

УДК 629.7.018.3:621.454.2

М.А. Бондарь, канд. техн. наук Г.И. Ильин,
канд. техн. наук В.И. Порубаймех, С.А. Демченко

К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ПРАКТИЧЕСКИ ПОЛНОЙ НЕВЕСОМОСТИ НА СТЕНДАХ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

Рассмотрены способ и вариант устройства, позволяющие компенсировать аэродинамическое сопротивление капсулы с исследуемым объектом при испытаниях на стендах свободного падения.

Розглянуто спосіб і варіант пристрою, що дозволяють компенсувати аеродинамічний опір капсули з досліджуванним об'єктом під час випробовувань на стендах вільного падіння.

Method and version of the facility, enabling balancing of aerodynamic resistance of the capsule with an object of study during tests on the free fall benches, are considered.

Двигатель космического аппарата (КА) может неоднократно запускаться в условиях свободного полета по орбите, когда гравитационные силы и ускорения имеют значения на много порядков меньше, чем, например, в земных условиях. В связи с этим возникает необходимость специальных исследований поведения жидкости в баках КА с ЖРД при их запуске в условиях практически полной невесомости.

В последнее время широкое распространение получили наземные лабораторные установки для создания условий невесомости, основанные на принципе свободного падения испытуемого объекта.

В процессе этого падения на объект действуют в основном сила тяжести объекта G и сила аэродинамического сопротивления воздуха

$$N = c_x S_k \frac{\rho V_k^2}{2}, \quad (1)$$

где c_x – коэффициент аэродинамического сопротивления объекта; S_k – площадь миделевого сечения капсулы; ρ – плотность воздуха; V_k – скорость свободного падения капсулы.

Важным фактором для оценки степени невесомости является остаточная перегрузка $n_{ост}$, действующая на объект в процессе падения,

$$n_{ост} = \frac{N}{G} = \frac{c_x S_k \rho V_k^2}{2G}. \quad (2)$$

На рис. 1 показаны зависимости силы аэродинамического сопротивления N и

остаточной перегрузки $n_{ост}$ от времени падения, рассчитанные по выражениям (1) и (2) для аэродинамически обтекаемой модели капсулы стенда невесомости ГП "КБ "Южное" с высотой свободного падения ~ 40 м.

Исходные данные для расчета: диаметр цилиндрической капсулы $d = 0,9$ м; площадь $S_k = 0,636$ м²; $c_x \approx 0,3$; $G = 150$ кгс; $\rho = 1,29 \cdot 10^{-1}$ кгс·с²/м⁴.

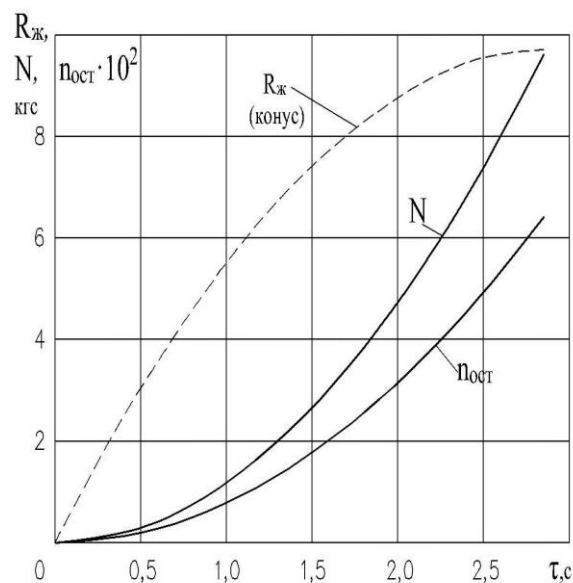


Рис. 1. Зависимость тяги жиклера $R_{ж}$, силы аэродинамического сопротивления N и остаточной перегрузки $n_{ост}$ от времени свободного падения

Из рис. 1 видно, что при изменении времени падения капсулы в атмосфере от 0,5 до 2,85 с сила аэродинамического сопро-

тивления растет от 0,3 до 9,65 кгс, а остаточная перегрузка, действующая на капсулу, увеличивается от $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ до $6,4 \cdot 10^{-2}$. Такие значения остаточной перегрузки являются сравнительно высокими, в связи с чем получить практически полную невесомость испытуемого объекта при падении в атмосфере не представляется возможным. Это вызывает необходимость принятия специальных мер для компенсации аэродинамического сопротивления капсулы.

Известно несколько способов устранения влияния аэродинамического сопротивления.

Одним из них является уменьшение плотности воздуха путем создания разрежения внутри специальной шахты, в которой происходит падение объекта [1]. Однако данный способ очень сложен и дорог.

На практике находит применение способ "капсулированного контейнера" [2]. Контейнер с испытуемой моделью топливного бака помещают внутрь специальной капсулы, а затем создают их раздельное падение. Скорость движения контейнера относительно капсулы мала, вследствие чего незначительна и сила аэродинамического сопротивления, воздействующая на контейнер, что способствует созданию практически полной невесомости контейнера с испытуемой моделью. К недостаткам данного способа относятся необходимость разработки дополнительного устройства для создания раздельного движения контейнера и капсулы, а также значительное увеличение веса и габаритов падающей системы.

В статье рассмотрены способ и вариант устройства аэродинамической компенсации [3], позволяющие устранить указанные выше недостатки. Силу аэродинамического сопротивления предлагается компенсировать силой тяги, изменяющейся в процессе падения по определенному закону. Схема предлагаемого устройства показана на рис. 2.

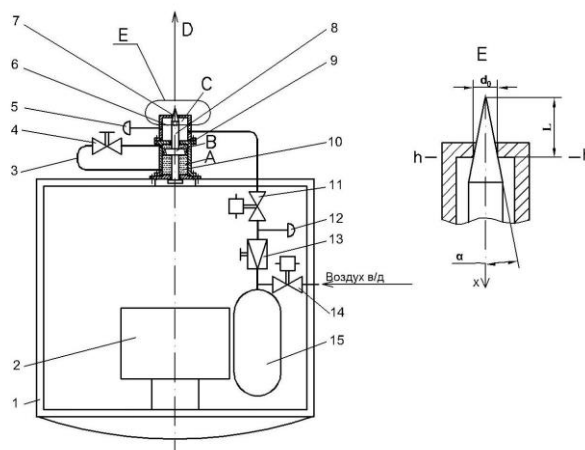


Рис. 2. Схема устройства аэродинамической компенсации контейнера невесомости

Устройство содержит аэродинамический компенсатор, состоящий из двух частей – воздушной 6 и жидкостной 10, соединенных между собой гидравлическим трубопроводом 3 с установленным в нем регулирующим дросселем 4. Внутри компенсатора находится подвижный шток 8 с дроссельной иглой 7 и поршнем 9, разделяющим жидкостную часть 10 на полости А и В. Воздух высокого давления подается в полость С из баллона 15 через редуктор 13 и электропневмоклапан (ЭПК) 11. Перед началом испытания баллон 15 при открытии ЭПК 14 заполняется воздухом до необходимого давления (~ 200 кгс/см²). Редуктор 13 при открытии ЭПК 11 настраивается на заданное давление в воздушной части 6 компенсатора по показаниям датчиков давления 12 и 5, после чего ЭПК 11 закрывается. Затем шток 8 перемещают в направлении стрелки D до полного закрытия дроссельной иглой 7 жиклерного отверстия d_0 .

По команде от системы управления происходит сброс контейнера 1 с испытуемым объектом 2 при одновременной подаче напряжения на открытие ЭПК 11. При этом воздух высокого давления поступает в полость С компенсатора и, воздействуя на дроссельную иглу 7, начинает перемещать шток 8 с поршнем 9 в направлении, противоположном стрелке D. В результате этого между дроссельной иглой 7 и отверстием d_0 образуется кольцевое сечение, через которое воздух истекает в атмосферу, создавая тем самым тягу, направленную на компенсацию.

сацию аэродинамического сопротивления контейнера. При перемещении штока 8 с поршнем 9 происходит перетекание жидкости из полости А в полость В по трубопроводу 3 с регулируемым дросселем 4. Путем предварительной настройки дросселя 4 регулируется скорость течения жидкости в трубопроводе 3, а соответственно и скорость перемещения штока 8 с дроссельной иглой 7, открывающей кольцевое отверстие, через которое происходит истечение воздуха для создания заданной тяги.

Нетрудно установить, что площадь кольцевого отверстия в сечении h-h будет определяться выражением

$$S_{кол} = \pi d_0 \operatorname{tg} \alpha \cdot x - \pi \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot x^2. \quad (3)$$

Эквивалентный диаметр отверстия в сечении h-h

$$d_{экр} = \sqrt{4S_{кол} / \pi} = 2\sqrt{d_0 \operatorname{tg} \alpha \cdot x - \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot x^2}. \quad (4)$$

Расчетные зависимости $S_{кол}$ и $d_{экр}$ от хода штока x для конической дроссельной иглы приведены на рис. 3.

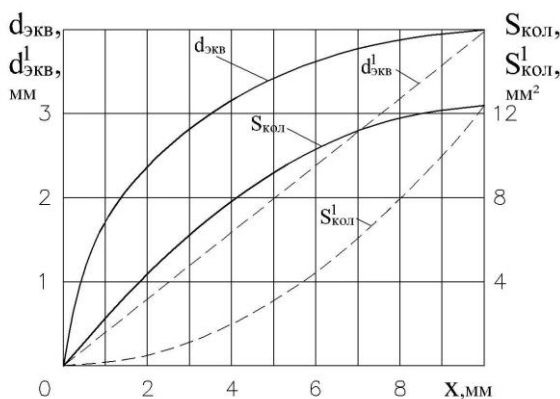


Рис. 3. Зависимость площадей кольцевого дроссельного отверстия и эквивалентных диаметров отверстий от хода штока для конической иглы штока ($S_{кол}, d_{экр}$)

и оптимального варианта штока ($S_{кол1}, d_{экр1}$)

Определим зависимость тяги $R_{жс}$ при истечении воздуха через кольцевое отверстие от хода штока x по формуле

$$R_{жс} = QR_{y0} = \frac{A_n}{\sqrt{RT}} S_{жс} p_{жс} R_{y0} \mu, \quad (5)$$

где Q — расход воздуха через жиклер; R_{y0} — удельная тяга, принятая равной 57 с; $S_{жс} = \pi d_{жс}^2 / 4$ — площадь жиклера;

$R = 29,3$ кг·м/(кг·град) — газовая постоянная; T — температура воздуха перед жиклером; μ — коэффициент расхода;

$$A_n = \sqrt{kg \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \approx 2,15 \frac{M^{-2}}{c} - \text{газодинамический комплекс; } k = 1,4 - \text{показатель адиабаты для воздуха; } g = 9,81 \text{ м/с}^2 - \text{ускорение силы тяжести.}$$

Приняв $\mu = 0,85$ и $T = 293$ К и подставив численные значения в выражение (5), получим

$$R_{жс} = 0,88 p_{жс} d_{экр}^2 = 1,11 p_{жс} S_{кол}, \quad (6)$$

где $p_{жс}$ — давление в рабочей камере устройства перед кольцевым отверстием.

Давление $p_{жс}$ выбираем из условия равенства тяги $R_{жс}$ в конце падения ($x = l$) силе аэродинамического сопротивления N , т.е. принимаем $R_{жсl} = N_d$.

С учетом выражения (6) можно записать

$$N_d = 0,88 p_{жсl} d_{экр}^2 \text{ или } p_{жсl} = \frac{N_d}{0,88 d_{экр}^2}.$$

Сила аэродинамического сопротивления N_d , соответствующая концу полета капсулы невесомости на стенде ($\tau_k = 2,85$ с), равна 9,65 кгс (рис. 1), а эквивалентный диаметр дроссельного отверстия в этот момент $d_{экрl} = d_0 \approx 0,4$ см при $l = 1$ см. Исходя из этого, нетрудно определить, что необходимое давление в камере устройства $p_{жсl} \approx 70$ кгс/см².

Зависимость тяги жиклера $R_{жс}$ от хода штока x можно записать в виде:

$$R_{жс} = 0,88 p_{жс} 4(d_0 \operatorname{tg} \alpha \cdot x - \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot x^2). \quad (7)$$

Примем: $p_{жс} = 70$ кгс/см²; $d_0 = 0,4$ см; $\alpha = 11^\circ$.

Тогда выражение (7) примет вид:

$$R_{жс} = 18,95x - 9,21x^2. \quad (8)$$

Зависимость тяги $R_{жс}$ от хода штока x для рассматриваемого случая приведена на рис. 4.

Зависимость тяги $R_{жс}$ от времени падения капсулы при условии равномерного

движения штока устройства приведена также на рис. 1.

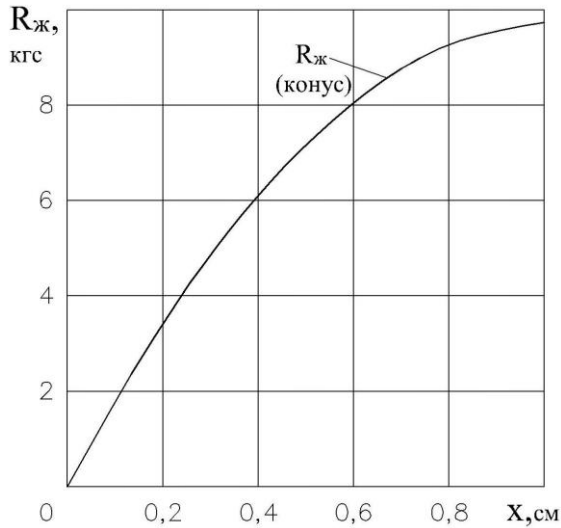


Рис. 4. Зависимость тяги $R_{ж}$ от хода штока x

Из условия равенства сил аэродинамического сопротивления N и тяги $R_{ж}$ на пути падения капсулы определим оптимальную площадь кольцевого сечения дроссельного отверстия $S_{кол}^1$. При этом за время τ_k шток устройства перемещается на длину l . Движение штока считаем равномерным со скоростью $V_{умт} = l/\tau_k$. Тогда текущий путь штока $x = V_{умт} \tau = \frac{l}{\tau_k} \tau$, отсюда $\tau = \frac{\tau_k}{l} x$. Скорость падения капсулы равна $V_k = g \tau = \frac{g \tau_k}{l} x$. Подставив это выражение в формулу (1), получим

$$N = \frac{c_x S_k \rho g^2 \tau_k^2}{2l^2} x^2. \quad (9)$$

Из условия равенства $N = R_{ж}$ с учетом выражений (6) и (9) можно записать для оптимальной площади кольцевого сечения

$$S_{кол}^1 = \frac{c_x S_k \rho g^2 \tau_k^2}{2l^2 \cdot 1,11 p_{ж}} x^2 \quad (10)$$

и для оптимального эквивалентного диаметра кольцевого сечения

$$d_{экв}^1 = \sqrt{4S_{кол}^1 / \pi}. \quad (11)$$

Для профильной иглы площадь текущего сечения

$$S_{вн}^1 = S_0 - S_{кол}^1 = \frac{\pi}{4} d_0^2 - \frac{\pi}{4} (d_{экв}^1)^2, \quad (12)$$

а диаметр текущего сечения

$$d_{вн} = \sqrt{4S_{вн}^1 / \pi}, \quad (13)$$

где d_0 – максимальный диаметр жиклера (рис. 1).

Расчетный оптимальный профиль дроссельной иглы, полученный с использованием выражения (13), приведен на рис. 5.

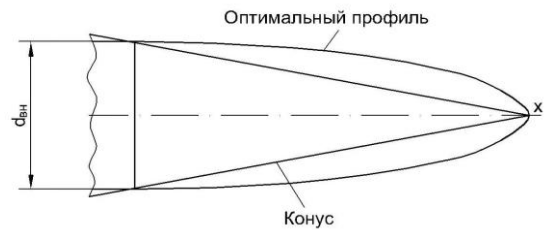


Рис. 5. Оптимальный профиль дроссельной иглы

Таким образом, предложенное техническое решение позволяет создавать практически полную невесомость испытуемого объекта на стендах свободного падения, что максимально приближает условия проведения испытаний к натурным условиям полета космических объектов на околоземных орбитах, и тем самым повышает надежность экспериментальной отработки.

Список использованной литературы

1. Василина В.Г. и др. Автономная экспериментальная отработка агрегатов и систем пневмогидросистемы подачи ЖРДУ: Учеб. пособие/В.Г. Василина, Г.И. Ильин, В.Ф. Несвит, В.И. Перлик. – Харьков: ХАИ, 2005. – 130 с.
2. А.с. №41372 СССР, МПК G01M 19/00. Устройство для создания условий невесомости испытуемой жидкости, помещенной в контейнер / Г.И. Ильин, О.В. Носков, В.А. Остапов; Заявлено 06.07.67.
3. Заявка № а201214392, МПК G01M 19/00. Способ создания невесомости контейнера на стенде свободного падения и устройство для осуществления способа / М.А. Бондарь, С.А. Демченко, Г.И. Ильин, В.И. Порубаймех; Заявлено 17.12.2012.

Статья поступила 15.01.2014