

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

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

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.

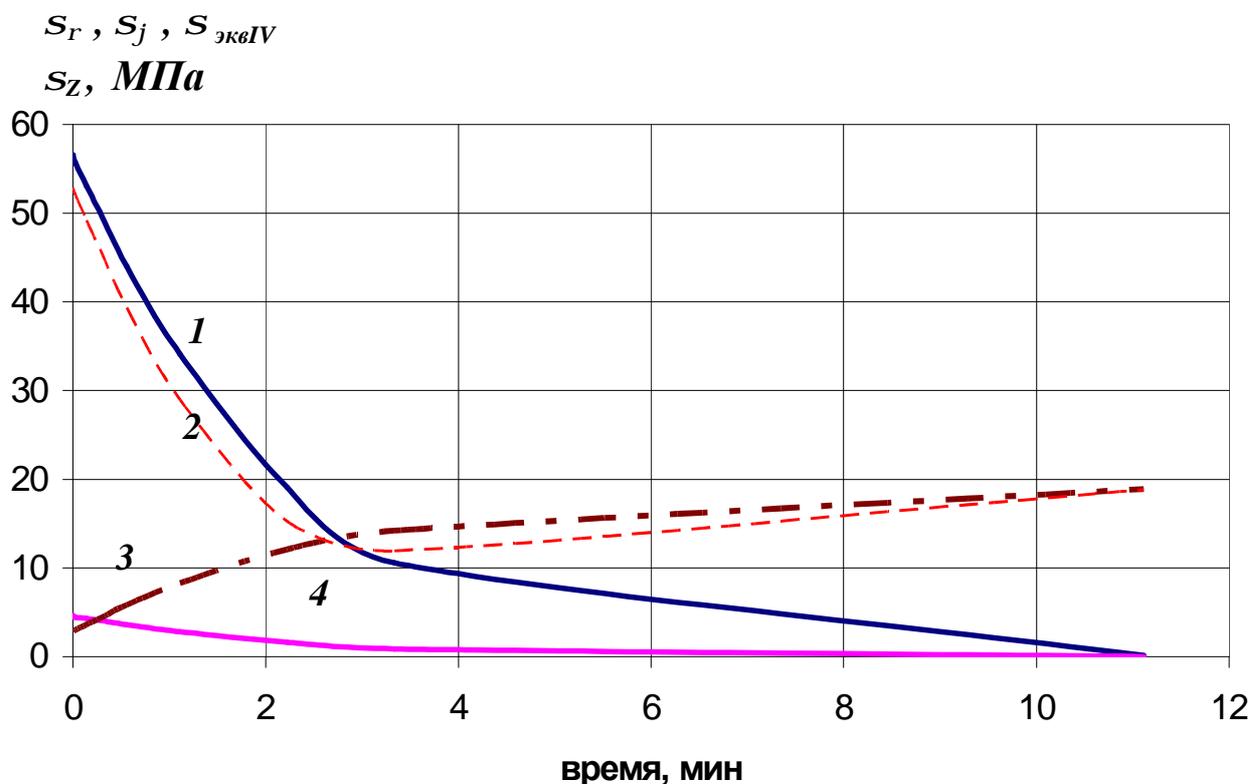


Рис. 1. График изменения термических радиальных  $s_r$  (1), эквивалентных напряжений  $s_{эквIV}$  (2), напряжений создаваемых давлением испаряющегося газа (3) и касательных  $s_j$  напряжений в стенке баллона (4)

### 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 тепломассопереноса. - 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.

## THERMAL CYCLING TOUGHNESS ESTIMATION OF FUEL TANK REFUELED BY CRYOGEN PRODUCT

© 2007 A. I. Dovgyallo, D. A. Uglanov, T. V. Ashihmina

Samara State Aerospace University

In this paper it is described the decision of task of determination tensions in the universal gas tank's wall in terms its interaction with vaporizing cryoagent. In order to decide this task it is used the method of unstationary heat conducting calculation for temperature tensions' investigation. The received data's analyzing allows saying that during gazification process tank wall's temperature tensions are less than tension strength.