

## Несущая способность цилиндрической камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя

© В.Е. Миненко, А.Н. Семененко

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

*Рассмотрен вопрос о несущей способности камеры жидкостного ракетного двигателя. Обычно, когда говорят о несущей способности, определяющей работоспособность какого-то изделия, ориентируются на диаграмму растяжения идеально пластического материала, что исключает возможность вычисления деформации. Такой подход к нахождению предельной нагрузки, характеризующей несущую способность камеры жидкостного ракетного двигателя, не применим, так как камера представляет собой конструкцию, состоящую из двух скрепленных между собой оболочек, оценка совместной работы которых возможна с использованием данных по их деформациям.*

*В статье несущая способность камеры обуславливается запасом прочности по напряжению в точке неустойчивости на диаграмме растяжения с логарифмической шкалой деформаций. Для наружной и внутренней оболочек камеры получена диаграмма растяжения с учетом их температурного состояния. Графически определена точка неустойчивости оболочек, соответствующая наибольшему напряжению и, следовательно, предельному давлению в камере, по которому назначают запас прочности и расчетное напряжение.*

**Ключевые слова:** несущая способность, точка неустойчивости, предельное давление.

Известен [1–5] способ определения несущей способности камеры жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), связанный с построением кривой зависимости внутреннего давления  $p_r$  газов от приращения радиуса  $\Delta R$  камеры. Для этого задают несколько значений относительных удлинений  $\varepsilon$  в окружном направлении и устанавливают соответствующие им давления  $p_r = f(\Delta R)$  при известных температурах внутренней и наружной оболочек камеры. На кривой отмечают точку рабочего давления. Построенный график  $p_r = f(\Delta R)$  позволяет также вычислить запас несущей способности камеры, не допускающий быстрого роста  $\Delta R$  при увеличении внутреннего давления  $p_r$ .

В данной работе для оценки несущей способности камеры использовали истинные деформации

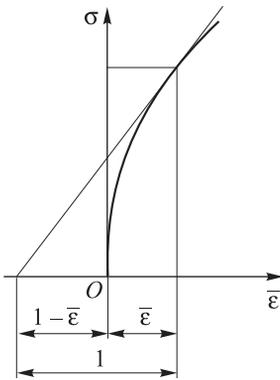
$$\bar{\varepsilon} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon),$$

где  $l$  — длина элемента после деформирования;  $l_0$  — исходная длина элемента;  $\varepsilon$  — условная относительная деформация,  $\varepsilon = l/l_0 - 1$ .

Приращение истинной деформации  $d\bar{\varepsilon} = \frac{dl}{l} = \frac{d\varepsilon}{1+\varepsilon}$  выражает изменение длины элемента по отношению к его текущей длине  $l$ . Приращение условной деформации  $d\varepsilon = dl/l_0$ . Для очень малых деформаций величины  $d\bar{\varepsilon}$  и  $d\varepsilon$  совпадают, например при  $\varepsilon = 0,1$  значение  $\bar{\varepsilon} = \ln(1 + \varepsilon) = 0,0953$ .

На графике  $\sigma = f(\bar{\varepsilon})$  растяжения образца существует точка равенства [6–8]

$$\frac{d\sigma}{d\bar{\varepsilon}} = \sigma, \quad (1)$$



**Рис. 1.** Точка неустойчивости при растяжении

означающая возникновение неустойчивости процесса деформирования, когда наряду с равновесным состоянием, определяемым  $\sigma$  и  $\bar{\varepsilon}$ , появляются другие равновесные состояния, определяемые  $\sigma + d\sigma$  и  $\bar{\varepsilon} + d\bar{\varepsilon}$ , при которых уменьшение площади поперечного сечения вследствие растяжения компенсируется увеличением  $d\sigma$  (упрочнение), и сила  $P$  остается постоянной. Эту точку устанавливают графически (рис. 1).

Дальнейшее нагружение часто может быть нецелесообразным, так как деформации развиваются, опережая рост напряжений. Камера ЖРД представляет собой двухслойную конструкцию, состоящую из двух связанных между собой оболочек.

Для анализа несущей способности двухслойной конструкции необходимо понимание неустойчивости тонкостенной оболочки. Поскольку при нагружении внутренним давлением  $p$  окружное напряжение  $\sigma_2$  всегда больше осевого  $\sigma_1$ , оно является определяющим:

$$\sigma_2 = \frac{pR}{h}, \quad (2)$$

где  $h$  — толщина оболочки.

Истинные окружная и радиальная деформации определяются соответственно соотношениями

$$\bar{\varepsilon}_2 = \ln \frac{R}{R_0}; \quad (3)$$

$$\bar{\varepsilon}_3 = \ln \frac{h}{h_0}, \quad (4)$$

где  $R_0, h_0$  — начальные радиус и толщина оболочки.

Истинную продольную деформацию находят из условия постоянства объема:

$$\bar{\varepsilon}_1 = -\bar{\varepsilon}_2 - \bar{\varepsilon}_3.$$

Используя формулы (3) и (4), можно представить окружное напряжение в виде

$$\bar{\sigma}_2 = \frac{pR_0}{h_0} e^{\bar{\varepsilon}_2 - \bar{\varepsilon}_3}. \quad (5)$$

Соотношения Сен-Венана устанавливают связь напряжений с истинными деформациями:

$$\frac{2\sigma_2 - \sigma_1}{2\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{d\bar{\varepsilon}_2}{d\bar{\varepsilon}_1}, \quad \frac{2\sigma_2 - \sigma_1}{-\sigma_2 - \sigma_x} = \frac{d\bar{\varepsilon}_2}{d\bar{\varepsilon}_3}. \quad (6)$$

Исключая из выражения (6)  $d\bar{\varepsilon}_3$ , получаем

$$d\bar{\varepsilon}_1 = -\frac{2\frac{\sigma_1}{\sigma_2} - 1}{\frac{\sigma_1}{\sigma_2} - 2} d\bar{\varepsilon}_2 = -kd\bar{\varepsilon}_2, \quad (7)$$

где  $k$  — параметр двухосности,

$$k = \frac{2\frac{\sigma_1}{\sigma_2} - 1}{\frac{\sigma_1}{\sigma_2} - 2}. \quad (8)$$

Из формулы (7) получаем  $\bar{\varepsilon}_1 = -k\bar{\varepsilon}_2$ , а из условия постоянства объема находим

$$\bar{\varepsilon}_3 = -\bar{\varepsilon}_2 - \bar{\varepsilon}_1 = k\bar{\varepsilon}_2 - \bar{\varepsilon}_2 = (k-1)\bar{\varepsilon}_2. \quad (9)$$

Рассмотрим два случая нагружения оболочки.

1.  $\sigma_1 = 0$ ,  $k = 1/2$ .

Из формулы (5) давление  $p$  можно выразить с учетом (9) в функции деформации  $\bar{\varepsilon}_2$ :

$$p = \frac{\sigma_2 h_0}{R_0} e^{\bar{\varepsilon}_3 - \bar{\varepsilon}_2} = \frac{\sigma_2 h_0}{R_0} e^{(k-1)\bar{\varepsilon}_2 - \bar{\varepsilon}_2} = \frac{\sigma_2 h_0}{R_0} e^{(k-2)\bar{\varepsilon}_2}. \quad (10)$$

Условие неустойчивости нагружения представим равенством нулю производной от внутреннего давления по определяющей деформации  $\bar{\varepsilon}_2$ :

$$\frac{dp}{d\bar{\varepsilon}_2} = 0.$$

Тогда

$$\frac{d}{d\bar{\varepsilon}_2} \left( \frac{\sigma_2 h_0}{R_0} e^{(k-2)\bar{\varepsilon}_2} \right) = \frac{d\sigma_2}{d\bar{\varepsilon}_2} \frac{h_0}{R_0} e^{(k-2)\bar{\varepsilon}_2} + \sigma_2 \frac{h_0}{R_0} (k-2) e^{(k-2)\bar{\varepsilon}_2} = 0,$$

или

$$\frac{d\sigma_2}{d\bar{\varepsilon}_2} = (2-k)\sigma_2. \quad (11)$$

Для  $k = 1/2$  искомое условие имеет вид

$$\frac{d\sigma_2}{d\bar{\varepsilon}_2} = \frac{3}{2}\sigma_2.$$

$$2. \sigma_1 = \frac{1}{2}\sigma_2, \quad k = 0.$$

В этом случае искомое условие неустойчивости превращается в выражение

$$\frac{d\sigma_2}{d\bar{\varepsilon}_2} = 2\sigma_2.$$

Следовательно, касательная к кривой деформирования в координатах  $\sigma_2$  —  $\bar{\varepsilon}_2$  (рис. 2) в точке  $A_1$  неустойчивого равновесия для случая 1 пересекает ось абсцисс на расстоянии  $2/3$ , а для случая 2 — на расстоянии  $1/2$  от точки  $B_2$ .

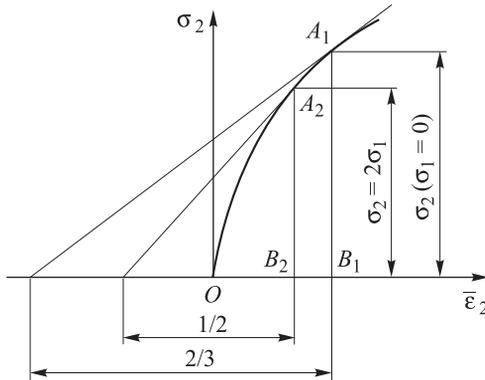


Рис. 2. Определение точек неустойчивости для цилиндрических оболочек

В цилиндрических оболочках, нагружаемых внутренним давлением, графически установлены значения окружных напряжений, уве-

личение которых при дальнейшем росте давления приводит к существенно более быстрому возрастанию относительных деформаций.

Специфика расчета несущей способности камеры ЖРД заключается в том [1], что ее корпус состоит из соединенных между собой цилиндрических оболочек, материал которых имеет разные диаграммы растяжения, поскольку внутренняя оболочка нагрета до более высоких температур, чем наружная. Параметры внутренней оболочки обозначаем одним штрихом, наружной — двумя штрихами. Вследствие малости расстояния между оболочками можно считать  $R' = R'' = R$ .

Рассматриваем камеру, не нагруженную в осевом направлении. На внутреннюю оболочку действует давление рабочих газов  $p$ , а снаружи — давление  $p_{\text{мр}}$  охлаждающей жидкости в межрубашечном (между оболочками) пространстве и контактное давление  $p_{\text{к}}$  сил связи между оболочками; наружная оболочка нагружена давлением  $(p_{\text{мр}} - p_{\text{к}})$ .

Несущую способность камеры ЖРД нельзя определять по напряжению, соответствующему точке неустойчивости (см. формулу (11)), которая полезна в качестве верхней границы возникающих в оболочках напряжений. В связи с этим можно рекомендовать следующий порядок определения работоспособности камеры.

Уравнение равновесия элемента камеры сгорания (рис. 3) в проекции на нормаль имеет вид

$$\sigma'_2 h + \sigma''_2 h'' = pR. \quad (12)$$

Диаграммы растяжения материалов внутренней и наружной оболочек при соответствующих температурах нагрева известны. Задаем окружное напряжение  $\sigma'_2$  таким, что при его возрастании наблюдается интенсивное уменьшение кривизны деформирования. Находим относительную деформацию  $\varepsilon''_2$ . Деформация оболочек складывается из деформаций  $\varepsilon'_2, \varepsilon''_2$  силового нагружения и  $\varepsilon'_{2t}, \varepsilon''_{2t}$  нагрева [6–8]:

$$\varepsilon'_{2\Sigma} = \varepsilon'_2 + \varepsilon'_{2t};$$

$$\varepsilon''_{2\Sigma} = \varepsilon''_2 + \varepsilon''_{2t},$$

где  $\varepsilon_{2\Sigma}$  — суммарная деформация, а значения  $\varepsilon_{2t}$  для разных материалов представлены в справочной литературе.

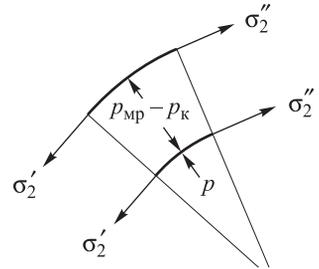


Рис. 3. Элемент цилиндрической оболочки

Равенство  $\varepsilon'_{2\Sigma} = \varepsilon''_{2\Sigma}$  позволяет найти значение  $\varepsilon'_2$ , по которому на диаграмме растяжения устанавливаем значение  $\sigma'_2$ . Давление  $p$  в камере определяем по формуле (12). Естественно, что это давление не равно рабочему давлению в двигателе. Необходимы другие приближения.

Значение напряжения в точке неустойчивости может быть отправным при назначении запаса прочности конструкции.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Феодосьев В.И. *Прочность теплонапряженных узлов ракетных двигателей*. Москва, ГНТИ «Оборонгиз», 1963, 212 с.
- [2] Коларов Д., Балтов А., Бончева Н. *Механика пластических сред*. Москва, Мир, 1979, 302 с.
- [3] Коллинз Дж. *Повреждение материалов в конструкциях*. Москва, Мир, 1984, 624 с.
- [4] Захаров А.А. *Предельное состояние материалов и конструкций*. Москва, Изд-во МГИУ, 2012, 103 с.
- [5] Прочность и пластичность. Москва, Наука, 1971, 458 с.
- [6] Работнов Ю.Н. *Механика деформируемого твердого тела*. Москва, Наука, 1979, 744 с.
- [7] Дегтярев В.П. *Деформации и разрушение*. Москва, Машиностроение, 1987, 104 с.
- [8] Гофман О., Закс Г. *Введение в теорию пластичности для инженеров*. Москва, ГНТИ «Машгиз», 1957, 280 с.

Статья поступила в редакцию 06.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Миненко В.Е., Семененко А.Н. Несущая способность цилиндрической камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/853.html>

**Миненко Виктор Елисеевич** окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1956 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носителя» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 120 научных трудов в области проектирования аэрокосмических возвращаемых аппаратов. e-mail: departm1@sm.bmstu.ru

**Семененко Александр Николаевич** окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1957 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители». Автор 10 научных трудов в области прочности оболочек. e-mail: departm1@sm.bmstu.ru