

## Напряженно-деформированное состояние заряда РДТТ, скрепленного с ортотропным корпусом

© В.П. Печников

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Исследовано совместное деформирование корпуса и скрепленного с ним заряда твердотопливного ракетного двигателя при воздействии внутреннего давления и изменении температуры. Цилиндрический корпус двигателя рассмотрен как ортотропная безмоментная оболочка. Твердотопливный заряд выполнен из линейно-упругого изотропного материала и представляет собой толстостенную трубу. Определено напряженно-деформированное состояние системы оболочка корпуса — заряд в условиях их совместного деформирования в окружном и осевом направлениях. Представлено аналитическое решение, целью которого является нахождение контактного давления в месте скрепления корпуса и заряда с последующим определением напряжений и деформаций в подобной конструкции. Приведены примеры расчетов. Показано, что изменение жесткостных характеристик оболочки в продольном направлении может привести к заметному изменению характера деформирования этой системы. По этой причине точный учет жесткостных характеристик является необходимым условием получения надежных результатов оценки прочности конструкции как при силовом, так и при температурном воздействии.*

**Ключевые слова:** *твердотопливный заряд, ортотропная безмоментная оболочка, внутреннее давление, температура, напряженно-деформированное состояние, коэффициент линейного расширения, контактное давление.*

Расчет на прочность и жесткость корпуса и заряда является обязательным при проектировании современных ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) [1–3]. Среди рассматриваемых расчетных задач особое место занимают случай нагружения двигателя внутренним давлением в момент запуска, а также изменение температурного режима при его изготовлении и эксплуатации.

Обычно эту задачу решают в следующей постановке. Заряд рассматривают как толстостенную трубу, заключенную в абсолютно жесткую [4] или упругую [5, 6] обечайки. Топливный заряд представляют как линейно-упругое тело, выполненное из изотропного материала. Подобный подход оправдан при воздействии относительно кратковременных силовых и температурных нагрузок. Обечайку корпуса рассматривают как длинную оболочку в одномерном напряженно-деформированном состоянии. В отличие от вышеупомянутых работ в работе [7] учитывают двумерный характер напряженно-деформированного состояния системы заряд — оболочка. Задачу решают в перемещениях. Для интегрирования разрешающего уравнения задают приближенный закон изменения осевых напряжений по радиусу заряда.

Целью данной работы является дальнейшее исследование влияния двумерного характера совместной работы обечайки и заряда на напряженно-деформированное состояние составляющих конструкции РДТТ при воздействии силовых и температурных нагрузок.

Исследования напряженно-деформированного состояния заряда, скрепленного с оболочкой корпуса РДТТ, показывают, что при нагружении внутренним давлением наиболее опасной с позиции прочности и жесткости является его средняя часть, длина которой в 2,5–3 раза превосходит толщину свода. В этом случае можно не учитывать влияние днищ на напряженно-деформированное состояние средней части.

Рассмотрим заряд, который выполнен в виде длинного полого толстостенного цилиндра, скрепленного по внешней поверхности с оболочкой корпуса. Торцы заряда скреплены с днищами произвольной формы, передающими на корпус только растягивающие или сжимающие силы (рис. 1). Корпус РДТТ представляет собой тонкую ортотропную оболочку, напряжения и перемещения в которой определяют с помощью безмоментной теории.

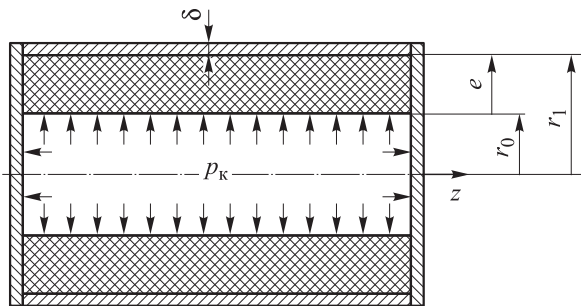


Рис. 1. Расчетная схема РДТТ

При запуске и во время работы РДТТ на внутреннюю поверхность заряда действует давление, которое распределяется между зарядом и корпусом пропорционально отношению их жесткостей, равных произведению модуля упругости на характерный размер соответствующего материала:

$$\frac{E_k \delta}{E e},$$

где  $E_k$ ,  $E$  — модуль упругости материала корпуса и заряда твердого топлива соответственно;  $\delta$ ,  $e$  — толщина стенки корпуса двигателя и свода топливного заряда соответственно.

Поскольку жесткость заряда значительно меньше, чем корпуса ( $E \ll E_k$ ), корпус препятствует растяжению заряда. По этой причине возникает контактное давление, которое сжимает заряд по наружной

поверхности и растягивает корпус изнутри в радиальном направлении. Сжатие заряда приводит к его растяжению в осевом направлении, чему препятствуют днища, поэтому и в осевом направлении заряд сжат, а корпус растянут (рис. 2).

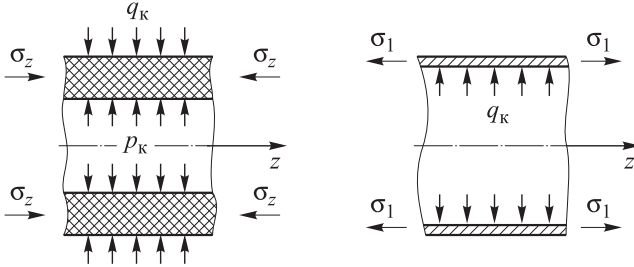


Рис 2. Напряжения в заряде и оболочке корпуса при действии внутреннего давления

В заряде, скрепленном с корпусом РДТТ, возникает напряженное состояние, определяемое в общем случае шестью напряжениями ( $\sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_z, \tau_{r\varphi}, \tau_{\varphi z}, \tau_{zr}$ ) и соответствующими им деформациями. Здесь  $\varphi, r$  и  $z$  — окружная, радиальная и осевая координаты. Вследствие осевой симметрии задачи касательные напряжения  $\tau_{r\varphi}, \tau_{\varphi z}$  и деформации  $\gamma_{r\varphi}, \gamma_{\varphi z}$  равны нулю. Касательные напряжения  $\tau_{zr}$  заметно увеличиваются ближе к торцам, но уменьшаются до нуля у РДТТ с достаточно большой относительной длиной [7], поэтому их также принимают равными нулю.

Таким образом, имеет место напряженное состояние элемента заряда, представленное на рис. 3. Из условия равновесия действующих на гранях элемента нормальных напряжений в проекции на ось  $r$

$$(r\sigma_r)' - \sigma_\varphi = 0. \quad (1)$$

Окружная и радиальная деформации соответственно

$$\varepsilon_\varphi = \frac{w}{r}; \quad \varepsilon_r = \frac{dw}{dr}, \quad (2)$$

где  $w$  — радиальное перемещение.

Исключив из выражений (2) радиальное перемещение  $w$ , получим условие совместности деформаций

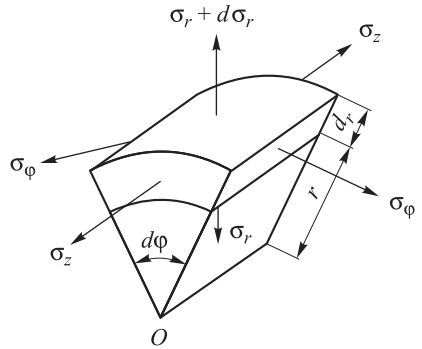


Рис 3. Напряженное состояние элемента заряда

$$(r\varepsilon_\varphi)' - \varepsilon_r = 0. \quad (3)$$

Материал трубы считаем работающим упруго. В этом случае справедливы формулы закона Гука. С учетом температуры выражения закона Гука для заряда имеют вид

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_z + \sigma_\varphi)] + \alpha(T - T_0); \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{1}{E} [\sigma_\varphi - \mu(\sigma_z + \sigma_r)] + \alpha(T - T_0); \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_\varphi)] + \alpha(T - T_0). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения заряда;  $T, T_0$  — температура заряда в определенный момент времени и начальная равновесная температура оболочки и заряда соответственно. Равновесная температура  $T_0$  соответствует отсутствию напряжений в заряде в окрестностях контакта его с корпусом.

В момент запуска РДТТ считаем, что температурные деформации отсутствуют. Исключив из формул (4) осевое напряжение  $\sigma_z$ , находим

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1-\mu^2}{E} \left[ \sigma_r - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_\varphi \right] - \mu\varepsilon_z; \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{1-\mu^2}{E} \left[ \sigma_\varphi - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_r \right] - \mu\varepsilon_z. \end{aligned} \quad (5)$$

Введем функцию напряжений  $F$  согласно выражениям

$$\sigma_r = \frac{1}{r} F; \quad \sigma_\varphi = \frac{dF}{dr}.$$

При таком выборе функции напряжений уравнение равновесия (1) удовлетворяется, а из условия совместности деформаций (3) получаем разрешающее уравнение

$$F'' + \frac{1}{r} F' - \frac{1}{r^2} F = 0,$$

решение которого имеет вид

$$F = C_1 r + C_2 r^{-1},$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — постоянные интегрирования.

Тогда формулы для определения напряжений будут следующими:

$$\sigma_r = C_1 + \frac{C_2}{r^2}; \quad \sigma_\varphi = C_1 - \frac{C_2}{r^2}. \quad (6)$$

Для вычисления постоянных  $C_1$  и  $C_2$  должны быть заданы два граничных условия на внутренней ( $r = r_0$ ) и внешней ( $r = r_1$ ) поверхностях трубы. Радиальная и окружная деформация (см. формулы (5)) после подстановки выражений (6) примет вид

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{1-\mu^2}{E} \left[ C_1(1-2\mu) + \frac{C_2}{r^2} \right] - \mu\varepsilon_z; \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{1-\mu^2}{E} \left[ C_1(1-2\mu) + \frac{C_2}{r^2} \right] - \mu\varepsilon_z.\end{aligned}\quad (7)$$

Следует отметить, что напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_\varphi$  в формулах (6) не зависят от осевого удлинения  $\varepsilon_z$ , а определяются только условиями на внутренней и наружной поверхностях трубы. В формулы (7) осевая деформация  $\varepsilon_z$  входит, поэтому для ее определения, а значит и для вычисления  $\sigma_z$ , должно быть задано еще одно дополнительное условие.

Осевое напряжение  $\sigma_z$  можно найти, используя третью формулу закона Гука (4) и выражения (6):

$$\sigma_z = E\varepsilon_z + \mu(\sigma_r + \sigma_\varphi) = E\varepsilon_z + 2\mu C_1. \quad (8)$$

Указанное решение справедливо для трубы конечной длины, если при нагружении все ее поперечные сечения остаются плоскими, т. е. им можно пользоваться для определения напряжений и деформаций в средней части достаточно длинной трубы.

Запишем граничные условия на внутреннем  $r_0$  и внешнем  $r_1$  радиусе заряда:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -p_k \text{ при } r = r_0; \\ \sigma_r &= -q_k \text{ при } r = r_1.\end{aligned}$$

где  $p_k$  — давление в камере сгорания двигателя;  $q_k$  — контактное давление между внутренней поверхностью оболочки корпуса и зарядом.

Удовлетворяя граничным условиям, из выражений (6) и (8) получаем радиальное, окружное и осевое напряжения:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{1}{1-m^2} \left[ (p_k m^2 - q_k) + (q_k - p_k) \frac{r_0^2}{r^2} \right]; \\ \sigma_\varphi &= \frac{1}{1-m^2} \left[ (p_k m^2 - q_k) - (q_k - p_k) \frac{r_0^2}{r^2} \right]; \\ \sigma_z &= E\varepsilon_z + 2\mu \frac{p_k m^2 - q_k}{1-m^2},\end{aligned}\quad (9)$$

где  $m = r_0/r_1$ .

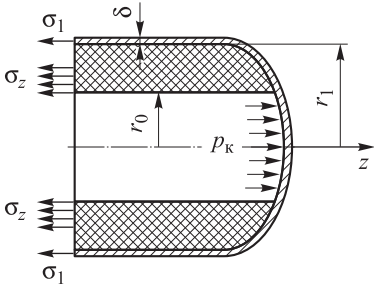
Выражения (7) для радиальной и окружной деформации принимают вид

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{1+\mu}{E(1-m^2)} \left[ (1-2\mu)(p_k m^2 - q_k) + (q_k - p_k) \frac{r_0^2}{r^2} \right] - \mu \varepsilon_z; \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{1+\mu}{E(1-m^2)} \left[ (1-2\mu)(p_k m^2 - q_k) - (q_k - p_k) \frac{r_0^2}{r^2} \right] - \mu \varepsilon_z.\end{aligned}\quad (10)$$

Оболочка корпуса выполнена методом намотки. Считается, что композиционный материал обладает ортотропными механическими характеристиками, которые можно определить [8–10]. Закон Гука для такой оболочки с учетом температурных деформаций имеет вид

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{E_1} [\sigma_1 - \mu_1 \sigma_2] + \alpha_1 (T - T_0); \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E_2} [\sigma_2 - \mu_2 \sigma_1] + \alpha_2 (T - T_0),\end{aligned}\quad (11)$$

где  $\varepsilon_1, \sigma_1, \varepsilon_2, \sigma_2$  — деформации и напряжения вдоль образующей оболочки (индекс «1») и в ее окружном направлении (индекс «2»);  $E_1, \mu_1, E_2, \mu_2$  — соответствующие модули упругости и коэффициент Пуассона материала оболочки;  $\alpha_1, \alpha_2$  — коэффициенты линейного расширения ортотропной оболочки в осевом и окружном направлении соответственно.



**Рис. 4.** Напряжения в заряде и оболочке в отсеченной части двигателя при действии внутреннего давления

Оболочка находится под действием внутреннего контактного давления  $q_k$  со стороны заряда и осевых сил. Температурные деформации, как и раньше, не учитываем. Окружное напряжение имеет вид

$$\sigma_2 = \frac{q_k r_1}{\delta}, \quad (12)$$

а осевое напряжение находим из условий равновесия отсеченной части оболочки и заряда (рис. 4):

$$\sigma_1 = \frac{p_k r_0^2 - \sigma_2 (r_1^2 - r_0^2)}{2\delta r_1}. \quad (13)$$

На границе оболочки и заряда при  $r = r_1$  выполняются условия совместности осевой и окружной деформаций:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_1; \quad \varepsilon_\varphi = \varepsilon_2.$$

Используя уравнения закона Гука (11) для оболочки и (7) — для заряда, из условий совместности деформаций находим два уравнения для определения контактного давления  $q_k$  и осевой деформации  $\varepsilon_z$ :

$$\begin{aligned}\varepsilon_z &= \frac{1}{E_1} [\sigma_1 - \mu_1 \sigma_2]; \\ \frac{1}{E_2} [\sigma_2 - \mu_2 \sigma_1] &= \frac{1}{E} [\sigma_\varphi - \mu(\sigma_z + \sigma_r)].\end{aligned}\quad (14)$$

Подставляя в эти уравнения выражения (12), (13) для напряжений оболочки и (9) — для заряда при  $r = r_1$ , получаем систему уравнений для вычисления контактного давления  $q_k$  и осевой деформации  $\varepsilon_z$ . В результате решения системы уравнений находим

$$\bar{q}_k = m^2 \frac{A_1 + A_2 + A_3}{B_1 + B_2 + B_3}.\quad (15)$$

Здесь

$$\begin{aligned}\bar{q}_k &= \frac{q_k}{p_k}; \\ A_1 &= \bar{E}_1 \bar{E}_2 2(1 - \mu^2); \\ \bar{E}_1 &= \frac{2\delta E_1}{E r_1 (1 - m^2)}, \quad \bar{E}_2 = \frac{2\delta E_2}{E r_1 (1 - m^2)}; \\ A_2 &= \bar{E}_1 \mu_2 (1 - 2\mu) + \bar{E}_2 [2(1 - \mu^2) + \mu(1 - 2\mu)]; \\ A_3 &= 2\mu_2 (1 - 2\mu); \\ B_1 &= \bar{E}_1 \bar{E}_2 [(1 - \mu - 2\mu^2) + m^2(1 + \mu)]; \\ B_2 &= 2\bar{E}_1 (1 - \mu\mu_2) + \bar{E}_2 [1 - \mu - 2\mu\mu_1 + m^2(1 + \mu)]; \\ B_3 &= 2(1 - \mu_1\mu_2).\end{aligned}$$

Осевая деформация

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E(E_1 + 1)(1 - m^2)} [m^2(1 - 2\mu) + 2\bar{q}(\mu - \mu_1)].\quad (16)$$

Таким образом, зная контактное давление и осевую деформацию (см. выражении (15) и (16)), можно по формулам (9), (12) и (13) вы-

числить напряжение в заряде и оболочке. Радиальную и окружную деформации заряда можно определить, используя выражения (10) или непосредственно формулы (4). Считая напряжения в оболочке известными, осевую и окружную деформации оболочки можно найти из выражений (11).

Для оценки влияния жесткостных характеристик на напряжения и деформации были проведены расчеты, в результате которых определены деформации и напряжения, появляющиеся в момент запуска РДТТ в заряде и корпусе. Исходные данные для расчетов следующие: давление в двигателе  $p_k = 8$  МПа; внутренний и наружный радиусы заряда  $r_0 = 0,2$  м и  $r_1 = 0,8$  м; толщина оболочки  $\delta = 0,012$  м; продольный и поперечный модули упругости  $E_1 = 28,37$  ГПа и  $E_2 = 61,35$  ГПа; коэффициенты Пуассона  $\mu_1 = 0,075$  и  $\mu_2 = 0,162$ ; модуль упругости изотропного смесового заряда  $E = 19,8$  МПа, а коэффициент Пуассона  $\mu = 0,41$ .

Ниже для  $r = r_1$  представлены данные расчетов напряжений и контактного давления, Мпа:

$\sigma_r$ .....	-8,0	-8,0
$\sigma_\varphi$ .....	4,22	6,12
$\sigma_z$ .....	-1,53	0,279
$\sigma_1$ .....	63,9	7,96
$\sigma_2$ .....	151,4	92,1
$q_k$ .....	2,27	1,38

а также деформаций, %:

$\varepsilon_r$ .....	-0,46	-0,536
$\varepsilon_\varphi$ .....	0,41	0,469
$\varepsilon_z$ .....	$1,854 \cdot 10^{-3}$	0,053
$\varepsilon_1$ .....	$1,854 \cdot 10^{-3}$	0,053
$\varepsilon_2$ .....	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$

Примечание. В первом столбце даны результаты расчетов в соответствии с перечисленными выше исходными данными, во втором — системы оболочка — заряд, в которой продольный модуль упругости оболочки и заряда равны, т. е.  $E_1 = E$ .

Как следует из приведенных данных, изменение продольных жесткостных характеристик оболочки, а тем более их неучет, может сильно повлиять на напряженно-деформированное состояние системы. Это объясняется тем, что большую часть нагрузки от давления начинает воспринимать заряд (увеличивается окружное напряжение  $\sigma_\varphi$ ). Как следствие, уменьшаются контактное давление  $q_k$  и нагрузка на оболочку и соответственно увеличиваются окружные  $\varepsilon_\varphi$  и осевые  $\varepsilon_z = \varepsilon_1$  де-



формации в заряде и оболочке. Для зарядов с небольшим значением модуля упругости влияние продольного модуля упругости еще более возрастает. Следует отметить, что в полученных результатах не учитывается наличие расклея, так как считается, что заряд жестко связан с днищем корпуса. Кроме того, согласно этим данным, корпус РДТТ выдерживает возникающие в нем напряжения, поскольку предельное напряжение для органопластика составляет 1,6 ГПа [11].

Рассмотрим теперь влияние на напряженно-деформированное состояние заряда температурных условий применения РДТТ. Коэффициенты линейного расширения смесового топлива и материала корпуса двигателя могут сильно отличаться. Поэтому при значительной разнице температуры эксплуатации  $T$  и равновесной температуры  $T_0$  в окрестностях скрепления топлива с корпусом возникают опасные напряжения, которые могут привести к отрыву заряда от корпуса и вызвать растяжение канала заряда в окружном направлении (рис. 5).

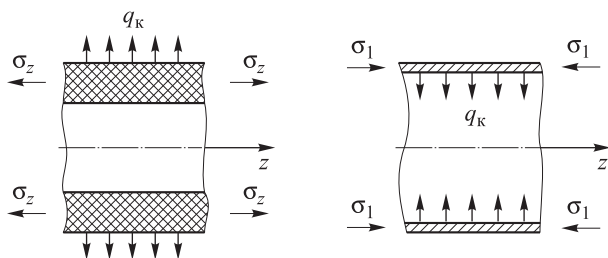


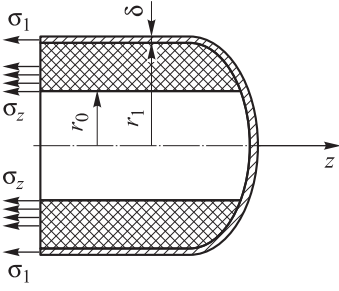
Рис. 5. Напряжение в заряде и оболочке корпуса при изменении температуры

Определим, какие напряжения и деформации возникнут в заряде, если температура заряда и корпуса двигателя изменится. Для этого воспользуемся выражениями (4) и (11) соответственно для заряда и оболочки корпуса, но уже с учетом температуры, а также формулами (9) для вычисления напряжений в заряде. Считая, что внутреннее давление отсутствует, т. е.  $p_k = 0$ , получаем

$$\sigma_r = \frac{q_k}{1-m^2} \pi \left( \frac{r_0^2}{r^2} - 1 \right);$$

$$\sigma_\phi = -\frac{q_k}{1-m^2} \left( \frac{r_0^2}{r^2} + 1 \right).$$
(17)

Подставив выражения (17) в последнюю формулу (4) закона Гука, находим



**Рис. 6.** Напряжение в заряде и оболочке в отсеченной части двигателя при изменении температуры

$$\sigma_z = E\varepsilon_z + \frac{2q_k\mu}{1-m^2} - E\alpha(T-T_0). \quad (18)$$

Осевое напряжение в оболочке определим из условий равновесия части оболочки и заряда (рис. 6):

$$\sigma_1 = -\frac{r_1}{2\delta}\sigma_z(1-m^2), \quad (19)$$

а окружное напряжение в оболочке определим по формуле

$$\sigma_2 = \frac{q_k r_1}{\delta}. \quad (20)$$

Как и в предыдущем случае нагружения РДГТ внутренним давлением, условия сопряжения оболочки и заряда при  $r = r_1$  имеют вид

$$\varepsilon_\phi = \varepsilon_2; \quad \varepsilon_z = \varepsilon_1.$$

Учитывая плоский характер деформации, последнее условие справедливо по всей толщине заряда.

Используя условия сопряжения оболочки и заряда, законы Гука для заряда и оболочки корпуса (см. выражения (4) и (11)) и уравнения (17)–(20), можно определить осевую деформацию  $\varepsilon_z$  и контактное давление  $q_k$ :

$$\varepsilon_z = \frac{1}{(\bar{E}_1 + 1)} \left[ \frac{q_k}{E} \frac{2}{(1-m^2)} (\mu - \mu_1) + (T - T_0) (\alpha + \alpha_1 \bar{E}_1) \right]; \quad (21)$$

$$\bar{q}_k = -(1-m^2) \frac{(D_1 + D_2 + D_3)(T - T_0)}{H_1 + H_2 + H_3}.$$

Здесь

$$D_1 = \bar{E}_1 \bar{E}_2 [(\alpha_2 - \alpha) + \mu(\alpha_1 - \alpha)];$$

$$D_2 = \bar{E}_1 \mu_2 (\alpha_1 - \alpha) + \bar{E}_2 (\alpha_2 - \alpha);$$

$$D_3 = 2(1 - \mu^2);$$

$$H_1 = \bar{E}_1 \bar{E}_2 [(1 - \mu - 2\mu^2) + m^2(1 + \mu)];$$

$$H_2 = 2\bar{E}_1(1 - \mu\mu_2) + \bar{E}_2 [1 - \mu - 2\mu\mu_1 + m^2(1 + \mu)];$$

$$H_3 = 2(1 - \mu_1 \mu_2).$$

Напряжения в заряде и ортотропной оболочке можно определить по формулам (17)–(20), а деформации — по известным напряжениям из закона Гука (см. формулы (4) и (11)).

Ниже для  $r = r_1$  представлены результаты расчетов радиального напряжения, соответствующего напряжению разрыва заряда и корпуса; остальные напряжения и деформации даны для радиуса  $r = r_0$ :

$\sigma_r$ , МПа.....	0,3	0,133
$\sigma_\phi$ , МПа .....	0,639	0,283
$\sigma_z$ , МПа.....	0,329	0,00264
$\varepsilon_r$ , % .....	0,025	–0,011
$\varepsilon_\phi$ , % .....	0,021	0,0925
$\varepsilon_z$ , % .....	0,001	–0,00904

Примечание. В первом столбце указаны результаты расчетов в соответствии с перечисленными выше исходными данными, во втором — системы оболочка — заряд при  $E_1 = E$ .

Видно, что в обоих случаях контактное напряжение не превысило предельного напряжения разрыва заряда и корпуса  $\sigma_b = 5$  МПа в каждом РДТТ [12], а следовательно, нет опасности отделения топлива от стенок корпуса. Как и в случае нагружения системы внутренним давлением, здесь имеют место максимальные окружные напряжения  $\sigma_\phi$  и деформации  $\varepsilon_\phi$  в канале заряда, однако меньшие по абсолютному значению. Для зарядов с меньшим значением модуля упругости влияние продольного модуля упругости оболочки еще более возрастает.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Липанов А.М., Алиев А.В. *Проектирование двигателей твердого топлива*. Москва, Машиностроение, 1995, 399 с.
- [2] Разумеев В.Ф., Ковалев Б.К. *Основы проектирования баллистических ракет на твердом топливе*. Москва, Машиностроение, 1976, 356 с.
- [3] Лавров Л.Н. *Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе*. Москва, Машиностроение, 1993, 214 с.
- [4] Балабух Л.И., Алфутов Н.А., Усюкин В.И. *Строительная механика ракет*. Москва, Высш. шк., 1984, 391 с.
- [5] Фахрутдинов И.Х., Котельников А.В. *Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива*. Москва, Машиностроение, 1987, 325 с.
- [6] Погорелов В.И. *Строительная механика тонкостенных конструкций*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2007, 517 с.

- [7] Галкин Г.Н., Чежегов В.Э. *Двигательные установки ракет. Расчет напряженно-деформированного состояния заряда РДТТ*. Серпухов, СВИ РВ, 2006, 47 с.
- [8] Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г. *Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов*. Москва, Машиностроение, 1984, 263 с.
- [9] Сарбаев Б.С. *Расчет силовой оболочки композитного баллона давления*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, 96 с.
- [10] Моссаковский В.И., ред. *Прочность ракетных конструкций*. Москва, Высш. шк., 1990, 359 с.
- [11] Васильев В.В., ред. *Композиционные материалы*. Москва, Машиностроение, 1990, 512 с.
- [12] Тамуж В.П., Протасова В.Д., ред. *Разрушение конструкций из композитных материалов*. Рига, Зинатне, 1986, 264 с.

Статья поступила в редакцию 06.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Печников В.П. Напряженно-деформированное состояние заряда РДТТ, скрепленного с ортотропным корпусом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/855.html>

**Печников Валерий Петрович** окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1961 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор свыше 40 научных трудов в области строительной механики оболочек. e-mail: [pechnikov@m1.sm.bmstu.ru](mailto:pechnikov@m1.sm.bmstu.ru)