Научная статья
УДК 629.7:629.018

Моделирование динамики движения экспериментальной установки при трековых испытаниях ракетной техники и вооружения

Сергей Анатольевич Астахов, Владимир Павлович Кутахов

Аннотация. Одной из основных стадий при создании новых образцов ракетного вооружения является стадия испытаний, ключевым этапом которой служат наземные испытания на скоростном рельсовом треке. При трековых пусках проводятся исследования технических решений, заложенных в объект испытаний, подтверждается достижение заданных параметров образца, функционирование систем объекта на высоких скоростях полёта. Достижение высоких и сверхвысоких скоростей на скоростном рельсовом треке ограничивается рядом факторов, в их числе перегрузки и виброударные нагружения при движении по рельсовому треку. В работе с целью повышения способности трековой установки к реализации высоких скоростных параметров проводится моделирование динамики движения экспериментальной установки и численные исследования вибраций динамической системы ТК-ОИ (трековая каретка-объект испытаний).

Ключевые слова: наземные испытания; рельсовый трек; трековая экспериментальная установка; сверхвысокие скорости; модель динамики движения; моделирование; вибрации

Для цитирования: Астахов С.А., Кутахов В.П. Моделирование динамики движения экспериментальной установки при трековых испытаниях ракетной техники и вооружения // Вооружение и экономика. 2025. №1(71). С. 31-41.

Original article

The Dynamics Motion Simulation of an Experimental Facility During Missiles and Weapons Track Tests

Sergei A. Astakhov, Vladimir P. Kutakhov

Abstract. One of main stages of new missile and weapons samples creation is the testing stage, and the ground tests on a high-speed rail track is the key stage. During track launches the study of technical approachres that are inherent in the test object is carried out, and the achievement of the sample specified technical parameters, object system operation at flight high speed is confirmed. An attainment of high and super-high speed at high-speed rail track is limited by several factors which include overload factor, vibroimpulsive loading in the course of the rail track movement. In the course of work the dynamic motion simulation with the aim of track facility capability ehancement for high-speed parameters performing, and vibrations numerical studies of the dynamic track carriage-test object system are conducted.

Keywords: ground tests; rail track; track experimental facility; high speed; dynamics motion model; simulation; vibrations

For citation: Astakhov S.A., Kutakhov V.P. The Dynamics Motion Simulation of an Experimental Facility During Missiles and Weapons Track Tests. Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics. 2025;71(1): 31-41. (In Russ.).

Введение

Трековые испытания образцов ракетной техники и вооружения проводят на ракетных рельсовых треках[1]. В качестве экспериментальной установки (ЭУ) используют трековую каретку (ТК) со средствами разгона, как правило, ракетными двигателями твердого топлива (РДТТ), и помещенный на нее объект испытания (ОИ) [2]. Достижение высоких скоростей разгона системы ТК-ОИ (трековая каретка-объект испытаний) ограничивается рядом механических факторов, характерных для экспериментальной установки и её поведения на высоких скоростях движения по рельсовым направляющим. Среди них существенную роль играют возникающие при движении каретки виброперегрузки. Уровень и характеристики виброперегрузок, их влияние на достижение высоких скоростей ОИ и способы снижения этого влияния исследуются как экспериментальным путём, так и моделированием динамики движения с оценкой их аэродинамических характеристик и численных значений виброперегрузок [3; 4].

[1] *См*.: Файков Ю.И., Бердников В.А., Шульженко П.Ф. Функциональная отработка боевых частей и ракетных комплексов на многоцелевом испытательном комплексе ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» // Известия РАРАН. 2006. №3. С. 64-67; *см. также* [1].

В данной работе развивается направление моделирования движения системы ТК-ОИ в составе экспериментальной трековой установки. Построение модели осуществлялось применительно к ракетному рельсовому треку, используемому на действующем научно-испытательном полигоне.

Характеристика силовых воздействий на систему ТК-ОИ

Трековые каретки с объектом испытаний образуют сложную динамическую систему, обладающую неравномерно распределенной массой и упругостью (жесткостью), нагруженную рядом сил и моментов, действующих относительно центра масс и центра приложения аэродинамических сил. Схема сил и моментов, действующих на элементы ТК-ОИ, представлена на рисунке 1.

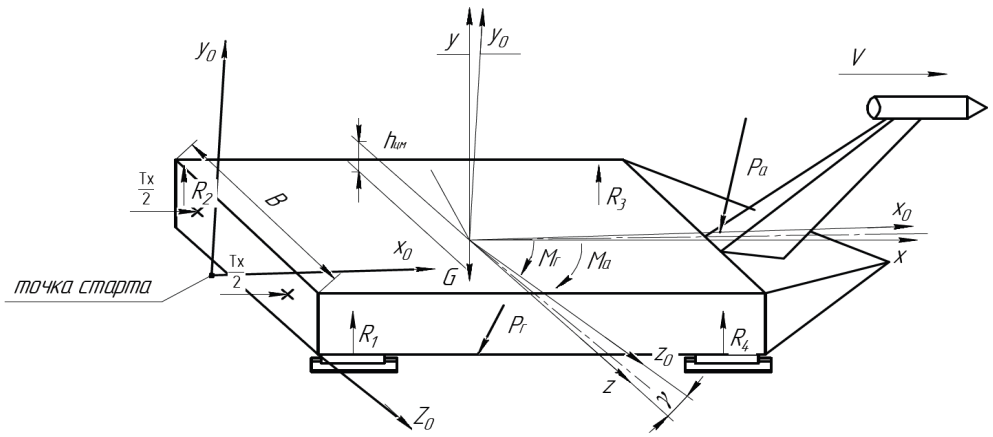

Рисунок 1 – Схема сил и моментов, действующих на элементы ТК-ОИ

Формулы равновесия системы ТК-ОИ представляют собой систему уравнений (1).

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{n} P_{k_i=1}(x,t) = P_{\text{ин}}(x,t) + T_{\sum}(x,t) + P_{\text{А}}(x,t) + P_{\Gamma}(x,t) + F_{\text{тр}}(x,t) = 0 \\ \sum_{k=1}^{n} P_{k_i=2}(y,t) = P_{\text{ин}}(y,t) + T(y,t) + P_{\text{А}}(y,t) + P_{\Gamma}(y,t) + \sum_{j=1}^{m} R_{j_{\text{РП}}}(y,t) = 0 \\ \sum_{k=1}^{n} P_{k_i=3}(z,t) = P_{\text{ин}}(z,t) + T(z,t) + P_{\text{А}}(z,t) + P_{\Gamma}(z,t) + \sum_{j=1}^{m} R_{j_{\text{РП}}}(z,t) = 0 \\ \sum_{k=1}^{n} P_{k_i=4}(x,t) = M_{\text{ин}}(x,t) + M_T(x,t) + M_{\text{А}}(x,t) + M_{\Gamma}(x,t) + \sum_{j=1}^{m} M_{j_{\text{РП}}}(x,t) = 0, \\ \sum_{k=1}^{n} P_{k_i=5}(y,t) = M_{\text{ин}}(y,t) + M_T(y,t) + M_{\text{А}}(y,t) + M_{\Gamma}(y,t) + \sum_{j=1}^{m} M_{j_{\text{РП}}}(y,t) = 0 \\ \sum_{k=1}^{n} P_{k_i=6}(z,t) = M_{\text{ин}}(z,t) + M_T(z,t) + M_{\text{А}}(z,t) + M_{\Gamma}(z,t) + \sum_{j=1}^{m} M_{j_{\text{РП}}}(z,t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где: $i = \{1,2,\dots,6\}$ – число степеней свободы;
k – количество учтенных сил, действующих на систему;
j – количество башмаков каретки;
$P_{\text{ин}}$ – проекции сил инерции; $M_{\text{ин}}$ – проекции моментов от сил инерции;
T – проекции сил тяги и M_T – моментов ДУ;
$P_{\text{А}}$ – проекции аэродинамических сил ($M_{\text{А}}$ – моментов);
P_{Γ} – проекции гидродинамических сил (M_{Γ} – моментов);
$F_{\text{тр}}$ – силы трения опор скольжения с контактной поверхностью рельсов;
$\sum R_{\text{РП}}$ – проекции сил действующих со стороны рельсов ($\sum M_{\text{РП}}$ – моментов).

Динамика системы ТК-ОИ определяется внутренними силами, возникающими в элементах конструкции под действием внешних силовых нагружений: силы тяги двигательных установок, силы трения, силы торможения, аэродинамических сил, силы давления акустического поля.

Математическое описание внешних нагрузок на систему ТК-ОИ представлено формулами (2-5).

Сила тяги двигательных установок (комбинация n двигателей типа i с тягой T):

$$T_{\sum} = \sum_0^i n_i T_i. \tag{2}$$

Сила торможения:

$$\begin{cases} P_{\Gamma X} = C_{\Gamma X}\frac{\rho_{\text{В}} W^2}{2} S_{\text{ГК}}(x) \\ P_{\Gamma Y} = C_{\Gamma Y}\frac{\rho_{\text{В}} W^2}{2} S_{\text{ГК}}(x) \\ P_{\Gamma Z} = C_{\Gamma Z}\frac{\rho_{\text{В}} W^2}{2} S_{\text{ГК}}(x) \\ M_{\Gamma Z} = m_{\Gamma Z}\frac{\rho_{\text{В}} W^2}{2} S_{\text{ГК}}(x) l \\ M_{\Gamma Y} = m_{\Gamma Y}\frac{\rho_{\text{В}} W^2}{2} S_{\text{ГК}}(x) l \\ M_{\Gamma X} = m_{\Gamma X}\frac{\rho_{\text{В}} W^2}{2} S_{\text{ГК}}(x) B \end{cases}, \tag{3}$$

где: $\rho_{\text{В}}$ – плотность воды; $C_{\Gamma X}$, $C_{\Gamma Y}$, $C_{\Gamma Z}$, $m_{\Gamma Z}$, $m_{\Gamma Y}$, $m_{\Gamma X}$ – гидродинамические коэффициенты тормозного устройства ТК; $S_{\text{ГК}}(x)$ – омываемая площадь заборного устройства; l – расстояние от центра тяжести ТК до центра приложения гидродинамических сил ковша; B – ширина рельсового полотна, м.

Сила трения:

$$F_{\text{тр}} = 2\mu\left(\left|F_{\text{вн}_Z}\right| + \left|F_{\text{вн}_{Z_2}}\right| + \left|F_{\text{вн}_Y}\right|\right), \tag{4}$$

где: $F_{\text{тр}}$ – компонент силы трения от внутренних сил, Н; $F_{\text{вн}_Z}$, $F_{\text{вн}_{Z_2}}$, $F_{\text{вн}_Y}$ – силы реакции опоры (поверхности контакта рельс-башмак) по боковому направлению Z с одной и с другой стороны контакта рельс-башмак соответственно и по вертикальному направлению Y; μ – коэффициент трения.

Аэродинамические силы:

$$\begin{cases} P_{\text{AX}} = \left(C_{\text{AX}_0} + C_{\text{AX}}^{\alpha}\alpha + C_{\text{AX}}^{\beta}\beta\right)\frac{\rho_{\text{A}} W^2(x)}{2} S_m \\ P_{\text{AY}} = \left(C_{\text{AY}_0} + C_{\text{AY}}^{\alpha}\alpha + C_{\text{AY}}^{\beta}\beta\right)\frac{\rho_{\text{A}} W^2(x)}{2} S_m \\ P_{\text{AZ}} = \left(C_{\text{AZ}_0} + C_{\text{AZ}}^{\alpha}\alpha + C_{\text{AZ}}^{\beta}\beta\right)\frac{\rho_{\text{A}} W^2(x)}{2} S_m \\ M_{\text{AZ}} = \left(m_{\text{AZ}_0} + m_{\text{AZ}}^{\alpha}\alpha\right)\frac{\rho_{\text{В}} W^2}{2} S_m l \\ M_{\text{AY}} = \left(m_{\text{AY}_0} + m_{\text{AY}}^{\alpha}\beta\right)\frac{\rho_{\text{В}} W^2}{2} S_m l \\ M_{\text{AX}} = \left(m_{\text{AX}_0} + m_{\text{AX}}^{\alpha}\gamma\right)\frac{\rho_{\text{В}} W^2}{2} S_m B \end{cases}, \tag{5}$$

где: C_{AX_0}, C_{AY_0}, C_{AZ_0}, m_{AX_0}, m_{AY_0}, m_{AZ_0} – аэродинамические коэффициенты системы ТК-ОИ при нулевых углах тангажа, рыскания и крена; S_m – мидель динамической системы ТК-ОИ; $C_{\text{AX}}^{\alpha} = \frac{\partial C_{\text{AX}}}{\partial \alpha}, \ldots, m_{\text{AX}}^{\gamma} = \frac{\partial m_{\text{AX}}}{\partial \gamma}$ – коэффициенты аэродинамических сил и моментов, учитывающих возмущенное колебательное движение системы ТК-ОИ.

В дополнение к внешним силам на систему ТК-ОИ воздействуют импульсные силы – виброударные нагружения, возникающие при разделении трековой каретки (в случае многоступенчатой конструктивной схемы), при прохождении стыков между рельсами (рисунок 2), при наличии зазоров между рельсовым полотном и башмаком (рисунок 3), при наличии расстояния между центром масс и центром жесткости элементов ТК-ОИ – эксцентриситета центра жесткости. Весьма важным возмущающим воздействием на систему ТК-ОИ при

её движении является неидеальная прямолинейность трека – имеющие место и практически неустранимые в процессе испытаний малые отклонения рельсового пути от прямолинейности. На рисунке 4 представлены примеры измеренных отклонений[2].

Рисунок 2 – Вид стыкового зазора между рельсами с изображением элементов заделки крепления рельсов к бетонному основанию и анкерной заделки с рельсовой направляющей

Рисунок 3 – Вид типовой опоры скольжения (башмака) рельсовой каретки, вид крепления опоры к цапфе поперечной балки, вид ковша гидроторможения

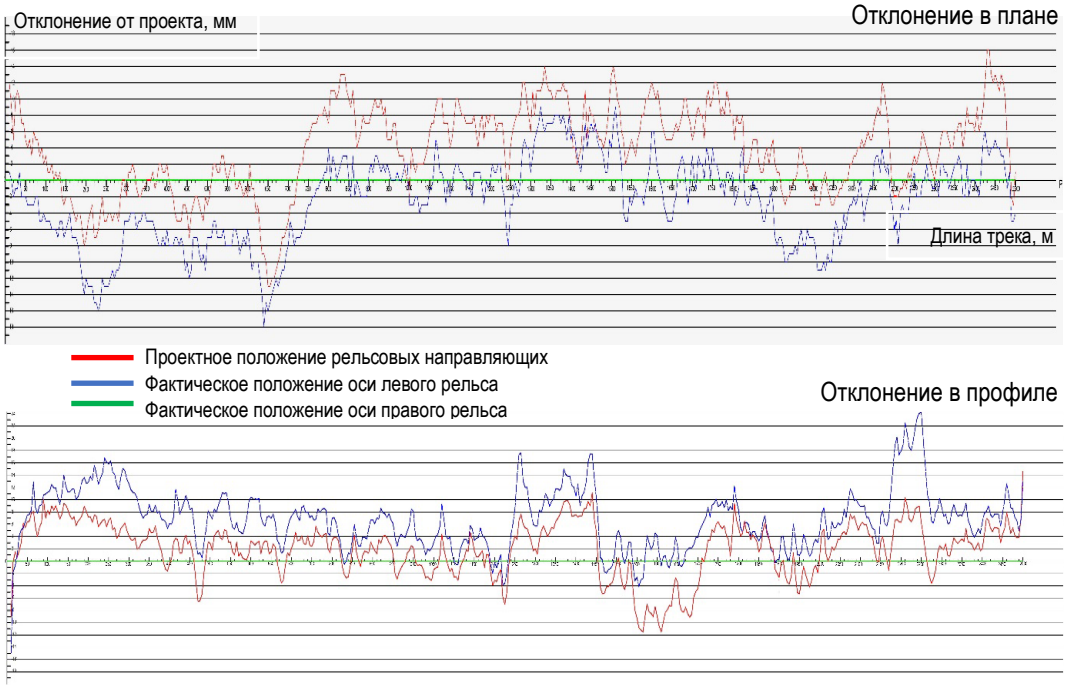

Рисунок 4 – Отклонение рельсового пути от прямолинейности

[2] Вибрации в технике: справочник в 6 т. Т.1: Колебания линейных систем. 2-е изд. / Под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение, 1999. 504 с.

В результате действия импульсных сил в динамической системе ТК-ОИ возникают различные виды колебаний, которые имеют собственные частоты и учитываются в модели как изгибно-крутильные колебания консольно-закрепленной тонкостенной трубчатой балки с неравномерным распределением присоединенной массы по длине [5].

При формировании расчетной модели связанной динамической системы ТК-ОИ конструкция каретки представляется системой взаимосвязанных упругих балок (стержней, трубок) с эквивалентной массой и жесткостью. Балки с переменными по длине инерционными и упругими свойствами соединены сосредоточенными жесткими связями со своей упругостью (либо в виде вязкоупругой связи), нагружены изменяющимися внешними силами и моментами. РДТТ представляются блоком с распределенной по длине массой и жесткостью, переменными по времени. Связи элементов кареток, препятствующие перемещениям балок, моделируются соответствующими опорами. Для оценки собственных частот, форм колебаний и их производных, единичных нагрузок в различных сечениях по длине балок используются известные методы расчета (метод конечных элементов, метод начальных параметров, конечно-разностный метод)[3].

При создании модели для задания нагрузок применяется метод прямого интегрирования дифференциальных уравнений движения модели. Диссипативные силы учитываются через логарифмические декременты колебаний. Дискретно-массовая модель позволяет определить усилия и моменты в связях между элементами, виброускорения, перемещения и углы поворота. Для отдельных элементов напряжения, перемещения, деформации внутри них определяются через перемещения связей методом конечных элементов.

Для реализации численных расчетов разработана универсальная программа в среде *Амесим*, позволяющая преобразовать исходную компоновку ТК-ОИ программного комплекса в конкретную для данного испытания. В программе для оценки влияния на вибрационные характеристики элементов конструкции каретки и объекта испытания учитываются изменяющиеся величины стыковых зазоров между рельсами вследствие температурного удлинения (или уменьшения) в диапазоне значений от $-20°C$ до $+25°C$, а также влияние конструктивных зазоров между боковыми стенками опор скольжения и головкой рельсовой направляющей. Зазоры разнонаправлено влияют на динамику разгона трековой каретки и имеют рациональные значения для конкретной конструкции башмаков в зависимости от скорости движения каретки. Также важен учет механических свойств элементов каретки (изменение упругих свойств на растяжение/сжатие, изгиб, кручение). Как показали расчеты, высокая жесткость рамы приводит к увеличению вибрационной нагрузки вплоть до деформаций, приводящих к заклиниванию тележки на рельсах при малых зазорах между боковыми стенками башмаков и головкой рельсов. Достаточно важным является передаваемость вибраций от элементов каретки к объекту испытания (особенно к его электронным приборам, расположенным в носовой части). Моделирование позволяет варьировать установкой различного количества РДТТ, изменяя тягу и массу подвижного трекового снаряжения. Геометрическая *3D* модель трековой каретки для упрощения программы была разделена на четыре блока. Ко всем блокам присоединены соответствующие опоры. Блоки масс связаны между собой соединениями, жёсткость которых подсчитана по формуле:

$$k = ES/L_0, \tag{6}$$

где E – модуль Юнга; S – площадь поперечного сечения; L_0 – длина.

Площадь каждого поперечного сечения выбирается из *3D* модели.

[3] Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: справочник / Под общ. ред. В.И. Мяченкова. М.: Машиностроение, 1989. 520 с.

На рисунке 5 изображены фрагменты разбиения *3D* модели каретки с РДТТ.

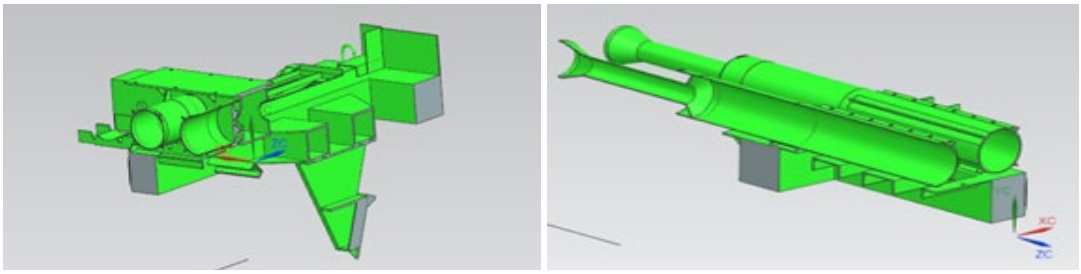

Рисунок 5 – Фрагменты разбиения *3D* модели каретки с РДТТ

Моделирование аэродинамических взаимодействий

Для расчета аэродинамических сил в математическую модель закладывается зависимость коэффициентов аэродинамического сопротивления, подъемной силы и боковой силы от скорости движения. Для расчета моментов аэродинамических сил в модель закладываются координаты фокуса аэродинамических сил. Расчет аэродинамических сил выполняется как для отдельных элементов, так и для всей каретки программным пакетом *Flow Vision*.

Численное моделирование проводится по адаптированной сетке (рисунок 6). Для проверки сеточной сходимости принятой расчетной модели расчеты выполнены на сетках разного уровня адаптации.

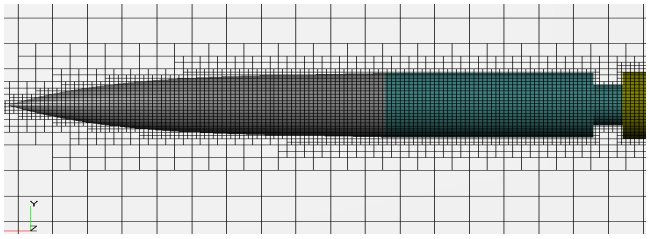

Рисунок 6 – Адаптированная к границам расчетная сетка

В качестве примера определения аэродинамических сил и моментов на рисунке 7 представлена *3D* модель трековой каретки, используемой на действующем научно-испытательном полигоне. Трековая каретка представляет собой раму с приваренными поперек тремя балками. На торцевых окончаниях передней и задней балок шарнирно размещены башмаки – опоры скольжения, охватывающие головку рельсов. На средней и задней балках выполнены ложементы для размещения РДТТ. На передней и средней балках консольно размещается объект испытания с вынесенным вперед обтекателем. Заделка объекта испытания жесткая. Внизу посередине каретки установлен ковш, предназначенный для гидродинамического торможения в целях сохранения материальной части после проведения эксперимента.

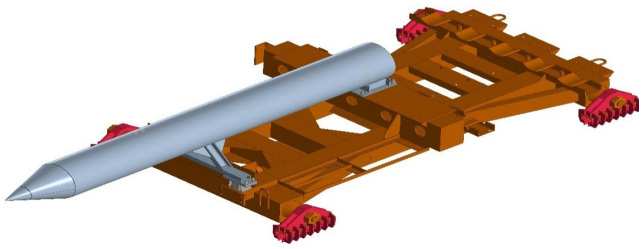

Рисунок 7 – *3D* модель трековой каретки с ложементами под РДТТ

На рисунках 8-10 приводятся результаты численного моделирования динамики движения двухрельсовой каретки с пятью РДТТ.

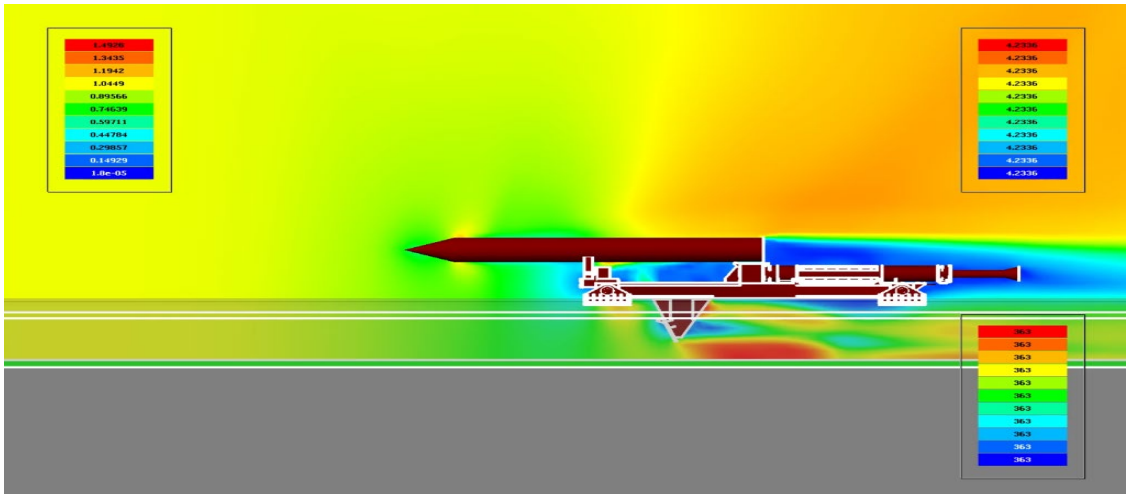

Рисунок 8 – Фронтальное изображение обтекания модели воздушным потоком со скоростью 363 м/с

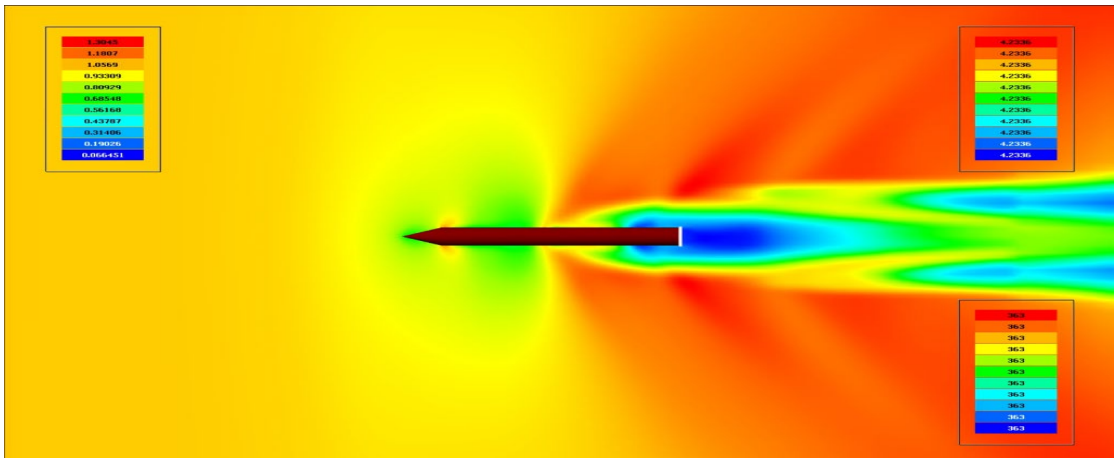

Рисунок 9 – Вид сверху. Картина обтекания модели воздушным потоком со скоростью 363 м/с. Уровень объекта испытания

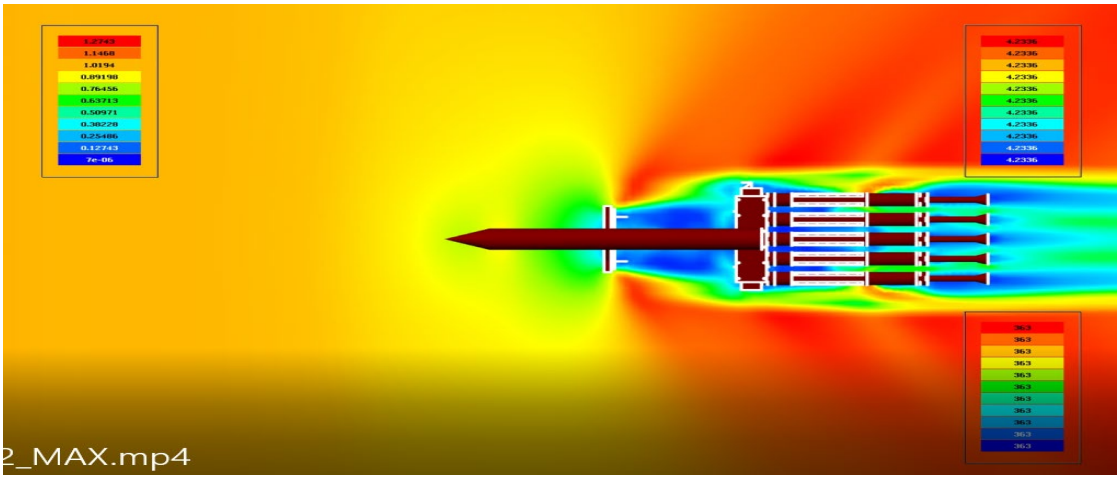

Рисунок 10 – Вид сверху. Картина обтекания модели воздушным потоком со скоростью 363 м/с. Уровень трековой каретки

На рисунках видна сложная картина интерференции скачков уплотнений, отраженных от элементов конструкции каретки, включая полотно рельсового трека. Для различных режимов движения получены численные значения газодинамических сил, моментов и распределения параметров давления, плотности, температуры.

Анализ результатов моделирования показал, что ускорение каретки изменяется в процессе разгона в соответствии с циклограммой работы блока РДТТ, одновременно по мере роста скорости каретки увеличиваются силы аэродинамического сопротивления. Силы трения башмаков каретки о рельсы в процессе движения переменны. При увеличении скорости движения каретки возникающая подъемная сила уменьшает силу веса снаряжения и соответственно снижает трение скольжения. Одновременно уменьшается масса подвижной установки из-за сгорания топлива двигателей. Также учитывается влияние стыковых зазоров между рельсами и зазоров между стенками опор скольжения и головкой рельсов на площадь контакта башмаков.

На рисунке 11 приведены графики изменения аэродинамических сил, действующим по различным направлениям.

По оси Z боковая сила составляет всего $1{,}5$ кН. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с данными экспериментов, проводимых на Полигоне на натурных объектах.

На рисунках 12-13 приведены графики величин сил трения на передних и задних опорах.

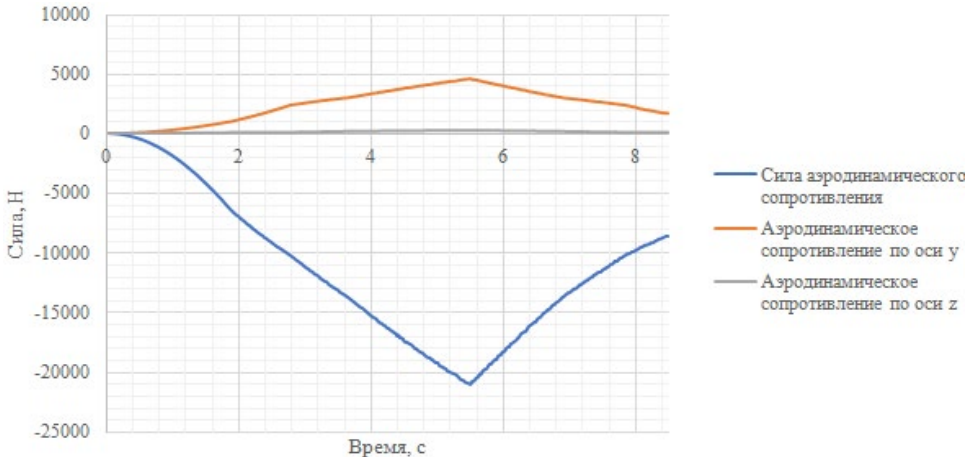

Рисунок 11 – Силы аэродинамического сопротивления по направлениям осей X, Y, Z

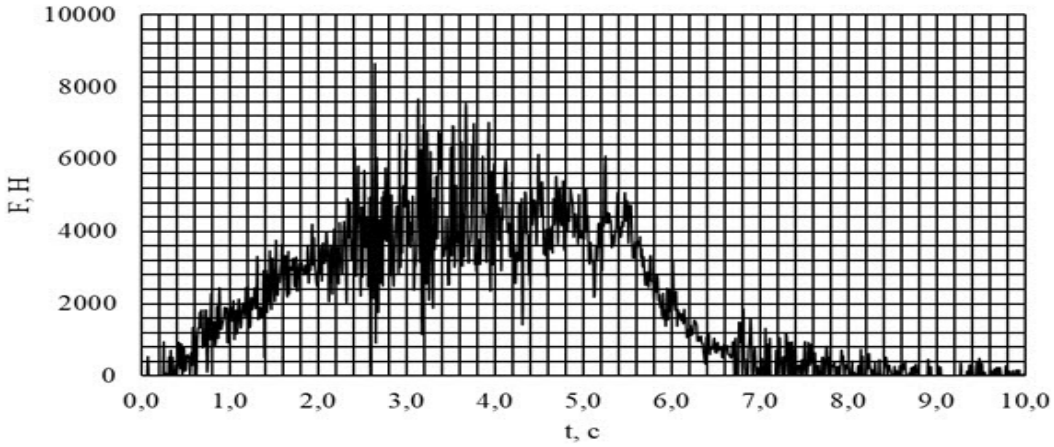

Рисунок 12 – Силы трения на передней опоре с правой стороны каретки

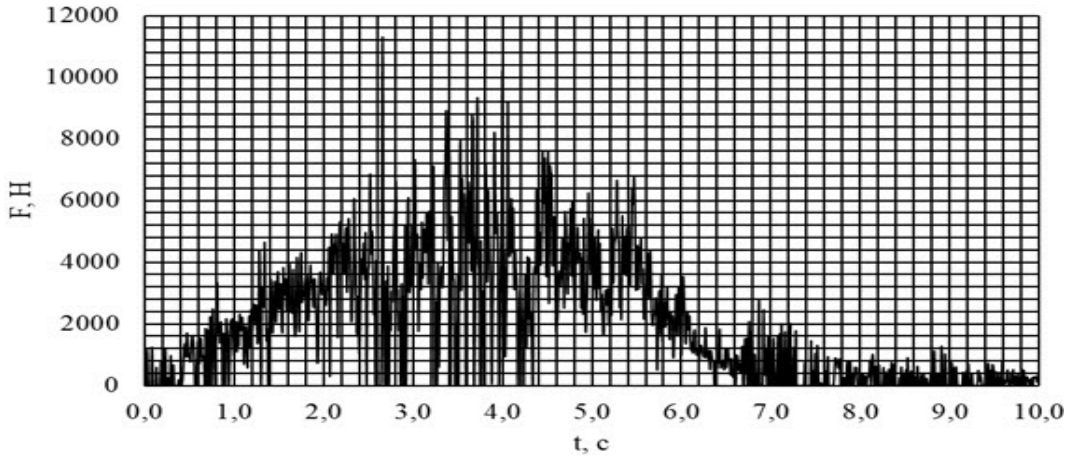

Рисунок 13 – Силы трения на задней опоре с правой стороны каретки

В процессе ускоренного движения на участке разгона со 2 с по 5 с силы трения на передней опоре практически постоянны. Динамика изменения величин потерь трения на задней опоре несколько отличается. В процессе разгона до скорости 690 м/с (на $2{,}9$ с) силы трения заднего башмака растут, а далее по мере увеличения скорости уменьшаются. Сказывается распределение массы трековой каретки и влияние сил аэродинамического сопротивления. Размах амплитуд сил трения на заднем башмаке выше, чем на переднем. На участке торможения на 7 с реализуется удар при вхождении ковша в воду лотка, размещенного между рельсами, и возникают значительные гидравлические силы и моменты, уменьшающие скорость движения каретки. При этом неровности рельсового пути на этом участке трека являются не значимыми с точки зрения динамических воздействий на конструкцию башмаков, каретки и объекта испытания.

На рисунке 14 приведены зависимости плотности спектра вибраций в диапазоне низких частот от 0 Гц до 500 Гц.

По оси X виброускорения с большими значениями соответствуют собственным частотам, так $AR = 300g$ при частоте $f = 150$Гц; $AR = 580g$ при частоте $f = 277$Гц. По оси Y виброускорения относительно невелики и не превышают $100g$ в широкой полосе частот.

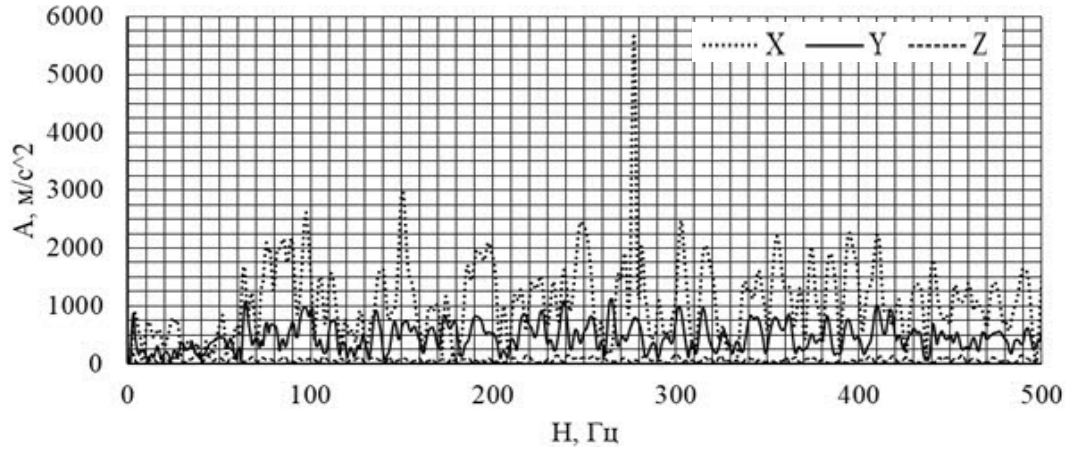

Рисунок 14 – Плотность спектра мощности виброускорений каретки в направлении осей X, Y и Z

На рисунках 15-16 приведены амплитудно-частотные зависимости для виброперегрузок на опорах по оси Y.

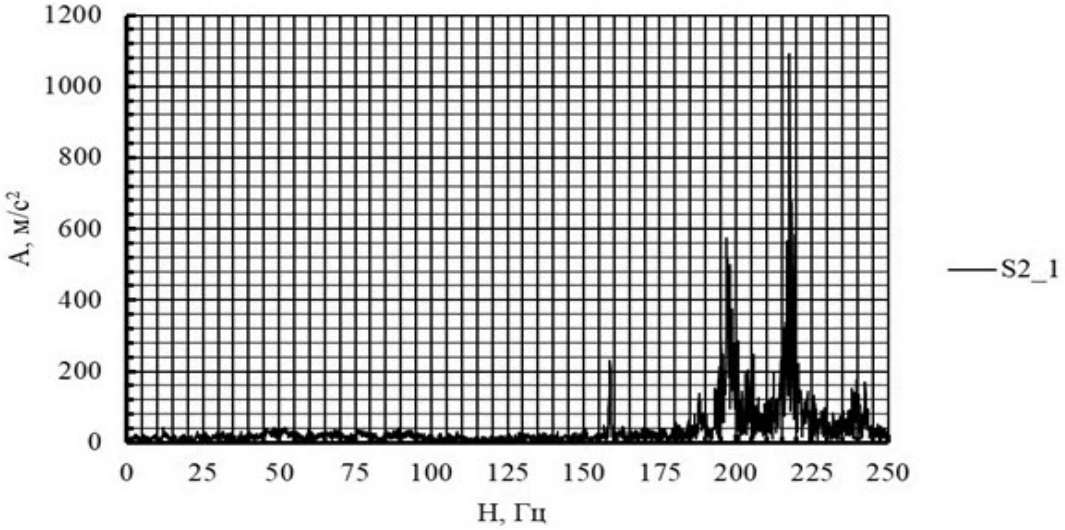

Рисунок 15 – Плотность спектра виброускорений по оси Y правой передней опоры

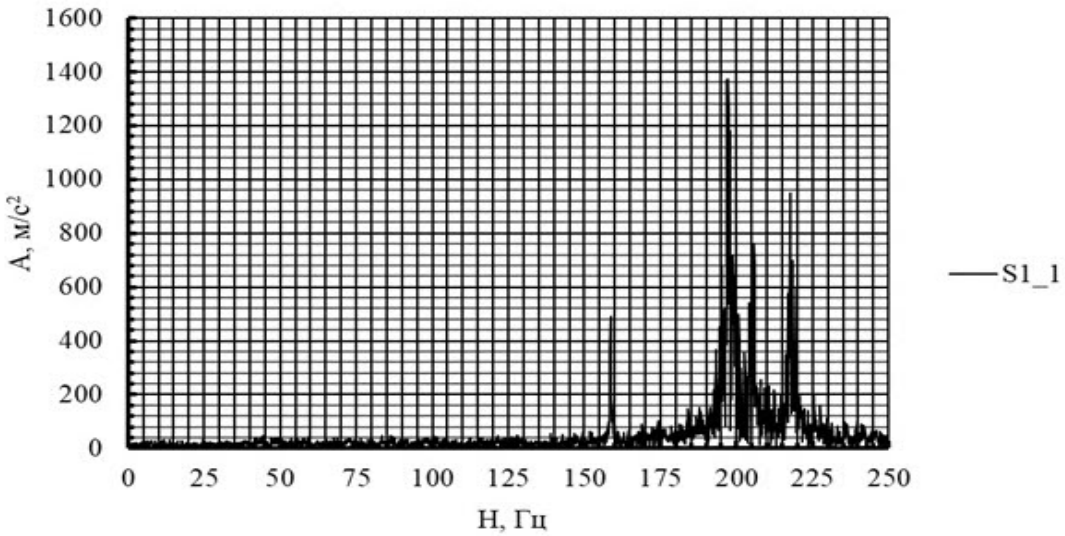

Рисунок 16 – Плотность спектра виброускорений по оси Y правой задней опоры

В среднем по всем передним и задним опорам каретки амплитуды вибраций по оси Y в диапазоне частоты от 150 Гц до 250 Гц остаются на уровне 500 м/с^2 (около 50 *g*). Выделяются резонансы с амплитудой A_R= 500 *g* на частотах f = 190-210 Гц, а также A_R =135, 110 *g* при f = 200, 220 Гц. Реальные нагрузки на опорах каретки, как показали испытания на Полигоне, существенно могут превышать расчетные.

Выводы

Моделирование виброускорений проводилось для основных элементов системы трековая каретка-объект испытаний. Расчетные данные, полученные по результатам моделирования, позволяют производить предварительную оценку значений виброперегрузок непосредственно на корпусе трековой каретки, передних и задних ее опорах, а также на самом объекте испытаний для оценки возможности системы ТК-ОИ выдерживать перегрузки и виброударные нагружения для достижения испытуемым объектом заявленных параметров испытаний.

По результатам предварительной оценки параметров нагружения системы ТК-ОИ принимается решение о проведении реальных пусков на ракетном рельсовом треке Полигона. При пусках на основные элементы системы ТК-ОИ устанавливаются датчики для снятия значений виброускорений. Значения, полученные с датчиков, как правило, соответствуют расчетным значениям, полученным в результате моделирования процессов испытаний.

Результаты моделирования позволяют получить множество параметров от действия внешних сил, виброударных нагрузок и собственных колебаний системы с целью разработки мероприятий по снижению влияния негативных факторов, сопровождающих испытательные процедуры и обеспечения достижения высоких скоростей испытуемого объекта при проведении трековых испытаний.

Результаты проведенных испытаний, в том числе полученные значения скоростей и виброускорений, зафиксированных при проведении экспериментов, а также мероприятия по повышению скоростей и снижению вибраций планируется представить в следующих научных статьях изданий РАРАН.

Список источников

1. Файков Ю.И., Дудай В.И., Никулин В.М., Шляпников Г.П. Испытания ракетной и авиационной техники на ракетном треке // Известия РАРАН. 2006. №3. С. 11-14.
2. Астахов С.А. Особенности достижения предельных значений скорости трековых испытаний летательных аппаратов баллистического типа // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т.25. №1. С. 44-55.
3. Камчатный В.Г. Особенности динамики взаимодействия высокоскоростных объектов с рельсовой направляющей // Испытания материалов и конструкций: сб. науч. трудов. Вып.2. Н. Новгород: Интелсервис, 2000. С. 206-215.
4. Бутова С.В., Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Камчатный В.Г. Задачи устойчивости высокоскоростного движения объектов по упругим направляющим // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. №1-3. С. 55-60.
5. Герасимов С.И., Ерофеев В.И. Расчет изгибно-крутильных колебаний рельсовой направляющей ракетного трека // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. №3. С. 25-27.

Информация об авторах

С.А. Астахов – кандидат технических наук, SPIN код автора 5836-4639.
В.П. Кутахов – доктор технических наук, профессор.