

## ОЦЕНКА ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ В ТОПЛИВНОМ БАЛЛОНЕ С КРИОГЕННОЙ ЗАПРАВКОЙ

© 2007 А. И. Довгялло, Д. А. Угланов, Т. В. Ашихмина

Самарский государственный аэрокосмический университет

В настоящей статье приводится решение задачи определения напряжений в стенке универсального газового баллона в условиях его взаимодействия с испаряющимся криоагентом. Для решения этой задачи использован метод расчета нестационарной теплопроводности для исследования температурных напряжений. Анализ полученных данных позволяет заключить, что на протяжении всего процесса газификации температурные напряжения в стенке баллона не превышают предел прочности.

Идея универсального газового баллона, например для пригородного газа [1], заключается в том, что он может заправляться как компримированием до рабочего давления (20 – 40 МПа), так и заправкой сжиженным природным газом (СПГ). В последнем случае криоагент заливается во внутренний сосуд, снаружи которого между ним и внутренней стенкой баллона располагается многослойная теплоизоляция типа ЭВТИ. Изоляция здесь служит для предотвращения конвективных токов и защищает стенку от теплового удара. При этом теплообмен между стенкой баллона СПГ обусловлен только теплопроводностью газообразного метана, находящегося в кольцевой газовой полости.

Поведение рабочего тела в баллоне рассчитывалось по специальным методикам [2]. При этом было показано, что прогрев жидкой фазы, ее испарение и перераспределение жидкой и газообразной фракций осуществляется в сравнительно большой промежуток времени (до двух суток). Спустя это время параметры рабочего тела приходят к равновесному состоянию всего баллона, при этом равновесная температура достигает значения  $-80...-100^{\circ}\text{C}$ , а давление не превышает  $2...3$  МПа.

Такие параметры позволяют ожидать малые напряжения в стенке баллона. Все это с учетом универсальности баллона по способу заправки способствует увеличению его ресурса. Несмотря на то, что задачи теплофизики применительно к баллону можно считать в определенном объеме решенными,

вопросы оценки уровней напряжений, и, соответственно, термоциклическая прочность требует отдельной проработки. В настоящей статье приводится решение задачи определения напряжений в стенке баллона в условиях его взаимодействия с испаряющимся криоагентом.

Задача определения термоупругих напряжений сводится к совместному решению прочностной задачи и задачи нестационарной теплопроводности.

Для решения этой задачи использован метод расчета нестационарной теплопроводности для исследования температурных напряжений [3]. Возможность представления задач термоупругих напряжений простыми и надежными функциональными операторами позволяет сравнительно несложно определить поля температурных напряжений при любых переменных во времени тепловых воздействиях.

После заполнения баллона криагентом жидкость начинает испаряться, и испарившаяся доля криопродукта перераспределяется по слоям газовой полости.

Введем для стенки баллона с внутренним  $R_1$  и наружным  $R_2$  радиусами относительный радиус  $r = r/R_1$ . Тогда дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности внутри стенки баллона при смешанных граничных условиях третьего и второго рода в безразмерных координатах приводится к виду:

$$\frac{\partial T}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r},$$

$$[T(r, Fo)]_{Fo=0} = T_0; \quad (1)$$

$T_0 = T_0(c) = const$  – начальная температура стенки,

$$\left[ \frac{\partial T}{\partial r} - Bi \cdot T(r, Bi) \right]_{r=1} = -Bi \cdot j_2(Fo);$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=k} = \frac{R_1}{l} \cdot j_1(Fo), \quad (2)$$

где  $Fo = a \cdot t / R_1^2$ ;  $Bi = a \cdot R_1 / l$ ;

$k = R_2 / R_1 > 1$ ;  $1 \ll r \ll k$ .

После соответствующих преобразований [3] относительная избыточная температура стенки для рассматриваемого случая охлаждения выразится соотношением:

$$q(r, Fo, Bi, k) = \frac{T_{cp} - T(r, Fo)}{T_{cp} - T_0} = D(Bi, k) \cdot \left[ \frac{(k-1) \cdot Bi + 2}{Bi} - \frac{(k-r)^2}{k-1} \right] \cdot \exp[-A(Bi, k) \cdot Fo]. \quad (3)$$

Тангенциальные и радиальные напряжения с учетом [3] в цилиндрической стенке находятся по формулам:

$$s_j = \frac{b \cdot E}{1-n} \cdot \frac{1}{r^2} \times \left[ \frac{r^2 + 1}{k^2 - 1} \int_1^k T(r, Fo) r dr + \int_1^k T(r, Fo) r dr - T(r, Fo) r^2 \right]; \quad (4)$$

$$s_r = \frac{b \cdot E}{1-n} \cdot \frac{1}{r^2} \left[ \frac{r^2 - 1}{k^2 - 1} \int_1^k T(r, Fo) r dr - \int_1^k T(r, Fo) r dr \right] \quad (5)$$

Если подставить значение текущей локальной температуры  $T(r, Fo)$ , полученное по выражению (3) в формулы (4), (5), то безразмерные напряжения:

$$\bar{s}_j = \frac{(1-n) \cdot s_j}{b \cdot E \cdot (T_{cp} - T_0)}; \quad \bar{s}_r = \frac{(1-n) \cdot s_r}{b \cdot E \cdot (T_{cp} - T_0)}$$

определяются формулами:

$$\bar{s}_j = -D(Bi, k) \cdot N(r, k) \cdot \exp[-A(Bi, k) \cdot Fo]; \quad (6)$$

$$\bar{s}_r = D(Bi, k) \cdot M(r, k) \cdot \exp[-A(Bi, k) \cdot Fo]. \quad (7)$$

Значения  $D(Bi, k)$  и  $A(Bi, k)$  вычисляются по соотношениям:

$$A(Bi, k) = \frac{10Bi[Bi \cdot (k-1)(k+3) + 12]}{(k-1)[Bi^2 \cdot (k-1)^2 \cdot (11k+5) + 10Bi \cdot (k-1) \cdot (5k+3) + 60 \cdot (k+1)]}; \quad (8)$$

$$D(Bi, k) = 2,5 \cdot w \cdot Bi \cdot [Bi \cdot (k-1) \cdot (5k+3) + 12 \cdot (k+1)] \quad (9)$$

$$w^{-1} = Bi^2 \cdot (k-1)^2 \cdot (11k+5) + 10 \cdot Bi \cdot (k-1) \cdot (5k+3) + 60 \cdot (k+1)$$

Формулы (8, 9) позволяют определять напряжения при любых значениях  $Bi$  и параметров стенки баллона  $k$ . По приведенным выше соотношениям были определены значения параметров, входящих в расчетные формулы (таблица 1).

Таблица 1

Параметр	Значение
$R_1$ , мм	100
$R_2$ , мм	106
$k = R_1 / R_2$	1,06
$l$ , Вт/м К	16,3
$a = \lambda / \rho \cdot c$ , м <sup>2</sup> /с	$0,85 \cdot 10^{-5}$
$Fo = a \cdot t / R_1^2$	$0,00085 \cdot \tau$
$a$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К	22,9
$Bi = a R_1 / l$	0,013
$B(Bi, k)$	0,066
$D(Bi, k)$	0,068
$A(Bi, k)$	2,27

$$s_z = \frac{p_g \cdot D_2}{2(R_2 - R_1)}, \quad (10)$$

$$s_{эквIV} = \sqrt{s_z^2 + s_r^2 + s_j^2 - (s_z s_r + s_j s_r + s_z s_k)}, \quad (11)$$

$$s_{эквIV} \leq [s] , \quad (12)$$

$$[s] = \frac{s_T}{n} . \quad (13)$$

С использованием этих параметров были вычислены значения относительных избыточных температур стенки на внутренней поверхности баллона с учетом их зависимости от времени  $q(r, Fo, Bi, k)$ , распределение температуры в стенке баллона  $T(r, Fo)$  как функции времени, а также радиальные и касательные напряжения  $s_r(r)$ ,  $s_j(r)$  в стенке баллона. Напряжения, создаваемые давлением испаряющегося газа (график изменения давления газа по времени, представлен в статье «Численное моделирование процессов в топливном баллоне с криогенной заправкой природным газом при бездренажном хранении»), определяются с помощью известного

выражения 10. Результаты расчетов представлены на рис. 1. В соответствии с ГОСТом [5] запас прочности принимается  $n = 2$ . Анализ полученных данных позволяет заключить, что на протяжении всего процесса газификации напряжения в стенке баллона не превышают предел прочности, равный, например для баллона БК-6601-400 ТУ, изготовленного из стали 45,  $s_T = 890$  МПа. Таким образом, напряжения в стенке баллона в рассматриваемом случае значительно ниже, т. е. на порядок, чем при заправке компримированием по сравнению с  $s_T = 890$  МПа.

Если учесть практику эксплуатации баллона как топливной емкости для автомобиля даже с учетом эпизодической полной газификации СПГ до параметров заправки компримированием, то можно утверждать, что ресурс баллона увеличивается минимум в три раза.

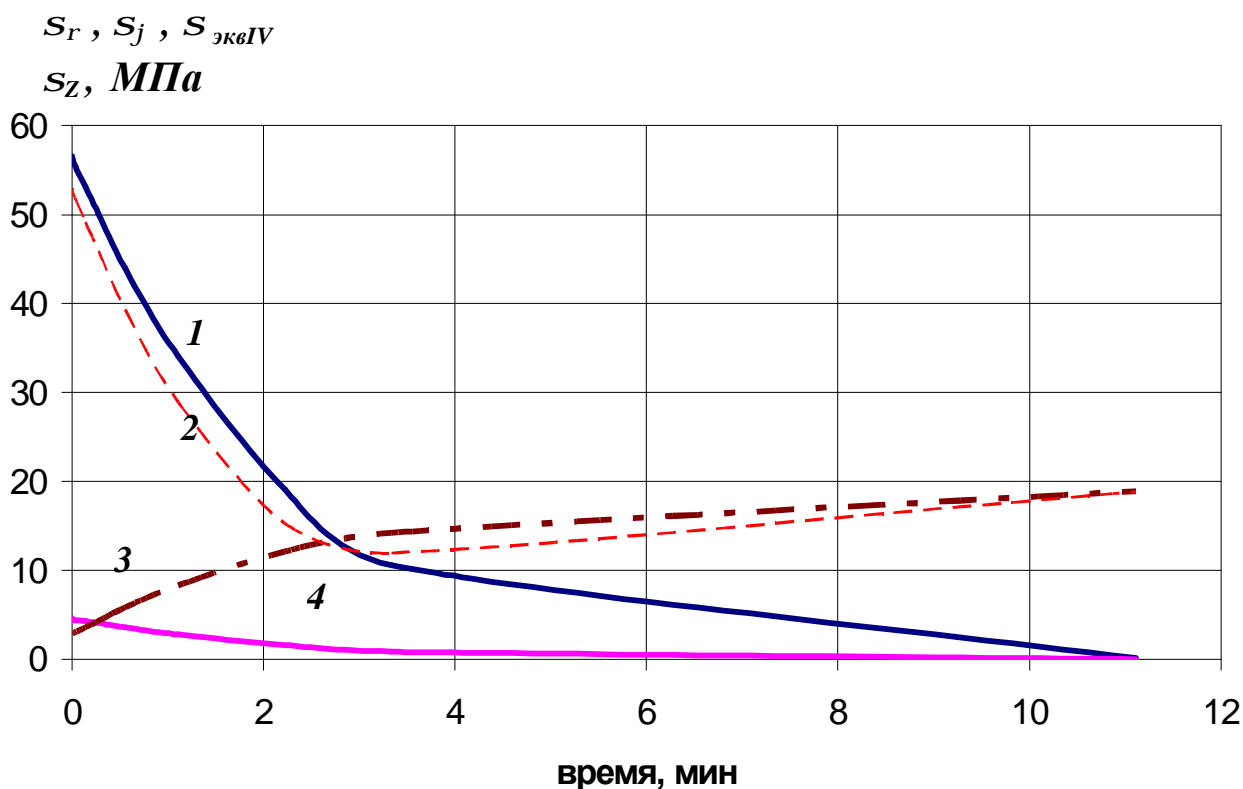


Рис. 1. График изменения термических радиальных  $s_r$  (1), эквивалентных напряжений  $s_{эквIV}$  (2), напряжений создаваемых давлением испаряющегося газа (3) и касательных  $s_j$  напряжений в стенке баллона (4)

### Список литературы

1. Топливный баллон/ Довгялло А. И., Лукачев С. В. и др.// Патент № 2163699, Россия, МПК 7F17C9/02, 99114577//06 заявл. 02.07.1977, опубл. 27.02.2001. Бюл. №6.

2. Т. В. Ашихмина, А. И. Довгялло. Особенности постановки задачи расчета процессов для универсального газового баллона как неклассической двухфазной системы и оценка его температурного состояния // Вестник СГАУ. – 2006. - № 1. - С. 133-137.

3. Цой П. В. Методы расчета задач теп-

ломассопереноса. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.

4. Справочник металлиста, 2 том. - М.: Машгиз, 1958. – 975 с.

5. ГОСТ 949 – 73. Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на  $P \leq 16$  МПа (200 кгс/см<sup>2</sup>). Технические условия.

6. Стрижало В. А., Филин Н. В., Куранов Б. А. Прочность материалов и конструкций при криогенных температурах. – Киев: Наук. Думка, 1988. – 240 с.