

УДК 629.764.02

Канд. техн. наук В. Н. Сиренко, П. В. Ильенко, П. В. Семененко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ДРЕНИРУЕМЫХ ОТСЕКАХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Предложена методология вероятностной оценки выполнения требований к газодинамическим параметрам в дренажных отсеках ракет-носителей в тех случаях, когда однозначно обеспечить выполнение всех ограничений невозможно. На примере РН «Зенит» показано, что при использовании статистической оценки можно существенно расширить область использования ракет-носителей с точки зрения обеспечения требуемых условий в зоне установки космических аппаратов.

Запропоновано методологію ймовірнісної оцінки виконання вимог до газодинамічних параметрів у дренажних відсіках ракет-носіїв у випадках, коли однозначно забезпечити виконання всіх обмежень неможливо. На прикладі РН «Зеніт» показано, що при використанні статистичної оцінки можна істотно розширити сферу використання ракет-носіїв з точки зору забезпечення необхідних умов у зоні встановлення космічних апаратів.

The methodology is proposed of probabilistic assessment of fulfilment of the requirements to gas dynamic parameters in launch vehicle vented bays in the cases when it is impossible to categorically ensure satisfaction of all limitations. By the example of Zenit LV it is shown that when using the statistic assessment, it is possible to considerably expand the launch vehicles application field from the viewpoint of ensuring required conditions in the spacecraft area.

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации ракет-носителей в сухих отсеках, а также в зоне полезного груза необходимо обеспечивать заданные газодинамические параметры, которые определяют прочность отсеков и комфортные условия для космических аппаратов. Возможный диапазон изменения параметров в отсеках зависит от целого ряда факторов, к числу которых относится разброс параметров атмосферы, аэродинамических характеристик, конструктивных параметров, условий движения РН. На этапе проектирования стоит задача выбрать такую конструкцию РН, чтобы изменение внутреннего давления в отсеках при предстартовой подготовке и в полете отвечало требованиям во всех возможных случаях эксплуатации.

Обычно расчет параметров в отсеках проводится в консервативной форме для предельного влияния всех факторов с учетом возможного разброса их величин. Однако в некоторых случаях однозначно обеспечить выполнение требований невозможно. Особенно это характерно для ранних этапов эксплуатации РН.

Сложная конструкция дренажных устройств, связывающих отсеки между собой и с наружным потоком, не позволяет

расчетно с высокой точностью определить расходные характеристики. Особенности возмущенного движения на участке активного движения могут привести к нерасчетному изменению давления на наружной поверхности дренажных устройств, определяющему характер вытекания газов из отсеков.

Обычно эти характеристики находят по результатам дорогостоящих экспериментальных исследований в аэродинамических трубах и барометрических камерах. Однако в тех случаях, когда объем экспериментальных исследований ограничен, возможно также уточнение перечисленных параметров после проведения первых пусков ракет путем сопоставления расчетных и измеренных параметров в отсеках. В этом случае возникает задача необходимости принятия решения о допустимости проведения первых пусков при больших разбросах параметров, определяющих работу системы дренирования, с возможным выходом расчетных значений газодинамических параметров за допустимые пределы.

В данной работе изложена методология статистического подхода при анализе результатов расчета системы дренирования, позволяющего оценить вероятность невыполнения ограничений к газодинамическим параметрам в отсеках. В качестве примера

рассмотрена одна из модификаций РН «Зенит» [1].

ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ ДРЕНИРОВАНИЯ

Рассматриваемая система дренирования (рис. 1) состоит из трех отсеков V_1, V_2, V_3 , которые связаны между собой дренажными устройствами S_{1-2} и S_{2-3} . Кроме того, каждый из отсеков связан с параметрами внешнего обтекания устройствами S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 .

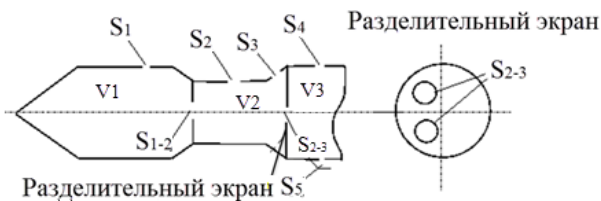


Рис. 1. Схема системы дренирования

На участке выведения часть воздуха из зоны полезного груза V_1 стравливается наружу через устройства S_1 , расположенные на головном обтекателе РН, а часть – в объем V_2 через дренажные устройства S_{1-2} , расположенные в мембране между отсеками V_1 и V_2 . Часть воздуха отсека V_1 , попавшая в отсек V_2 через дренажное устройство в мембране, вместе с воздухом V_2 частично стравливается наружу через дренажные устройства S_2 и S_3 , расположенные в отсеке V_2 , а частично – в отсек V_3 через отверстия в разделительном экране S_{2-3} . Далее весь воздух, попавший в отсек V_3 из V_2 , вместе с воздухом V_3 стравливается наружу через устройства S_4 и S_5 .

Система дренирования должна обеспечить вентилирование отсеков таким образом, чтобы для обеспечения прочности избыточное давление в отсеках и перепад давления между ними не превышали значений, приведенных в табл. 1 [1].

Таблица 1

Требования по избыточным давлениям на элементах конструкции

Отсек	ΔP , кг/см ²	
	min	max
$V_1, \Delta P=P_1-P_\infty$	-0,035	0,1462
$V_2, \Delta P=P_2-P_\infty$	-0,05	0,15
$V_3, \Delta P=P_3-P_\infty$	-0,1	0,1
На мембране $\Delta P=P_1-P_2$	-0,035	0,035
На разделительном экране		

$\Delta P=P_2-P_3$	-0,04	0,04
Давление на момент сброса обтекателя $\Delta P=P_1-P_\infty$	0	0,002

Кроме того, по условиям эксплуатации КА градиент изменения давления в зоне полезного груза (ЗПГ) не должен превышать значений, приведенных на рис. 2.

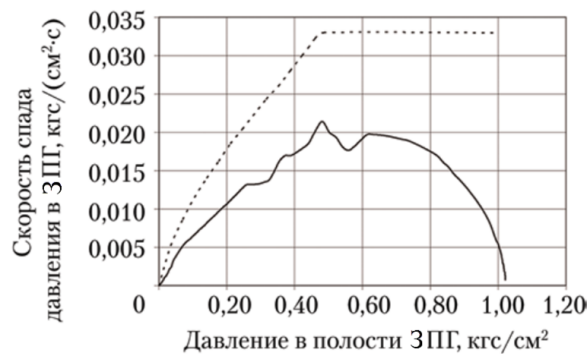


Рис. 2. Скорость спада давления в зоне полезного груза:

..... требование;
 ————— расчет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДРЕНИРОВАНИЯ

Для решения задачи определяются среднеобъемные значения газодинамических параметров в отсеках. Для этого используется система обыкновенных дифференциальных уравнений [2]

$$\begin{cases} \frac{dP_i}{dt} = -\chi \frac{P_i}{V_i \rho_i} (G_i^- + G_i^+ + G_i^{atm}); \\ \frac{d\rho_i}{dt} = -\frac{G_i^- + G_i^+ + G_i^{atm}}{V_i}, \end{cases}$$

где P_i и ρ_i – давление и плотность воздуха в i -том отсеке; V_i – его объем; χ – показатель политропы процесса (для изотермического процесса $\chi=1$); G_i^{atm} – массовый расход газа из отсека через выходные устройства в атмосферу; G_i^- – переток в предыдущий отсек; G_i^+ – переток в следующий отсек; $i=1-N$ – номер отсека; N – количество отсеков.

Расход через дренажные устройства при сверхкритическом и докритическом истечении определяется с помощью соотношения [3]

$$G = \begin{cases} \mu F \sqrt{\frac{2k}{(k-1)P_p}} \left[\left(\frac{P_{h_2}}{P} \right)^{k_1} - \left(\frac{P_{h_2}}{P} \right)^{k_2} \right] & \text{при } \frac{P_{h_2}}{P} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k_4}; \\ \mu F \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k_3} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} P_p & \text{при } \frac{P_{h_2}}{P} \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k_4}, \end{cases}$$

где P_{h_2} – давление в области, куда происходит истечение воздуха;

F – площадь отверстия;

μ – коэффициент расхода выходного отверстия;

k – показатель адиабаты (для воздуха $k=1,4$);

$$k_1=2/k; k_2=(k+1)/k; k_3=1/(k-1); k_4=k/(k+1).$$

При решении задач дренирования используются следующие исходные данные:

1. Параметры траектории, включающие в себя зависимости высоты полета H , числа Маха M , скоростного напора q и перегрузки n от времени полета.

2. Параметры изменения атмосферных давления P_h и температуры T_h в зависимости от высоты над уровнем моря.

3. Характеристики системы дренирования РКН:

- количество дренируемых отсеков;
- свободные объемы дренируемых отсеков;

- начальные параметры в отсеках P_0 и T_0 ;

- количество дренажных устройств;
- расходные характеристики дренажных устройств $Cd = f(\Delta P_{др.устр})$;

- коэффициенты давления на дренажных устройствах связи с атмосферой $Cp = (P_{др.устр} - P_h) / q$.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Выбранная схема дренирования для номинальных исходных данных обеспечивает выполнение всех требований. Однако при учете разбросов для предельных сочетаний исходных данных имеет место невыполнение требования по ограничению перепада давления на разделительном экране. В случае реализации максимального давления в

отсеке V_2 и минимального – в отсеке V_1 перепад может достигать $0,044 \text{ кгс/см}^2$ (при ограничении $0,04 \text{ кгс/см}^2$).

Для определения вероятности выполнения данного требования была проведена обработка параметров дренирования по результатам статистических расчетов со случайным выбором исходных данных из области возможных значений.

Математическое ожидание m и среднеквадратическое отклонение σ для газодинамических параметров вычисляются по соотношениям [4]

$$m = \sum_{i=1}^n x_i / n;$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right],$$

где n количество опытов.

Для $n > 500$ полученные расчетные газодинамические параметры будут лежать в полосе $m \pm 3\sigma$ с вероятностью, равной $0,997$.

В зависимости от того, какие законы распределения реализуются для разбросов исходных данных, показатели вероятности выполнения требуемых условий могут сильно отличаться.

РАВНОМЕРНЫЙ ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

О непрерывных случайных величинах заранее известно, что их возможные значения лежат в пределах некоторого определенного интервала. Кроме того, известно, что в пределах этого интервала все значения случайной величины одинаково вероятны. О таких случайных величинах говорят, что они распределяются по закону равномерной плотности

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta - \alpha} & \text{при } \alpha < x < \beta; \\ 0 & \text{при } x < \alpha \text{ и } x > \beta. \end{cases}$$

Функция распределения (рис. 3) по закону равномерной плотности имеет следующий вид:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < \alpha; \\ \frac{x-\alpha}{\beta-\alpha} & \text{при } \alpha < x < \beta; \\ 1 & \text{при } x > \alpha, \end{cases}$$

x – случайная величина, равномерно распределенная на участке (α, β) .

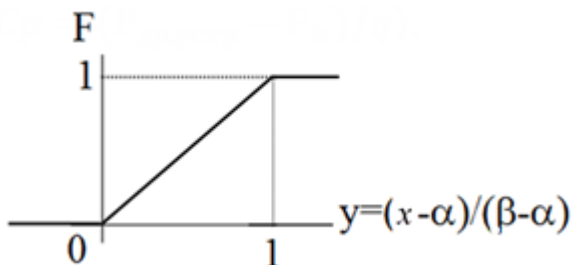


Рис. 3. Функция распределения по закону равномерной плотности

Тогда, если известно, что величина x лежит в пределах от α до β и равномерно распределена на этом участке, для определения x , как случайной величины, используют следующее соотношение:

$$x = \alpha + y \cdot (\beta - \alpha),$$

где y – число, определенное по рис. 3, соответствующее случайно определенному значению F .

НОРМАЛЬНЫЙ ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Нормальный закон распределения – это наиболее часто встречающийся на практике. Главная особенность, выделяющая нормальный закон среди других законов, состоит в том, что он является предельным законом, к которому приближаются другие законы распределения при весьма часто встречающихся типичных условиях.

Нормальный закон распределения характеризуется плотностью вероятности вида:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}},$$

где m – математическое ожидание;

σ – среднеквадратическое отклонение величины x .

Функция распределения (рис. 4) для нормального закона распределения имеет следующий вид:

$$F(\alpha < x < \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx.$$

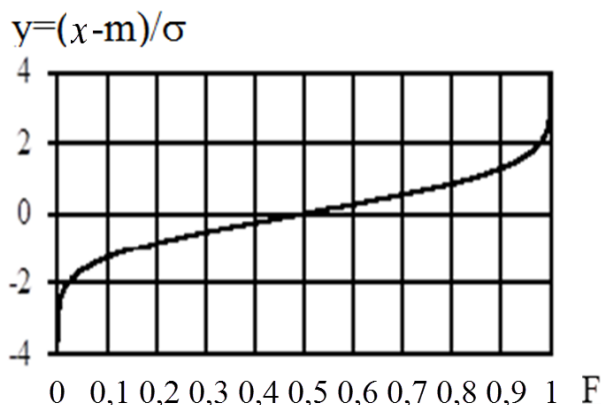


Рис. 4. Функция распределения для нормального закона распределения

Если известно, что величина x имеет среднее значение m и погрешность $\pm n\%$ с нормальным законом распределения, то для определения x как случайной величины используют следующее соотношение:

$$x = m + n \cdot y / k,$$

где y – число, определенное по рис. 4, соответствующее случайно определенному значению F ; k – число среднеквадратических отклонений, которое нужно отложить вправо и влево от центра рассеивания m для того, чтобы вероятность попадания в полученный интервал была равной p (табл. 2) (обычно $k=3$).

Таблица 2

Зависимость коэффициента k от вероятности p

p	0,8	0,84	0,88	0,92	0,96	0,98	0,997	0,999
k	1,28	1,4	1,55	1,75	2,05	2,33	3	3,29

Для параметров траектории и стандартной атмосферы закон будет нормальным, так как на них влияет очень много факторов.

Разбросы для свободных объемов и площадей дренажных устройств вызваны неточностями в изготовлении конструкции,

что, как известно, приводит к нормальному закону распределения разбросов.

Расходные характеристики дренажных устройств определялись экспериментальным путем, поэтому закон распределения разбросов будет нормальным.

Закон распределения разбросов коэффициентов давления на дренажных устройствах не известен. В таких случаях принято использовать равномерный закон распределения, так как он приводит к более консервативным результатам.

Разбросы на начальные параметры можно не учитывать, так как они очень слабо влияют на выполнение требуемых условий.

Следует отметить, что для исходных данных (параметры траектории и атмосферы, расходных характеристик) корректнее использовать понятие случайной функции, для которой берется одно случайное число во всем диапазоне ее изменения.

Статистический анализ (рис. 5) с описанными выше допущениями по законам распределения разбросов исходных данных показал, что вероятность выполнения требования на разделительный экран составляет 0,97. Такое значение допустимо для допуска этой конструкции в эксплуатацию.

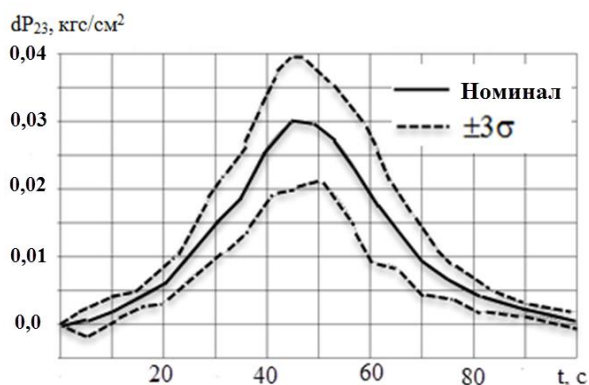


Рис. 5. Результаты статистического анализа перепада давления на разделительном экране

Впоследствии, после получения опытных данных по измерению фактических значений расходных дренажных устройств, был проведен уточненный анализ параметров дренирования, который показал, что перепад давления на разделительном экране не превышает 0,038 кгс/см² [5].

Выводы

Использование статистических подходов при анализе дренирования позволяет решить вопрос организации пусков ракет-носителей в тех случаях, когда опытных и экспериментальных данных недостаточно для безусловного выполнения требований к газодинамическим параметрам в отсеках РН.

Список использованной литературы

1. Расчет параметров дренирования в отсеках БПГ, РБ и ПО РКН «Зенит-3SL» на участке выведения. Зенит-3SL 21.13651.122 ОТ: Техн. отчет. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 1998. – 104 с.
2. Отработка газодинамических и конструктивных параметров системы термостатирования и локального обдува X-панелей КА «Глобалстар»: Отчет о НИР/ИТМ НАНУ. – № 12-12/97. – 1997. – 79 с.
3. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
4. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. – 551 с.
5. Ракета космического назначения «Зенит-3SL». Ракета-носитель «Зенит-2S». Расчет аэродинамический. Ч. 1. Материалы по аэрогазодинамике. Кн. 5. «Зенит-2S»/Thuraya P01.05: Материалы РБД. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 2000. – 120 с.

Статья поступила 30.01.2017