

УДК 539.319:534.5; 620.162:62-756.6

## ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ АМОРТИЗИРУЮЩИХ ПРОКЛАДОК НА НАПРЯЖЕНИЯ В КОРПУСЕ ВЗРЫВНОЙ КАМЕРЫ

Ю. П. Мещеряков, А. А. Пикаревский, О. И. Стояновский

Конструкторско-технологический филиал  
Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск  
E-mail: stn@sibexplo.com

Экспериментально и численно исследовано влияние жесткости амортизирующих прокладок реальной взрывной камеры на степень затухания колебаний и максимальные напряжения в корпусе камеры. Проведен анализ полученных результатов. Обнаружена связь между сейсмическим воздействием на фундамент при подрыве заряда внутри камеры и долговечностью ее эксплуатации.

**Ключевые слова:** взрывная камера, импульсная нагрузка, численный расчет, амортизирующая прокладка, тензометрирование, параметр затухания колебаний.

**Введение.** Применение технологических взрывных камер (ТВК), установленных в цехах, имеет существенные преимущества по сравнению с взрывными работами на полигонах (отсутствие влияния погоды, возможность использования камеры в технологическом цикле и т. д.). Однако применение ТВК ограничено тем, что корпус и элементы ТВК нагружаются в импульсном режиме [1, 2], для которого недостаточно полно разработаны методики аналитических оценок. И модельные расчетно-экспериментальные данные (см., например, [3]), и экспериментальные данные, полученные для реальных ТВК [4–6], показывают, что на напряженное состояние корпуса ТВК оказывают влияние наличие присоединенных масс, неидеальность форм, наличие внутренних подвижных элементов (рабочих столов) и др. В этих условиях одним из способов решения основных проблем является проведение совместно численных и экспериментальных исследований. Например, в работе [7] проведено сравнение результатов численных расчетов напряженно-деформированного состояния на полюсах корпуса ТВК и результатов тензометрирования; установлено, что их различие не превышает 10 %.

Принцип работы металлических взрывных камер заключается в локализации высвобождающейся при взрыве энергии оболочкой камеры с последующей частичной диссипацией и выделением накопленной упругой энергии в окружающую среду. Как и следовало ожидать, большая часть энергии передается от камеры в грунт, что объясняется существенно меньшим различием импедансов материала оболочки и грунта по сравнению с импедансом воздушной среды. Изучение возможности влияния изменения жесткости связей между камерой и фундаментом на циклическую прочность камер необходимо для получения оптимального сочетания долговечности ТВК с эксплуатационными характеристиками и требованиями к уровню ее сейсмичности.

В данной работе рассмотрено влияние условий крепления ТВК к массивной раме при наличии (отсутствии) амортизирующих прокладок, выполнены численные расчеты и с помощью тензометрирования проведены экспериментальные исследования напряженного состояния корпуса промышленной ТВК (КВ-2Ч).

**Численное моделирование амортизации корпуса ТВК.** В рамках теории линейной упругости нестационарное осесимметричное напряженно-деформированное состояние описывается системой уравнений [8]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \\ \sigma_{zz} &= \lambda \operatorname{div} \mathbf{D} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial z}, & \sigma_{rr} &= \lambda \operatorname{div} \mathbf{D} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial r}, \\ \sigma_{\theta\theta} &= \lambda \operatorname{div} \mathbf{D} + 2\mu \frac{u}{r}, & \sigma_{rz} &= \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right), \end{aligned}$$

где  $\rho$  — плотность;  $\sigma_{zz}$ ,  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{\theta\theta}$ ,  $\sigma_{rz}$  — компоненты тензора напряжений;  $u$ ,  $w$  — компоненты вектора смещения  $\mathbf{D}$ ; постоянные Ламе  $\lambda$ ,  $\mu$  связаны с модулем Юнга и коэффициентом Пуассона соотношениями

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

Численные расчеты выполнены с использованием модифицированного метода конечных элементов [9, 10] для уравнений линейной упругости, описывающих нестационарное осесимметричное напряженно-деформированное состояние. При численном моделировании использовалось приблизительно 5000 элементов треугольной формы. Четыре кронштейна, с помощью которых корпус крепится к раме, моделировались кольцевым фланцем с эквивалентной площадью контакта, а сама рама — цилиндрической оболочкой. Фундамент представлял собой стальную плиту массой 10 т. Задача решалась при следующих граничных условиях. На внешней границе оболочки задавалось давление  $P = 0$ . Для определения импульса сферической ударной волны использовалась формула [1]

$$J = 2\rho_0 r_0^3 (2Q_0)^{0,5} / (3R^2), \quad (1)$$

где  $R$  — радиус оболочки;  $r_0$  — радиус заряда;  $\rho_0$  — плотность заряда;  $Q_0$  — удельная тепловая энергия.

Подставляя в (1) значения  $\rho_0 = 1,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $r_0 = 7,35 \cdot 10^{-2}$  м, соответствующие сферическому заряду тротила массой 2 кг,  $R = 0,7$  м,  $Q_0 = 4,32 \cdot 10^6$  Дж/кг, получаем  $J = 1909,5$  Н·с/м<sup>2</sup>. Удельный импульс, действующий на внутреннюю поверхность ТВК, определялся по формуле

$$j = JS_{\text{сф}}/S_{\text{об}}, \quad (2)$$

где  $S_{\text{сф}}$  — площадь вписанной в оболочку сферы;  $S_{\text{об}}$  — площадь внутренней поверхности оболочки. Формула (2) является следствием равенства импульсов, воздействующих на сферическую и реальную поверхности. Учитывая, что  $S_{\text{сф}}/S_{\text{об}} \approx 0,524$ , имеем  $j \approx 1000$  Па·с. При этом импульс на внутренней поверхности оболочки задавался давлением  $P = 40$  МПа, длительность действия которого составляет 25 мкс. Корпус ТВК моделировался с помощью трех элементов толщиной 45 мм: цилиндра и двух полусфер, замыкающих цилиндрическую часть оболочки. Остальные размеры элементов корпуса указаны на рис. 1.

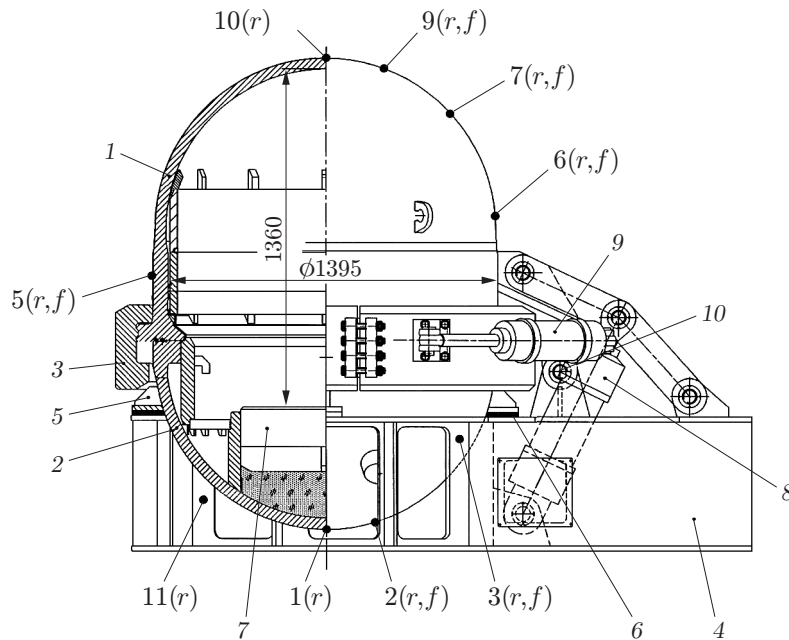


Рис. 1. Схема установки КВ-2Ч:

точки — места наклейки датчиков; 1 — верхняя часть корпуса; 2 — нижняя часть корпуса; 3 — байонетный замок; 4 — рама; 5 — кронштейн; 6 — металлическая (резиновая) прокладка; 7 — рабочий стол; 8 — гидроцилиндр для подъема корпуса 1; 9 — гидроцилиндр байонетного замка; 10 — горизонтальная ось поворота корпуса 1 с байонетным замком

Влияние предметного стола, байонетного замка и других элементов взрывной камеры, за исключением отмеченных выше, на динамику колебаний оболочки ТВК не учитывалось.

В расчетах использовались следующие начальные данные и константы: для стали — модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ , плотность  $\rho = 7,85 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, смещение  $\mathbf{u}|_{t=0} = 0$ , компоненты тензора напряжений  $\sigma_{zz} = \sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{rz} = 0$ ; для резиновой прокладки —  $E = 10$  МПа,  $\nu = 0,45$ ,  $\rho = 1,4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mathbf{u}|_{t=0} = 0$ ,  $\sigma_{zz} = \sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{rz} = 0$ .

Представленные на рис. 2 результаты численного моделирования в случае использования резиновых (РП) и стальных (СП) прокладок показывают, что металлическая прокладка имеет преимущество по сравнению с резиновой. Вследствие раскочки оболочки ТВК [4] максимальные напряжения имеют место на ее верхнем полюсе. Более того, в случае использования РП эти напряжения затухают существенно медленнее, чем в случае использования СП. В областях крепления корпуса ТВК к раме при использовании РП напряжения на 15–20 % меньше, чем при использовании металлической прокладки, но затухание колебаний, как и на верхнем полюсе, происходит быстрее, когда применяется металлическая прокладка. В целом напряжения в области крепления существенно меньше, чем на верхнем полюсе оболочки ТВК, поэтому металлическая прокладка имеет преимущество по сравнению с РП. Данный результат объясняется тем, что энергия взрыва заряда, аккумулируемая оболочкой ТВК, более интенсивно передается в фундамент в случае использования жесткой металлической прокладки. Это приводит к увеличению напряжений в областях крепления камеры и соответственно к их уменьшению на большей части оболочки ТВК и более быстрому затуханию колебаний. Этот эффект является наиболее важным, поскольку в течение рабочего цикла оболочка совершает меньшее число колебаний с большой амплитудой, что существенно повышает долговечность ТВК.

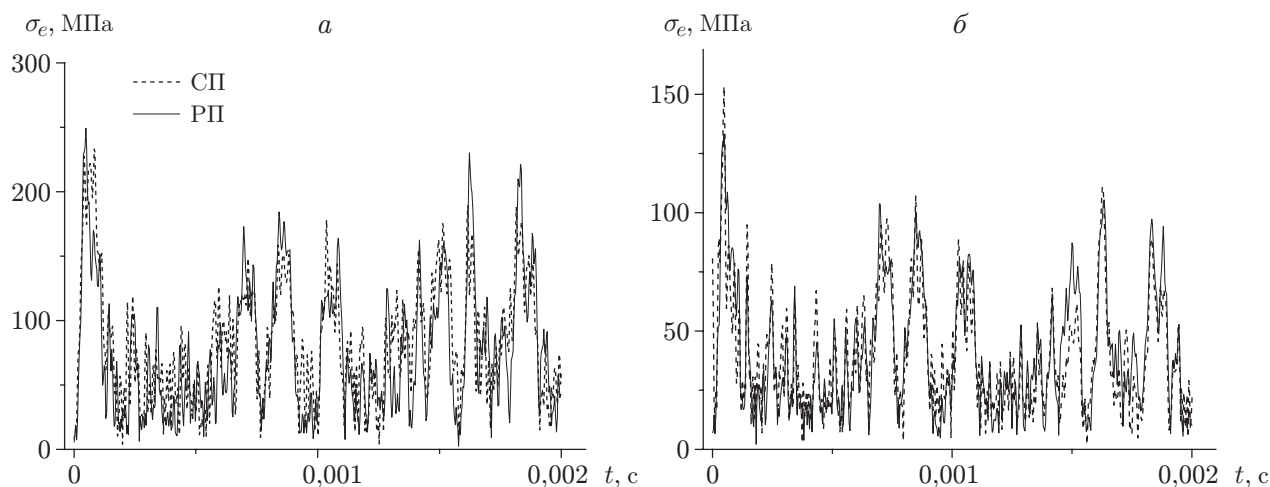


Рис. 2. Эквивалентные напряжения на верхнем полюсе (*а*) и в областях крепления (*б*) камеры

**Схема установки КВ-2Ч и методика проведения исследований.** На рис. 1 приведена схема взрывной камеры КВ-2Ч, на корпус которой наклеены тензодатчики. Продольная ось датчиков с направлением  $r$  расположена в плоскости, проходящей через вертикальную ось корпуса, а продольная ось датчиков с направлением  $f$  — перпендикулярно им. Запись  $7(r, f)$  означает, что в данной области наклеены два датчика  $7(r)$  и  $7(f)$ .

С помощью четырех кронштейнов корпус КВ-2Ч опирается на раму и крепится к ней. Амортизация корпуса осуществляется с помощью РП (резина средней твердости) толщиной 20 мм, установленных между четырьмя кронштейнами и рамой. В ряде экспериментов вместо резиновых прокладок устанавливались металлические прокладки.

При тензометрировании использовались полупроводниковые тензодатчики КСПН-9-10К-Е4, соединенные в полумостовую схему, на одно из плеч которой устанавливались постоянный и подстроечный резисторы, а на другое в точке измерения наклеивался тензорезистор. Опорной точкой для полумостов является средняя точка блока питания, состоящего из двух аккумуляторов. Использование аккумуляторов исключает помехи, характерные для сетевых источников питания. Большие значения коэффициента тензочувствительности ( $183 \pm 3 \%$ ) и сопротивления тензодатчиков (10 кОм) позволяют получить от датчиков сигнал с напряжением, приблизительно равным 1 В (при этом отношение сигнал-шум увеличивается на два порядка по сравнению со случаем использования проволочных или фольговых тензодатчиков), и не использовать усилитель. Вследствие малости погрешности коэффициента тензочувствительности тензодатчиков (согласно паспортным данным) можно выполнять непосредственные измерения напряжений без тарировок. Малое время процесса нагружения ( $10 \div 20$  мс), слабая зависимость коэффициента тензочувствительности от температуры ( $0,0029 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) и выбор датчиков, у которых коэффициент линейного расширения такой же, как у материала, на который наклеиваются датчики, позволяют уменьшить погрешность измерений, обусловленную влиянием температуры. Измерительная система создана на базе персонального компьютера и встраиваемой в него многофункциональной платы DAQe-2204 с частотой опроса 3 МГц, имеющей 64 входных аналоговых канала с общим проводом или 32 дифференциальных канала, а также АЦП (12 бит). Частота последовательного опроса датчиков равна 93,75 кГц. Погрешность единичного измерения составила не более  $\pm 5 \%$ .

В экспериментах используется заряд в виде цилиндра, высота которого равна диаметру, в качестве ВВ выбран аммонит 6ЖВ с плотностью  $1000 \text{ кг/м}^3$  с перерасчетом массы заряда в тротиловом эквиваленте.

С использованием результатов измерений радиального  $\sigma_r$  и окружного  $\sigma_f$  напряжений эквивалентные напряжения определялись по формуле Мизеса

$$\sigma_e = (\sigma_r^2 + \sigma_f^2 - \sigma_r \sigma_f)^{1/2}, \quad (3)$$

в соответствии с которой на полюсах корпуса (датчики  $1(r)$  и  $10(r)$ )  $\sigma_e = |\sigma_r|$ , так как  $\sigma_r = \sigma_f$ .

**Распределение напряжений в корпусе ТВК при амортизации и в ее отсутствие.** В табл. 1 приведены максимальные значения эквивалентных напряжений в различных точках корпуса в случае использования СП и РП для заряда массой  $m = 2 \text{ кг}$  ( $\Delta\sigma_e = (\sigma_e^{\text{РП}} - \sigma_e^{\text{СП}})/\sigma_e^{\text{СП}}$ ). Из табл. 1 следует, что в обоих режимах наибольшие напряжения достигаются на верхнем полюсе корпуса, где наклеен датчик  $10(r)$ , но при этом напряжения в режиме РП ( $\sigma_e^{\text{РП}} = 258 \text{ МПа}$ ) превышают напряжения в режиме СП на 6,6 %.

Наиболее существенные различия эквивалентных напряжений в случае использования различных прокладок наблюдаются в нижней части корпуса. На нижнем полюсе, где наклеен датчик  $1(r)$ , и в области наклейки датчиков  $2(r, f)$  различия эквивалентных напряжений в различных режимах максимальны и достигают 55 и 49 % соответственно. Особенностью конструкции нижней части корпуса является наличие опор на раму и массивного рабочего стола с дробью. Результирующие напряжения в нижней части корпуса имеют две составляющие: от действия волн деформаций, проходящих по оболочке, и от воздействия на оболочку импульса, прошедшего через стол. Дробь, являясь неоднородной средой, вызывает значительное растяжение импульса, уменьшение его амплитуды и замедление его прохождения [11]. Это приводит к ослаблению влияния импульса, распространяющегося через дробь, на результирующие напряжения в нижней части корпуса по сравнению с воздействием волн деформаций, распространяющихся по оболочке. Поэтому первая составляющая результирующих напряжений в нижней части корпуса становится существенной. Таким образом, потери энергии этой составляющей должны оказывать значительное влияние на результирующие напряжения. Следует ожидать, что в режиме СП потери энергии деформаций волны, распространяющейся в оболочке, больше, чем в режиме РП. Действительно, в случае использования металлической прокладки волны

Таблица 1

Максимальные напряжения  $\sigma_e^{\text{СП}}$ ,  $\sigma_e^{\text{РП}}$  и изменение напряжений  $\Delta\sigma_e$  в корпусе ТВК при его амортизации

Датчик	$\sigma_e^{\text{СП}}$ , МПа	$\sigma_e^{\text{РП}}$ , МПа	$\Delta\sigma_e$ , %
$10(r)$	242,0	258,0	6,6
$9(r, f)$	142,4	152,3	7,0
$7(r, f)$	153,4	146,2	-4,7
$6(r, f)$	140,8	146,5	4,0
$5(r, f)$	100,3	98,6	-1,7
$3(r, f)$	73,3	66,0	-10,0
$2(r, f)$	47,3	70,3	49,0
$1(r)$	71,6	111,0	55,0
$11(r)^*$	33,8	27,7	-18,0

\*Для датчика  $11(r)$  приведены значения  $\sigma_r^{\text{СП}}$  и  $\sigma_r^{\text{РП}}$ . Датчик  $11(r)$  наклеен на стойку рамы.

Таблица 2

Максимальные значения  $\sigma_e$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_f$  для датчиков  $9(r, f)$  и  $7(r, f)$  в режимах РП и СП

Датчик	Режим СП			Режим РП		
	$\sigma_e$ , МПа	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_f$ , МПа	$\sigma_e$ , МПа	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_f$ , МПа
$9(r, f)$	142,4	163,0	108,0	152,3	166,0	136,0
$7(r, f)$	153,4	122,0	113,0	146,2	132,0	133,0

деформаций могут беспрепятственно проходить в раму вследствие отсутствия различия импедансов материалов, оболочки, прокладки и рамы. Таким образом, полученные экспериментальные данные, свидетельствующие о существенных различиях напряжений в нижней части корпуса в режимах РП и СП, являются ожидаемыми.

В режиме СП в точке  $3(r, f)$ , расположенной вблизи (на расстоянии 0,16 м) кронштейнов, наблюдаются более высокие напряжения, что естественно при жестком креплении корпуса к раме.

В табл. 2 приведены значения  $\sigma_r$  и  $\sigma_f$  для датчиков  $7(r, f)$  и  $9(r, f)$ . Из табл. 2 следует, что значения  $\sigma_e$  для датчика  $7(r, f)$  больше значений  $\sigma_r$  и  $\sigma_f$ . Это означает, что их максимальные значения достигаются в противофазе (см. (3)). Для каждого типа используемых прокладок (СП или РП) значения  $\sigma_r$  и  $\sigma_f$  различаются несущественно, но для режима РП они больше, чем для режима СП: значения  $\sigma_r$  — на 8 %,  $\sigma_f$  — на 18 %.

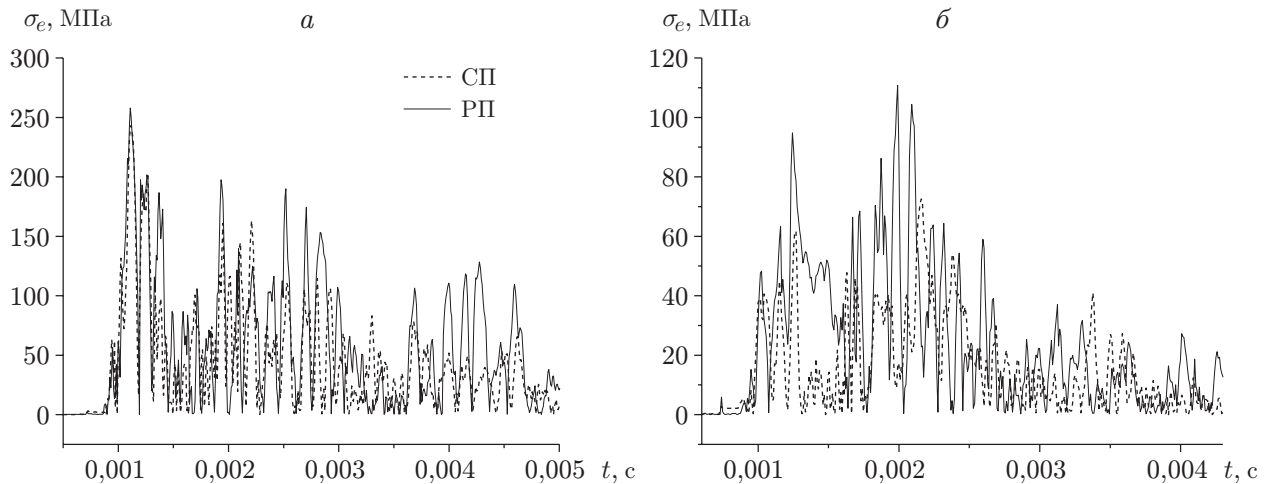
Для датчиков  $9(r, f)$  происходит перестройка фаз  $\sigma_r$  и  $\sigma_f$ : значение  $\sigma_e$  меньше наибольшего из значений  $\sigma_r$  и  $\sigma_f$ , т. е. максимальные значения напряжения достигаются в одной фазе. Для обоих режимов значения напряжений  $\sigma_r$  в области наклейки датчика  $9(r)$  равны и существенно превышают (в среднем на 30 %) напряжения в области наклейки датчика  $7(r)$ . Напряжения  $\sigma_f$  в областях наклейки датчиков  $9(f)$  и  $7(f)$  различаются незначительно.

Таким образом, в зоне, расположенной между датчиками  $7(r, f)$  и  $9(r, f)$ , происходит перераспределение энергии деформации с относительным увеличением радиальных напряжений  $\sigma_r$  при сохранении значений окружных напряжений  $\sigma_f$ , а также изменение фаз колебаний  $\sigma_r(t)$  и  $\sigma_f(t)$ , в результате чего наблюдается переход от их колебаний в противофазе для датчиков  $7(r, f)$  к колебаниям в одной фазе для датчиков  $9(r, f)$ . Из табл. 2 следует, что в режиме СП окружные напряжения, в отличие от радиальных, значительно меньше, чем в режиме РП. Поскольку максимальные напряжения достигаются непосредственно после нагружения, можно предположить, что энергия окружных напряжений передается в раму (и далее в фундамент) начиная с момента возникновения напряжений в оболочке камеры.

На рис. 3,а представлены сигналы датчика  $10(r)$  для режимов РП и СП. Видно, что сначала импульсы ( $t = 4 \cdot 10^{-4} \div 8 \cdot 10^{-4}$  с) различаются незначительно (на 6,6 % при максимальных значениях напряжений), однако после уменьшения амплитуд сигналов наблюдаются всплески (так называемые биения). При этом сигнал в режиме РП более чем в два раза превышает сигнал в режиме СП. Также отмечается более быстрое затухание сигнала в режиме СП.

На рис. 3,б приведены сигналы датчика  $1(r)$  в режимах РП и СП. Для сигналов датчиков в нижней части корпуса (датчики  $1(r)$ ,  $2(r, f)$ ,  $3(r, f)$ ) на начальном этапе  $t = 0,0004 \div 0,0011$  с в режиме РП имеют место большие значения  $\sigma_e$ , затем наблюдаются всплески. При  $t > 0,0022$  с происходит быстрое затухание колебаний.

В режиме СП максимальные значения  $\sigma_e$  наблюдаются при  $t = 0,0015 \div 0,0018$  с. Далее, как и в режиме РП, амплитуда колебаний уменьшается, однако в режиме СП это происходит значительно быстрее.

Рис. 3. Сигналы датчиков 10( $r$ ) (а) и 1( $r$ ) (б) в режимах СП и РП

В последней строке табл. 1 приведены данные для датчика 11( $r$ ) (среднее значение напряжений для двух датчиков, наклеенных на вертикальные стойки рамы). При массе заряда  $m = 2$  кг  $\Delta\sigma_e = -18\%$ , т. е. крепление корпуса к раме без амортизации приводит к увеличению нагрузки на раму и фундамент. Сравнение результатов численных расчетов (см. рис. 2,а) и результатов тензометрирования (см. рис. 3,а) на верхнем полюсе при  $t < 2$  мс показывает, что они хорошо согласуются. В расчетах получены максимальные эквивалентные напряжения  $\sigma_p^{\text{СП}} = 235$  МПа,  $\sigma_p^{\text{РП}} = 249,5$  МПа ( $K_p = \sigma_p^{\text{РП}}/\sigma_p^{\text{СП}} = 1,062$ ), в результате измерений —  $\sigma_{\text{и}}^{\text{СП}} = 240,7$  МПа,  $\sigma_{\text{и}}^{\text{РП}} = 255,6$  МПа ( $K_{\text{и}} = \sigma_{\text{и}}^{\text{РП}}/\sigma_{\text{и}}^{\text{СП}} = 1,062$ ). Таким образом, соотношения напряжений совпадают, а значения этих напряжений различаются не более чем на 2,5 %. В диапазоне  $t = 0 \div 0,002$  с на рис. 2,а, 3,а помимо начальных максимальных импульсов наблюдается по два всплеска (на рис. 3,а начало сигнала сдвинуто по оси времени на 0,0003 с).

На рис. 2,а для всплесков в диапазоне  $t = 0,0007 \div 0,0011$  с средние значения напряжений равны  $\sigma_p^{\text{РП}} = 174$  МПа,  $\sigma_p^{\text{СП}} = 143$  МПа ( $K_p = 1,22$ ). Аналогично на рис. 3,а в диапазоне  $t = 0,0010 \div 0,0013$  с  $\sigma_{\text{и}}^{\text{РП}} = 168,1$  МПа,  $\sigma_{\text{и}}^{\text{СП}} = 134,7$  МПа ( $K_{\text{и}} = 1,248$ ), при этом в режиме РП расчетные напряжения больше измеренных на 3,5 %, в режиме СП — на 6,2 %. Таким образом, расчетные и измеренные значения различаются незначительно. Следует отметить, что в режиме СП относительные значения напряжений меньше, чем в режиме РП. На рис. 2,а для всплесков в диапазоне  $t = 0,00160 \div 0,00185$  с  $\sigma_p^{\text{РП}} = 225,4$  МПа,  $\sigma_p^{\text{СП}} = 189$  МПа ( $K_p = 1,19$ ), на рис. 3,а в диапазоне  $t = 0,00160 \div 0,00193$  с  $\sigma_{\text{и}}^{\text{РП}} = 172,9$  МПа,  $\sigma_{\text{и}}^{\text{СП}} = 108,5$  МПа ( $K_{\text{и}} = 1,59$ ). Далее наблюдается резкое уменьшение измеренных напряжений в режиме СП, для которого характерно более быстрое затухание колебаний. На рис. 2,б приведены расчетные значения эквивалентных напряжений в режимах РП и СП непосредственно на границе контакта фланца и рамы, где отношение максимальных эквивалентных напряжений равно  $K_p = 135,6/154,5 = 0,88$ .

На рис. 3,б приведены измеренные эквивалентные напряжения в режимах РП и СП на нижней половине корпуса. Видно, что в диапазоне  $t = 0,0005 \div 0,0020$  с напряжения в режиме РП значительно больше, чем в режиме СП:  $K_{\text{и}} = 1,55$ . По мере приближения к кронштейнам максимальные напряжения в режиме СП увеличиваются. Из табл. 1 следует, что в точке 2( $r, f$ )  $K_{\text{и}} = 1,49$ , а в точке 3( $r, f$ ), расположенной вблизи кронштейнов, в режиме СП максимальные напряжения больше на 10 % и  $K_{\text{и}} = 0,9$ . Результаты экспериментов показывают, что начиная с некоторого момента времени затухание колебаний

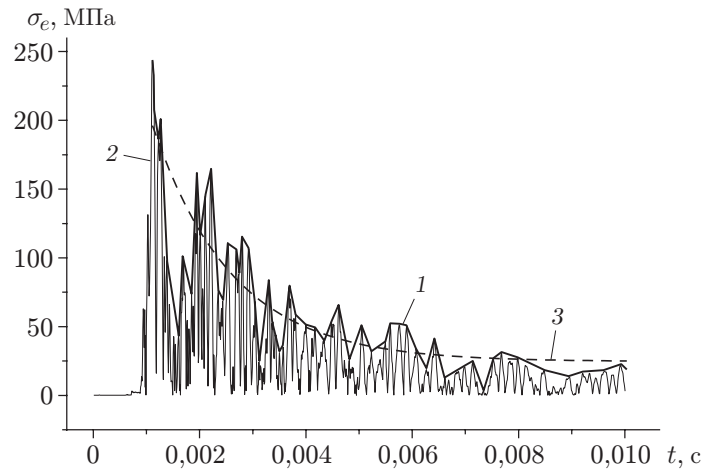


Рис. 4. Огибающая (1) эквивалентных напряжений (2) и ее экспоненциальная аппроксимация (3) для датчика 10( $r$ ) в режиме СП

происходит быстрее, чем в соответствии с численными расчетами. Это объясняется тем, что в действительности энергия, аккумулированная оболочкой ТВК, рассеивается не только в ограниченном объеме фундамента, но и в грунте.

Расчетное значение эквивалентного напряжения в области крепления корпуса к раме для режима СП (см. рис. 2, б) на 15–20 % больше, чем для режима РП, т. е. значения  $\Delta\sigma_e$  существенно уменьшаются в направлении от точек, в которых расположены датчики 1( $r$ ), 2( $r, f$ ), к точке, в которой расположены датчики 3( $r, f$ ) (см. табл. 1), находящиеся вблизи опоры.

**Влияние амортизации корпуса на скорость затухания его колебаний.** На рис. 3 видно, что колебания корпуса являются затухающими. Процесс затухания колебаний корпуса в области, где расположены датчики, можно описать с использованием метода наименьших квадратов, построив экспоненциальную аппроксимацию значений напряжений:

$$\sigma_e = \sigma_{e0} + \sigma_{e1} e^{-t/t_1}. \quad (4)$$

Здесь  $t$  — текущее время;  $t_1$  — параметр затухания колебаний;  $\sigma_{e0}$  — значение эквивалентных напряжений при  $t \rightarrow \infty$ . При  $t = 0$   $\sigma_{e \max} = \sigma_{e0} + \sigma_{e1}$ , при  $t = t_1$  составляющая амплитуды колебаний  $\sigma_{e1}$ , зависящая от времени, уменьшается в  $e$  раз.

На рис. 4 показана огибающая  $\sigma_e(t)$  (см. (4)) для датчика 10( $r$ ) в режиме СП. Значения параметров затухания для всех датчиков приведены в табл. 3 ( $\delta t_1$  — стандартная погрешность определения  $t_1$ ). Огибающие строились с использованием достаточно большого количества точек ( $n = 60 \div 100$ ), поэтому величина стандартной погрешности определяется в основном наличием всплесков и их величиной.

В последней строке табл. 3 приведено среднее значение параметра затухания  $t_1 \pm \delta t_1$ , а также среднее значение стандартной погрешности. При наличии амортизаторов среднее значение параметра затухания  $t_1$  в 2,5 раза больше, чем при их отсутствии. Иными словами, корпус, установленный на массивную раму с резиновыми амортизаторами, испытывает существенные напряжения, длительность воздействия которых в среднем в 2,5 раза больше, чем для корпуса, установленного на раму без амортизаторов. В режиме РП среднее значение стандартной погрешности на 9 % больше, чем в режиме СП, что свидетельствует о большей амплитуде всплесков в режиме РП.



Таблица 3

Значения параметров затухания  $t_1$  для корпуса установки КВ-2Ч

Датчик	Режим СП		Режим РП	
	$t_1 \pm \delta t_1$ , с	$\delta t_1$ , %	$t_1 \pm \delta t_1$ , с	$\delta t_1$ , %
1( <i>r</i> )	0,000 65 ± 0,000 10	15	0,001 86 ± 0,000 50	26
2( <i>r, f</i> )	0,001 14 ± 0,000 25	22	0,003 97 ± 0,001 05	38
3( <i>r, f</i> )	0,001 18 ± 0,000 25	21	0,003 04 ± 0,000 69	23
5( <i>r, f</i> )	0,001 73 ± 0,000 20	12	0,003 53 ± 0,000 49	14
6( <i>r, f</i> )	0,000 92 ± 0,000 11	12	0,002 03 ± 0,000 46	23
7( <i>r, f</i> )	0,001 51 ± 0,000 12	8	0,002 53 ± 0,000 47	18
9( <i>r, f</i> )	0,001 10 ± 0,000 28	25	0,003,97 ± 0,001 45	36
10( <i>r</i> )	0,001 50 ± 0,000 26	17	0,003 35 ± 0,000 91	27
Среднее значение	0,001 220	16,5	0,003 035	25,5

**Заклучение.** Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы. При удалении амортизаторов корпуса взрывной камеры КВ-2Ч наиболее существенное относительное уменьшение напряжений на 35 % наблюдается на нижнем полюсе (на верхнем полюсе — на 6 %). Однако абсолютные значения напряжений на нижнем полюсе  $\sigma_{e \max} = 72$  МПа меньше, чем на верхнем полюсе ( $\sigma_{e \max} = 242$  МПа), уменьшение напряжений на котором играет более существенную роль при введении ограничений на допустимую массу заряда ВВ.

Отсутствие амортизаторов приводит к повышению напряжений в областях крепления оболочки ТВК к раме на 15–20 %. В этих областях абсолютные значения напряжений существенно меньше, чем на верхнем полюсе.

Отсутствие амортизаторов между корпусом КВ-2Ч и рамой не приводит к значительному увеличению нагрузки на фундамент: при максимально допустимой массе заряда для КВ-2Ч  $m = 2$  кг удаление амортизаторов вызывает увеличение нагрузки на фундамент лишь на 18 %.

При наличии амортизаторов среднее значение параметра затухания  $t_1$  в 2,5 раза больше, чем при их отсутствии. Иными словами, корпус, установленный на массивную раму с резиновыми амортизаторами, испытывает существенные напряжения, длительность воздействия которых в среднем в 2,5 раза больше, чем для корпуса, установленного на раму без амортизаторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Демчук А. Ф. Металлические взрывные камеры / А. Ф. Демчук, В. П. Исаков. Красноярск: Изд-во Краснояр. гос. ун-та, 2006.
2. Мещеряков Ю. П., Стояновский О. И. Расчет максимальных напряжений в металлических дисках, возникающих в результате импульсных нагрузок // Изв. Волгогр. гос. техн. ун-та. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. 2008. Вып. 3, № 3. С. 83–85.
3. Абакумов А. И., Егунов В. В., Иванов А. Г. и др. Расчетно-экспериментальное исследование деформации оболочек взрывных камер // ПМТФ. 1984. № 3. С. 127–130.
4. Корнев В. М., Адищев В. В., Митрофанов А. Н., Грехов В. А. Экспериментальное исследование и анализ колебаний оболочки взрывной камеры // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 6. С. 155–157.

5. 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.
6. 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.
7. 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. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. 2010. Вып. 4, № 5. С. 56–62.
8. Тимошенко С. П. Курс теории упругости. Киев: Наук. думка, 1972.
9. Мещеряков Ю. П. Численное моделирование процесса резки облученных тепловыделяющих сборок // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 3. С. 134–140.
10. Meshcheryakov Y. P., Bulgakova N. M. Thermoelastic modeling of microbump and nanojet formation on nanosize gold films under femtosecond laser irradiation // J. Appl. Phys. A. 2006. V. 82. P. 363–368.
11. Мещеряков Ю. П. Численное исследование демпфирующих свойств стержневых структур при импульсном нагружении // Изв. Волгогр. гос. техн. ун-та. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. 2008. Вып. 3, № 3. С. 101–104.

*Поступила в редакцию 31/V 2012 г.,  
в окончательном варианте — 21/I 2013 г.*

---