

Уточнение энергии поверхностного нагружения диафрагмы топливного бака

Д.А. КЛИМОВСКИЙ,
В.Ю. ЖУРАВЛЕВ,
канд. техн. наук
(СибГУ
им. М.Ф. Решетнева,
Красноярск)
klinsky92@yandex.ru

Для уточненной зоны пластических деформаций металлических выворачивающихся диафрагм топливных баков определяется уточненное поле кинематически возможных скоростей. Приводится решение левой части уравнения энергетического принципа с учетом уточненных скоростей.

Диафрагма-разделитель, уравнение энергетического принципа, давление выворачивания

В большинстве космических аппаратов используется двигательная установка орбитального маневрирования на базе жидкостных ракетных двигателей малых тяг [1]. Актуальным направлением исследований в области проектирования космических аппаратов является обеспечение бесперебойной и надежной работы этих двигателей в условиях невесомости. Надежная работа и запуск двигателя невозможны без гарантированного разделения жидкой и газовой фазы в топливном баке.

Эффективным решением этой задачи является использование осесимметричных металлических выворачивающихся диафрагм-разделителей (рис. 1) [2–5]. В процессе выворачивания под действием распределенного давления происходит деформирование разделителя, который перемещается вдоль оси бака. Деформации сосредоточены в малом объеме пластической области [3–5].

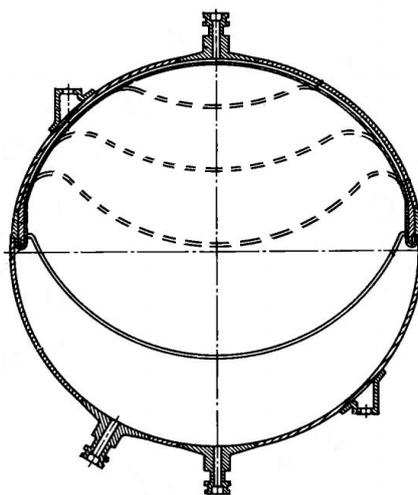


Рис. 1

Известны различные подходы к решению упругопластических задач для оболочек вращения [3–10]. Для определения основных параметров процесса пластического деформирования [3–5, 10] рекомендуется использовать экстремальный принцип для идеально пластического тела, характеризующий минимальные свойства действительного поля скоростей на основе конечных пластических деформаций, что подтверждено результатами экспериментов:

$$\int_F X_n V_n dF \leq \tau_s \int_V H' dV, \quad (1)$$

где X_n – поверхностная нагрузка; V_n – скорость перемещения поверхности; F – движущаяся в результате деформации поверхность; τ_s – предел текучести материала при сдвиге; H' – кинематически возможная интенсивность скоростей деформации; V – объем пластической зоны.

Левая часть выражения (1) представляет собой энергию поверхностного нагружения, правая – величину энергии внутренних сил.

Известные математические зависимости [3–5] не отличаются достаточной точностью и соответствием результатам экспериментов. Эти расхождения объясняются принятыми без достаточного обоснования симметричными границами зоны пластического деформирования и формой этой зоны, принимаемой как торовая. Для расчета параметров пластического деформирования участков оболочек при их проектировании используются требующие значительных затрат времени и средств, уточняющие коэффициенты, определяемые для каждой формы образующей разделителя экспериментально и зависящие преимущественно от угла φ [4, 5]. Приведем формулы для расчета давления выворачивания и радиуса торовой зоны для отдельных видов форм образующей на участке выворачивания [4, 5]:

$$P = \frac{4\tau_s s}{R_c^2 \sin \varphi} \sqrt{R_c s (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi)} \frac{1}{1 - k\varphi};$$

$$r = 0,5 \sqrt{\frac{x_c s}{\sin \varphi - \varphi \cos \varphi}} (1 - k\varphi),$$

или

$$r = 0,5 \sqrt{\frac{x_c s}{\sin \varphi - \varphi \cos \varphi}} (1 - k\varphi) \left(1 - k_1 \frac{R_c - A}{R_c} \right).$$

Для повышения качества проектирования необходимо уточнить физическую модель выворачивания металлических диафрагм-разделителей топливных баков.

В работе [11] было определено, что область пластических деформаций не доходит до границы торовой зоны на внешнем краю разделителя и превышает ее на внутренней границе. Были введены уточненные углы зоны пластических деформаций ψ^+ и ψ^- . В связи с этим возникла необходимость пересмотреть решение уравнения (1) с учетом новых углов. Для этого необходимо было уточнить кинематику процесса выворачивания, а на ее основе – решение левой и правой части уравнения (1). Решение данных задач проведено на примере полусферической диафрагмы с параметрами, приведенными на рис. 2.

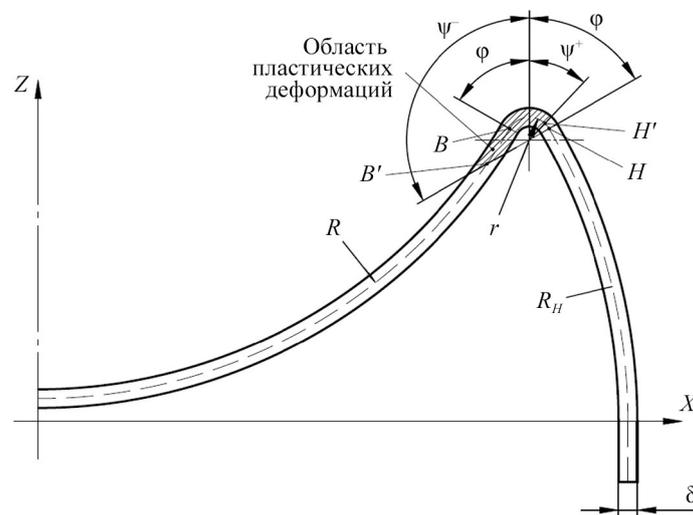


Рис. 2

Исследована свободно-выворачивающаяся диафрагма при отсутствии касания вывернутой части разделителя стенок бака. Кинематика процесса выворачивания представляется как процесс перекачивания тора радиуса r по вывернутой поверхности разделителя. Деформируется только область пластических деформаций, которая делит оставшуюся часть разделителя на две зоны – внешнюю, прошедшую деформацию, и внутреннюю. Процесс деформации симметричен, поэтому его рассматривают в плоскости меридионального сечения [3–5, 12].

Любая точка меридионального сечения торовой зоны за счет деформации меридиана участвует в сложном движении – переносном, как часть диска, катящегося по поверхности радиуса R_H , и относительно-ном, перемещаясь вдоль соответствующего меридиана [3–5, 12].

Для определения поля скоростей был использован координатный метод. В переносном движении (рис. 3, а) торовая зона совершает качение без проскальзывания по траектории средней линии вывернутой диафрагмы.

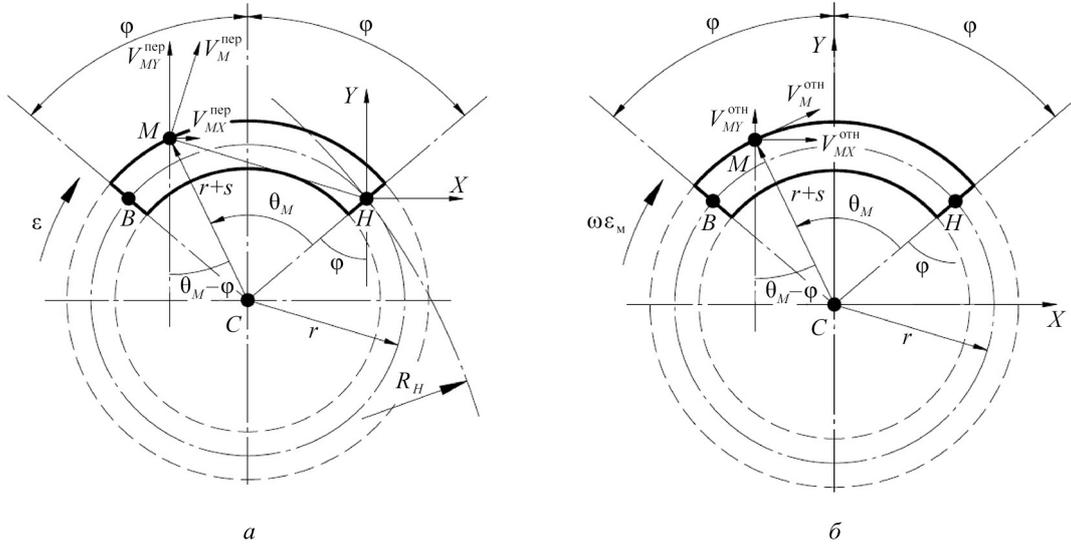


Рис. 3

Так как H – точка касания, то при качении без проскальзывания в ней находится мгновенный центр скоростей. Учитывая это, совместим начало координат с точкой H . Тогда координаты произвольной точки M в переносном движении определяются следующим образом:

$$X_M^{\text{пер}} = -r \sin \varphi - (r + s) \sin (\theta_M - \varphi);$$

$$Y_M^{\text{пер}} = -r \cos \varphi + (r + s) \cos (\theta_M - \varphi).$$

Скорость точки M в проекции на оси координат получим дифференцированием данных координат:

$$V_{MX}^{\text{пер}} = \dot{X}_M^{\text{пер}} = \omega [(r + s) \cos (\theta_M - \varphi) - r \cos \varphi];$$

$$V_{MY}^{\text{пер}} = \dot{Y}_M^{\text{пер}} = \omega [(r + s) \sin (\theta_M - \varphi) + r \sin \varphi].$$

Каждая точка M за счет деформации меридиана ε_m получит относительное перемещение вдоль соответствующей окружности торового участка меридиана. За время dt точка M переместилась бы по дуге меридиана торовой поверхности на величину

$$dl = \omega (r + s) dt.$$

За счет деформации это расстояние изменится на величину $\varepsilon_m dl$. Из-за изменения длины меридиана произойдет относительное перемещение точки M со скоростью

$$V_{\text{отн}} = \frac{\varepsilon_m dl}{dt}.$$

Относительная угловая скорость вращательного движения определится отношением

$$\omega_{\text{отн}} = \frac{V_{\text{отн}}}{(r + s)} = \omega \varepsilon_m.$$

Таким образом, относительное движение представляет собой вращение торовой зоны вокруг точки C (рис. 3, б). Разместив начало координат в точке C , положение точки M определим следующим образом:

$$X_M^{\text{отн}} = -(r + s)\sin(\theta_M - \varphi);$$

$$Y_M^{\text{отн}} = (r + s)\cos(\theta_M - \varphi).$$

Относительная скорость точки M в проекции на оси координат:

$$V_{MX}^{\text{отн}} = \dot{X}_M^{\text{отн}} = \omega \varepsilon_m (r + s) \cos(\theta_M - \varphi);$$

$$V_{MY}^{\text{отн}} = \dot{Y}_M^{\text{отн}} = \omega \varepsilon_m (r + s) \sin(\theta_M - \varphi).$$

Скорость точки M в абсолютном движении складывается из суммы скоростей относительного и переносного движения в проекции на соответствующие оси координат:

$$V_{MY}^{\text{абс}} = V_{MY}^{\text{отн}} + V_{MY}^{\text{пер}} = \omega [(\varepsilon_m + 1)(r + s) \sin(\theta_M - \varphi) + r \sin \varphi]; \quad (2)$$

$$V_{MX}^{\text{абс}} = V_{MX}^{\text{отн}} + V_{MX}^{\text{пер}} = \omega [(\varepsilon_m + 1)(r + s) \cos(\theta_M - \varphi) - r \cos \varphi]. \quad (3)$$

Для точки B выражение примет следующий вид:

$$s = 0; \quad \theta_M = \theta_B = 2\varphi;$$

$$V_{BX}^{\text{абс}} = \omega \varepsilon_m r \cos \varphi; \quad (4)$$

$$V_{BY}^{\text{абс}} = \omega (\varepsilon_m + 2) r \sin \varphi. \quad (5)$$

На участке от точки B до B' за счет наличия области пластических деформаций можно принять, что скорости точек равны скорости точки B как по оси Y (см. выражение (5)), так по оси X (см. выражение (4)). Центральная часть диафрагмы до точки B' перемещается поступательно вдоль оси Y [4, 5]. При поступательном движении скорости всех точек тела равны, поэтому скорость точек центральной части равна скорости точки B в проекции на ось Y (см. выражение (5)).

Для определения энергии поверхностного нагружения мгновенное состояние диафрагмы разделителя принимаем симметричным. Поверхностная нагрузка, или перепад между давлением наддува и давлением топлива, равномерно распределена по нижней поверхности диафрагмы (рис. 4).

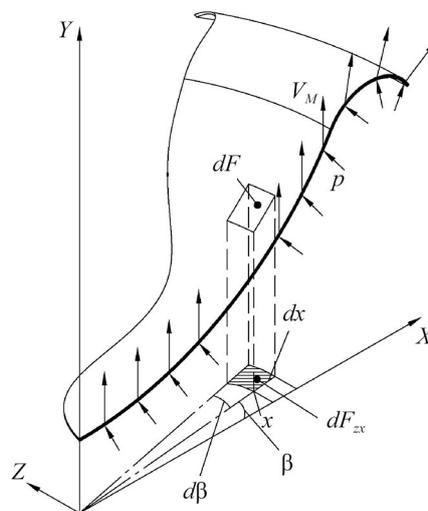


Рис. 4

С учетом этого представим левую часть выражения (1) в виде двух интегралов:

$$\int_F X_n V_n dF = \int_{F_1} p V_{BY} dF_{1ZX} + \int_{F_2} p V_{MHY} dF_{2ZX},$$

где F_1 – средняя линия центральной части диафрагмы, все точки которой имеют вертикальную составляющую скорости V_{BY} (рис. 5, а); F_2 – средняя линия торовой зоны (рис. 5, б).

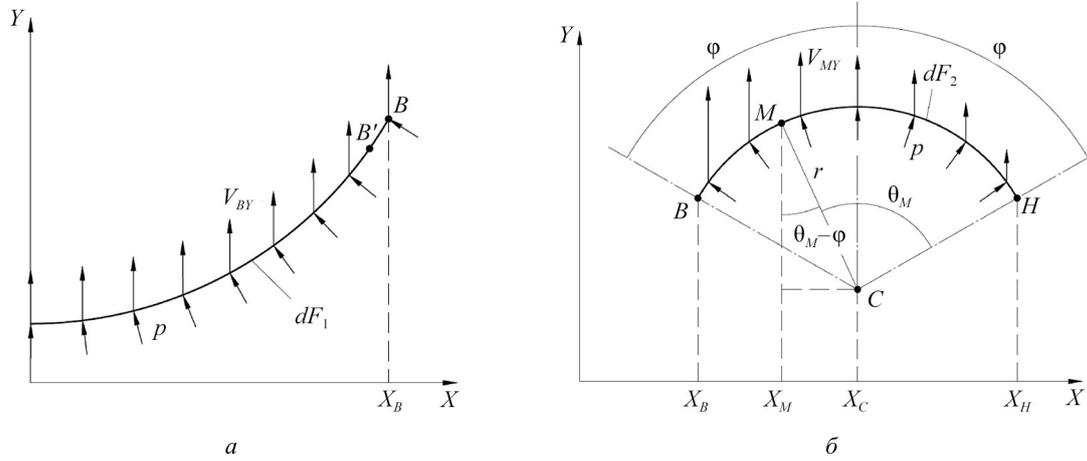


Рис. 5

Для поверхности F_1 имеем:

$$II_1 = \int_{F_1} p V_{BY} dF_{1ZX} = p V_{BY} \int_{x=0}^{x=X_B} \int_{\beta=0}^{\beta=2\pi} x dx d\beta = \pi p r \omega (\varepsilon_m + 2) X_B^2 \sin \varphi.$$

Как видно из решения, этот интеграл не зависит от формы средней части разделителя и равен произведению давления, скорости V_{BY} и площади круга радиусом X_B .

Для поверхности F_2 с учетом того, что $s = 0$, имеем:

$$\begin{aligned} II_2 &= \int_{F_2} p V_{MHY} dF_{2ZX} = \int_{x=X_B}^{x=X_H} \int_{\beta=0}^{\beta=2\pi} p \omega [(\varepsilon_m + 1)(r + s) \sin(\theta_M - \varphi) + r \sin \varphi] x dx d\beta = \\ &= \pi p r \omega \left[(X_H^2 - X_B^2) \sin \varphi + \frac{(\varepsilon_m + 1)(X_B - X_H)^3}{6r} \right]. \end{aligned}$$

Суммируем два интеграла:

$$\int_F X_n V_n dF = \pi p r \omega \left[((\varepsilon_m + 1) X_B^2 + X_H^2) \sin \varphi + \frac{(\varepsilon_m + 1)(X_B - X_H)^3}{6r} \right]. \quad (6)$$

В результате исследования получено уточненное поле кинематически возможных скоростей металлических диафрагм разделителей топливных баков (2) – (5). Решением левой части уравнения энергетического принципа уточнена энергия поверхностного нагружения (6), что позволяет скорректировать ранее разработанный алгоритм расчета основных параметров процесса выворачивания [4, 5] и исключить в дальнейшем при проектировании процесс идентификации этих параметров по результатам экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коломенцев А.И., Хохлов А.Н. Программное обеспечение для планирования и обработки результатов испытаний жидкостных ракетных двигателей малых тяг // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 1. С. 89–91.

2. *Беляков И.Т. и др.* Технология сборки и испытаний космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.
3. *Залесов В.Н., Даев И.Ф.* Пластическое деформирование вытеснительных диафрагм. М.: Машиностроение, 1977. 72 с.
4. *Ефремов В.Н., Журавлев В.Ю., Якубович О.П.* Разделители топливных баков с отрицательной деформацией параллели. Красноярск: СибГАУ, 2005. 76 с.
5. *Кубриков М.В., Журавлев В.Ю.* Проектирование диафрагм-разделителей удлиненных топливных баков // Вестник СибГАУ. 2010. № 4 (30). С. 105–107.
6. *Wen Y., Zhao W.* Finite Deformation of Everted Spherical Shells Composed of Incompressible Hyperelastic Materials // Applied Mathematical Sciences. 2013. Vol. 7. № 67. P. 3303–3308.
7. *Gomez M., Moulton D.E., Vella D.* The Shallow Shell Approach to Pogorelov's Problem and the Breakdown of 'Mirror Buckling' // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2016. Vol. 472. Iss. 2187. Article № 20150732.
8. *Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В.* Теория упругости и пластичности. М.: Физматлит, 2002. 416 с.
9. *Аннин Б.Д., Черепанов Г.П.* Уругопластическая задача. Новосибирск: Наука, 1983. 239 с.
10. *Качанов Л.М.* Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
11. *Климковский Д.А., Журавлев В.Ю.* Уточнение границ зоны пластических деформаций диафрагмы топливного бака // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. № 2. С. 223–232.
12. *Журавлев В.Ю. и др.* Кинематика тонкостенных выворачивающихся оболочек при пластическом деформировании // Механика. Исследования и инновации. 2018. № 11. С. 75–79.

Поступила в редакцию 25.12.24

После доработки 10.01.25

Принята к публикации 10.01.25

Clarification of the Surface Loading Energy for the Fuel Tank Diaphragm

D.A. KLIMOVSKII AND V.YU. ZHURAVLEV

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk

In the paper, a refined field of kinematically possible velocities is determined for the refined zone of plastic deformations of metal eversible diaphragms for fuel tanks. The solution of the left side of the energy principle equation is given, taking into account the refined velocities.

Diaphragm separator, energy principle equation, eversion pressure