

РАСЧЕТ ДИНАМИКИ НАГРУЖЕНИЯ СТЕНКИ СФЕРИЧЕСКОЙ ВЗРЫВНОЙ КАМЕРЫ

А. И. Белов, В. М. Беляев, В. А. Корнило, А. И. Марченко,
Г. С. Романов, В. В. Чернуха

(Минск)

При решении многих инженерных задач большой практический интерес представляет изучение динамики нагружения оболочек взрывных камер с целью прогнозирования их прочностных свойств и расчета конструктивных параметров, отвечающих заданным конкретным режимам технической эксплуатации. Краткий обзор теоретических и экспериментальных исследований, относящихся к расчету оболочек взрывных камер, а также качественная интерпретация полученных результатов приведены в [1], где в частности отмечается отсутствие работ, касающихся непосредственного расчета металлических камер. В [2] экспериментально изучен процесс деформации и проанализированы особенности поведения стальной оболочки цилиндрической взрывной камеры. В [3] численным решением определена динамическая нагрузка на стенку сферической камеры, при этом предполагалось, что стенка абсолютно жесткая.

В настоящем исследовании рассматриваются процессы нагружения упругой оболочки стальной сферической камеры. В качестве источника энерговыделения выбирался заряд конденсированного ВВ, помещенный в центре камеры, заполненной воздухом при нормальных условиях. Результаты данной работы получены на основе расчетной методики [4], позволяющей проводить численное исследование как ударно-волнового движения внутри камеры, вызванного разлетом и торможением вещества источника энерговыделения, так и процессов развития упругих напряжений, возникающих в стенках камеры при их ударном нагружении.

Постановка задачи. В соответствии с [4] для численного расчета процессов в камере и стенке использовалась система уравнений механики сплошной среды, записанных в лагранжевых координатах для случая сферической симметрии (точка над величинами в уравнениях означает производную по времени вдоль траектории частицы среды):

$$\begin{aligned} \dot{R} &= V, \quad \dot{V} = v_1 \left[\frac{R}{M} \right]^2 \frac{\partial \Sigma_R}{\partial M} + 2 \frac{\Sigma_R - \Sigma_\theta}{R}, \\ v &= v_1 \left[\frac{R}{M} \right]^2 \frac{\partial R}{\partial M} \cdot \dot{E} - v (s_1 \dot{\epsilon}_1 + 2s_2 \dot{\epsilon}_2) + (p + q) \dot{v} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь и далее использованы следующие обозначения: t — время; R — радиальная координата; M — массовая (лагранжева) координата; V — скорость; E — удельная внутренняя энергия; p — давление; q — псевдовязкость; T — температура; v — удельный объем; p_0, ρ_0 — начальные давление и плотность воздуха в камере; ρ_1 — плотность материала стенок камеры; s_1, s_2, s_3 — компоненты девиатора напряжений; $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ — компоненты вектора деформаций; $\rho_{ок}$ — плотность кристаллического ВВ; D_k — скорость детонационной волны; $A, B, a, b, c, \alpha, \beta$ — константы в уравнениях состояния Тиллотсона; $\gamma, \gamma_0, \gamma_1, \delta_*, A_0, m$ — константы в уравнениях состояния продуктов детонации ВВ; $\dot{t}_*, \dot{R}_*, p_*, \rho_*, E_*$ — характерные обезразмеривающие параметры задачи; $\Sigma_R = -(p + q) + s_1$ и $\Sigma_\theta = -(p + q) + s_2$ — радиальное и тангенциальное напряжения.

В расчете упругопластических свойств среды применялись известные соотношения, связывающие компоненты вектора деформаций ϵ и девиатора напряжений s [5]

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= 2\mu_1 \left(\dot{\epsilon}_1 - \frac{1}{3} \dot{v}/v \right), \quad \dot{s}_2 = 2\mu_1 \left(\dot{\epsilon}_2 - \frac{1}{5} \dot{v}/v \right), \\ \dot{\epsilon}_1 &= \frac{\partial V}{\partial R}, \quad \dot{\epsilon}_2 = \frac{V}{R}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для термодинамического описания стальной оболочки, испытывающей динамические нагрузки, использовались уравнения Тиллотсона [6—7], апробированные в расчетах высокоскоростного удара по металлическим и пластиковым мишеням, что соответствует условиям на стенках камеры

$$p = [a + b/(E/c\eta^2 + 1)] E\rho + A\mu + B\mu^2, \quad \rho \geq \rho_1,$$

$$p = aE\rho + \left\{ bE\rho/(E/c\eta^2 + 1) + A\mu \exp\left[-\beta\left(\frac{1}{\eta} - 1\right)\right] \right\} \exp\left[-\alpha\left(\frac{1}{\eta} - 1\right)^2\right], \quad (3)$$

$$\rho < \rho_1$$

($\eta = \rho/\rho_1$; $\mu = \eta - 1$). При этом использованы следующие значения констант [6—7]: $\rho_1 = 7,83$ г/см³, $A = 1,279 \cdot 10^{11}$ Па, $B = 1,05 \cdot 10^{11}$ Па, $a = 0,5$, $b = 1,5$, $c = 9,5 \cdot 10^3$ Дж, $\alpha = 5$, $\beta = 5$.

Термодинамические параметры холодного конденсированного ВВ описывались с помощью формулы $p = E\rho(\gamma - 1)$ с $\gamma = 3$, а для определения параметров продуктов детонации использовались соотношения [8]:

$$p = (\gamma - 1)\rho E + \varphi,$$

$$\gamma = \gamma_0 + (\gamma_1 - \gamma_0)(x^2 - 3x + 3)x, \quad \varphi = 0, \quad x \leq 1,$$

$$\gamma = \gamma_1, \quad \varphi = \rho_{ок} D_{к}^2 A_0 (\delta - \delta_*)^m, \quad x > 1, \quad (4)$$

$$x = \delta/\delta_*, \quad \delta = \rho/\rho_{ок},$$

где $\rho_{ок} = 1,735$ г/см³; $D_{к} = 7,83$ км/с; $\delta_* = 0,35$; $A_0 = 0,1533$; $m = 2,284$; $\gamma_1 = 1,67$; $\gamma_0 = 1,375$ [8]. Термодинамические свойства воздуха в камере рассчитывались по табличным данным из работы [9].

В соответствии с [4] с помощью характерных параметров задачи $t_* = 10^{-5}$ с, $R_* = 1$ см, $p_* = 7,83$ ГПа, $\rho_* = 7,83$ г/см³, $E_* = 1$ кДж/г) система (1)–(4) приводилась к безразмерному конечно-разностному виду. Численные расчеты выполнялись на ЭВМ ЕС-1055 с использованием неравномерной сетки по массовой координате; число расчетных ячеек для описания процессов составляло ~ 100 – 150 внутри камеры и ~ 20 – 30 в ее стенке, а величина показателя прогрессии для размеров ячеек равна $\sim 1,01$ – $1,05$. Расчетная сетка вблизи стенки камеры выбиралась достаточно подробной с величиной ячеек $\sim 0,1$ – $0,2$ см и, как показали тестовые расчеты, обеспечивала хорошую точность и надежность определения термодинамических параметров на стенке.

Результаты численных расчетов. На рис. 1–4 представлен процесс развития волнового движения внутри взрывной камеры и формирования поля упругих напряжений в ее стенке. В исследуемом варианте задачи рассматривалась камера с внутренним радиусом 21,5 см и стенкой из стали ЗОХГСА толщиной 1 см. Стенка камеры нагружалась взрывом шарового заряда ВВ радиусом 2 см и массой 55 г с энерговыведением 5 кДж/г [10]. Начальные значения давления и плотности воздуха в камере составляли 0,1 МПа и 1,29 г/см³.

Из рис. 1 видно, что в начале процесса по массе заряда ВВ распространяется детонационная волна с $V \approx 2,3$ км/с и $p \approx 25$ ГПа на фронте. К моменту $\sim 2,7$ мкс процесс детонации заканчивается (рис. 1, а), при этом газообразные продукты начинают интенсивно расширяться, а в воздушной полости формируется ударная волна, движущаяся к стенке камеры (рис. 1, б). При $t = 66,81$ мкс на стенке камеры достигаются максимальные значения термодинамических параметров: $p \sim 27$ МПа, $\rho \sim 17,5\rho_0$ и $T \sim 4,2 \cdot 10^3$ К (рис. 2). Наличие двойных максимумов у указанных величин объясняется действием на стенку второго ударного импульса (см. рис. 1, б), догоняющего основную ударную волну и обусловленного отражением в центральной области и последующим движением газообразных продуктов детонации к стенке камеры [4]. Существование более мелких максимумов у параметров на стенке (см. рис. 2) связано с многократными отражениями от границы раздела продуктов детонации и воздуха.

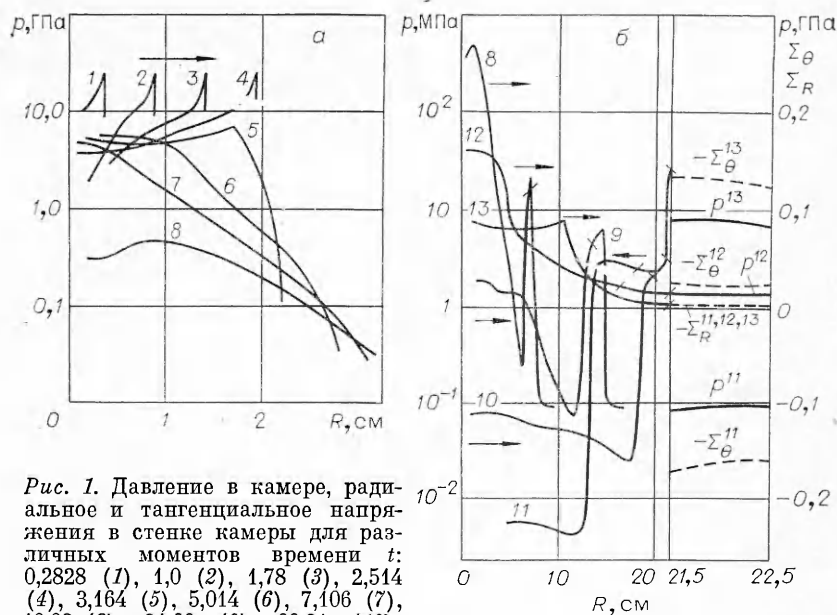


Рис. 1. Давление в камере, радиальное и тангенциальное напряжения в стенке камеры для различных моментов времени t : 0,2828 (1), 1,0 (2), 1,78 (3), 2,514 (4), 3,164 (5), 5,014 (6), 7,106 (7), 10,08 (8), 31,66 (9), 66,81 (10), 126,7 (11), 177,8 (12), 213,6 (13). Штрихом отмечено положение контактных границ (продукты детонации — воздух, воздух — стенка камеры). Стрелки указывают направление движения.

Из полученных результатов следует, что процесс взрывного нагружения камеры носит импульсный периодический характер [1—3] и определяется динамикой ударно-волнового движения, вызванного разлетом и торможением продуктов детонации. С течением времени в камере устанавливается колебательное движение среды с частотой $\sim 4-5$ кГц, а средние значения параметров на стенке камеры составляют: $p \sim 2 \div 2,5$ МПа, $\rho \sim 2,5\rho_0$, $T \sim 3,2 \cdot 10^3$ К, при этом, как показали численные расчеты, среднее значение радиуса области, занятой продуктами детонации, составляет $\sim 17,5-18$ см. В результате импульсного периодического ударного нагружения в стенке камеры развиваются упругие напряжения сжатия — растяжения (см. рис. 1, б). Вследствие малой толщины стенки возникающие напряжения примерно постоянны по ее толщине, а их абсолютные амплитудные и средние значения составляют соответственно $\sim 0,1-0,15$ и $0,01-0,02$ ГПа, что значительно меньше пределов прочности (1,28 ГПа) и текучести (0,6 ГПа) для выбранной марки стали и указывает на упругий характер деформации стенки (рис. 3).

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Для апробации используемой теоретической модели в данной работе расчетные результаты сопоставлены с некоторыми экспериментальными данными [10], в частности, для давления на внутренней поверхности и упругих деформаций в нижнем полюсе стенки камеры. Из рис. 4 видно, что динамика взрывного нагружения камеры определяется в основном первым ударным импульсом, действующим на стенку. После $t \sim 0,5 \div 0,7$ мс следуют незначительные пульсации давления и нагрузка на стенку близка к квазистатической (см. рис. 2). При этом наблюдается очень слабая зависимость параметров стенки от дальнейшего развития ударно-волновых процессов в камере. В результате расчетные амплитудные и средние значения напряжений и деформаций в стенке практически не меняются с течением времени. Полученная в эксперименте «раскачка» амплитуды колебаний упругих деформаций не есть следствие каких-либо эффектов, вызванных периодическим импульсным нагружением камеры, и может быть объяснена возбуждением и взаимодействием различных форм собственных колебаний стенки с близкими частотами [2, 10]. Наблюдающиеся в эксперименте нарушения периодичности и более сложный характер

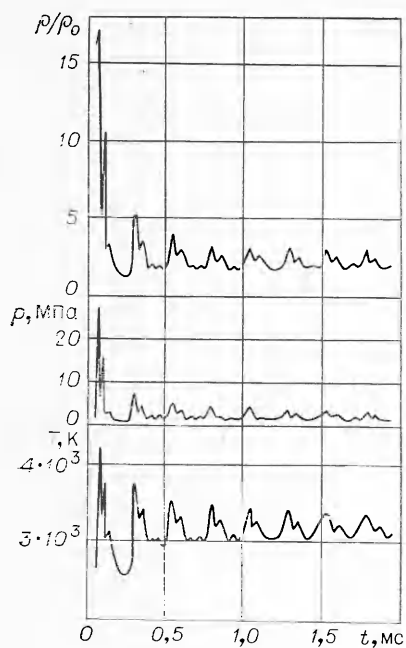


Рис. 2. Давление, относительная плотность и температура на стенке камеры в зависимости от t .

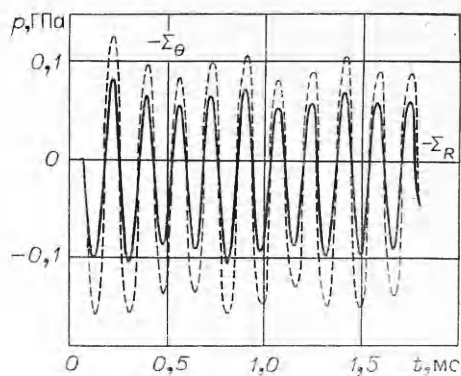


Рис. 3. Расчетная осциллограмма для давления, радиального и тангенциального напряжений на внешней границе стенки камеры.

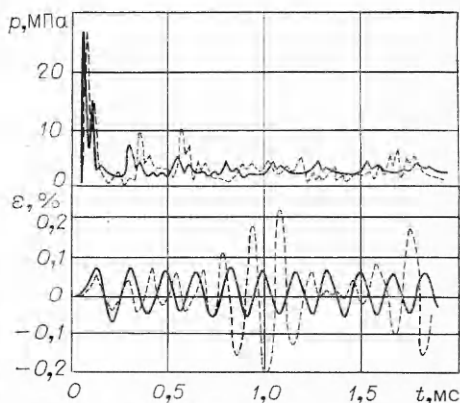


Рис. 4. Сравнительная осциллограмма для давления на внутренней поверхности стенки камеры и относительных деформаций в нижнем полюсе стенки (сплошная линия — расчет, штриховая — эксперимент).

зависимости давления на стенке могут быть связаны с геометрическими и другими неидеальностями стенки, в частности, физическими неоднородностями, однако этот вопрос специально не изучался.

Поступила в редакцию 20/XI 1984,
после доработки — 6/II 1985

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Адичев, В. М. Корнев. ФГВ, 1979, 15, 6, 108.
2. А. А. Бузуков. ФГВ, 1980, 16, 5, 87.
3. С. А. Ждан. ФГВ, 1981, 17, 2, 142.
4. А. И. Марченко, Г. С. Романов. Докл. АН БССР, 1984, 28, 2, 144.
5. М. Л. Уилкинс.— В кн.: Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967.
6. Дж. Д. О'Киф, Т. Дж. Арнс.— В сб.: Механика образования воронок при ударе и взрыве. М.: Мир, 1977.
7. R. T. Sedgwick, L. J. Hageman, R. G. Herrmann e. a. Int. J. Eng. Sci., 1978, 16, 859.
8. В. Ф. Куропатенко. ЧММСС, 1977, 8, 6, 68.
9. Н. М. Кузнецов. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1965.
10. А. И. Белов, В. Е. Клаповский, В. А. Корнило и др. ФГВ, 1984, 20, 3, 71.