

УДК 669.14

К. В. АВРАМОВ¹, О. К. МОРАЧКОВСКИЙ², А. М. ТОНКОНОЖЕНКО³,
В. Ю. КОЖАРИН³, П. Г. ДЕГТЯРЕНКО³

¹ *Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Украина*

² *Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Украина*

³ *Государственное предприятие КБ «Южное», Украина*

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РАЗРУШАЮЩИХ НАГРУЗОК ОРЕБРЕННЫХ БАКОВ РАКЕТОНОСИТЕЛЕЙ

Предложен метод расчета величин внутренних разрушающих статических давлений, действующих на баки ракетноносителей. Основным элементом бака ракетноносителя является цилиндрическая оболочка усиленная внутри стрингерами и шпангоутами. Задача решается в два этапа. На первом этапе рассчитывается напряженно-деформируемое состояние бака. На втором этапе - в самое напряженное место бака устанавливается трещина и определяется коэффициент интенсивности напряжений. Для его расчета численно решается система четырех сингулярных интегральных уравнений. Для расчета напряженно-деформированного состояния бака предлагается использовать полуаналитический метод конечных элементов.

Ключевые слова: *полуаналитический метод конечных элементов, оребренная цилиндрическая оболочка, магистральная трещина, коэффициент интенсивности напряжений.*

Введение и постановка задачи

Баки ракетноносителей имеют двойное назначение. С одной стороны, они заполняются топливом и поэтому должны выдержать начальное статическое внутренне давление создаваемое топливом. С другой стороны, баки являются элементами корпуса ракет и поэтому должны выдерживать разнообразные динамические нагрузки в полете от двигательной установки, порывов ветра, перегрузок в процессе движения ракеты.

Перед установкой бака на ракету с ним проводятся стендовые испытания. Бак нагружается статическим внутренним давлением; в него закачивается вода. Если бак выдерживает номинальное внутреннее давление и не разрушается, то его устанавливают на ракету. Если при испытаниях бак разрушается, то изготавливают новый и еще раз производятся стендовые испытания. Бак чрезвычайно дорогой. Поэтому выбраковка бака дорого обходится КБ «Южному». Перед проведением экспериментальных исследований желательно провести расчет разрушающих нагрузок баков ракетноносителей и выбрать необходимые параметры баков. В этой статье предлагается методика расчета разрушающих нагрузок этих баков.

Как следует из [1], разрушение космических аппаратов происходит вследствие развития дефектов, которые могут быть дислокациями, микротре-

щинами, порами и другими несовершенствами структуры. Эти дефекты не могут быть обнаружены инженерными методами. При эксплуатации конструкции эти дефекты развиваются в трещину. Статья [2] посвящена исследованию разрушения сосудов высокого давления в атомной энергетике. Сосуды исследуются на способность сопротивляться сквозным трещинам. В статье [3] представлены теоретические основы механики разрушения, которые применяются в анализе летательных аппаратов. В [4] для исследования трещиностойкости аэрокосмической технике применяется метод конечных элементов. Математические модели и методы анализа разрушения деформируемых тел представлены в [5, 6]. Математические модели и методы анализа оболочек с магистральными трещинами представлены в монографии [7, 8].

Эскиз несущей цилиндрической оболочки бака ракеты представлен на рис.1. Внутри тонкая цилиндрическая оболочка подкреплена стрингерами и шпангоутами. К торцевым сечениям оболочки крепятся днища баков, которые являются сферическими оболочками. Оболочка находится под действием постоянного внутреннего давления. В этой статье исследуется статическое деформирование конструкции. Оболочка является тонкой, поэтому сдвиги не учитываются. Предполагается, что оболочка работает в области упругости, то есть напряжения и деформации удовлетворяют закону Гука. Перемеще-

ния точек срединной поверхности оболочки малы. Поэтому деформации и перемещения удовлетворяют линейным формулам Коши.

Численный анализ разрушения бака ракетносителя под действием внутреннего давления разделим на две последовательно решаемые задачи.

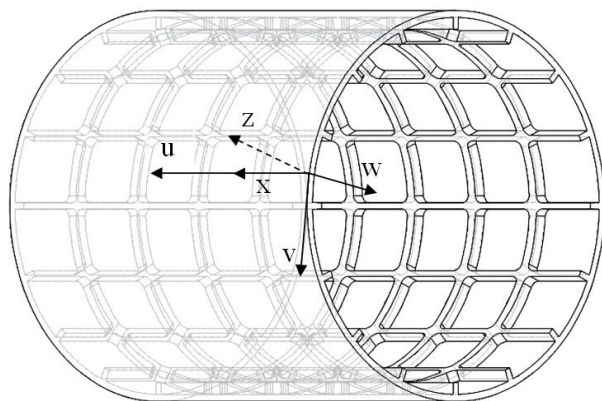


Рис. 1. Эскиз несущей цилиндрической оболочки бака ракеты

1. Расчет напряженно- деформируемого состояния (НДС) бака без трещины под действием заданного внутреннего давления.

2. Анализ НДС конструкции с трещиной, на берегах которой приложены удельные силовые факторы, полученные из первого расчета.

Сначала определяется НДС баков без трещины и рассчитываются удельные силовые факторы в месте расположения трещины. Так как берега трещины свободны от нагрузок, то для компенсации силовых факторов, возникающих в оболочке без трещины, на берегах трещины прикладываются удельные силовые факторы противоположного знака по сравнению с силовыми факторами, которые имеют место в конструкции без трещины [7, 8].

Несущий элемент бака – вафельная цилиндрическая оболочка состоит из ячеек [9]. Для расчета разрушающих нагрузок оболочки, трещина помещается посреди ячейки в продольном направлении. Трещина размещается в продольном направлении, так как это самое опасное направление. Дело в том, что окружные напряжения максимальны. Размеры ячейки значительно больше размеров трещины. Поэтому возмущения в НДС оболочки вследствие трещины затухают не дойдя до участков стрингера или шпангоута, принадлежащих рассматриваемой ячейки. Вследствие этого при расчете конструкции с трещиной стрингеры и шпангоуты не рассматриваются. Их влияние учтено в приложенных к берегам трещины нагрузкам, которые получены из расчета НДС орбренных баков ракетносителей.

Численный подход к анализу разрушения

Поход к расчету НДС орбренных баков подробно рассмотрен в статье [10]. Здесь рассмотрим основные идеи предложенного подхода. Основными неизвестными задачи являются перемещения (u, v, w) срединной поверхности оболочки (рис.1). Эти перемещения представляются в виде ряда Фурье по окружной координате оболочки φ :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0(x) \\ v_0(x) \\ w_0(x) \end{bmatrix} + \sum_{n=1}^{N_G} \begin{bmatrix} u_n^{(c)}(x) \\ v_n^{(c)}(x) \\ w_n^{(c)}(x) \end{bmatrix} \cos n\varphi + \begin{bmatrix} u_n^{(s)}(x) \\ v_n^{(s)}(x) \\ w_n^{(s)}(x) \end{bmatrix} \sin n\varphi, \tag{1}$$

где x – продольная координата оболочки; $u_0(x), v_0(x), \dots, u_1^{(c)}(x), \dots$ – подлежащие расчету функции. Для расчета этих функций применяется метод конечных элементов, что позволит привести континуальную задачу к дискретной. Для этого в продольном направлении разобьем конструкцию на N участков. Концы этих участков являются точками, в которых задаются неизвестные значения функций $u_0(x), v_0(x), \dots, u_1^{(c)}(x), \dots$. Эти точки имеют следующие координаты $x_i; i = \overline{0, N}$. Таким образом, множество непрерывных функций заменяется множеством точечных функций. Значения в дискретных наборах точек объединяются в вектора следующим образом:

$$U_{j-2+i}^{(1)} = \begin{bmatrix} u_{j-2+i}^{(0)} & v_{j-2+i}^{(0)} & w_{j-2+i}^{(0)} & u_{j-2+i}^{(c,v)} \\ u_{j-2+i}^{(s,v)} & v_{j-2+i}^{(c,v)} & v_{j-2+i}^{(s,v)} & w_{j-2+i}^{(c,v)} & w_{j-2+i}^{(s,v)} \end{bmatrix}^T ;$$

$$j = \overline{1, N}; i = 1, 2.$$

На каждом из участков $[x_{j-1}; x_j]$ вводится локальная координата $\xi \in [-1; 1]$. Следуя методу конечных элементов, неизвестные функции из (1) представим, используя полиномы Эрмита так [11]:

$$U_0(x) = \sum_{i=1}^2 \bar{N}_i(\xi) U_{j-2+i}^{(1)} + \sum_{i=1}^2 \bar{N}_i^*(\xi) \Theta_{j-2+i} \cdot 0.5(x_j - x_{j-1}), \quad (2)$$

где $U_0 = [u_0 \ v_0 \ w_0 \ u_v^{(c)} \ u_v^{(s)} \ v_v^{(c)} \ v_v^{(s)} \ w_v^{(c)} \ w_v^{(s)}]^T$;
 $\Theta_{j-2+i} = [\varphi_{j-2+i}^{(0)} \ \psi_{j-2+i}^{(0)} \ \theta_{j-2+i}^{(0)} \ \varphi_{j-2+i}^{(c,v)} \ \varphi_{j-2+i}^{(s,v)} \ \psi_{j-2+i}^{(c,v)} \ \psi_{j-2+i}^{(s,v)} \ \theta_{j-2+i}^{(c,v)} \ \theta_{j-2+i}^{(s,v)}]^T$ – вектор из производных по x от элементов вектора $U_{j-2+i}^{(1)}$. Буквами φ, ψ, θ обозначаются обобщенные углы поворота в узлах конечного элемента. Функции $\bar{N}_i(\xi); \bar{N}_i^*(\xi)$ являются полиномами Эрмита третьего порядка. Все неизвестные задачи объединяются в один вектор глобальных неизвестных задачи:

$$(z_{glob}) = [y_1^{(0)}, y_{2,1}^{(0)}, \dots, y_{2,N_G}^{(0)}; y_{3,1}^{(0)}, \dots, y_{3,N_G}^{(0)}; y_1^{(1)}, y_{2,1}^{(1)}, \dots, y_{2,N_G}^{(1)}; y_{3,1}^{(1)}, \dots, y_{3,N_G}^{(1)}; \dots y_1^{(N)}, y_{2,1}^{(N)}, \dots, y_{2,N_G}^{(N)}; y_{3,1}^{(N)}, \dots, y_{3,N_G}^{(N)}],$$

$$\text{где } y_1^{(j)} = [u_j^{(0)}, \varphi_j^{(0)}, v_j^{(0)}, \psi_j^{(0)}, w_j^{(0)}, \theta_j^{(0)}];$$

$$y_{2,v}^{(j)} = [u_j^{(c,v)}, \varphi_j^{(c,v)}, v_j^{(s,v)}, \psi_j^{(s,v)}, w_j^{(c,v)}, \theta_j^{(c,v)}];$$

$$y_{3,v}^{(j)} = [u_j^{(s,v)}, \varphi_j^{(s,v)}, v_j^{(c,v)}, \psi_j^{(c,v)}, w_j^{(s,v)}, \theta_j^{(s,v)}].$$

Теперь воспользуемся методом Релея и разложения (2) введем в потенциальную энергию. После проведения необходимых интегрирований и расчета производных, получаем разрешающую систему линейных алгебраических уравнений в следующем виде:

$$[K](z_{glob}) = (F), \quad (3)$$

где (F) – глобальный вектор узловых нагрузок.

По результатам решения системы линейных алгебраических уравнений (3) рассчитываем НДС бака. По результатам расчета НДС находим самую нагруженную ячейку оболочки. Посередине этой ячейки в оболочке помещаем магистральную трещину в продольном направлении.

Деформирование оболочки с трещиной опишем теорией пологих оболочек. Тогда воспользуемся системой уравнений в частных производных отно-

сительно поперечного перемещения w и функции напряжения φ :

$$\Delta \Delta \varphi + \frac{E h l^2}{R} \frac{\partial^2}{\partial y^2} w = 0; \quad \Delta \Delta w - \frac{l^2}{R D} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \varphi = 0, \quad (4)$$

где E – модуль Юнга; h – толщина оболочки; $R = \min(R_1, R_2)$; R_1, R_2 – главные кривизны срединной поверхности оболочки; D – цилиндрическая жесткость оболочки; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$; $y = \varphi R$.

Как отмечалось выше, в месте оболочки, где размещается трещина, предварительно рассчитывается НДС и удельные силовые факторы. Найденные удельные силовые факторы обозначим так:

$$T_y(\tilde{x}, \tilde{y}), T_x(\tilde{x}, \tilde{y}), S(\tilde{x}, \tilde{y}), G_y(\tilde{x}, \tilde{y}), G_x(\tilde{x}, \tilde{y}), Q_y(\tilde{x}, \tilde{y}), Q_x(\tilde{x}, \tilde{y}),$$

где (\tilde{x}, \tilde{y}) – координаты центральной точки разреза (трещины); T_x, T_y – удельные продольные усилия вдоль осей x и y ; S – удельные сдвигающие усилия; G_y, G_x – удельные изгибающие моменты; Q_y, Q_x – удельные поперечные силы. Граничные условия на верхней и нижней сторонах трещины представим так:

$$T_y^+(x, 0) = T_y^-(x, 0) = f_1;$$

$$S^+(x, 0) = S^-(x, 0) = f_2;$$

$$G_y^+(x, 0) = G_y^-(x, 0) = f_3;$$

$$Q_y^+(x, 0) = Q_y^-(x, 0) = f_4; \quad (5)$$

$$y = 0; |x| \leq 1,$$

где знаки плюс и минус обозначают, что граничное условие принадлежит верхней и нижней сторонам трещины (рис. 2), соответственно; f_1, \dots, f_4 – некоторые числа. Граничные условия записаны для трещины единичной длины.

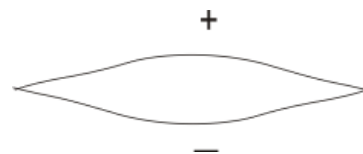


Рис. 2. Эскиз трещины в оболочке

В этой статье рассматривается хрупкое разрушение оболочки с трещиной. Исследование сводится к определению коэффициента интенсивности напряжения. Зная коэффициент интенсивности напряжений, легко находится НДС в окрестности трещины и параметры начала разрушения конструкции. Для расчета коэффициента интенсивности напряжений система дифференциальных уравнений (4) с граничными условиями (5) сводится к следующей системе четырех сингулярных интегральных уравнений [7]:

$$\sum_{k=1}^4 \int_{-1}^1 \psi'_k(t) K_{jk}(t-x) dt = \pi F'_j(x) + C \delta_{4j}; \quad (6)$$

$$j = 1, \dots, 4,$$

где $c_1 = c_2 = \frac{1}{l^2 \delta}$; $c_3 = \frac{D}{l^2}$; $c_4 = \frac{D}{l^3}$; $\delta = \frac{\sqrt{12(1-\nu^2)}}{Eh^2}$;

$$F'_j(x) = \frac{f_j}{c_j}; j = \overline{1, 3}; F'_4(x) = \frac{f_4}{c_4} x;$$

δ_{4j} – символ Кронекера;

C – константа интегрирования;

$\psi'_k(t)$ – подлежащие расчету неизвестные функции; $K_{jk}(t-x)$ – ядра системы сингулярных уравнений. Представление этих ядер через несобственные интегралы и в специальных функциях опубликовано в монографии [7]. Ядра представим в следующем виде:

$$K_{jk}(x) = \frac{\tilde{a}_j}{x} \delta_{jk} + \lambda k_{jk}(\lambda, x), \quad (7)$$

где $\tilde{a}_1 = -\tilde{a}_2 = -\frac{1}{2}$; $\tilde{a}_3 = \tilde{a}_4 = \frac{(1-\nu)(3+\nu)}{2}$. Из этого представления следует, что ядра с номерами $j = k$ являются сингулярными. Остальные ядра этим свойством не обладают. К системе сингулярных уравнений (6) применим замену переменных:

$$\psi'_j(x) = \frac{\varphi_j(x)}{\sqrt{1-x^2}}. \quad (8)$$

Замену переменных (8) и соотношения (7) введем в систему сингулярных интегральных уравнений (6). В результате получим следующую систему интегральных уравнений:

$$\tilde{a}_j \int_{-1}^1 \frac{\varphi_j(t) dt}{\sqrt{1-t^2}(t-x)} + \lambda \sum_{k=1}^4 \int_{-1}^1 \frac{\varphi_k(t)}{\sqrt{1-t^2}} k_{jk}[\lambda(t-x)] dt = \pi F'_j(x) + C \delta_{4j}; j = 1, \dots, 4. \quad (9)$$

Как следует из [7], некоторые из ядер $k_{jk}[\lambda(t-x)]$ нулевые. Поэтому система сингулярных интегральных уравнений (9) распадается на две независимые системы сингулярных интегральных уравнений. В первой, в качестве неизвестных выступают функции $\varphi_1(t)$ и $\varphi_3(t)$, а во второй системе, неизвестными являются $\varphi_2(t), \varphi_4(t), C$. Первая система описывает симметричную деформацию оболочки около трещины, а вторая система – анти-симметричную деформацию оболочки около трещины.

Из свойств решений сингулярных интегральных уравнений следует, что выполняются следующие соотношения:

$$\int_{-1}^1 \frac{\varphi_j(t)}{\sqrt{1-t^2}} dt = 0; j = \overline{1, 4}. \quad (10)$$

В монографии [7] показано, что выполняется еще одно дополнительное уравнение:

$$\int_{-1}^1 \frac{t \varphi_4(t)}{\sqrt{1-t^2}} dt = 0. \quad (11)$$

Теперь построим дискретный аналог системы сингулярных интегральных уравнений, который является системой линейных алгебраических уравнений. Для этого воспользуемся следующими квадратурными формулами [7]:

$$\int_{-1}^1 \frac{u(t) dt}{\sqrt{1-t^2}(t-\bar{x}_r)} = \sum_{m=1}^M \frac{\pi u(t_m)}{M(t_m-\bar{x}_r)};$$

$$\int_{-1}^1 \frac{u(t) dt}{\sqrt{1-t^2}} = \sum_{m=1}^M \frac{\pi}{M} u(t_m), \quad (12)$$

где $\bar{x}_r = \cos\left(\frac{\pi r}{M}\right)$; $r = 1, \dots, M-1$;

$$t_m = \cos\left(\frac{2m-1}{2M} \pi\right); m = 1, \dots, M.$$

Применим квадратурные формулы (12) к системе сингулярных интегральных уравнений (9) и ограничениям (10), (11). Тогда симметричная де-

формация оболочки описывается следующей системой линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \frac{\varphi_1(t_m)}{t_m - \bar{x}_r} + \lambda \sum_{m=1}^M \varphi_1(t_m) k_{11} [\lambda(t_m - \bar{x}_r)] + \\
 & + \lambda \sum_{m=1}^M \varphi_3(t_m) k_{13} [\lambda(t_m - \bar{x}_r)] = \frac{M}{c_1} f_1; \\
 & \frac{(1-\nu)(3+\nu)}{2} \sum_{m=1}^M \frac{\varphi_3(t_m)}{t_m - \bar{x}_r} + \\
 & + \lambda \sum_{m=1}^M \varphi_1(t_m) k_{31} [\lambda(t_m - \bar{x}_r)] + \\
 & + \lambda \sum_{m=1}^M \varphi_3(t_m) k_{33} [\lambda(t_m - \bar{x}_r)] = \frac{M}{c_1} f_3; \\
 & r = 1, \dots, M-1. \\
 & \sum_{m=1}^M \varphi_j(t_m) = 0; j = 1, 3.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Антисимметричная деформация оболочки около трещины описывается следующей системой линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \frac{\varphi_2(t_m)}{t_m - \bar{x}_r} + \lambda \sum_{m=1}^M \varphi_2(t_m) k_{22}(t_m - \bar{x}_r) + \\
 & + \lambda \sum_{m=1}^M \varphi_4(t_m) k_{24}(t_m - \bar{x}_r) = \frac{M}{c_2} f_2; \\
 & r = 1, \dots, M-1.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{(1-\nu)(3+\nu)}{2} \sum_{m=1}^M \frac{\varphi_4(t_m)}{t_m - \bar{x}_r} + \\
 & + \lambda \sum_{m=1}^M \varphi_2(t_m) k_{42}(t_m - \bar{x}_r) + \\
 & + \lambda \sum_{m=1}^M \varphi_4(t_m) k_{44}(t_m - \bar{x}_r) - C = \frac{M}{c_4} f_4 \bar{x}_r; \\
 & \sum_{m=1}^M \varphi_j(t_m) = 0; j = 2, 4. \\
 & \sum_{m=1}^M t_m \varphi_4(t_m) = 0.
 \end{aligned}$$

В результате решения систем линейных алгебраических уравнений получаем неизвестные системы (9) в виде точечных функций:

$$[\varphi_1(t_1), \dots, \varphi_1(t_M), \varphi_2(t_1), \dots, \varphi_2(t_M), \varphi_3(t_1), \dots, \varphi_3(t_M), \varphi_4(t_1), \dots, \varphi_4(t_M)].
 \tag{15}$$

На основании решений (15) определяется коэффициент интенсивности напряжений. Для этого используются такие соотношения:

$$K_j = -\tilde{a}_j b_j c_j \sqrt{l} \varphi_j(t_1); j = 1, 4,
 \tag{16}$$

где $b_1 = b_2 = b_3 = 1; b_4 = 1$.

Для расчета разрушающих нагрузок используется силовой критерий Дж. Р. Ирвина [5].

Численный анализ коэффициентов интенсивности напряжений

Для конечно элементного расчета НДС баков ракетополетчиков был разработан пакет программ в среде Borland Delphi 6. Результаты расчетов НДС баков ракетополетчиков опубликованы в других наших статьях. Поэтому эти результаты здесь не обсуждаются. Рассмотрим цилиндрическую оболочку радиусом $R = 1\text{ м}$ и толщиной $h = 0,01\text{ м}$. Коэффициент Пуассона и модуль Юнга для этой оболочки таковы: $\nu = 0,3; E = 2,1 \cdot 10^{11}\text{ Па}$. На краях трещины действуют удельные силовые факторы: $T_y = -2 \cdot 10^6\text{ Па} \cdot \text{м}; G_y = Q_y = 0$. Длина трещины принималась следующей: $l = 0,01\text{ м}$.

В работе [7] представлены асимптотические формулы для коэффициентов интенсивности напряжений рассматриваемой оболочки:

$$\begin{aligned}
 K_1 = -T_y \sqrt{l} & \left\{ 1 + \frac{5\pi}{64} \lambda^2 + \frac{\lambda^4}{40960} \left\{ 250\pi^2 + 2361 + \right. \right. \\
 & + 20 \left[189 + \frac{2(1+5\nu)(17+133\nu)}{3(1-\nu)(3+\nu)} \right] \ln \frac{\lambda \gamma_0}{8} + \\
 & \left. \left. + \frac{20(7+59\nu)(5+37\nu)}{9(1-\nu)(3+\nu)} + \frac{160(1+5\nu)^2}{(1-\nu)(3+\nu)} \ln^2 \frac{\lambda \gamma_0}{8} \right\} \right\} + \\
 & + O(\lambda^6 \ln \lambda), \dots,
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

где $\ln \gamma_0 = 0,5772$ – постоянная Эйлера.

Для численного решения этой задачи была создана программа в среде Maple, которая рассчитывала коэффициент интенсивности напряжений. Результаты расчета коэффициента интенсивности напряжений для симметричного деформирования оболочки представлены в таблице 1. Здесь длины трещин представлены в первом столбце таблицы. Во втором столбце представлены числа точек дискретизации неизвестных системы сингулярных интегральных уравнений. В третьем и четвертом столб-

цах приводятся расчетные значения коэффициента интенсивности напряжения $K_1^{(расч)}$ и значение коэффициента интенсивности напряжения, полученного по асимптотической формуле (17) $K_1^{(асymp)}$.

Таблица 1

Результаты расчета коэффициента интенсивности напряжения для симметричного деформирования оболочки

l	M	$K_1^{(расч)}$	$K_1^{(асymp)}$	δ
0,01	20	$2,65 \cdot 10^5$	$2,02 \cdot 10^5$	0,24
0,01	25	$3,45 \cdot 10^5$		
0,002	20	$1,10 \cdot 10^5$	$8,95 \cdot 10^4$	0,23

В последнем столбце представлена относительная разница результатов, которая определяется по следующему соотношению:

$$\delta = \left| \frac{K_1^{(расч)} - K_1^{(асymp)}}{K_1^{(расч)}} \right|.$$

Итак, результаты, полученные двумя различными методами, близки.

Заключение

В статье предложен общий подход к расчету разрушения баков ракетоносителей. В основу этого подхода положено сочетание метода конечных элементов с элементами механики разрушения. Напряженно- деформируемое состояние баков представлялось в виде рядов Фурье по окружной координате цилиндрической оболочки. В продольном направлении неизвестные функции дискретизируются с помощью конечных элементов. Для расчета напряженно- деформируемого состояния около трещины находятся коэффициенты интенсивности напряжений. Они определяются из расчета системы сингулярных интегральных уравнений.

Литература

1. Бабель, Г. В. Проектирование, контроль качества и испытание нагружаемых давлением конструкций космических аппаратов [Текст] / Г. В. Бабель, Р. Х. Кристенсен, Г. Х. Диксон // Тонкостенные оболочечные конструкции. – М., 1980. – С. 234–260.

2. Проблемы разрушения крупных стальных сосудов давления [Текст] / Б. Эдмондсон, К. Формби, Р. Юркевич, М. Стег // Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению. – М., 1972. – С. 12–30.

3. Huang, N. C. Fracture mechanics of plates and shells applied to fail-safe analysis of fuselage. Part I: Theory [Text] / N. C. Huang, Y. C. Li, S. G. Russel // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 1997. – Vol. 32, № 27. – P. 221–236.

4. Huang, N. C. Fracture mechanics of plates and shells applied to fail-safe analysis of fuselage. Part II: Computational results [Text] / N. C. Huang, Y. C. Li, S. G. Russel // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 1997. – Vol. 32, № 27. – P. 237-253.

5. Пестриков, В. М. Механика разрушения. Курс лекций [Текст] / В. М. Пестриков, Е. М. Морозов. – СПб.: Издательство профессия, 2012. – 578 с.

6. Черепанов, Г. И. Механика хрупкого разрушения [Текст]: моногр. / Г. И. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 976 с.

7. Панасюк, В. В. Распространение напряжений около трещины в пластинках и оболочках [Текст]: моногр. / В. В. Панасюк, М. П. Савчук, А. П. Дацьшин. – Киев: Наукова думка, 1976. – 700 с.

8. Осадчук, В. А. Напряженно- деформированное состояние и предельное равновесие оболочек с разрезами [Текст]: моногр. / В. А. Осадчук. – Киев: Наукова думка, 1985. – 224 с.

9. Лизин, В. И. Проектирование тонкостенных конструкций [Текст]: моногр. / В. И. Лизин, В. А. Пяткин. – М.: Машиностроение, 1976. – 357 с.

10. Полуаналитический метод конечных элементов для расчета напряженно- деформируемого состояния цилиндрических оболочек с продольными ребрами [Текст] / К. В. Аврамов, О. К. Морачковский, А. М. Тонконоженко, В. Ю. Кожарин, Р. Кочуров // Проблемы машиностроения. – 2014. – Т. 17, № 1. – С. 34-43.

11. Рикардс, Р. Б. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин [Текст]: моногр. / Р. Б. Рикардс. – Рига: Зинатне, 1988. – 467 с.

12. Важов, А. Я. Учет реализации продукции [Текст] / А. Я. Важов // Основы бухгалтерского учета / М. Я. Штейнман, В. В. Данев, А. Я. Важов. – М., 1966. – Гл. 14. – С. 2111 – 2113.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. отделом нестационарных механических процессов Ю. С. Воробьев, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ РУЙНІВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ОБРЕБРЕНИХ БАКІВ РАКЕТОНОСІЇВ

К. В. Аврамов, О. К. Морачковський, А. М. Тонконоженко, В. Ю. Кожарін, П. Г. Дегтяренко

Запропоновано метод розрахунку величини внутрішнього руйнівного статичного тиску, що діє на баки ракетоносіїв. Основним елементом бака ракетоносія є циліндрична оболонка посилена зсередини стрингерами і шпангоутами. Задача вирішується в два етапи. На першому етапі розраховується напружено-деформований стан бака. На другому етапі- в саме напружене місце бака встановлюється тріщина і визначається коефіцієнт інтенсивності напруження. Для його розрахунку чисельно вирішується система чотирьох сингулярних інтегральних рівнянь. Для розрахунку напружено-деформованого стану бака пропонується використовувати напіваналітичний метод скінченних елементів.

Ключові слова: напіваналітичний метод скінченних елементів, обребрена циліндрична оболонка, магістральна тріщина, коефіцієнт інтенсивності напруження.

NUMERICAL ANALYSIS OF ROCKETS TANKS BREAKING LOADS

K. V. Avramov, O. K. Morachkovski, A. M. Tonkonogenko, V. Yu. Kogarin, P. G. Degtyarenko

The method for calculations of internal breaking loads acting on the rockets tanks is suggested. The cylindrical shell reinforced on the inside by the stringers and the frames is the main element of the rockets tanks. The problem is solved in two stages. The deflected mode of the tank is calculated on the first stage. On the second stage, a crack is placed on the most stressed point of the tank and the stress intensity factor is calculated. The system of four singular integral equations is solved numerically to calculate the stress intensity factor. The semi-analytical finite element method is used to calculate the deflected mode.

Key words: semi-analytical finite element method, ribbed cylindrical shell, crack, stress intensity factor.

Аврамов Константин Витальевич – д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: kvavramov@mail.ru.

Морачковский Олег Константинович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Теоретическая механика”, Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, Украина.

Тонконоженко Анатолий Мстиславович – ведущий специалист ГП КБ «Южное», Днепропетровск, Украина.

Кожарин Василий Юрбевич – инженер- программист ГП КБ «Южное», Днепропетровск, Украина.

Дегтяренко Павел Глебович – Главный конструктор ГП КБ «Южное», Днепропетровск, Украина.