

УДК 621.45.04

В. Ю. ЖУРАВЛЕВ, Л. П. НАЗАРОВА, Е. Н. ФИСЕНКО, В. О. ФАЛЬКОВ
Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫВОРАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАЗДЕЛИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Рассматриваются особенности проектирования металлических разделителей газовой и жидкостной фаз топливных баков. Проведен анализ процесса выворачивания металлического разделителя на основе кинематической модели. Предложены соотношения для оценки радиуса зоны деформации и давления выворачивания.

Ключевые слова: выворачивающаяся оболочка, диафрагмы-разделители, пластическое деформирование.

С целью изучения и освоения космического пространства, расширения исследований по применению космических средств при изучении природных ресурсов земли, в метеорологии, навигации, связи и для других нужд материального производства продолжается развитие и совершенствование ракетно-космической техники. Решение большинства поставленных задач требует применения топливных баков с вытеснительной системой подачи при гарантированном разделении газовой и жидкостной фаз. Такие баки применяются в системах коррекции и стыковки транспортных систем, в системах ориентации и стабилизации ступеней ракеты.

Важнейшим условием нормальной работы агрегатов космического летательного аппарата является непрерывность подачи компонентов. Она может быть нарушена при наличии газовых пузырей в топливоподающих магистралях, например, при запуске в условиях невесомости или вследствие временного оголения заборного устройства, при манёвре летательного аппарата. Для разграничения газовой и жидкостной фаз успешно применяются механические разделители [1], которые можно условно разделить на два больших класса: эластичные (неметаллические) и металлические. Неметаллические разделители выполняются из пластических материалов, стойких к компонентам, ассортимент которых ограничен. При кажущейся простоте схемы они достаточно сложны в реальном конструктивном исполнении. При небольшом перепаде давления между газовой подушкой и жидким компонентом положение разделителя, а следовательно и жидкого компонента, может быть строго определено только при дополнении разделителя специально сконструированными приспособлениями. Дополнительные детали необходимы также для сбора компонента и надёжной подачи его к заборной горловине. Форма эластичного разделителя в расправленном состоянии должна

соответствовать форме бака, поэтому раскрой материала для последующей сварки оболочки или сшивание чехла может быть сложным даже для простой формы бака. Увеличение размера разделителя может привести к прекращению подачи компонента. Уменьшение размера разделителя приводит к увеличению объема незабранного компонента.

Процесс снаряжения топливного бака эластичным разделителем и последующая заправка бака топливом сложны. Во время заправки и при испытаниях могут появиться дефекты, перебои дренирования, ложная негерметичность. Плёночные материалы, применяемые в настоящее время, не гарантируют работу в течение длительного времени. По этим причинам несколько более распространены металлические разделители. Они, в большинстве своём, строго определяют положение жидкости в любой момент работы, гарантируют долговечность при контакте с компонентами и разнообразны по своей конструкции. Схема бака приведена на рисунке 1.

Прямые методы выбора конструкторских параметров разделителя для бака заданной геометрии приводят к недопустимым расхождениям с результатами экспериментов, поэтому при проектировании разделителя приходится проводить эксперименты по выворачиванию разделителей – корректировать конструкторские параметры разделителя. Затраты на изготовление технологической оснастки, опытных образцов разделителя, проведение экспериментов в основном определяют стоимость проектирования.

Основой проектирования разделителя является математическая модель пластического деформирования разделителя при выворачивании, основанная на кинематике свободного выворачивания, как процесса перекатывания условного тора по поверхности разделителя в относительном движении [2–4]. Пластически деформируется только область торовой поверхности разделителя. Она делит оставшуюся часть разделителя на две зоны, перемещающиеся параллельно оси деформации в разных направлениях относительно друг друга: внешнюю зону, уже прошедшую пластическое деформирование; среднюю зону, ожидающую процесс деформирования.

Меридиан срединной поверхности невывернутой части разделителя рассматривается в относительном перемещении как неподвижная кривая, по которой катится без скольжения срединная окружность сечения торовой поверхности зоны перекатывания. Тогда скорость любой точки окружности

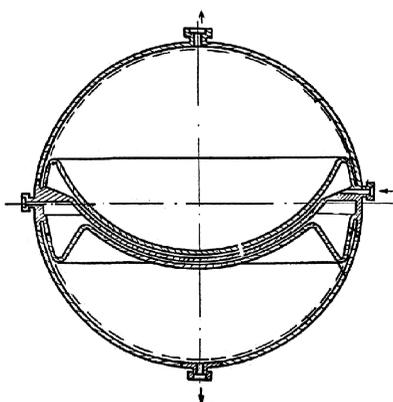


Рисунок 1 – Схема двухкомпонентного бака

геометрически складывается из скорости движения центра окружности и скорости точки в ее вращательном движении вокруг этого центра [5]. Каждая точка сечения торовой поверхности, отстоящая от срединной поверхности, за счет деформации меридиана получает относительное перемещение вдоль соответствующей окружности. При таком представлении скорости произвольной точки торовой поверхности в меридиональном сечении определена ее функциональная зависимость от переменного значения радиуса зоны перекачивания, соответствующее положению меридионального сечения вместо постоянного радиуса для любого меридиана.

Полученные соотношения скоростей точек при выворачивании разделителя используются для определения кинематически возможных скоростей при решении неравенства энергетического принципа при пластическом деформировании материала. Предложенная кинематически возможная модель процесса выворачивания оболочки вращения позволила определить теоретические зависимости основных характеристик процесса выворачивания (давление выворачивания и радиус зоны перекачивания) от параметров оболочки, меняющихся при перемещении зоны перекачивания.

Разработанная технология проектирования разделителей позволяет существенно снизить стоимость проектирования. Решение задачи осуществляется в несколько этапов: "Расчет параметров", "Параметрическая идентификация", "Оптимизация", "Оценка результатов". Решение задачи доведено до инженерного, с определением параметров выворачивания с точностью до постоянных коэффициентов. Применение математической модели при проектировании разделителя емкости дает еще одно преимущество: позволяет проводить оптимизацию конструкции разделителя по заданным критериям, используя хорошо разработанные математические методы оптимизации. Снижение стоимости проектирования осуществлено за счет замены большей части физических экспериментов математическим моделированием.

Оптимизация конструкции разделителя. На этом этапе, в соответствии с техническим заданием на проектирование разделителя, разрабатывается критерий оптимальности разделителя – функция цели, формализуются дополнительные условия – функциональные ограничения, определяются диапазоны изменения конструкторских параметров – граничные значения варьируемых параметров. Оптимизация заключается в поиске такой комбинации конструкторских параметров разделителя, при которой функция цели принимает экстремальное значение при условии, что функциональные границы не нарушены. Как правило, в качестве функции цели используется объем, вытесненный разделителем при свободном выворачивании в области пространства, ограниченной внутренней поверхностью бака. То есть, производится поиск такой комбинации конструкторских параметров, при которой разделитель, помещенный в заданный бак, вытеснит при выворачивании максимально возможный объем, не коснувшись стенок бака. В особых слу-

чаях возможно формирование других, в том числе и интегральных, критериев оптимальности конструкторских параметров разделителя.

Оценка результатов. По результатам оптимизации изготавливается опытный образец разделителя, производится экспериментальное исследование процесса его выворачивания. Если этот образец оказался неудачным, этапы «Параметрическая идентификация» (с учетом полученных экспериментальных данных), «Оптимизация», «Оценка результатов» повторяются.

Задачи оптимизационного характера, решаемые на этапах «Параметрическая идентификация» и «Оптимизация» требуют реализации алгоритмов поиска, не предъявляющих специальных требований к структуре математической модели, то есть необходимы алгоритмы поиска экстремума функции цели, рассматривающие математическую модель как «черный ящик». Этот вопрос хорошо разработан в специальной литературе и не требует дополнительного обсуждения. Задача, разрешенная на этапе «Структурная идентификация» нетривиальна, решение ее получено авторами путем обобщения результатов экспериментального и теоретического исследования процесса выворачивания металлического разделителя.

На рисунке 2 представлена схема однокомпонентного сферического бака. Выделены начальное и конечное положения разделителя. Все разделители имеют осевую симметрию, конструкторские параметры разделителей задаются геометрией срединной поверхности и законом изменения толщины по длине меридиана. Как правило, срединную поверхность разделителя удастся аппроксимировать участками простых геометрических форм: конуса, тора, сферы.

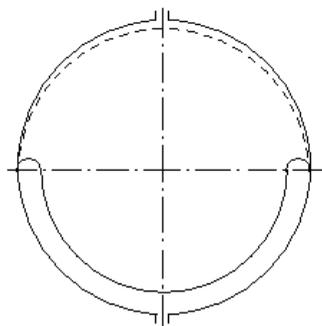


Рисунок 2 – Схема однокомпонентного сферического бака

Экспериментальное изучение работы разделителей позволило сделать следующие выводы:

1 Геометрия разделителя на любой стадии процесса не зависит от скорости процесса и полностью определяется геометрией исходного разделителя, т. е. можно утверждать, что геометрически идентичные разделители, изготовленные в одинаковых условиях, будут работать одинаково, в смысле геометрии промежуточных и конечного положений, при разных скоростных режимах процесса. Экспериментально обнаруженный разброс давления выворачивания объясняется сильным влиянием толщины разделителя на величину давления и разбросом толщины в пределах технологического допуска.

2 При правильно выбранной геометрии разделителя осевая симметрия сохраняется на всем протяжении процесса выворачивания. Причиной нару-

шения осевой симметрии служит разная толщина разделителя в пределах параллели. Нарушение осевой симметрии может привести к "закусыванию" разделителя и последующему его разрыву. Дополнительным фактором, повышающим устойчивость осевой симметрии процесса, является задание такого закона изменения толщины разделителя по длине меридиана, который обеспечивает повышение давления выворачивания на всем протяжении процесса. Выворачивание по жесткому калибру (при касании разделителем стенок бака) увеличивает вероятность нарушения осевой симметрии процесса.

3 В любом промежуточном положении на срединной поверхности разделителя можно выделить три зоны, имеющие четкие границы. Зона, от полярной области разделителя до границы зоны деформации, где материал разделителя работает в упругой области. Геометрия этой зоны почти не отличается от геометрии соответствующего участка исходного разделителя. Зона деформации, материал разделителя работает в области больших пластических деформаций. Выворачивание разделителя возможно только при увеличении длины параллели в процессе прохождения этой зоны. Геометрия срединной поверхности здесь хорошо аппроксимируется участком тороидальной поверхности, имеющей большой и малый радиусы, соответственно R и r , причем образующая этой зоны практически симметрична относительно оси, параллельной оси симметрии разделителя. На границах зоны деформации происходит изгибание срединной поверхности разделителя, деформация в точках, находящихся на максимальном удалении от срединной поверхности может достигать, для толстых разделителей, 35 %, что может привести к образованию трещин. В зоне, прошедшей пластическое деформирование, материал разделителя работает упруго.

Экспериментально выявленные закономерности позволяют принять следующую модель процесса выворачивания металлического разделителя:

1 На всем протяжении процесса выворачивания сохраняется осевая симметрия, выворачивание происходит свободно, без касания стенок бака.

2 Внутренняя граница зоны деформации занимает, последовательно, n геометрически близких положений. Геометрия пластически деформируемого участка в системе координат, связанной с полюсом разделителя, однозначно определяется заданием положения внутренней границы и радиусом r срединной поверхности зоны деформации. Оценки величин радиуса r и давления выворачивания p однозначно определяются положением внутренней границы зоны деформации торовой поверхности с углом 2φ . Величина деформации параллели в первом приближении, без учета деформации меридиана, может быть оценена как

$$\varepsilon_{\Pi} = \frac{X_H - X_{H_0}}{X_{H_0}},$$

где X_{H_0} определяется из условия, что длина участка меридиана $l_{BH_0} = 2r\varphi$.

Деформация меридиана определяется из эмпирической зависимости, которую можно использовать для разделителей всех типоразмеров

$$\varepsilon_m = (-0,797\varphi^2 + 2,525\varphi - 1)\varepsilon_n.$$

3 Для полного определения параметров процесса выворачивания осталось выяснить характер движения системы координат, связанной с полюсом разделителя, в системе координат, связанной с баком. Оси симметрии разделителя и бака совпадают. Если оси OY разделителя и бака совместить с осями их симметрии, то координаты всех точек разделителя по оси OX в этих системах координат становятся одинаковыми. Расчет ведется по координатам характерных точек зоны пластического деформирования X_H и X_B , причем X_B и φ задаются положением внутренней границы зоны деформации, а $X_H = X_B + 2r \sin \varphi$. При перемещении разделителя из положения i в положение $i + 1$, где $i = 1, \dots, n - 1$, в зону деформации уходит участок меридиана длиной dl , а из зоны деформации выходит участок меридиана длиной

$$dl_D = (dl + 2r_i\varphi_i - 2r_{i+1}\varphi_{i+1})(1 - (\varepsilon_{m,i} + \varepsilon_{m,i+1})/2),$$

при этом ордината внутренней границы зоны деформации в системе координат, связанной с полюсом разделителя, уменьшается на величину

$$dY_B = Y_i - Y_{i+1},$$

а ордината наружной границы зоны деформации в системе координат, связанной с баком, увеличивается на величину dY_H , определяемую из уравнения

$$dl_D^2 = (X_{H,i} - X_{H,i+1})^2 + dY_H^2.$$

Таким образом, все точки недеформированной части разделителя переместятся в системе координат, связанной с баком, на величину

$$dY_O = dY_B + dY_H.$$

Расчет объема, вытесняемого разделителем за шаг выворачивания, является тривиальной задачей аналитической геометрии.

Наиболее сложной задачей, решаемой при идентификации процесса выворачивания металлического разделителя, является разработка надежных оценок для радиуса срединной поверхности зоны деформации r и давления выворачивания p .

Радиус зоны деформации и давление выворачивания предлагается оценивать как

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\delta R}{\Psi}} \left[1 + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\delta \Psi}{R}} \right];$$

$$p \begin{cases} \leq 2 \\ \geq \sqrt{3} \end{cases} \left\{ \frac{\tau_0 \delta}{R \sin \varphi} \left[\frac{\delta}{2r} \left(1 - \frac{2r}{R} \Psi \right) + \frac{2r}{R} \left(1 - \frac{r}{R} \Psi \right) \Psi \right] \right\},$$

где $\psi = \sin \varphi - \varphi \cos \varphi$; φ – угол между нормалью к поверхности разделителя на границе зоны деформации и осью симметрии разделителя; δ – средняя толщина разделителя в пределах зоны деформации; τ_0 – предел текучести материала разделителя; R – радиус центра зоны деформации; r – радиус зоны деформации; p – давление выворачивания.

Анализ экспериментальных данных показал, что лучшие результаты получаются при использовании зависимостей:

$$r = \frac{A - B\varphi}{2} \sqrt{\frac{\delta R}{\psi}};$$

$$p = C \frac{\tau_0 \delta^2}{Rr \sin \varphi},$$

где A, B, C – постоянные коэффициенты математической модели.

Определение значений этих коэффициентов выполняется на этапе параметрической идентификации процесса выворачивания разделителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2 **Даев, И. Ф.** Пластическое деформирование вытеснительных диафрагм / И. Ф. Даев, В. Н. Залесов. – М. : Машиностроение, 1977. – 72 с.

3 **Солодилова, Е. М.** Моделирование функционирования диафрагмы вытеснительной системы / Е. М. Солодилова, С. В. Глушков // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 7. – С. 207–209.

4 **Кубриков, М. В.** Проектирование диафрагм-разделителей удлиненных топливных баков / М. В. Кубриков, В. Ю. Журавлев / Вестник СибГАУ. – 2010. – № 4 (30). – С. 105–108.

5 Кинематика тонкостенных выворачивающихся оболочек при пластическом деформировании / В. Ю. Журавлев [и др.] // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – Вып. 11. – С. 75–79.

V. Yu. ZHURAVLEV, L. P. NAZAROVA, E. N. FISENKO, V. O. FALKOV
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk

IDENTIFICATION OF THE METAL SEPARATOR EVERSION PROCESS ON THE BASIS OF KINEMATIC MODEL

The design features of the metal separators for gas and liquid phases of fuel tanks are considered. There is presented the analysis of the metal separator eversion process based on the kinematic model. The relationships for estimating the deformation zone radius and the eversion pressure are proposed.

Получено 13.04.2018