

УДК 621.45.04:624.04

*В. Ю. ЖУРАВЛЕВ, Е. В. ФАЛЬКОВА, Л. П. НАЗАРОВА, Е. Н. ФИСЕНКО*  
*Сибирский государственный университет науки и технологий*  
*им. акад. М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия*

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ВЫВОРАЧИВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДИАФРАГМ-РАЗДЕЛИТЕЛЕЙ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ**

Рассматривается математическая модель процесса выворачивания металлического разделителя топливного бака космического летательного аппарата. Представлен результат исследования устойчивости выворачивающихся цилиндрических диафрагм-разделителей топливных баков космических аппаратов на основе использования энергетического принципа.

**Ключевые слова:** процесс выворачивания, устойчивость выворачивания, топливный бак, деформация.

Обеспечение бесперебойной работы и эксплуатационной надежности жидкостных ракетных двигателей можно отнести к актуальным направлениям теоретических и экспериментальных исследований в области космического машиностроения. Для решения большинства космических задач необходимы двигатели малой тяги, многократно запускаемые в условиях невесомости с увеличенным сроком их использования. Случаи аварийных ситуаций жидкостных ракетных двигателей космических аппаратов возникают из-за неравномерной подачи компонентов топлива, попадания газовых пузырей в топливные магистрали. Это послужило основанием для целенаправленных научно-исследовательских работ в области проектирования и эксплуатации топливных баков [1].

Нормальный запуск и работа двигателя в условиях невесомости возможны при гарантированном разделении жидкой и газообразной фазы в топливном баке. Для решения данной задачи применяются металлические разделители. Они строго определяют положение жидкости в любой момент работы двигательной установки летательного аппарата, обеспечивают долговечность при контакте с химически активными компонентами топлива, что гарантированно обеспечивает надежный запуск и останов двигательной установки. Варианты баков с выворачивающимися металлическими разделителями с монотонной образующей в конструктивном выполнении просты и технологичны, по весовым характеристикам близки к бакам с неметаллическими разделителями. Несмотря на кажущуюся простоту, элементы конструирования топливных баков жидкостных ракетных двигателей летательных аппаратов с выворачивающимися разделителями и работа этих разделителей изучены не полностью.

Проектирование топливных баков с металлическими диафрагмами-разделителями с высокими эксплуатационными характеристиками представляется актуальной проблемой. Проектирование топливных баков с участками образующей с малыми углами наклона позволит увеличить объем баков при неизменном диаметре. Исследование процесса выворачивания металлических диафрагм-разделителей позволяет проектировать их для баков различного размера и формы по заданным параметрам и является актуальным объектом исследования.

Основной задачей исследования является разработка научно обоснованных методов и критериев пластического течения материала для конструкций топливных баков с выворачивающимися диафрагмами-разделителями при малых углах наклона образующей на основании энергетического принципа с использованием принципа кинематически возможных скоростей. На основе разработанной модели пластического течения материала диафрагмы-разделителя решена задача проектирования диафрагм-разделителей в составе топливных баков с участком цилиндрической образующей при необходимости гарантированного разделения жидкой и газообразной фаз.

При разработке математической модели процесса выворачивания при малых углах наклона образующей, сформулированы физические и геометрические допущения по процессу выворачивания диафрагмы-разделителя.

Анализ результатов испытаний и статического расчета показал, что деформирование разделителя на всем протяжении процесса выворачивания носит четко выраженный характер и сосредоточено в малом объеме торовой зоны перекатывания. Под действием распределенного давления в результате деформации зоны перекатывания деформированная часть разделителя перемещается относительно недеформированной. Для топливных баков с диаметром 400–600 мм и с толщиной разделителя 0,5–2 мм относительная деформация меридиана на расстоянии  $s$  от срединной поверхности при переходе от недеформированной зоны с кривизной  $1/R$  в зону перекатывания с кривизной  $1/r$  составляет

$$\varepsilon_M = \frac{s}{R+s} R \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right),$$

т. е. не менее  $s/r$  и, для указанных выше размеров, на поверхности находится в диапазоне 0,1–0,2. Деформации параллелей и меридианов срединной поверхности по выходе из зоны перекатывания составляют на основном участке процесса деформации 0,02–0,03. Для указанных выше материалов (например АД-1М) механические характеристики  $\sigma = f(\varepsilon)$  таковы, что практически вся зона перекатывания за исключением небольшого участка является зоной пластических деформаций [2].

Для материала АД-1М согласно ГОСТ 10703–73 модуль упругости  $E = 0,7 \cdot 10^5$  МПа, а временное сопротивление  $\sigma_b = 80$  МПа, то есть возмож-

ные упругие деформации меньше величины  $\sigma_b/E = 1,1 \cdot 10^{-3}$ . Это значение на несколько порядков меньше величины деформации в зоне перекатывания. Область пластических деформаций достаточно протяженна ( $\epsilon_b = 0,35$ ) и полого (предел текучести  $\sigma_s = 50$  МПа,  $\sigma_b = 80$  МПа).

Сказанное выше дает основание заменить реальную характеристику ( $\sigma = f(\epsilon)$ ) прямой, параллельной оси абсцисс (оси  $\epsilon$ ), с координатой  $\sigma = \sigma_s$ , то есть идеально-пластической характеристикой механических свойств материала. Это обстоятельство не приводит к существенным погрешностям при расчете величин давления выворачивания, т. к. абсолютные значения напряжений для выбранного материала малы.

Для идеально-пластического тела пластическое течение определяется конечной комбинацией нагрузок, а путь нагружения, начальные напряжения и деформации при этом не учитываются [3]. Поэтому воспользуемся экстремальным принципом для идеально-пластического тела и запишем уравнение, характеризующее действительное поле скоростей, для определения основных параметров процесса пластического выворачивания разделителя.

В процессе работы в промежуточном положении при симметричном выворачивании поверхность разделителя можно рассматривать состоящей из трех зон (рисунок 1) [4].

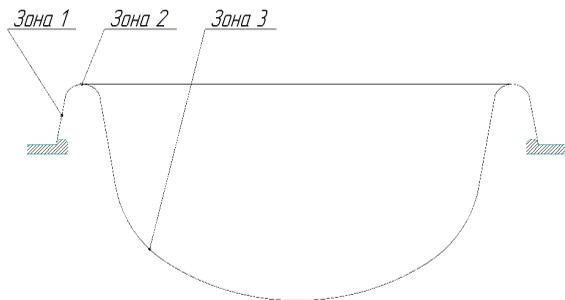


Рисунок 1 – Мгновенное положение диафрагмы-разделителя

Зона 1 – вывернутая часть разделителя, прошедшая пластическое деформирование. Форма и размеры этой части в процессе дальнейшего выворачивания считаются неизменными.

Зона 2 – зона пластического деформирования материала, за счет которой осуществляется процесс выворачивания, представляет собой торовую поверхность, размеры которой меняются в процессе выворачивания разделителя.

Зона 3 – срединная невывернутая часть разделителя считается недеформированной, она лишь перемещается вдоль оси симметрии разделителя.

В первой и третьей зоне материал идеально-упругий, во второй идеально-пластичный.

Деформация разделителя при его перемещении в торовой зоне перекачивания происходит за счет изменения кривизны меридиана в местах перехода тора к зонам 1, 3 и за счет смещения материала разделителя на основном участке тора.

В областях изменения кривизны меридиана его деформация происходит за счет поворота вокруг крайних точек срединной поверхности, являющихся мгновенными центрами скоростей. Скорость перемещения меридиана в этих зонах определится произведением расстояния от мгновенных центров скоростей до соответствующего меридиана на величину угловой скорости

$$v = (r + s)(\omega + \omega_{\text{отн}}),$$

где  $\omega$ ,  $\omega_{\text{отн}}$  – угловые скорости во вращении тора и относительном перемещении, связанном с деформацией меридиана.

Скорость деформации в обеих зонах определится как отношение скорости перемещения к расстоянию до точки от недеформированного или уже деформированного участка разделителя

$$\eta_M = \frac{v}{x_M} \text{ или } \eta_M = \frac{\omega}{x_M}(r + s)(1 + \varepsilon_M),$$

где  $x_M$  – расстояние от оси симметрии разделителя до произвольной точки  $M$ .

Проведен статический расчет по моментной теории методом конечных элементов. Расчет проведен для секторов разделителей, находящихся в начальном и промежуточном положениях и подверженных нагрузке давления компонента. В результате расчета получены эпюры распределения напряжений и погонных моментов. По результату статических расчетов и анализа экспериментов приняты схемы выворачивания для различных видов нагружения [5].

Для определения параметров процесса выворачивания используется экстремальный принцип для идеально-пластического тела и уравнение, характеризующее минимальные свойства действительного поля скоростей [6],

$$\int_F X_{ni} v_{ni} dF \leq \tau_s \int_V H' dV,$$

где  $X_{ni}$  – поверхностная нагрузка;  $v_{ni}$  – скорость перемещения поверхности;  $F$  – движущаяся в результате деформации поверхность;  $\tau_s$  – предел текучести при сдвиге;  $H'$  – кинематически возможная интенсивность скоростей деформации;  $V$  – объем пластической зоны.

С учетом скоростей перемещения точек поверхности разделителя и скоростей деформаций в зоне пластического деформирования левая часть энергетического уравнения после преобразований может быть представлено в виде

$$\int_F X_{ni} v_{ni} dF = -2\pi P \omega (r + \delta)(1 + \varepsilon_M) \int_0^{x_H} [\sin(\varphi - \alpha_B) - \sin(\varphi - \alpha_M)] x dx,$$

где  $\delta$  – толщина оболочки,  $\varphi$  – угол между вертикальной осью поперечного сечения тора и нормалью к границе торовой области.

Точка  $B$  соответствует завершению первой (вывернутой) зоны, а точка  $H$  – завершению второй зоны (зоны пластического деформирования).

В результате интегрирования, получено

$$\int_F X_{ni} v_{ni} dF = 2\pi P \omega (r + \delta) (1 + \varepsilon_M) (x_H^2 / 2 + x_B^2 / 2 + 2r^2 \sin^2 \varphi / 3) \sin \varphi.$$

После подстановки величин скоростей деформаций по трем основным направлениям правая часть энергетического уравнения преобразуется к виду

$$\tau_s \int_V H' dV = 4\tau_s \pi \omega r (r + \delta) (1 + \varepsilon_M) \left[ \frac{x_C \delta}{2r} + 2r (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi) \right],$$

где  $x_C$  – расстояние от оси симметрии разделителя до мгновенного центра скоростей сечения тора.

Величина давления выворачивания определена после решения интегрального уравнения энергетического принципа

$$P = 2\tau_s \delta \frac{r}{2} \frac{\frac{x_C \delta}{2r} + 2r (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi)}{x_C^2 \sin \varphi}.$$

Входящая в выражение давления величина радиуса зоны перекатывания определяется условием минимума энергии выворачивания, то есть, минимумом давления выворачивания. Для его нахождения продифференцируем выражение, стоящее в числителе, по радиусу зоны перекатывания

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{x_C \delta}{r} + 2r (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi) \right] = -\frac{x_C \delta}{2} \frac{1}{r^2} + 2 (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi).$$

Отсюда радиус зоны перекатывания

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{x_C \delta}{\sin \varphi - \varphi \cos \varphi}}.$$

Соответственно давление выворачивания будет определяться по формуле

$$P = \frac{4\tau_s \delta}{x_C^2 \sin \varphi} \sqrt{x_C \delta (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi)}.$$

Важнейшей характеристикой процесса выворачивания является конечная форма диафрагмы-разделителя. Для ее нахождения необходимо определение деформаций разделителя в меридиональном и окружном направлении. Конечная величина деформаций параллелей срединной поверхности разделителя определяется по зависимости

$$\varepsilon_{\pi} = \frac{2r}{x_B + 2r\varphi \cos \varphi} (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi).$$

Одной из основных причин, определяющих невозможность использования диафрагм-разделителей, соответствующих рассматриваемым схемам, является потеря устойчивости их форм [7]. Наиболее опасной является зона, образуемая конической и цилиндрической частью.

Величина критического давления, при котором происходит потеря устойчивости цилиндрического участка диафрагм-разделителей выполненных идеально, определяется по формуле [5]

$$P_{кр} = \frac{kE\delta^{5/2}}{lR^{3/2}},$$

где  $k$  – коэффициент, значение которого определяется расчетной схемой;  $R, l$  – радиус и длина цилиндрической оболочки.

Численным методом получены величины критического давления для разделителей с различной протяженностью цилиндрического участка и участков с малыми углами наклона конической образующей [8].

Изменение длины цилиндра чрезвычайно сильно сказывается на уменьшении величины критического давления потери устойчивости.

Разработана методика нахождения положения срединной поверхности диафрагмы-разделителя для разных ее положений. Координаты основных точек зоны перекачивания определяются численным способом для заданного шага смещения зоны перекачивания. По полученным положениям точек определяется приращение вытесненного объема. Конечная форма вывернутой диафрагмы-разделителя соответствует огибающей, соединяющей наружные точки зоны перекачивания, полученной на каждом шаге выворачивания.

В ходе исследования разработано программное обеспечение для расчета и проектирования выворачивающихся металлических диафрагм-разделителей двигательных установок топливных баков космических аппаратов [4, 9]. Разработанный программный продукт реализует представление математической модели процесса выворачивания диафрагмы-разделителя в виде графиков, таблиц и визуализации мгновенного положения разделителя в топливном баке.

Основным достоинством программы является визуализация начальной, промежуточных и конечной форм проектируемой диафрагмы-разделителя в зависимости от места крепления в топливном баке относительно внутренней поверхности стенок бака. Это позволяет оперативно менять геометрические параметры участков образующей и место крепления разделителя в баке для достижения максимальной эффективности использования его объема и исключения случаев прекращения процесса выворачивания при сминании стенки разделителя внутренними поверхностями топливного бака летательного аппарата.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Идентификация процесса выворачивания металлического разделителя на основе кинематической модели / В. Ю. Журавлев [и др.] // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – Вып. 11. – С. 68–74.

2 Математическая модель процесса выворачивания металлических разделителей топливных баков / В. Н. Ефремов [и др.] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М. Ф. Решетнева. – 2005. – № 3. – С. 127–129.

3 Wen, Y. Finite Deformation of Everted Spherical Shells Composed of Incompressible Hyperelastic Materials / Y. Wen, W. Zhao // Applied Mathematical Sciences. – 2013. – Vol. 7, No. 67. – P. 3303–3308.

4 Журавлев, В. Ю. Программное обеспечение для расчета процесса выворачивания разделителей топливных баков / В. Ю. Журавлев, М. В. Кубриков // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М. Ф. Решетнева. – 2010. – № 3 (29). – С. 111–114.

5 Кубриков, М. В. Проектирование диафрагм-разделителей удлиненных топливных баков / М. В. Кубриков, В. Ю. Журавлев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М. Ф. Решетнева. – 2010. – № 4 (30). – С. 105–108.

6 Ефремов, В. Н. Металлические выворачивающиеся диафрагмы-разделители топливных баков / В. Н. Ефремов, В. Ю. Журавлев. – Красноярск : САА, 1998. – 104 с.

7 Gomez, M. The shallow shell approach to Pogorelov's problem and the breakdown of 'mirror buckling' / M. Gomez, D. E. Moulton, D. Vella // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2016. – Vol. 472, Is. 2187. – Article 20150732. – 24 p.

8 Журавлев, В. Ю. Применение метода конечных элементов для расчета тонкостенных оболочек / В. Ю. Журавлев, Я. Ю. Бакулин // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф., г. Красноярск : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2017. – Ч. 1. – С. 195–196.

9 Журавлев, В. Ю. Построение физической модели пластического течения тонкостенной оболочки / В. Ю. Журавлев, Я. Ю. Бакулин // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесная механика : материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конф. – Томск, 2015. – С. 144–146.

*V. Yu. ZHURALEV, E. V. FALKOVA, L. P. NAZAROVA, E. N. FISENKO*  
*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia*

## PARTICULARITIES OF THE REVERSING OF CYLINDRICAL DIAPHRAGMS-SEPARATORS OF FUEL TANKS

In the article there is considered a mathematical model of the turning inside out of the fuel tank metallic separators for the cosmic flying machine. The research result of the stability of the fuel tank metallic separators for the cosmic flying machine at their turning inside out is presented and it is based on the energy principle.

Получено 23.04.2019