

Научная статья
УДК 629.7:629.018
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184992>
EDN: <https://www.elibrary.ru/BSXWIY>



Методология обеспечения трековых испытаний новых образцов летательных аппаратов на сверхвысоких скоростях

Сергей Анатольевич Астахов

Государственный казенный научно-испытательный полигон авиационных систем, Белоозерский, Российская Федерация
info@gknipas.ru

Аннотация. Представлена методология, позволяющая решить важную научную проблему по достижению сверхвысоких скоростей при трековых испытаниях новых образцов летательных аппаратов и обеспечению сохранности объекта испытаний в условиях высокоскоростного движения. Предложены новые научно обоснованные технические, технологические и конструктивные решения по созданию средств разгона, определению требований к разгонному устройству, оценки вибрационных воздействий на объект испытаний и трековую каретку, развитию методов трековых испытаний.

Ключевые слова: наземные трековые испытания, рельсовый трек, трековая экспериментальная установка, наземные испытания на сверхвысоких скоростях, моделирование аэродинамического обтекания объекта, внешняя среда с различной плотностью, гелиево-воздушная среда, динамика движения трековой каретки, виброударные воздействия при трековых испытаниях

Для цитирования: Астахов С.А. Методология обеспечения трековых испытаний новых образцов летательных аппаратов на сверхвысоких скоростях // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 2. С. 66–76. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184992>

Original article

Methodology for the Track Tests Ensuring of New Aircraft Models at Ultra-High Speeds

Sergey A. Astakhov

State governmental scientific-testing area of aircraft systems named after L.K. Safronov, Beloozersky, Russian Federation
info@gknipas.ru

Abstract

Development of the new aircraft samples defines the need for increasing the flight speeds to solve the problems of their effective application for the intended purpose.

To solve the scientific problem on achieving ultra-high speeds and ensuring the test object functioning during the track tests, the author proposes the methodology, consisting of the following stages.

1. Preliminary substantiation of the “track carriage-test object” system options and its components; the rail track state and the track test scheme determining (in accordance with the terms of reference for the tests).

© Астахов С.А., 2025

2. Defining the force impacts acting on the “track carriage-test object” system while its movement along the rail track.
3. Studying the speedup possibility of the tested object up to the specified speeds, and ensuring parameters of its functioning while its application in various design styles.

The possibility of employing technical, technological and design solutions to achieve the specified test parameters is being assessed at this stage as well. With this, the following procedures are being performed:

- a set of solutions for creating a section of a rail track with an experimental sample of a device for the medium parameters changing;
- a set of solutions for ensuring the test information storing under the high-speed traffic conditions.

4. Theoretical studies of the dynamic “track carriage-test object” system vibrations.

5. Numerical study of the “track carriage-test object” system state during its movement along the rail track.

At this stage, simulation of the rocket carriage movement with a test object along the rail track is being performed with account for the force impacts acting on the track carriage-test object system, including those under conditions of an environment with reduced density. With this, aerodynamic flow-around is being simulated and aerodynamic characteristics of the system are being determined.

- models of the movement dynamics of the “track carriage-test object” system of an arbitrary layout;
- method of the aerodynamic characteristics numerical computing at non-stationary flow-around of the “track carriage-test object” system of an arbitrary layout with account for the variable parameters of the environment.

6. Experimental studies of vibration impacts on the dynamic “track carriage-test object” system of arbitrary layout during the high-speed track tests.

7. Conducting track tests of aircraft at ultra-high speeds.

The track tests technique is being developed with the proposed methodology based on the requirements of the terms of reference and may fully or partially reflect the above said stages.

The new technical, technological and design solutions obtained while this methodology development allow ensuring the ultra-high speeds achieving while track tests of the promising aircraft and its functioning in the area of application.

Keywords: ground track tests, rail track, experimental track installation, ground tests at ultra-high speeds, object aerodynamic flow-around modeling, external environment of various density, helium-air environment, track carriage movement dynamics, vibration impacts at track tests

For citation: Astakhov S.A. Methodology for the Track Tests Ensuring of New Aircraft Models at Ultra-High Speeds. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(2):66-76. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184992>

List of Figures

Fig. 1. Photo of the gallery built above the track right rail

Fig. 2. The scheme of the numerical study

Fig. 3. The flow-around pattern image of the airflow during transition to the helium medium

Fig. 4. Graphs of the aerodynamic forces changes upon entry into the helium section

Fig. 5. Graphs of the track carriage system speeds – the object of testing, depending on the helium mole fraction

Fig. 6. Spectral density graphs reflecting the helium medium density and viscosity effect in different concentrations on the vibration stability of the tested object motion the vertical direction

Fig. 7. The speed change graph of the experimental setup while its motion along the track section with the changed medium parameters. Computation and experiment

Fig. 8. The speed change graph of the experimental setup while its motion along the track in the air medium. Calculation and experiment

Fig. 9. Phase portrait of the signals directed along the X-axis of the sensor

Введение

Современные вызовы определяют повышенные требования к характеристикам перспективных образцов летательных аппаратов, в первую очередь, это увеличение скорости полета для обеспечения эффективного применения изделия по назначению.

Важнейшим этапом создания перспективных образцов летательных аппаратов является стадия испытаний, в частности, наземная отработка создаваемого изделия. Ключевую роль при испытаниях авиационной и ракетно-космической техники со-

ставляют наземные испытания на рельсовом треке [1]. Такие испытания позволяют получить необходимое количество контролируемых параметров в условиях, максимально приближенных к реальным условиям применения объектов испытаний.

Проблема по достижению сверхвысоких скоростей при трековых испытаниях новых образцов летательных аппаратов и обеспечению сохранности объекта испытаний в условиях высокоскоростного движения по рельсовому треку актуальна как в России, так и за рубежом.

Большое количество трековых полигонов, предназначенных для испытаний летательных аппаратов баллистического типа, находится в США. Как правило, на рельсовых треках в качестве средств разгона для ускорения опытного образца или полезной нагрузки на санях или салазках (Sled) используются двигатели твердого топлива. Основной особенностью данных треков является их способность разгонять полезную нагрузку до очень высоких значений числа M . Так, например, в 2003 году на базе ВВС США Холломан был установлен рекорд скорости, сани на рельсовом треке достигли числа $M 8,5$ (2868 м/с) [2]. Испытательные рельсовые треки расположены, в том числе в таких странах, как Индия (Rail Track Rocket Sled (RTRS) в Харайане [3], США (Holloman High Speed Test Track (HHSTT) в Нью-Мексико [4], Supersonic Naval Ordnance Research Track (SNORT) в Чайна-Лейк, Supersonic Military Air Research Track (SMART) в Харрикейн Меса [5, 6].

В России вопросами обеспечения высокоскоростного движения по рельсовым направляющим и исследованиями в направлении развития теории колебаний и динамики движения упругих систем применительно к трековым испытаниям посвящены работы некоторых научных школ: Горьковской (А.А. Андронов, Г.С. Горелик, М.А. Айзерман, Л.С. Понтрягин и др.); Казанской (Н.Г. Четаев, И.Г. Малкин, Г.Н. Каменков и К.П. Персидский); Киевской (Н.М. Крылов, Н.Н. Боголюбов); Московской (В.С. Пугачев, Б.В. Булгаков, И.И. Артоболевский, И.Ф. Образцов); Ленинградской (А.И. Лурье, В.И. Зубов, В.А. Якубович и др.).

Научная школа в области нестационарной динамики сплошных сред и конструкций Московского авиационного института, основанная А.Г. Горшковым, успешно проводила исследования в области решения динамических контактных задач с подвижными границами, развития численных методов исследования поведения однослойных и многослойных конструкций при их взаимодействии с различными деформируемыми преградами (А.Л. Медведский, Л.Н. Рабинский [7] и др.), решения нестационарных задач механики деформируемого твердого тела.

Работы А.И. Весницкого (Институт проблем машиностроения РАН — филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова РАН») [8] посвящены развитию теоретических основ динамики одномерных и двумерных упругих систем с движущимися по ним объектами и нагрузками, разработке и применению методов волновой динамики в задачах гашения колебаний в упругих элементах машин и конструкций. Найдены реше-

ния ряда актуальных задач динамики в интересах создания скоростного транспорта.

Следует отметить работы ученых Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского С.В. Крысова [9] и Л.В. Филатова [10], посвященных прикладным проблемам теории колебаний и движению тел вдоль упругих направляющих с закритическими скоростями. Рассматривая вынужденные колебания и резонанс одномерных упругих систем с движущимися нагрузками, необходимо отметить работу С.А. Сьянова [11].

В.В. Болотин (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН) [12] внес большой вклад в развитие ряда областей теоретической и прикладной механики — теории колебаний и устойчивости, прикладной теории упругости, строительной механики, теории надежности и безопасности машин и конструкций, механики разрушения и др.

Учеными нижегородского филиала Института машиноведения имени А.А. Благонравова РАН Г.А. Уткиным [13], С.В. Крысовым [14], А.В. Метрикиным [15], С.Н. Веричевым [16] и др. исследуются теоретические основы динамики одномерных систем с движущимися по ним объектами, волновые процессы при контактных взаимодействиях подвижных сопряжений в упругих элементах машин и конструкций, а также устойчивость колебаний механических систем с движущимися нагрузками. Е.Е. Лисенкова [17], С.Б. Маланов [18] и В.В. Кажаяев [19] свои работы посвятили изучению движения объектов под действием давления упругих волн, ударного взаимодействия материальной точки с одномерной упругой системой, проблемам волновых процессов в распределенных системах, взаимодействующих с сосредоточенными объектами. В своих теоретических и экспериментальных работах Л.В. Филатов [10] и Ю.В. Богданов [20] исследовали динамику тел, движущихся вдоль упругих направляющих и волновые процессы при контактном и бесконтактном взаимодействии движущихся нагрузок с вязкоупругими опорными направляющими.

В.И. Ерофеевым (Институт проблем машиностроения РАН) [21, 22], С.И. Герасимовым [22], С.В. Бутовой [22], И.А. Одзериho [23] (Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ), В.Г. Камчатным (РФЯЦ-ВНИИЭФ) [22] и др. проведены исследования физических и механических свойств материалов, подвергаемых интенсивным динамическим нагрузкам, рассмотрена устойчивость поперечного движения высокоскоростных объектов по направляющей ракетного трека. В данных работах определены зависимости динамической жесткости рельсовой направляющей в дви-

жушемся контакте от скорости движения объекта и частоты возмущения, а также области неустойчивости поперечного движения объекта, исследованы термомеханические и деформационные процессы при высокоскоростном скольжении объекта по рельсовым направляющим ракетного трека.

Несмотря на огромный научный задел, проблема достижения сверхвысоких скоростей при трековых испытаниях и обеспечения сохранности испытуемого объекта в процессе его высокоскоростного движения по рельсовому треку является актуальной, для решения которой требуется разрешение некоторых противоречий.

Первое противоречие заключается в том, что, с одной стороны, требуется значительное повышение скоростей объектов испытаний заданных массогабаритных параметров при наземных трековых испытаниях, с другой стороны, достижение требуемых скоростей невозможно без выработки технических решений по созданию средств разгона, определению требований к элементам разгонного устройства (ракетной каретки), оценки вибрационных воздействий на объект испытаний и трековую каретку, а также развитию методов трековых испытаний, обеспечивающих увеличение скорости при движении объекта испытаний по рельсовому треку.

Второе противоречие состоит в том, что, с одной стороны, требуется обеспечение сохранности образцов летательных аппаратов в процессе трековых испытаний, с другой стороны, при росте скоростей и увеличении влияния различных факторов обеспечение их сохранности в процессе испытаний не гарантировано ввиду отсутствия предварительных оценок предельных значений виброударных воздействий на объект испытаний и методов их анализа.

Разрешение указанных противоречий невозможно без выработки принципиально новых научно обоснованных технических, технологических и конструктивных решений по созданию средств разгона, определению требований к разгонному устройству, оценки вибрационных воздействий на объект испытаний и трековую каретку, развитию методов трековых испытаний.

В связи с этим актуальная научная проблема заключается в выработке принципиально новых научно обоснованных технических, технологических и конструктивных решений по совершенствованию элементов конструкции трековой каретки, обоснованию средств разгона, снижению уровня виброперегрузок, развитию методов, моделей и технологий трековых испытаний, а также оценке предельных значений виброударных воздействий на объект испытаний.

Методология обеспечения трековых испытаний образцов летательных аппаратов

Для решения обозначенной проблемы предлагается методология, состоящая из следующих этапов.

1. Обоснование вариантов системы трековая каретка — объект испытаний (ТК—ОИ) с разгонными двигателями и ее составных частей, определение состояния и характеристик рельсового пути и схемы трековых испытаний [24] (в соответствии — с техническим заданием на испытания).

2. Определение силовых воздействий, действующих на систему трековая каретка — объект испытаний при ее движении по рельсовому треку.

Проводится обоснование внешних нагрузжений и вибрационных нагрузок, действующих на динамическую систему ТК—ОИ с целью их учета в математических моделях при моделировании движения по рельсовому треку.

3. Исследование возможности разгона испытуемого объекта до заданных скоростей и обеспечения параметров его функционирования при применении в вариантах исполнения [25].

Определяются конструктивная схема и компоновка системы ТК—ОИ для обеспечения заданных параметров испытаний [26], проводятся:

- расчет и анализ режимов разгона различных схем и обликов;
- разработка облика трековой каретки с объектом испытаний и основных элементов разгонного устройства;
- непосредственно выбор конструктивной схемы и компоновки системы ТК—ОИ.

Также на данном этапе оценивается возможность использования технических, технологических и конструктивных решений по достижению заданных параметров испытаний, а именно, проводится:

- комплекс решений по созданию участка рельсового трека с экспериментальным образцом устройства для изменения параметров среды [27];
- комплекс решений по обеспечению сохранения информации об испытаниях в условиях высокоскоростного движения [28].

На рис. 1 представлена фотография экспериментального образца устройства для изменения параметров среды — галерея (тоннель) вдоль трекового пути, предназначенная для создания измененной среды в виде смеси воздуха и гелия.

4. Теоретические исследования вибраций динамической системы «трековая каретка — объект испытаний» проводятся для получения оценочных параметров системы ТК—ОИ при формировании конструктивного решения ее исполнения с учетом массово-габаритных параметров объекта испытаний [29]:



Рис. 1. Фотография галереи, сооруженной над правым рельсом трека

— для оценки вероятности возбуждения механических автоколебаний динамической системы ТК–ОИ и прогнозирования автоколебательных режимов системы;

— для оценки статической устойчивости системы ТК–ОИ при продольном нагружении аэродинамической силой сопротивления и тягой двигательных установок;

— для оценки смещения носовой части изделия от оси при продольном изгибе под действием аэродинамических сил;

— для оценки прочностных свойств системы ТК–ОИ;

— для стохастического анализа неустойчивых режимов движения трековой каретки по сигналам виброускорений датчиков, установленных на элементах ее конструкции при проведении натурного эксперимента;

— для оценки частот акустико-вихревого взаимодействия в полукрытых полостях конструкции.

5. Численное исследование состояния системы трековая каретка – объект испытаний при ее движении по рельсовому треку (рис. 2).

На данном этапе проводится моделирование движения трековой каретки с объектом испытаний по рельсовому треку с учетом силовых воздействий, действующих на систему ТК–ОИ, в том числе в условиях среды с уменьшенной плотностью, а также моделирование аэродинамического обтекания системы ТК–ОИ.

Численное исследование проводится на основе:

— модели динамики движения системы ТК–ОИ;

— метода численного расчета аэродинамических характеристик при нестационарном обтекании системы ТК–ОИ с учетом изменяемых параметров внешней среды (рис. 3).

На рис. 4 представлен график по результатам численного моделирования, иллюстрирующий изменение действующих аэродинамических сил при вхождении в гелиевый участок трека.

При движении ТК–ОИ со скоростью 832 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 гелиевой галереи и ТК–ОИ входит в атмосферу с гелием. Следует

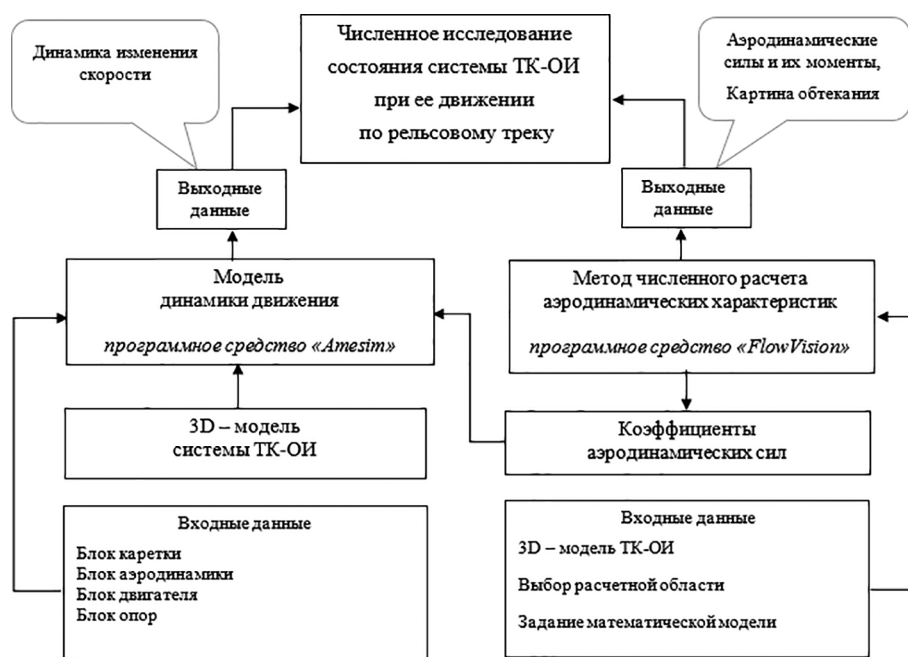


Рис. 2. Схема численного исследования

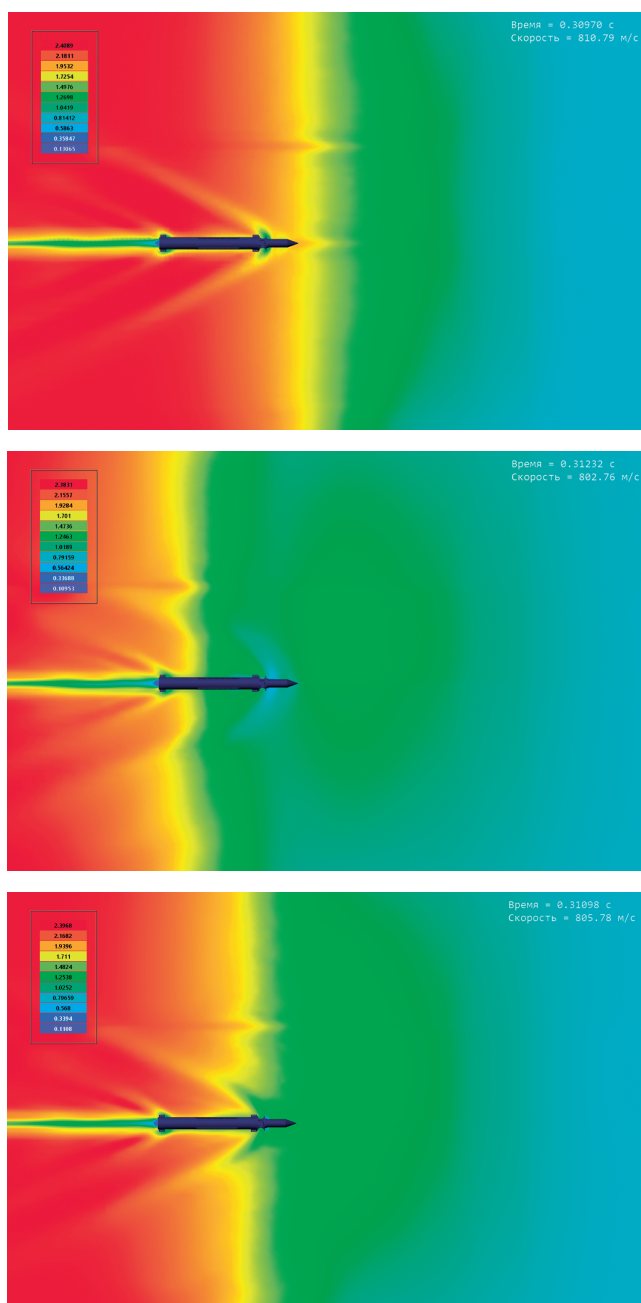


Рис. 3. Изображение картины обтекания воздушным потоком при переходе в гелиевую среду

ударное возмущение с последующим затуханием силового воздействия и аэродинамические силы резко уменьшаются. Так, сила аэродинамического сопротивления уменьшается почти на порядок до величины 2600 Н. Однако трековая каретка при входе в участок с гелиевой средой из-за ступенчатого провала аэродинамического сопротивления получает возмущение (аналогичное ударному), но с обратным знаком силового воздействия.

Результаты моделирования входа трековой каретки монорельсового исполнения в гелиевый участок трека показывают существенность влияния



Рис. 4. Графики изменения аэродинамических сил при вхождении в гелиевый участок

уменьшения аэродинамического сопротивления. При прохождении кареткой границы раздела сред изменяется волновая картина взаимодействия потоком среды поверхности ТК–ОИ, а именно, серия скачков уплотнения изменяет свою конфигурацию. Увеличивается угол конуса Маха и 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. Также изменяется структура пограничного слоя при обтекании потоком конуса головной части и особенно области сопряжения конуса и цилиндра головного обтекателя объекта испытания.

Из рис. 5 следует, что при разгоне трековой каретки с объектом испытания при рассматриваемой суммарной массе снаряжения и тяги РДТТ достигается скорость 830 м/с, при смеси воздуха с гелием в 50% по объему скорость составляет 1000 м/с. В среде с чисто гелиевой атмосферой – 1120 м/с.

На рис. 6 приведен пример численного расчета виброустойчивости движения обтекателя летательного аппарата по вертикальной оси.

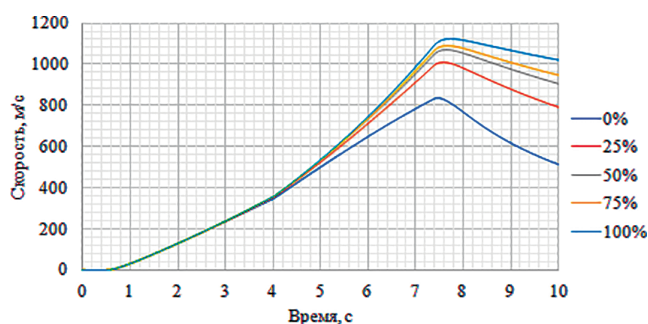


Рис. 5. Графики скоростей движения системы ТК–ОИ в зависимости от мольной доли гелия



Рис. 6. Графики спектральной плотности, отражающие влияние плотности и вязкости гелиевой среды в разной концентрации на виброустойчивость движения объекта испытания в вертикальном направлении

При движении ТК–ОИ в смесях воздуха с гелием при различных концентрациях вибрация, действующая в направлении оси Y , заметно уменьшается. Вибрация в вертикальном направлении в случае движения каретки в среде с гелием заметно снижается на опорах, на самой ТК–ОИ и обтекателе.

При снижении уровня виброускорений в направлении оси Y ожидаемо улучшение траекторной виброустойчивости ТК–ОИ из-за уменьшения величин возмущающих моментов от аэродинамических сил.

6. Экспериментальные исследования скоростных и динамических характеристик системы ТК–ОИ при ее движении по рельсовому треку.

Основной задачей экспериментальных исследований является апробация и верификация результатов численных расчетов по теоретическим моделям с данными эксперимента. Эксперимент позволяет подтвердить результаты моделирования скоростных и динамических характеристик при сложном многофакторном силовом нагружении элементов конструкции трековой каретки и объекта испытаний в условиях высокоскоростного движения по рельсовому треку.

На рис. 7 и 8 соответственно приведены результаты исследования скоростных характеристик движения экспериментальной установки по треку с гелиевой галереей и в воздушной среде, выполнена верификация расчетных значений с данными измерений при проведении натурного эксперимента. На основе расчетных оценок определена реальная концентрация гелия в галерее.

Зависимости на графике (рис. 8) аналогичны предыдущим зависимостям. В целом, разброс значений скорости между расчетом и экспериментом приемлемый.

Экспериментальные исследования динамических характеристик системы ТК–ОИ при движении по рельсовому треку проводились при трековых испытаниях экспериментальных образцов с имитаторами объектов испытаний. В результате экспериментальных исследований определяются вибрационные воздействия на динамическую систему ТК–ОИ с использованием соответствующего метода обработки экспериментальных данных вибрационных воздействий [30].

На данном этапе проводится анализ движения трековой каретки по сигналам виброускорений датчиков, установленных на элементах системы ТК–ОИ.

Далее приведен анализ движения трековой каретки на примере реального эксперимента движения четырехопорной каретки по рельсовому треку.

На рис 9 изображен фазовый портрет в координатах виброскорость (м/с) и виброперемещение (м), построенный по сигналам виброускорений датчика TSR, установленного на средней балке

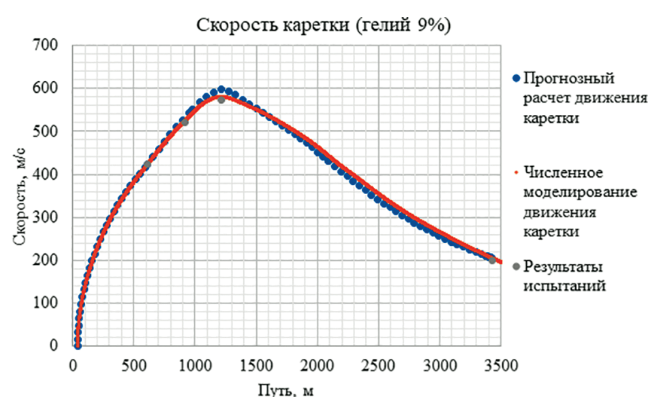


Рис. 7. График изменения скорости экспериментальной установки при ее движении по треку с участком с измененными параметрами среды. Расчет и эксперимент

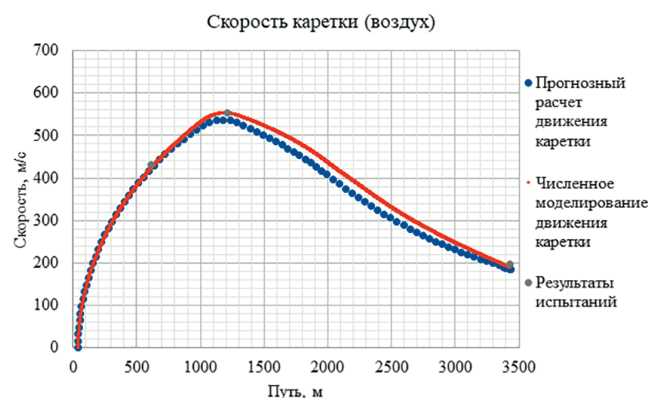
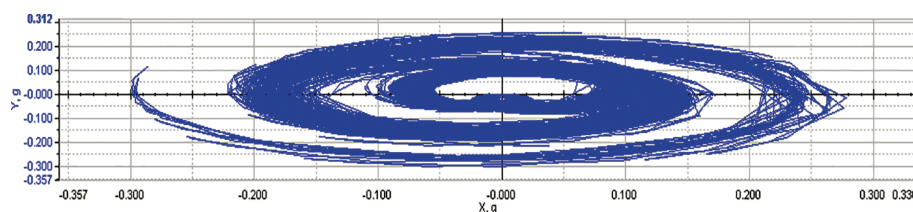


Рис. 8. График изменения скорости экспериментальной установки при ее движении по треку в воздушной среде. Расчет и эксперимент

Рис. 9. Фазовый портрет сигналов, направленных по оси X датчика

четырехопорной трековой каретки при ее движении по рельсовому треку.

Данный эксперимент проводился с целью определения вибраций при прохождении системы ТК—ОИ скорости звука. Исследования сигналов виброускорений, направленных по всем трем осям (X , Y , Z) выполняются с использованием метода дискретного преобразования Фурье, вейвлетного анализа и путем построения фазовых портретов, а также оценки декрементов затухания колебаний периодических составляющих сложного сигнала. Вейвлетный анализ сигналов виброускорений каретки вместе с фазовыми портретами этих же сигналов однозначно характеризуют динамическую систему ТК—ОИ как существенно нелинейную и позволяют оценить особенности ее движения по трековой дорожке.

7. Проведение трековых испытаний образцов летательных аппаратов на сверхвысоких скоростях.

Методика трековых испытаний разрабатывается с использованием предложенной методологии на основании требований технического задания и может полностью или частично отражать вышеизложенные этапы.

Реализация методологии приведена на примере испытания трековой экспериментальной установки с объектом испытаний с использованием экспериментального образца устройства для изменения параметров среды на ракетном рельсовом треке ФКП «ГкНИПАС имени Л.К. Сафронова».

Полученные при разработке методологии новые технические, технологические и конструктивные решения позволяют обеспечить достижение сверхвысоких скоростей при трековых испытаниях образцов летательных аппаратов.

Результаты проведенных исследований

По результатам численного моделирования движения трековой каретки с образцом летательного аппарата по рельсовому треку в условиях внешней среды с пониженной плотностью (гелиевой галереи) эффект от снижения сил аэродинамического сопротивления возрос более чем в 7 раз (с 2200 кг до 250 кг); боковой силы — с 500 кг до около нулевых значений; подъемной силы — с 300 кг до около нулевых значений, в связи с чем прирост предельных

значений скорости за счет использования участка трекового пути с измененными параметрами внешней среды в зависимости от значений мольной доли гелия может составить до 30–40%, а снижение уровня виброускорений по осям — не менее чем в два раза.

Степень достоверности результатов проведенных исследований обеспечивается использованием известных теоретических методов и полученными на их основе оценками, численных методов математического моделирования и расчета, апробацией и верификацией полученных результатов с результатами натурных испытаний.

Выводы

Представленная методология решает важную научную проблему по достижению сверхвысоких скоростей при трековых испытаниях новых образцов летательных аппаратов и обеспечению сохранности объекта испытаний в условиях высокоскоростного движения на основе новых научно обоснованных технических, технологических и конструктивных решений по созданию средств разгона, определению требований к разгонному устройству, оценки вибрационных воздействий на объект испытаний и трековую каретку, развитию методов трековых испытаний. При разработке методологии впервые:

1) обоснованы и представлены технические и конструктивные решения по выбору средств разгона, определению конструктивной схемы и компоновки системы ТК—ОИ для достижения максимальных скоростей движения по рельсовому треку с учетом массово-габаритных характеристик системы; разработана методика определения конструктивной схемы и компоновки системы ТК—ОИ для обеспечения разгона объекта испытаний до сверхвысоких скоростей;

2) обоснованы и представлены технические, конструктивные и технологические решения по увеличению скоростного диапазона испытаний и уменьшению динамических нагрузок на систему ТК—ОИ в условиях измененных параметров среды; разработана технология создания участка рельсового трека с экспериментальным образцом устройства для изменения параметров среды;

3) определены методические подходы, предложены конструктивные и технологические решения по сохранению параметров испытаний в условиях высокоскоростного движения по рельсовому треку для оценки их предельных значений и снижения уровня виброударных воздействий на объект испытаний, разработан метод сохранения датчиков виброускорений с накопителями информации в условиях высокоскоростного движения по рельсовому треку и улавливания элементов системы ТК—ОИ;

4) выполнен расчет аэродинамических характеристик системы ТК—ОИ испытаний при нестационарном ее обтекании в условиях внешней среды с различной плотностью, проведено моделирование аэродинамического обтекания; разработан метод численного расчета аэродинамических характеристик при нестационарном обтекании системы ТК—ОИ произвольной компоновки при высокоскоростных трековых испытаниях с учетом изменения параметров внешней среды;

5) проведено моделирование движения системы ТК—ОИ по рельсовому треку с учетом силовых воздействий и характеристик рельсового пути, в том числе в условиях среды с уменьшенной плотностью; разработана модель динамики движения системы ТК—ОИ произвольной компоновки при высокоскоростных трековых испытаниях;

6) получены экспериментальные данные вибрационных воздействий на динамическую систему ТК—ОИ при проведении трековых испытаний, разработан метод обработки экспериментальных данных вибрационных воздействий на динамическую систему ТК—ОИ произвольной компоновки при высокоскоростных трековых испытаниях;

7) определены методические подходы по достижению максимальной скорости движения испытуемого объекта по рельсовому треку при обеспечении его сохранности в условиях высокоскоростного движения с учетом массово-габаритных характеристик системы ТК—ОИ; разработана и апробирована методика трековых испытаний образцов летательных аппаратов на сверхвысоких скоростях.

Список источников

1. Файков Ю.И., Дудай В.И., Никулин В.М. и др. Испытания ракетной и авиационной техники на ракетном треке // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2006. № 3(48). С. 11–14.
2. Minto D.W. Recent increases in hypersonic test capabilities at the Holloman high speed test track // 38th Aerospace Sciences Meetings & Exhibit (10–13 January 2000; Reno, Nevada, USA). DOI: 10.2514/6.2000-154
3. Walia S., Satya V., Malik S., et al. Rocket Sled Based High Speed Rail Track Test Facilities // Defence Science

- Journal. Vol. 72. No. 2, pp. 182–194. DOI: 10.14429/dsj.72.17014
4. Minto D.W., Bosmajian N. A Hypersonic Test Capabilities at the Holloman High-Speed Test Track // In: Marren D., Lu F. Advanced Hypersonic Test Facilities. 2012, pp. 499–530. DOI: 10.2514/5.9781600866678.0499.0530
5. Gurol H., Ketchen D., Holland L., et al. Status of the Holloman high speed maglev test track (HNSMTT) // 30th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference (16–20 June 2014; Atlanta, GA). DOI: 10.2514/6.2014-2655
6. Stronge W.J. Aerodynamic testing on rocket sled tracks // Aerodynamic Testing Conference (09–10 March 1964; Washington, DC, USA). DOI: 10.2514/6.1964-1117
7. Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н. и др. Волны в сплошных средах: Учебное пособие. М.: Физматлит, 2004. 472 с.
8. Весницкий А.И. Избранные труды по механике. Нижний Новгород: Изд-во «Наш дом», 2010. 248 с.
9. Крысов С.В., Филатов Л.В. О движении тел вдоль упругих направляющих с закритическими скоростями. Прикладные проблемы теории колебаний. Нижний Новгород: ННГУ, 1991. С. 40–51.
10. Филатов Л.В. Задачи динамики тел, движущихся вдоль упругих направляющих. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 1992. 190 с
11. Сьянов С.А. Вынужденные колебания и резонанс одномерных упругих систем с движущимися нагрузками. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Горький, 1987. 120 с.
12. Болотин В.В. Случайные колебания упругих систем. М.: Наука, 1979. 335 с.
13. Уткин Г.А. Теоретические основы динамики одномерных систем с движущимися по ним объектами. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1991. 256 с.
14. Крысов С.В. Волновые процессы при контактных взаимодействиях подвижных сопряжений в упругих элементах машин и конструкций. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 1992. 313 с.
15. Метрикин А.В. Переходное излучение в упругих системах. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 1998. 221 с.
16. Веричев С.Н. Устойчивость колебаний механических систем с движущимися нагрузками. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 2009. 312 с.
17. Лисенкова Е.Е. Движение объектов под действием давления упругих волн. Дисс. ... кандидата физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 2009. 146 с.
18. Маланов С.Б. Ударное взаимодействие материальной точки с одномерной упругой системой. Дисс. ... кандидата физ.-мат. наук. Горький, 1989. 140 с.
19. Кажеев В.В. Волновые процессы в распределенных системах, взаимодействующих с сосредоточенными объектами. Дисс. ... кандидата физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 1999. 140 с.
20. Богданов Ю.В. Экспериментальные исследования волновых процессов при контактном и бесконтактном

- взаимодействии движущихся нагрузок с вязкоупругими опорными направляющими. Дисс. ... кандидата физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 2004. 152 с.
21. Ерофеев В.И. Волновые процессы в упругих телах с микроструктурой. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 1993. 303 с.
 22. Бутова С.В., Герасимов С.И., Ерофеев В.И. и др. Задачи устойчивости высокоскоростного движения объектов по упругим направляющим // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 1(3). С. 55-60.
 23. Одзерихо И.А. Исследование динамики монорельсовой двухопорной ракетной ступени и объекта испытания в опытах на ракетных треках на соответствие требований МАГАТЭ. Дисс. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2021. 117 с.
 24. 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
 25. Astakhov S.A., Biryukov V.I. Problems of ensuring the acceleration dynamics of aircraft during track test at a speed of 1600 m/s // INCAS Bulletin. 2020. Vol.12. Special issue, pp. 33-42. DOI: 10.13111/2066-8201.2020.12.S.3
 26. Астахов С.А., Архипов И.А., Киселев И.А. и др. Ракетная каретка для трековых испытаний. Патент RU 232970 U1. Бюл. № 10, 28.03.2025.
 27. Астахов С.А., Кутахов В.П. Исследование проблемы достижения сверхвысоких скоростей при трековых испытаниях ракетной техники и вооружения // Вооружение и экономика. 2024. № 4(70). С. 26-35. URL: https://viek.ru/70/vie_24_4%2870%29-026-035.pdf
 28. Астахов С.А., Бирюков В.И., Катаев А.В. Оценка эффективности различных методов торможения сохраняемого оборудования на ограниченной длине при высокоскоростных трековых испытаниях изделий авиационной и ракетной техники // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 2. С. 20-34. DOI: 10.34759/vst-2022-2-20-34
 29. Astakhov S.A., Biryukov V.I. Buckling under the action of loading by aerodynamic and inertial forces during ground track tests of aviation equipment // INCAS Bulletin. 2021. Vol. 13. Special Issue, pp. 5-12. DOI: 10.13111/2066-8201.2021.13.S.1
 30. Astakhov S.A., Biryukov V.I. Experimental Researches on the Conductivity of Shock Impacts from Track Sled Supports to Products during Supersonic Test // Russian Engineering Research. 2024. Vol. 44. No. 5, pp. 691-696. DOI: 10.3103/s1068798x24700874

References

1. Faikov Yu.I., Dudai VI., Nikulin VM, et al. Tests of rocket and aviation technology on a rocket track. *Izvestiya Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*. 2006(3):11-14. (In Russ.).
2. Minto DW. Recent increases in hypersonic test capabilities at the Holloman high speed test track. *38th Aerospace Sciences Meetings & Exhibit (January 10-13, 2000; Reno, Nevada, USA)*. DOI: 10.2514/6.2000-154
3. Walia S, Satya V, Malik S, et al. Rocket Sled Based High Speed Rail Track Test Facilities. *Defence Science Journal*. 72(2):182-194. DOI: 10.14429/dsj.72.17014
4. Minto DW, Bosmajian N. A Hypersonic Test Capabilities at the Holloman High-Speed Test Track. In: Marren D, Lu F. *Advanced Hypersonic Test Facilities*. 2012. p. 499-530. DOI: 10.2514/5.9781600866678.0499.0530
5. Gurol H, Ketchen D, Holland L, et al. Status of the Holloman high speed maglev test track (HHSMTT). *30th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference (June 16-20, 2014; Atlanta, GA)*. DOI: 10.2514/6.2014-2655
6. Stronge WJ. Aerodynamic testing on rocket sled tracks. *Aerodynamic Testing Conference (March 09-10, 1964; Washington, DC, USA)*. DOI: 10.2514/6.1964-1117
7. Gorshkov AG, Medvedskii AL, Rabinskii LN, et al. *Waves in continuous media*. Moscow: Fizmatlit; 2004. 472 p. (In Russ.).
8. Vesnitskii AI. *Selected works on mechanics*. Nizhny Novgorod: Nash dom; 2010. 248 p. (In Russ.).
9. Krysov SV, Filatov LV. *On the motion of bodies along elastic guides with supercritical velocities. Applied problems of the theory of oscillations*. Nizhny Novgorod: NNGU; 1991. p. 40-51. (In Russ.).
10. Filatov LV. *Problems of dynamics of bodies moving along elastic guides*. PhD thesis. Nizhny Novgorod: NfIMASh RAS; 1992. 190 p. (In Russ.).
11. S'yanov SA. *Forced oscillations and resonance of one-dimensional elastic systems with moving loads*. PhD thesis. Gorky: GGU im. N.I. Lobachevskogo; 1987. 120 p. (In Russ.).
12. Bolotin VV. *Random oscillations of elastic systems*. Moscow: Nauka; 1979. 335 p. (In Russ.).
13. Utkin G.A. *Theoretical foundations of the dynamics of one-dimensional systems with objects moving through them*. Doctoral thesis. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 1991. 256 p. (In Russ.).
14. Krysov SV. *Wave processes during contact interactions of mobile interfaces in elastic elements of machines and structures*. Doctoral thesis. Doctoral thesis. Nizhny Novgorod: NfIMASh RAS; 1992. 313 p. (In Russ.).
15. Metrikin AV. *Transient radiation in elastic systems*. Doctoral thesis. Nizhny Novgorod: NfIMASh RAS; 1998. 221 p. (In Russ.).
16. Verichev SN. *Stability of vibrations of mechanical systems with moving loads*. Doctoral thesis. Nizhny Novgorod: NfIMASh RAS; 2009. 312 p. (In Russ.).
17. Lisenkova EE. *Motion of objects under the influence of pressure of elastic waves*. PhD thesis. Nizhny Novgorod: NfIMASh RAS; 2009. 146 p. (In Russ.).

18. Malanov SB. *Impact interaction of a material point with a one-dimensional elastic system*. PhD thesis. Gorky: GfIMASh AS of the USSR; 1989. 140 p. (In Russ.).
19. Kazhaev VV. *Wave processes in distributed systems interacting with concentrated objects*. PhD thesis. Nizhny Novgorod: NfIMASh RAS; 1999. 140 p. (In Russ.).
20. Bogdanov YuV. *Experimental studies of wave processes during contact and non-contact interaction of moving loads with viscoelastic support guides*. PhD thesis. Nizhny Novgorod: NfIMASh RAS; 2004. 152 p. (In Russ.).
21. Erofeev VI. *Wave processes in elastic bodies with microstructure*. Doctoral thesis. MAThematical sciences. Nizhny Novgorod: NfIMASh RAS; 1993. 303 p. (In Russ.).
22. Butova SV, Gerasimov SI, Erofeev VI, et al. Problems of stability of high-speed movement of objects along elastic guides. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2013(1):55-60. (In Russ.).
23. Odzerikho IA. *Investigation of the dynamics of a monorail two-prop rocket stage and a test object in experiments on rocket tracks for compliance with the requirements of the IAEA*. PhD thesis. Nizhny Novgorod: IPM RAS; 2021. 117 p. (In Russ.).
24. Astakhov SA. Features of achievement of limiting speed values of track tests of ballistic type aircraft. *Siberian Aerospace Journal*. 2024;25(1):44-55. (In Russ.). DOI: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-44-55
25. Astakhov SA, Biryukov VI. Problems of ensuring the acceleration dynamics of aircraft during track test at a speed of 1600 m/s. *INCAS Bulletin*. 2020;12:33-42. DOI: 10.13111/2066-8201.2020.12.S.3
26. Astakhov SA, Arkhipov IA, Kiselev IA, et al. *Rocket carriage for track tests*. Patent RU 232970 U1, 28.03.2025. (In Russ.).
27. Astakhov SA, Kutakhov VP. Study of the Ultra-High Speed Achievement Problem During the Missiles and Weapons Track Tests. *Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics*. 2024;70(4):26-35. (In Russ.).
28. Astakhov SA, Biryukov VI, Kataev AV. Effectiveness evaluation of various methods of the retainable equipment braking at the limited length while high-speed track tests of aircraft and rocket engineering products. *Aerospace MAI Journal*. 2022;29(2):20-34. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2022-2-20-34
29. Astakhov SA, Biryukov VI. Buckling under the action of loading by aerodynamic and inertial forces during ground track tests of aviation equipment. *INCAS Bulletin*. 2021;13:5-12. DOI: 10.13111/2066-8201.2021.13.S.1
30. Astakhov SA, Biryukov VI. Experimental Researches on the Conductivity of Shock Impacts from Track Sled Supports to Products during Supersonic Test. *Russian Engineering Research*. 2024; 44(5):691-696. DOI: 10.3103/s1068798x24700874

Статья поступила в редакцию / Received 07.04.2025
 Одобрена после рецензирования / Revised 28.04.2025
 Принята к публикации / Accepted 17.03.2025