

УДК 629.7:629.018

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-44-55

Для цитирования: Астахов С. А. Особенности достижения предельных значений скорости трековых испытаний летательных аппаратов баллистического типа // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 1. С. 44–55. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-44-55.

For citation: Astakhov S. A. [Features of achievement of limiting speed values of track tests of ballistic type aircraft]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 1, P. 44–55. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-44-55.

Особенности достижения предельных значений скорости трековых испытаний летательных аппаратов баллистического типа

С. А. Астахов

Федеральное казенное предприятие «Государственный казенный научно-испытательный полигон авиационных систем имени Л. К. Сафронова» (ФКП «ГкНИПАС имени Л. К. Сафронова»)
Российская Федерация, 140250, Московская обл., г. о. Воскресенск, г. Белоозерский
E-mail: info@gknipas.ru; aviatex@mail.ru

Разработка высокоскоростных летательных аппаратов баллистического типа со скоростью, превышающей 1000 м/с, в настоящее время является приоритетной задачей за рубежом и в России. Эффективность таких новых изделий подтверждается трековыми испытаниями со скоростью их применения. Испытательные полигоны с рельсовыми трассами существуют практически во всех странах, например в США их более 15: двухрельсовые, монорельсовые и различные их комбинации, различающиеся длиной, шириной рельсовой пары, рельсами и конструкцией самого трека, включая герметичную оболочку над рельсовой дорожкой для заполнения ее более легкой средой. Самый длинный трек США Holloman AFB, расположенный в New Mexico, длиной 15536 м. Располагают трековыми полигонами с различной длиной и своим особенным исполнением Англия, Франция, Германия, Канада, Италия, Япония, Индия, Китай, Корея, Турция и другие страны, включая Африканский континент. Высокоскоростные полигонные испытания в России проводятся на экспериментальной установке «Ракетный рельсовый трек 2500», размещенной на территории ФКП «ГкНИПАС имени Л. К. Сафронова». Экспериментальная установка состоит из рельсового пути, размещенного на специальном основании, обеспечивающем необходимый вертикальный профиль пути с участками подъема и прямолинейного горизонтального движения, а также технологический участок снижения для торможения подвижного технологического оборудования. Испытуемое изделие размещается на ракетной трековой каретке, движущейся по рельсам на опорах скольжения. Для придания ускорения трековой каретке используются ракетные двигатели твердого топлива, тяга которых выбирается на основе баллистических расчетов для достижения требуемой скорости испытания. Длина трека играет важную роль для достижения предельных скоростей разгона подвижного трекового снаряжения. Огромное аэродинамическое сопротивление, пропорциональное квадрату скорости движения каретки при испытаниях на высоких скоростях приводит к необходимости уменьшать мидель и массу подвижной установки. Увеличение тяги двигателей приводит к росту массы и стоимости трекового снаряжения, а также к необходимости увеличения запаса прочности опор скольжения. Однако прирост скорости испытаний можно достичь при замене воздушной среды газами, обладающими существенно меньшей плотностью, например гелием. Трековые испытания новых летательных аппаратов или их элементов хотя и дешевле летных испытаний, однако достаточно дороги. В этой связи работа по теоретической оценке замены среды из окружающего воздуха на гелий, а также на смеси гелия с воздухом при разной его концентрации в крытой галерее на трековой рельсовой дорожке является новой, актуальной и практически полезной задачей. В работе выполнено численное моделирование задачи сверхзвукового обтекания потоком смеси гелия с воздухом при различном их объемном соотношении. Получены численные значения аэродинамического сопротивления при скорости движения

каретки равной 830 м/с. Приведены результаты численных расчетов динамики движения 3D-модели монорельсового трекового снаряжения, которые планируются для использования при проведении натурных огневых экспериментов.

Ключевые слова: трековые испытания, ракетная каретка, собственные частоты, гелиевая среда, вибрационное ускорение, спектральная плотность.

Features of achievement of limiting speed values of track tests of ballistic type aircraft

S. A. Astakhov

Scientific Test Range of Aviation Systems named after L. K. Safronov
Beloozersky, Moscow region, 140250, Russian Federation
E-mail: info@gknipas.ru ; aviatrix@mail.ru

The development of high-speed ballistic aircraft with speeds exceeding 1000 m/s is currently a priority abroad and in Russia. The effectiveness of new such products is confirmed by track tests at the speed of their use. Test sites with rail tracks exist in almost all countries, for example in the USA there are more than 15 of them. Double-rail, monorail and various combinations thereof, differing in length, width of the rail pair, rails and the design of the track itself, including a sealed shell over the rail track to fill it with a lighter one environment. The longest track in the USA is Holloman AFB, located in New Mexico with a length of 15536 m. They have track ranges with different lengths and their own special design in England, France, Germany, Canada, Italy, Japan, India, China, Korea, Turkey and other countries, including African continent. High-speed range tests in Russia are carried out on the experimental installation "Rocket Rail Track 2500", located on the territory of the FKP "GkNIPAS named after L. K. Safronov". The experimental installation consists of a rail track placed on a special base, providing the necessary vertical profile of the track with sections of ascent and straight horizontal movement, as well as a technological descent section for braking moving technological equipment. The product under test is placed on a rocket track sled moving along rails on sliding supports. To accelerate the track carriage, solid fuel rocket engines are used, the thrust of which is selected based on ballistic calculations to achieve the required test speed. The length of the track plays an important role in achieving the maximum acceleration speeds of moving track equipment. The enormous aerodynamic drag, proportional to the square of the speed of movement of the carriage, when tested at high speeds, leads to the need to reduce the midsection and mass of the mobile unit. An increase in engine thrust leads to an increase in the weight and cost of track equipment, as well as to the need to increase the safety margin of sliding supports. However, an increase in test speed can be achieved by replacing the air medium with gases that have a significantly lower density, for example, helium. Track testing of new aircraft or their elements, although cheaper than flight testing, is quite expensive. In this regard, work on the theoretical assessment of replacing the medium from ambient air with helium, as well as with a mixture of helium and air at different concentrations in an indoor gallery on a track rail track, is a new, relevant and practically useful task. The work performed a numerical simulation of the problem of supersonic flow around a helium-air mixture at different volumetric ratios. Numerical values of aerodynamic resistance were obtained at a sled speed of 830 m/s. The results of numerical calculations of the motion dynamics of a 3D model of monorail track equipment, which are planned for use in conducting full-scale fire experiments, are presented.

Keywords: Track tests, rocket sled, natural frequencies, helium medium, vibration acceleration, spectral density.

Введение

Из всех известных газов гелий обладает наилучшей совокупностью свойств, пригодных для применения в условиях испытаний на трековом стенде. Во-первых, гелий и его смеси с воздухом не токсичны. Во-вторых, гелий обладает малой молекулярной массой, низкой плотностью

и незначительной вязкостью. Его газовая постоянная при нормальных условиях (НУ) равна $R = 2077,2$ Дж/(кг·К); плотность (НУ) $\rho_{\text{He}} = 0,1785$ кг/м³ в 7,264 раз меньшая плотности воздуха; динамическая вязкость $\nu_{\text{He}} = 19$ мкПа·с; теплоемкость $C_p = (5,2 - 5,27)$ кДж/(кг·°С); коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,15$ Вт/(м·К); объем кмоль He $\mu_v = 22,42$ м³/кмоль, показатель адиабаты $k = C_p / C_v = 1,67$.

Крытый участок трековой дорожки (в дальнейшем назовем гелиевая галерея или тоннель) представляем в виде цилиндра радиусом R_T длиной L , разрезанного вдоль пополам. Объем тоннеля будет равен объему галереи V_T и объему гидродинамического лотка, выполненного вдоль тоннеля V_L ниже уровня горизонта

$$V_T = \int_0^L S_T(x) dx, \quad (1)$$

здесь $S_T(x)$ – поперечное сечение надземного участка крытой галереи.

$$V_L = \int_0^L S_L(x) dx, \quad (2)$$

здесь $S_L(x)$ – поперечное сечение участка гидродинамического лотка крытой галереи, расположенного ниже уровня основания рельсовой дорожки.

Участок объемом V_T при длине галереи $L = 600$ м $R_T = 1,75$ м упрощенно можно представить

$$V_T = \frac{\pi}{2} R_T^2 \cdot L = 2886,336 \text{ м}^3. \quad (3)$$

Объем газа, занимаемый лотком при размерах прямоугольного профиля шириной $b = 1$ м, глубиной $h = 1$ м

$$V_L = b \cdot h \cdot L = 600 \text{ м}^3.$$

При заполнении галереи гелием предполагаем, что воздух – более плотный газ, находящийся в тоннеле, будет вытесняться через лоток и выходить наружу в атмосферу. Учитывая высокую стоимость гелия, необходимо выполнить оценки потребного количества гелия для проведения испытания с разной концентрацией воздушно-гелиевой среды, далее провести имитационные численные расчеты с целью определения оптимальной концентрации воздушно-гелиевой среды для достижения максимального эффекта снижения аэродинамического сопротивления и прироста скорости трековой каретки с объектом испытания при фиксированной тяге ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ). Результаты теоретического прогноза в дальнейшем подлежат валидации после построения крытой галереи и проведения огневых технологических запусков монорельсового снаряжения ракетной каретки с измерением вибраций при скорости 830 м/с.

Необходимо подготовить среду в галерее с разным содержанием гелия в смеси с воздухом, начиная от случая с чисто гелиевой средой. Для проведения испытания в тоннеле со 100-процентной гелиевой средой нет необходимости вытеснять воздух гелием из лотка, поскольку рельсовый трек находится выше уровня лотка. С другой стороны, разгон трековой каретки до скорости 2,5 М и вход ее в участок с измененной средой сопряжен с взаимодействием скачков уплотнения вокруг носовой части объекта испытания и скачков, отраженных от поверхности рельсовой дорожки, а также от края лотка, что неизбежно вызовет перемешивание среды и неравномерности параметров среды по высоте сечения галереи. В этой связи целесообразно заблаговременно предусмотреть перемешивание воздуха и гелия. Что касается среды галереи в виде чистого гелия, здесь все проще. Единственно, перед запуском надлежит выполнить хроматографический анализ в различных точках по сечению и длине гелиевого участка.

Полный объем гелиевой галереи составляет примерно 3500 м³. Потребная масса гелия для заполнения коридора равна

$$N_{\text{He}} = V_{\Sigma} / \mu_v = 156,11 \text{ кмоль},$$

$$m_{\text{He}} = M \cdot V_{\Sigma} / \mu_v = 624,91 \text{ кг.} \quad (4)$$

Скорость звука в гелиевой среде равна 965 м/с.

При заполнении гелием массой m_{He} крытой галереи с атмосферным воздухом, возникнет избыточное давление, определяемое зависимостью

$$p_B + p_{\text{He}} = \frac{m_B}{V_{\Sigma}} R_B \cdot T(K) + \frac{m_{\text{He}}}{V_{\Sigma}} R_{\text{He}} \cdot T(K). \quad (5)$$

При массе 625 кг избыточное суммарное давление равно 2 атм.

По истечении времени давление будет выравниваться с атмосферным, вытесняя воздух из крытого объема. На рис. 1 представлена фотография монорельсовой трековой каретки с модельным объектом испытания.



Рис. 1. Изображение монорельсовой трековой каретки с модельным объектом испытания.
Состав: передний башмак с кронштейном для крепления модельного объекта испытания; РДТТ;
задний башмак

Fig. 1. Image of a monorail track sled with a model test object.
Composition: Front shoe with bracket for fastening a model test object; Solid propellant
rocket motor; rear shoe

Тяга стартового РДТТ обеспечивает необходимое ускорение для достижения требуемой скорости испытания. При необходимости для увеличения тяги ракетная каретка (рис. 1) может быть скомпонована из двух РДТТ, размещенных в виде поезда из нескольких ступеней ускорителей, соединенных последовательно с головной приборной кареткой [1]. В кронштейнах размещаются элементы автоматики управления и, при необходимости, датчики виброускорений.

В США на базе трека Холломан, имеющего длину 15536 м, создан специальный крытый тоннель для имитации условий разряженной атмосферы, который может заполняться газообразным гелием для снижения аэродинамического сопротивления среды при испытаниях [2; 3]. Длина крытого тоннеля составляет 3353 м, а его диаметр равен 4,67 м.

Целью настоящей работы является численное моделирование газодинамического обтекания 3D-модели подвижного трекового снаряжения в тоннеле, заполненном гелием и смесями гелия с воздухом в различных концентрациях. Расчеты обтекания выполняются разработанной программой с использованием комплекса Flow Vision [4–10], а динамика движения 3D-модели ракетной каретки монорельсового исполнения, разработанной программой, учитывающей

упругую конструкцию подвижного трекового снаряжения, схематизированную пространственным расположением балок [11–13], – с использованием программного комплекса Амесим [14–19]. В обоих случаях присутствует 3D-модель реальной рельсовой дорожки, включая вертикальный и горизонтальный профиль трекового стенда полигона ФКП «ГкНИПАС им. Л. К. Сафронова» и 3D трековой каретки с модельным объектом испытания (ТК-ОИ).

Рассматривается движение системы ТК-ОИ со сверхзвуковой скоростью 846,8 м/с, примерно 2,5М на 0,31 с каретка входит в тоннель, заполненный гелием. Расчетная тяга РДТТ принята 4,3 тн с.

На рис. 2–4 представлены результаты моделирования, где скорость движения объекта представлена в цветовой гамме [13].

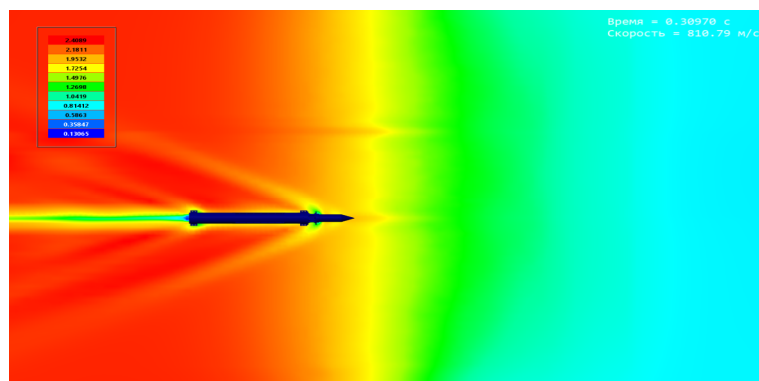


Рис. 2. Изображение обтекания воздушным потоком элементов трековой каретки и объекта испытания перед входом в галерею с гелиевой средой. Вид сверху

Fig. 2. Image of the air flow around the elements of the track carriage and the test object before entering the gallery with a helium environment. View from above

Скачки уплотнения при подходе к границе разделяющей две среды: воздушную и гелиевую. Далее, представлен момент входа ТК-ОИ через границу раздела сред в гелиевый участок. При этом увеличивается угол косых скачков уплотнения при обтекании элементов трековой каретки с объектом испытания при вхождении в гелиевую среду.

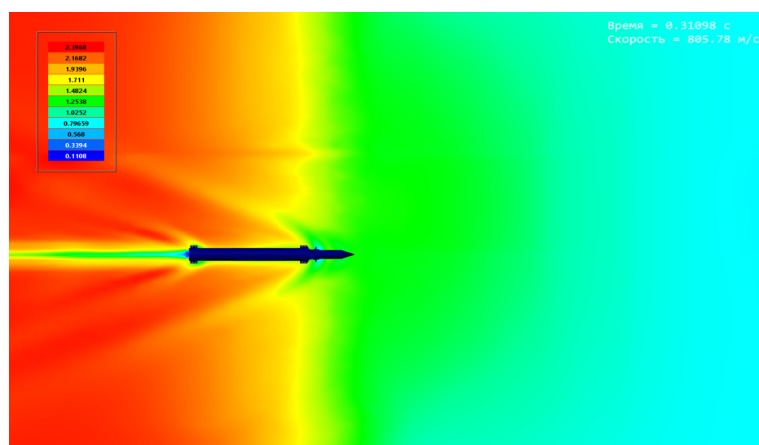


Рис. 3. Распределение скоростей среды на элементах ТК-ОИ при прохождении начального участка с гелиевой средой

Fig. 3. Distribution of medium velocities on the TK-OI elements when passing through the initial section with a helium medium

Из рис. 3 видно, что скачок уплотнения на коническом обтекателе объекта испытания реализуется со скоростью 1,4 М, т. е. значительно меньшей скорости движения самой каретки 2,5 М. Этот парадокс вполне понятен. В гелиевой среде скорость звука при наружной температуре 20 °С примерно 956 м/с, т. е. почти в три раза выше. Число Маха резко уменьшается, а угол Маха возрастает. При прохождении кареткой начального участка с гелиевой средой изменяется геометрия скачков уплотнения в гелиевой среде. Вид представляет собой интерференцию прямых скачков уплотнения с косыми. Меняется физическая картина сверхзвукового обтекания конических тел. Угол косога скачка уплотнения в гелиевой среде на коническом обтекателе увеличивается до 74–75 градусов.

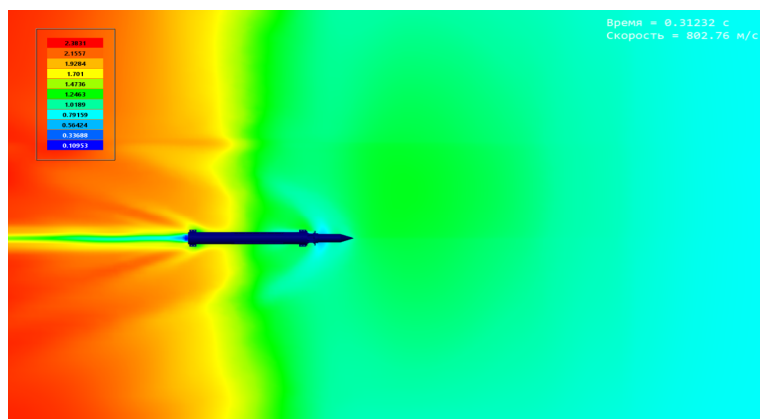


Рис. 4. Картина сверхзвукового обтекания элементов трекового подвижного снаряжения в воздушной и гелиевой среде. Вид сверху

Fig. 4. Picture of supersonic flow around elements of track moving equipment in air and helium. View from

На изображении просматриваются углы Маха в воздушном потоке – острый угол примерно равный 60° и угол больший 75–80° в гелиевой среде. На рис. 5. представлены графики, иллюстрирующие действующие аэродинамические силы по осям X, Y, Z на трековую каретку с объектом испытания при скорости движения 832 м/с.

При движении ТК-ОИ со скоростью 830 м/с подъемная сила, направленная вверх по оси Y, составляет величину порядка 3100 Н. Боковая сила, направленная по оси Z, составляет 600–700 Н. Лобовая сила аэродинамического сопротивления равна 22500 Н. После 0,31 с изделие входит в тоннель с гелиевой атмосферой. При этом конус носовой части пробивает пленку и ТК-ОИ входит в атмосферу с гелием. Следует ударное возмущение с последующим затуханием силового воздействия и аэродинамические силы резко уменьшаются. Так, сила аэродинамического сопротивления уменьшается почти в 10 раз до величины 2600 Н. Однако трековая каретка при входе в участок с гелиевой средой получает возмущение (аналогичное ударному), но с обратным знаком силового воздействия. Возмущение ускорения, полученное из-за ступенчатого провала аэродинамического сопротивления. На переходный процесс одновременно накладываются расчетные колебания, обусловленные счетной численной адаптацией сетки.

Результаты моделирования вхождения трековой каретки монорельсового исполнения в гелиевый участок трека показывают существенность влияния уменьшения аэродинамического сопротивления. Изменяется волновая картина взаимодействия поверхности трекового подвижного снаряжения ТК-ОИ, а именно серия скачков уплотнения изменяет свою конфигурацию. Увеличивается угол конуса Маха, конфигурация головного скачка приобретает вид прямого скачка уплотнения, характерного для меньшей скорости обтекания потоком элементов конструкции. Изменяется волновое сопротивление, пропорциональное произведению плотности среды на скорость звука в данной среде. Изменяется структура пограничного слоя при обтекании

поток конуса головной части и особенно области сопряжения конуса и цилиндра головного обтекателя объекта испытания. Влияние плотности среды в галерее, содержащей разный процентный состав смеси воздуха и гелия, на коэффициент аэродинамического сопротивления динамической системы ТК-ОИ представлено на рис. 6.

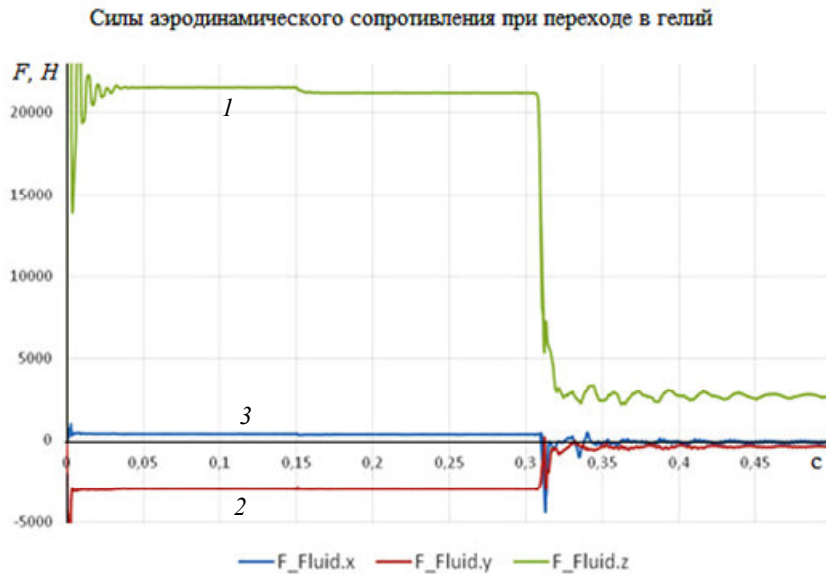


Рис. 5. Графики, иллюстрирующие изменение действующих сил по осям X, Y, Z на поверхность 3D-модели трековой каретки с объектом испытания при вхождении в гелиевый участок трека при скорости 830 м/с: 1 – сила аэродинамического сопротивления по оси X (зеленый цвет); 2 – вертикальная ось Y (красный цвет); 3 – Z на графике отражает поперечную боковую нагрузку (синий цвет). По оси абсцисс время в с

Fig. 5. Graphs illustrating the change in the acting forces along the X, Y, Z axes on the surface of a 3D model of a track sled with a test object when entering the helium section of the track at a speed of 830 m/s: aerodynamic drag force along the X axis – green; Y – (red) vertical axis; Z – on the graph reflects the transverse lateral load (blue color). The x-axis is time in s

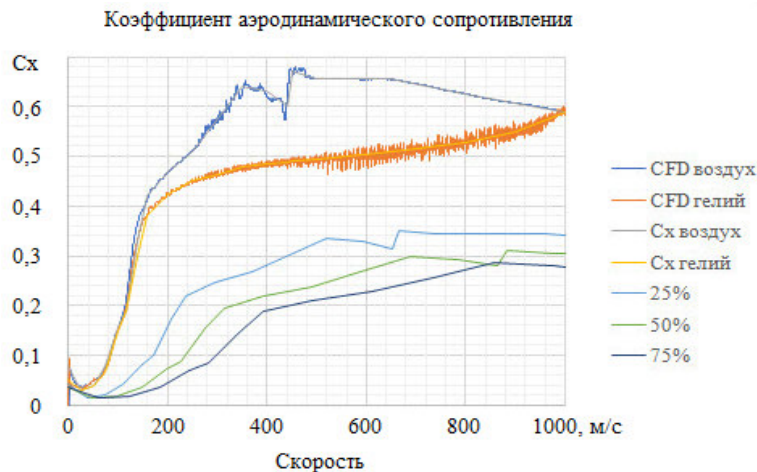


Рис. 6. Графики зависимостей коэффициентов аэродинамического сопротивления от скорости движения трековой каретки при разной концентрации смеси воздуха и гелия

Fig. 6. Graphs of the dependence of aerodynamic drag coefficients on the speed of movement of the track sled at different concentrations of the air and helium

Влияние плотности среды в тоннеле, содержащей разный процентный состав гелия, на величину прироста скорости разгона системы ТК-ОИ отражено на рис. 7.

Из рис. 7 следует, что при разгоне трековой каретки с объектом испытания при рассматриваемой суммарной массе снаряжения и тяге РДТТ, равной 43 кН, достигается скорость 830 м/с, а при смеси воздуха с гелием в равной пропорции 50 % по объему скорость достигается 1000 м/с. В среде из гелия скорость составит уже 1120 м/с.

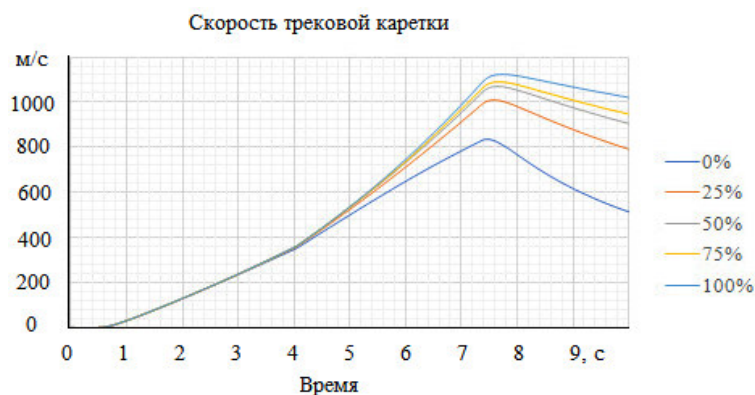


Рис. 7. Влияние процентного содержания воздуха в смеси с гелием в составе среды галереи на величину предельной скорости разгона каретки

Fig. 7. Influence of the percentage of air mixed with helium in the gallery environment on the maximum acceleration speed of the sled

Подъемная сила, действующая на конструкцию ракетной трековой каретки, в случае испытания в воздушной среде на максимальной скорости 800 м/с равна 3200 Н. Величина подъемной силы при испытании важна, поскольку от нее зависят силы трения при скольжении башмаков по контактной поверхности рельса. При добавлении гелия в воздушную среду галереи в соотношении 50 % по объему, подъемная сила на максимальной скорости уменьшается до 2700 Н по сравнению с чисто воздушной средой. Увеличение гелия в смеси до 70 % снижает подъемную силу каретки до 2000 Н. А в галерее, заполненной только гелием, подъемная сила на максимальной скорости 800 м/с падает до 500 Н. Причина нелинейной зависимости влияния гелия в составе смеси с воздухом при малой его концентрации подлежит дальнейшему анализу. Боковая сила, направленная по оси Z, также уменьшается при увеличении концентрации гелия в воздухе в составе среды крытой галереи с 200 Н (среда – воздух) до 90 Н (среда – гелий). Боковая сила возникает от несимметричности рельефа трековой дорожки. При монорельсовых испытаниях трековая каретка располагается на правом рельсе, при этом справа горизонтальный рельеф, а слева находится гидравлический лоток, расположенный ниже уровня горизонта. На рис. 8 представлены расчетные значения силы аэродинамического сопротивления при движении трековой каретки в зависимости от плотности среды в галерее при разном процентном составе гелия в воздухе.

Максимальное значение силы аэродинамического сопротивления воздушной среды составляет 23000 Н в процессе запуска системы ТК-ОИ. При 50 % смеси воздуха с гелием сопротивление среды на максимальной скорости движения каретки снижается до 10000 Н. В чистой среде с гелием сопротивление минимально и равно 6500 Н. Силы трения башмаков о контактирующие поверхности головки рельса также оказываются зависимыми от среды. Так, при чисто воздушной среде их максимальная величина равна –3600 Н, и, напротив, в среде гелия силы трения не превышают –700 Н. Аналогичным образом ведет себя крутящий момент по углу рыскания. Он различен, как и все аэродинамические силы, в процессе движения. Его максимальное значение в воздухе, соответствующее максимальной скорости разгона, равно –20000 Нм, а в гелии менее –5000 Нм. Максимальное значение крутящего момента по углу тангажа в воздухе +2800 Нм, а в гелии не превышает +600 Нм. Расчетные значения виброускорений на переднем и заднем башмаках без учета реальных отклонений рельсового пути от прямолинейности по оси X не превышают 2 м/с². Однако частотный диапазон спектра максимальных значений

виброускорений заднего башмака шире – от 3 до 70 Гц, тогда как у переднего максимальные виброускорения реализуются при частотах от 3 до 40 Гц. Заметим, что первая резонансная частота у башмаков по осям X и Y, определенная испытаниями на вибростенде, равна 3,15 Гц. Влияние плотности среды смеси воздух и гелия на плотность спектра виброускорения башмаков по оси X выделить не представляется возможным, так как все кривые сливаются в одну картину. Также разница практически не различима для плотности спектра виброускорений по оси X корпуса трековой каретки и обтекателя объекта испытания. Расчетный спектр виброускорений по оси Y на башмаках характеризуется резонансами в диапазоне от 3 до 120 Гц, с максимумом на частоте 70 Гц. У переднего башмака резонанс при 15 Гц с наибольшей амплитудой виброускорения, а далее уменьшающиеся пики амплитуд виброперегрузок реализуются при следующих частотах: 26, 47, 75, 98 Гц и др. По оси Y уменьшение плотности среды оранжереи приводит к снижению амплитуд виброперегрузок как на башмаках, так и на корпусе каретки и объекте испытания, т. е. почти в 2,5–3 раза снижает максимумы виброускорений, причем на задней опоре демпфирующий эффект выражен сильнее. Для примера на рис. 9 приведены графики распределения плотности спектров виброускорений по частоте для носового обтекателя по оси Y.

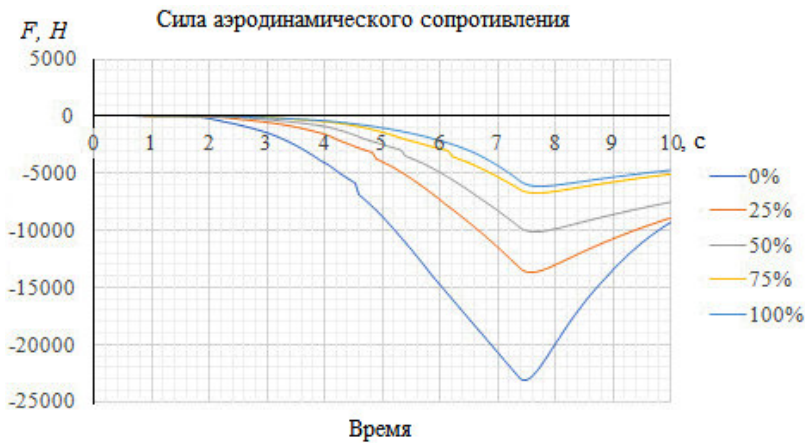


Рис. 8. Графики зависимостей сил аэродинамического сопротивления от объемного содержания гелия в среде галереи при разгоне каретки с объектом испытания

Fig. 8. Graphs of the dependence of aerodynamic drag forces on the volumetric content of helium in the gallery environment during acceleration of the sled with the test object



Рис. 9. Зависимости плотности спектра ускорений по оси Y обтекателя объекта испытания

Fig. 9. Dependences of the density of the acceleration spectrum along the Y axis of the fairing of the test object

Плотность спектра виброускорений по вертикальной оси Y конического обтекателя объекта испытания имеет максимум равный $0,12 \text{ м/с}^2$ на частоте $5\text{--}7 \text{ Гц}$. Далее следуют резонансные пики на следующих частотах $20\text{--}25$; 47 ; 76 Гц и т. д. Наибольшие значения виброперегрузок реализуются в среде воздуха, наименьшие – гелия. Виброперегрузки корпуса каретки по оси Y выражены несколько слабее, чем у обтекателя, а частоты, соответствующие максимальным виброускорениям, смещены в область больших значений частоты, и значимые величины распределены в диапазоне до 250 Гц . Максимальные значения плотности спектра виброускорений $0,3\text{--}0,35 \text{ м/с}^2$ обтекателя объекта испытания по оси Z имеют существенно меньший частотный диапазон $25\text{--}32 \text{ Гц}$. Влияние плотности и вязкости среды в расчетах выделить не удастся.

Максимальный эффект прироста скорости разгона трековой каретки ожидается в среде гелия. Затраты на обустройство трековой галереи и приобретение необходимой массы гелия можно сократить при выборе рациональной длины галереи по расчетным графикам из рис. 10, при этом достигнув планируемого эффекта приращения максимальной скорости разгона динамической системы ТК-ОИ.

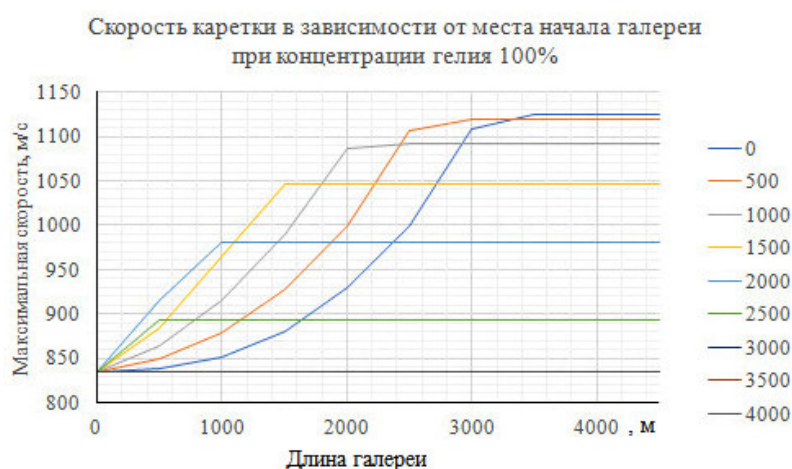


Рис. 10. Графики зависимостей прироста скорости системы ТК-ОИ от длины галереи со средой гелия

Fig. 10. Graphs of the dependence of the speed increase of the TK-OI system on the length of the gallery with a helium medium

Заключение

Учитывая, высокую стоимость гелия и необходимость его наличия в больших количествах для проведения натуральных экспериментов, получены расчетные оценки для выбора длины крытой галереи и ожидаемого прироста скорости разгона динамической системы ТК-ОИ при различных концентрациях гелия. Эффект снижения плотности среды за счет смешения воздуха с гелием в закрытой галерее становится значимым уже при 50% концентрации гелия. Как вариант, можно рекомендовать проведение экспериментов по валидации полученных расчетных результатов при 50% концентрации смеси гелия с воздухом в составе среды галереи.

Библиографические ссылки

1. Астахов С. А., Бирюков В. И., Катаев А. В. Методика определения характеристик вибропрочности конструкции при высокоскоростных трековых испытаниях авиационной техники // Вестник Пермского нац. исслед. политехнич. ун-та. Аэрокосмическая техника. 2023. № 72. С. 75–90. Doi: 10.15593/2224-9982/2023.72.06.
2. Rocket Sled. Wikipedia, 2019 [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Rocket_sled (дата обращения: 18.11.2023);

3. Rocket Sled Based High Speed Rail Track Test Facilities: A Review Shilpa Walia / Vikrant Satya, Sandeep Malik, Subhash Chander et al. // Defence Science Journal. 2022. Vol. 72, No. 2. P. 182–194. Doi: 10.14429/dsj.72.17014.
4. Astakhov S. A., Biryukov V. I. Buckling under the action of loading by aerodynamic and inertial forces during ground track tests of aviation equipmen // INCAS BULLETIN. 2021. Vol. 13, Special Issue. P. 5–12. Doi: 10.13111/2066-8201.13.S.1,2021.
5. Моделирование аэродинамического взаимодействия при трековых испытаниях изделий авиационной техники / С. А. Астахов, В. И. Бирюков, С. Ф. Тимушев, А. В. Катаев // Вестник Пермского нац. исслед. политехнич. ун-та. Аэрокосмическая техника. 2023. № 72. С. 5–20. Doi: 10.15593/2224-9982/2023.72.01.
6. Чесноков Ю. Г. Flow Vision. Руководство пользователя. Версия 3.12.04. М. : ТЕСИС, 1999–2021. 1593 с.
7. Wilcox, D. C. Turbulence modeling for CFD. DCW Industries, Inc., 1994. 460 p.
8. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М. : Дрофа, 2003. 840 с.
9. Морозов В. И., Пономарев А. Т., Рысев О. В. Математическое моделирование сложных аэроупругих систем. М. : Физматлит, 1995. 727с.
10. Bensi M., Golub G. H., Liesen J. Numerical solution of saddle point problems // Acta Numerica. 2006. Vol. 14. P. 1–13.
11. Кузнецов О. А. Динамические нагрузки на самолет. М. : Физматлит, 2008. 264 с.
12. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле : пер. с англ. Л. Г. Корнейчука / под ред. Э. И. Григолюка. М. : Машиностроение, 1985. 472 с.
13. Волны в сплошных средах / А. Г. Горшков, А. Л. Медведский, Л. Н. Рабинский, Д. В. Тарлаковский. М. : Физматлит, 2004. 472 с.
14. Программное обеспечение Siemens PLM. **Siemens Simcenter** Amesim 2020.2.0 (x64) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/simcenter/simcenter>.
15. Астахов С. А., Бирюков В. И., Боровиков Д. А. Алгоритм моделирования вибрационных воздействий при трековых испытаниях авиационной и ракетной техники // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 2. С. 291–308.
16. Астахов С. А., Бирюков В. И., Катаев А. В. Экспериментальное определение проводимости вибраций элементами конструкции ракетной каретки при высокоскоростных трековых испытаниях авиационной техники // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 1. С. 44–63. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-44-63.
17. Random Vibration and Stress Analysis of Fluidization Reactor System / Swetal Patel, Reena R. Trivedi, Bhadrashari Jariwala // International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS). 2017. No. 8. P. 102–111.
18. Random vibration analysis on installation of an environmental control system component in fighter aircraft / Kishen Karumbaiah B. J., Y. J. Suresh, T. Basava // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2015. № 12. P. 57– 62.
19. Features of the Application of Friction Braking in High-Speed Track Tests. S. Astakhov S. Biryukov V., Kataev A. // HSTD 2023, E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 446. P. 04004. Doi: 10.1051/e3sconf/202344604004.

References

1. Astakhov S. A. [Methodology for determining the characteristics of vibration strength of a structure during high-speed track tests of aircraft]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*. 2023, No. 72, P. 75–90 (In Russ.). Doi: 10.15593/2224-9982/2023.72.06.
2. Rocket Sled. Wikipedia, 2019. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Rocket_sled (accessed: 18.11.2023).

3. Shilpa Walia , Vikrant Satya, Sandeep Malik et al. Rocket Sled Based High Speed Rail Track Test Facilities: A Review. *Defence Science Journal*. 2022, Vol. 72, No. 2, P. 182–194. Doi: 10.14429/dsj.72.17014.
4. Astakhov S. A., Biryukov V. I. Buckling under the action of loading by aerodynamic and inertial forces during ground track tests of aviation equipmen. *INCAS BULLETIN*. 2021, Vol. 13, P. 5–12. Doi: 10.13111/2066-8201.
5. Astakhov S. A., Biryukov V. I., Timushev S. F., Katayev A. V. [Modeling of aerodynamic interaction during track tests of aviation equipment products]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*. 2023, No. 72, P. 5–20 (In Russ.). Doi: 10.15593/2224-9982/2023.72.01.
6. Chesnokov Yu. G. *Flow Vision. Rukovodstvo polzovatelya* [FlowVision. User manual]. Moscow, TESIS Publ., 1999–2021, 1593 p.
7. Wilcox D. C. Turbulence modeling for CFD, DCW Industries, Inc., 1994, 460 p.
8. Loytsyanskiy L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas]. Moscow, Drofa Publ., 2003, 840 p.
9. Morozov V. I., Ponomarev A. T., Rysev O. V. *Matematicheskoye modelirovaniye slozhnykh aerouprugikh system* [Mathematical modeling of complex aeroelastic systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1995, 727 p.
10. Bensi M., Golub G. H., Liese J. Numerical solution of saddle point problems. *Acta Numerica*. 2006, Vol. 14, P. 1–137.
11. Kuznetsov O. A. *Dinamicheskiye nagruzki na samolet* [Dynamic loads on an aircraft]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 264 p.
12. Timoshenko S. P., Yang D. K., Uiver U. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Fluctuations in engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1985, 472 p.
13. Gorshkov A. G., Medvedskiy A. L., Rabinskiy L. N., Tarlakovskiy D. V. *Volny v sploshnykh sredakh* [Waves in continuous media]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 472 p.
14. Programmnoye obespecheniye Siemens PLM. Siemens Simcenter Amesim 2020.2.0 (x64). Available at: <https://www.siemens.com/global/en/products/simcenter/simcenter>.
15. Astakhov S. A., Biryukov V. I., Borovikov D. A. [Algorithm for modeling vibration effects during track testing of aviation and rocket technology]. *Sibirskiy aerokosmicheskij zhurnal*. 2023, Vol. 24, No. 2, P. 291–308 (In Russ.).
16. Astakhov S. A., Biryukov V. I., Katayev A. V. [Experimental determination of vibration conductivity by rocket carriage structural elements during high-speed track tests of aviation equipment]. *Sibirskiy aerokosmicheskij zhurnal*. 2023, Vol. 24, No. 1, P. 44–63 (In Russ.). Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-44-63.
17. Random Vibration and Stress Analysis of Fluidization Reactor System / Swetal Patel, Reena R. Trivedi, Bhadrash Jariwala. *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS)*. 2017, No. 8, P. 102–111.
18. Kishen Karumbaiah B. J., Y. J. Suresh, Basava T. Random vibration analysis on installation of an environmental control system component in fighter aircraft. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015, No. 12, P. 57–62.
19. Astakhov S., Biryukov V., Kataev A. [Features of the Application of Friction Braking in High-Speed Track Tests]. *HSTD 2023, E3S Web of Conferences*. 2023, Vol. 446, P. 04004. Doi: 10.1051/e3sconf/202344604004.

© Астахов С. А., 2024

Астахов Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, директор; Федеральное казенное предприятие «Государственный казенный научно-испытательный полигон авиационных систем имени Л. К. Сафронова» (ФКП «ГкНИПАС им. Л. К. Сафронова»). E-mail: info@gknipas.ru.

Astakhov Sergey Anatolyevich – PhD in Technical Sciences, director; Scientific Test Range of Aviation Systems named after L. K. Safronov. E-mail: info@gknipas.ru.
