. С. 89–95.
4. Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Горшков Н. Н., Стояновский О. И. Реакция оболочки реальной взрывной камеры на внутреннее импульсное нагружение // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 2. С. 95–102.
5. Бедант Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бедант, А. Пирсон. М.: Мир, 1989.

Поступила в редакцию 11/IV 2012 г.
