УДК: 623.488 DOI: 10.53816/20753608_2021_4_97

МЕТОДЫ ТОРМОЖЕНИЯ РАЗГОННОЙ КАРЕТКИ В ПРОЦЕССЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА РАКЕТНОМ ТРЕКЕ

THE BRAKING METHODS OF THE ROCKET SLEDIN THE PROCESS OF THE ROCKET TRACK DYNAMIC TESTS

Академик РАРАН В.Т. Волков, Н.М. Ватутин, В.В. Колтунов, Ю.С. Фурсов

ФКП «НИО «ГБИП России»

V.T. Volkov, N.M. Vatutin, V.V. Koltunov, Yu.S. Fursov

В статье рассматривается вопрос разработки метода торможения разгонной каретки в процессе высокоскоростных динамических испытаний на ракетном треке, основанного на использовании в качестве энергопоглощающей среды спецжидкости с переменными реологическими характеристиками, а также улавливание разгонной каретки и её фрагментов. В качестве таких сред предлагается использовать дилатантные жидкости с различной степенью консистенции или электрореологические суспензии, способные изменять свою вязкость под действием электрического поля. С целью защиты отделившегося испытуемого объекта от наседающих масс разгонной каретки и её фрагментов после отделения испытуемого объекта и схода каретки с рельсовых направляющих трека предлагается использовать уловитель, состоящий из ограждающей конструкции и находящейся за ней энергопоглощающей среды.

Ключевые слова: динамические испытания, ракетный трек, разгонная каретка, торможение каретки, энергопоглощающая среда, реологическая жидкость, улавливающее устройство.

The article discusses the development of a method for braking an accelerating rocket sled during a rocket track high-speed dynamic tests, based on the use of a special fluid with variable rheological characteristics as an energy-absorbing medium, as well as capturing the accelerating rocket sled and its fragments. Dilatant liquids of varying consistency or electro rheological suspensions capable of changing their viscosity under the action of an electric field can be used as such media. In order to protect the separated test object from the pressing masses of the accelerating rocket sled and its fragments after separation of the test object and the rocket sled coming off the rail tracks, it is proposed to use a trap consisting of the enclosing structure and the energy-absorbing medium located behind it.

Keywords: dynamic tests, rocket track, rocket sled braking, energy-absorbing medium, rheological fluid, trapping device.

Трековые испытания новейших образцов вооружения, военной и специальной техники (далее — объект) получили всеобщее признание, как один из наиболее эффективных видов динамических испытаний. В отличие от лётных испытаний, весьма дорогостоящих и сложных, испытания на наземном треке позволяют весь-

ма экономично и оперативно проводить экспериментальную отработку новых объектов как в собранном виде, так и в виде отдельных фрагментов и элементов [1–3, 10].

В процессе испытаний на ракетном треке возникает необходимость торможения ракетных кареток, которое выполняется в следующих случаях:

- когда по требованию программы испытаний испытуемый объект должен быть сохранён для последующего осмотра и обследования;
- при пусках двух- или трёхступенчатых ракетных поездов, когда сохранение для последующего использования первых ступеней поезда экономически целесообразно;
- когда необходимо отделить наседающую массу разгонной каретки от отделяемого испытуемого объекта (в этом случае, обычно ограничиваются притормаживанием каретки для создания между ними требуемого интервала).

При трековых испытаниях объект устанавливается на каретке ракетного трека и разгоняется с её помощью до заданной скорости, после чего осуществляется торможение каретки с одновременной отстыковкой от нее объекта испытаний, и дальнейший его свободный полет до преграды. В этом случае, для торможения ракетных кареток при проведении исследований на ракетном треке применяются различные типы тормозных устройств.

Одним из наиболее распространённых устройств для торможения ракетных кареток является система фрикционных башмаков (рис. 1), приводимых в действие пороховыми аккумуляторами давления (ПАД) [1–4]. При срабатывании пиропатрона, находящегося в закрытой цилиндрической газовой полости тормозного цилиндра, воспламеняется пороховая шашка. Образующиеся газы толкают поршень, действующий на жидкость в рабочей полости тормозного цилиндра, посредством которой передаётся усилие на фрикционные элементы, контактирующие с головкой рельса. Данное устройство обладает

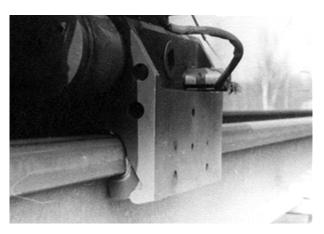


Рис. 1. Двухпоршневой тормозной башмак типа БТ-2П после процесса торможения

высоким быстродействием, однако не лишено и отдельных недостатков, таких как повышенный износ рельсовых направляющих трека под воздействием на них фрикционных башмаков, а также сложность осуществления синхронного срабатывания ПАДов при использовании на двухрельсовых треках.

Отдельную группу тормозных устройств представляют гидродинамические (рис. 2), в которых торможение объектов осуществляется жидкостью, преимущественно водой. Так, например, в устройствах [5, 6] торможение разогнанного объекта осуществляется встречным потоком воды. Данные устройства хорошо работают для торможения в основном малоразмерных объектов. Однако их недостатком является потребность в дополнительном насосном оборудовании, а применительно к ракетным трекам — необходимость в наличии больших объемов воды.

Еще одним из видов гидродинамических тормозных устройств для ракетных кареток являются системы лоткового типа [7], содержащие заполненную энергопоглощающей жидкой средой (как правило водой) полость, образованную днищем, передней, задней и боковыми стенками. При достижении ракетной кареткой тормозного участка трека она попадает в лоток, частично погружается в находящуюся в нем воду, и вследствие гидродинамического взаимодействия погруженных элементов каретки с водой осуществляется ее торможение. Подобные устройства осуществляют надежное торможение, однако при скоростях более 1М для полного торможения каретки с помощью воды лоток должен иметь большую длину, вплоть до нескольких десятков метров.

Как уже описывалось выше, при испытаниях объект сначала разгоняют до заданной скорости с помощью ракетной каретки, а в начале тормозного участка происходит его отстыковка и дальнейший свободный полет до преграды [3, 11, 12]. Очевидно, что чем меньше будет расстояние от начала тормозного участка трека до преграды, тем меньше будет потеря скорости испытываемого объекта при движении в свободном полете, более точным будет его попадание в заданную область, а также более адекватными и точными будут результаты соответствующих измерений.

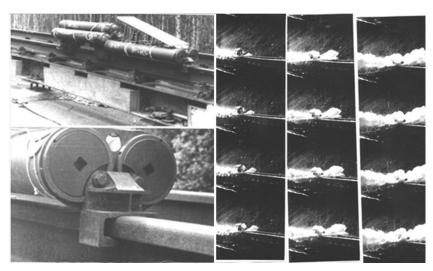


Рис. 2. Малогабаритное устройство для торможения водой и кинограмма этого процесса

В результате анализа имеющихся технических решений, для обеспечения выполнения указанных условий, т.е. уменьшения длины тормозного участка ракетного трека с обеспечением надежного и безопасного торможения высокоскоростных ракетных кареток, а также повышения точности результатов измерений, предлагается полость по длине лотка выполнять секционированной посредством поперечных легкоразрушаемых перегородок, с заполнением отдельных секций жидкими энергопоглощающими средами с различными реологическими характеристиками, — с увеличением коэффициента консистенции и соответствующим изменением индекса течения, в направлении движения ракетной каретки, подлежащей торможению [8].

Разделение исходно большой полости лотка на отдельные секции позволит исключить смешение заполняющих их жидких сред с различными реологическими характеристиками (разделяющие секции легкоразрушаемые перегородки не будут препятствовать последовательному перемещении каретки по секциям лотка при её торможении) и одновременно обеспечить в них эффективные режимы торможения каретки, соответствующие её скорости в текущий момент времени и условиям контактного взаимодействия конструктивных элементов со средой. В качестве энергопоглощающих жидких сред могут быть использованы, например, дилатантные (неньютоновские) жидкости с различной степенью консистенции, или электрореологические суспензии.

Вязкость дилатантных жидкостей, в отличие он ньютоновских, непостоянна, — увеличивается с ростом градиента скорости сдвига. Дилатантными свойствами обладают глиняные суспензии, системы песок-вода, взвесь крахмала в воде, суспензии силиката калия и т.п. Электрореологические жидкости обладают способностью к быстрому обратимому изменению вязкости под действием электрического поля. Они представляют собой суспензии, состоящие из частиц поляризующихся материалов, распределённых в диэлектрических жидкостях, например кремнезёма с размерами частиц не более 1 мкм. Дисперсионными средами могут служить неполярные или слабополярные органические жидкости с достаточно высоким электрическим сопротивлением. В отсутствие электрического поля электрореологические жидкости ведут себя как большинство обычных суспензий, а при наложении электрического поля в них практически мгновенно происходит резкое (на несколько порядков) увеличение вязкости за счёт образования цепочечных структур, направленных параллельно силовым линиям электрического поля.

При использовании для торможения кареток в качестве энергопоглощающей среды реологической жидкости лоток снабжается электродами, расположенными с внутренней стороны боковых стенок его секций, соединенных с источником регулируемого постоянного напряжения.

В процессе разгона каретка приобретает кинетическую энергию равную $M \cdot V_{\text{Kp}}^2 / 2$,

где M — масса каретки, кг, $V_{\rm Kp}$ — скорость разогнанной каретки перед началом торможения, м/с.

Наряду с некоторыми потерями на разрушение передней стенки лотка, а затем его перегородок, при торможении в жидкой среде, заполняющей секции лотка, эта энергия расходуется на придание скорости в различных направлениях отдельным объёмам жидкости и их перемещение, внутреннюю турбулизацию, волнообразование, приращение свободной поверхности, каплеобразование, нагрев жидкости и элементов каретки и т.п. Полное теоретическое описание этих процессов затруднительно, однако ввиду того, что исходной их причиной служит силовое взаимодействие элементов каретки с жидкостью, процесс торможения качественно может быть проанализирован с учетом указанных силовых факторов.

Тормозящая каретку сила сопротивления жидкости $F_{\rm T}$ в конкретный момент времени складывается из двух составляющих:

$$F_{\mathrm{T}} = F_{\Phi} + F_{\Gamma + \mathrm{B}}, \qquad (1)$$

где F_{Φ} — сила гидродинамического взаимодействия жидкости с фронтальными элементами каретки, H; $F_{\Gamma+B}$ — сила гидродинамического взаимодействия жидкости с горизонтальными и вертикальными элементами каретки, H.

В силу третьего закона Ньютона равные по величине и противоположно направленные силы действуют со стороны каретки на жидкость, приводя к изменению её энергетических характеристик.

При использовании для торможения ньютоновских жидкостей, в частности воды, указанные компоненты мгновенной тормозящей каретку силы могут быть описаны как:

$$F_{\Phi} = S_{\Phi} \cdot \rho \cdot V_{K}^{2} / 2, \qquad (2)$$

где S_{Φ} — площадь взаимодействующих с водой фронтальных элементов каретки, м²; ρ — плотность жидкости (воды), кг/м³; $V_{\rm K}$ — текущая скорость каретки, м/с.

И

$$F_{\Gamma+B} = \sum_{i=1}^{l} (S_{\Gamma i} \cdot \tau_{\Gamma i}) + \sum_{j=1}^{m} (S_{Bj} \cdot \tau_{Bj}) =$$

$$= \sum_{i=1}^{l} (S_{\Gamma i} \cdot \mu \cdot \dot{\gamma}_{i}) + \sum_{j=1}^{m} (S_{Bj} \cdot \mu \cdot \dot{\gamma}_{i}), \qquad (3)$$

где l и m — соответственно количество горизонтальных и вертикальных поверхностей каретки, контактирующих с жидкостью; S_{r_i} площадь отдельного взаимодействующего с жидкостью горизонтального элемента каретки, м 2 ; $S_{\mathrm{B}i}$ — площадь отдельного взаимодействующего с жидкостью вертикального элемента каретки, м²; $\tau_{\Gamma i}$, τ_{Bi} — касательные напряжения в жидкости, действующие соответственно в горизонтальной и вертикальных плоскостях на взаимодействующие с жидкостью отдельные поверхности каретки, Па; и — динамическая вязкость, для ньютоновской жидкости не зависящая от скорости сдвига, Па·с; у́ — градиент скорости сдвига жидкости в направлениях, перпендикулярных скорости движения каретки (вертикальном и горизонтальном), c^{-1} .

Составляющая силы равная F_{Φ} , действующая со стороны каретки на прилегающие слои жидкости, является источником для приведения в движение прилегающего к фронтальным поверхностям каретки некоего объема жидкости, препятствовать чему, в первую очередь, будут возникающие в ней при этом напряжения сдвига (касательные) относительно невозмущенных слоев. Таким образом, уменьшение кинетической энергии каретки и её торможение (снижение скорости) под действием силы F_{Φ} осуществляется преимущественно за счёт преодоления сил внутреннего вязкого трения между слоями жидкости.

Составляющая $F_{\Gamma+B}$ описывает проявление сил вязкого трения, обусловленных действием касательных напряжений на отдельных горизонтальных и вертикальных элементах каретки, при ее движении в жидкости. Т.е. потеря энергии движущейся каретки под действием составляющей $F_{\Gamma+B}$ происходит за счёт преодоления сил трения соответствующих элементов каретки о жидкость. Причём, в случае воды, обладающей малой динамической вязкостью μ (например, при температуре 20 °C всего 1,004·10-6 Па·с) вклад указанного силового фактора в торможение каретки весьма мал.

Анализ зависимостей (2) и (3) показывает, что по мере снижения текущей скорости каретки $V_{\rm K}$, вследствие потери энергии при торможении, будет соответственно уменьшаться как составляющая тормозящей силы $F_{\rm \Phi}$, так и $F_{\rm \Gamma+B}$.

Если же в качестве тормозящей энергопоглощающей среды использовать неньютоновскую жидкость, обладающую, в частности, дилатантными свойствами, тогда

$$F_{\Gamma+B} == \sum_{i=1}^{l} (S_{\Gamma i} \cdot k \cdot \dot{\gamma}_{i}^{n}) + \sum_{j=1}^{m} (S_{B j} \cdot k \cdot \dot{\gamma}_{j}^{n}), \quad (4)$$

где k — коэффициент консистентности жидкой среды (может быть определен как вязкость среды при градиенте скорости сдвига $\dot{\gamma}$ равном единице), Па·сⁿ; n>1 — индекс течения, определяющий возрастание эффективной вязкости среды при увеличении скорости сдвига.

Если ввести понятие эффективной вязкости

$$\mu_{adb} = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \,, \tag{5}$$

тогда зависимость (5) может быть представлена аналогично (4) в виде

$$F_{\Gamma+B} = \sum_{i=1}^{l} (S_{\Gamma i} \cdot \mu_{9\phi} \cdot \dot{\gamma}_{i}) + \sum_{i=1}^{m} (S_{Bj} \cdot \mu_{9\phi} \cdot \dot{\gamma}_{j}), \quad (6)$$

Эффективная вязкость и плотность дилатантных жидкостей (и электрореологических), в силу их состава, существенно выше, чем у воды, поэтому при одинаковых значениях $\dot{\gamma}$ соответственно выше и их энергопоглощающая способность, обусловленная действием сил вязкого трения, — как межслойного, генерируемого составляющей F_{ϕ} , так и по поверхностям каретки под действием составляющей $F_{\Gamma+B}$.

При первичном контакте каретки с энергопоглощающей дилатантной жидкостью в первой секции лотка, когда скорость каретки $V_{\rm Kp}$ велика, соответственно будет большой и величина $\dot{\gamma}$ — градиента скорости сдвига жидкости в направлениях перпендикулярных вектору скорости каретки. При достаточно больших значениях величин k и n жидкость по отношению к каретке может проявить себя практически как жестко-упругое тело. Т.е. первый же контакт «каретка-жидкость» будет фактически ударным взаимодействием, что чревато разрушением отдельных элементов каретки, ее опрокидыванию и т.п.

Поэтому, заполнение отдельных секций лотка жидкими энергопоглощающими средами, имеющими различные реологические характеристики, — с увеличением коэффициента консистенции и соответствующим изменением индекса течения в направлении движения каретки, подлежащей торможению, позволит обеспечить сначала вход каретки в первую секцию лотка без разрушения ее элементов, а затем, по мере её движения по лотку с замедлением, с поддержанием приблизительно одинаковых условий вязкостного трения при перемещении из секции в секцию. Так, если в первой секции по ходу торможения лотка энергопоглощающая жидкая среда имеет реологические характеристики k и n, а в последующих k' и n', k" и n" и т.д., то при *k* < *k* ' < *k* " < ... выполнении VСЛОВИЯ $n \le n' \le n'' \le ...$ в каждой секции лотка можно получить близкие по величине значения эффектив-щей скоростью каретки $V_{_{K}}$ и, как следствие, приблизительно равные тормозные факторы, обусловленные вязкостным трением под действием сил F_{Φ} и $F_{\Gamma+\mathrm{B}}$. Т.е. каретка будет тормозиться практически с постоянным замедлением, а тормозной путь вплоть до полного ее останова, и соответственно необходимая длина лотка будут меньшими, чем в случае лотка с водяным торможением.

При использовании для торможения кареток электрореологических суспензий возможны два варианта: 1 — секции лотка заполняются суспензиями с разными исходными реологическими характеристиками для каждой секции с вы*k* < *k* ' < *k* " < ... полнением условия $n \le n' \le n'' \le \dots$, а на электроды, расположенные с внутренней стороны боковых стенок секций лотка, от регулируемого источника подаётся постоянное напряжение одинаковой величины для всех секций; 2 — секции лотка заполняются суспензиями с одинаковыми исходными реологическими характеристиками k = k' = k'' = ... и n = n' = n'' = ..., в этом случае на электроды от регулируемого источника подается постоянное напряжение разной величины для всех секций, пообеспечивается чего средством $k < k' < k'' < \dots$ и $n \le n' \le n'' \le \dots$

Как и с дилатантной жидкостью оба этих варианта обеспечат в каждой секции лотка близкие по величине значения эффективной вязкости среды $\mu_{_{3\varphi}}$ и приблизительно равные тормозные факторы.

На рис. 3 схематично представлены виды сбоку и сверху лотка и ракетной каретки с испытываемым объектом перед торможением в дилатантной энергопоглощающей среде, а также —

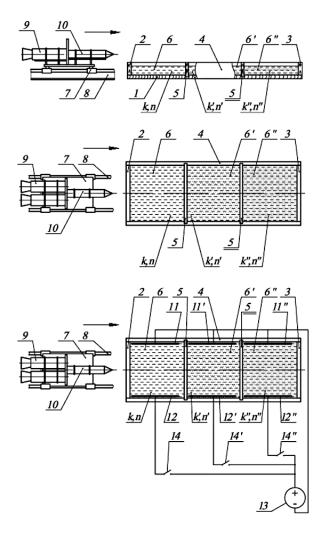


Рис. 3. Схема устройства для торможения разгонных кареток: 1 — днище; 2 — передняя; 3 — задняя и 4 — боковые стенки лотка; 5 — легко разрушаемые перегородки; 6 — энергопоглощающие жидкости; 7 — ракетная каретка; 8 — рельсовые направляющие; 9 — реактивные двигатели; 10 — испытываемый объект; 11, 12 — электроды; 13 — источник регулируемого напряжения; 14 — ключи

перед торможением в электрореологической энергопоглощающей среде.

Лоток для торможения ракетных кареток содержит заполненную энергопоглощающей жидкой средой полость, выполненную секционированной посредством поперечных легко разрушаемых перегородок. Секции лотка заполнены жидкими энергопоглощающими средами с различными реологическими характеристиками, — коэффициентами консистенции k (k > k' > k'') и индексами течения n ($n \ge n' \ge n''$).

Для использования при торможении кареток в качестве энергопоглощающей среды электрореологической жидкости лоток снабжен электродами, расположенными с внутренней стороны боковых стенок его секций и соединенными с источником регулируемого постоянного напряжения, с возможностью отдельного подключения посредством ключей.

В начале взаимодействия каретки с тормозным устройством осуществляется отстыковка испытываемого объекта от каретки и дальнейшее его движение по заданной траектории.

При соударении каретки с передней стенкой лотка стенка разрушается, каретка попадает в лоток и, за счет взаимодействия ее отдельных элементов с жидкой энергопоглощающей средой, находящейся в первом отсеке лотка, начинается гидродинамическое торможение. Перемещаясь по лотку каретка, последовательно разрушая перегородки, из первой секции попадает во вторую с энергопоглощающей средой ('), затем в третью (с энергопоглощающей средой (") и т.д. Энергопоглощающие среды в разных секциях имеют различные реологические характеристики (с увеличением коэффициента консистенции и соответствующим изменением индекса течения, в направлении движения каретки — k < k' < k'' < ... и $n \le n' \le n'' \le ...$), что позволяет получить в них близкие по величине значения эффективной стью каретки V_{κ}) сред и, как следствие, приблизительно равные тормозные факторы, обусловленные вязкостным трением под действием сил $F_{_{\Phi}}$ и $F_{_{\Gamma^{+}B}}$, вследствие чего каретка тормозится практически с постоянным замед-

В случае заполнения секций лотка энергопоглощающими средами, обладающими электрореологическими свойствами (рис. 3), для обеспечения в них близких по величине значений эффективной вязкости $\mu_{\rm эф}$, на электроды, расположенные с внутренней стороны боковых стенок его секций, от регулируемого источника посредством поочерёдного замыкания ключей подается постоянное напряжение. В результате, в обоих случаях каретка тормозится вплоть до полного её останова практически с постоянным замедлением на меньшем тормозном пути, чем в случае лотка с водяным торможением.

В процессе динамических испытаний наблюдались случаи, когда при торможении каретки она сама или ее фрагменты преодолевали тормозное устройство, сходили с рельсовых направляющих трека, продолжая движение в воздухе по траектории близкой к исходной, и достигали преграды вслед за испытываемым объектом, что затрудняло оценку взаимодействия испытываемого объекта с преградой. Для ликвидации последствий подобных нештатных явлений было предложено использовать устройство [9] схематично показанное на рис. 4. Устройство имеет высоту, превышающую высоту траектории свободного полета испытываемого объекта, на высоте соответствующей траектории его свободного полета имеется сквозной продольный канал прямолинейного профиля с сечением большим сечения испытываемого объекта. Вертикальная ограждающая конструкция устройства установлена перед входным отверстием канала, а в качестве энергопоглощающей среды используется насыпной грунт.

Выполнение устройства с высотой превышающей высоту траектории свободного полёта объекта позволит избежать «выброс» каретки

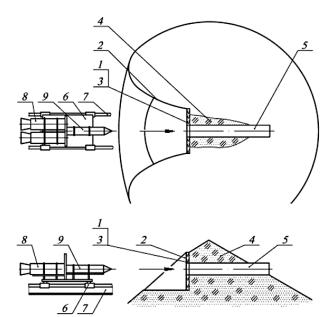


Рис. 4. Устройство для улавливания разгонных кареток: 1 — фронтальная стенка; 2 — боковая стенка; 3 — ограждающая конструкция; 4 — энергопоглощающая среда; 5 — сквозной канал; 6 — каретка; 7 — рельсовые направляющие; 8 — реактивные двигатели;

9 — испытываемый объект

над его верхней поверхностью в направлении преграды.

Предусмотренный в устройстве сквозной продольный канал обеспечивает свободный пролёт разогнанного ракетной кареткой до заданной скорости объекта сквозь устройство. В качестве канала может использоваться тонкостенная труба соответствующего сечения.

Наличие вертикальной ограждающей конструкции, установленной перед входным отверстием канала и использование в качестве энергопоглощающей среды насыпного грунта существенно удешевляет конструкцию устройства. Выполнение ограждающей конструкции наиболее целесообразно из древесины, а ее ширина и высота определяются размерами каретки. Свободные же, не ограниченные ограждающей конструкцией поверхности устройства могут располагаться в соответствии с углом естественного откоса энергопоглощающей насыпной среды.

В случае нештатной работы тормозных устройств разгонная каретка продолжает самостоятельное движение вплоть до столкновения с ограждающей конструкцией, формирующей фронтальную поверхность. При взаимодействии каретки с ограждающей конструкцией и находящейся за ней энергопоглощающей средой кинетическая энергия движения каретки преобразуется сначала в работу по разрушению ограждающей конструкции, а затем — по деформации энергопоглощающей среды. Вследствие этого, происходит остановка каретки. Высота устройства, превышающая высоту траектории свободного полета испытываемого объекта, исключает возможность «выброса» разгонной каретки, а также возникающих при ударном торможении фрагментов каретки над его верхней поверхностью в направлении преграды. Кроме того, устройство способно защитить конструкцию трека от воздействия ударной волны и фрагментов преграды в случае испытаний объекта с зарядом.

Выводы

- 1. Предложены принципиально новые методы торможения и улавливания разгонных кареток в процессе динамических испытаний на ракетном треке.
- 2. Описываемые устройства обеспечивают уменьшение длины тормозного участка ракетно-

го трека за счёт использования в качестве энергопоглощающей среды реологической жидкости с переменными реологическими характеристиками, а также эффективное улавливание разгонных кареток и их фрагментов после отделения испытуемого объекта.

3. Применение предложенных устройств позволяет повысить точность и результативность динамических испытаний на ракетном треке.

Литература

- 1. Крутецкий Ю.А. Становление и развитие динамических испытаний боеприпасов и ракетных систем на Софринском научно-испытательном полигоне. Красноармейск Мос. обл.: Изд. ФКП «НИИ «Геодезия». 2018. 64 с.
- 2. Научно-технические, исторические и конверсионные аспекты развития экспериментальных методов и средств в НИИ «Геодезия» для испытаний ракетно-артиллерийского вооружения и боеприпасов. Научно-технический сборник. Под общ. ред. Волкова В.Т. М.: Изд. ЦНИИ НТИКПК. 1994. С. 43–63.
- 3. Ватутин Н.М., Роберов И.Г. Тарновский В.А., Фурсов Ю.С. Развитие динамических испытаний на ракетном треке // Известия РАРАН. 2021. № 1 (116). С. 139–148.
- 4. Балакин В. Ракетные треки. М.: Наука и жизнь. 2006. № 2. С. 38–39.
- 5. Патент FR22534649 Франция, МПК7 F16F 9/00, F42B 13/00, G01M 19/00, Procede et dispositif pour la recuperacion de projectiles: №8217247: заявл. 15.10.1982: опубл. 20.04.1984/ Mainier R.; FRANCE ETAT. 12 с.: ил.
- 6. Патент JP0328700 Япония, МПК5 F42B 35/00, G01P 3/66, Bullet body speed measuring device for scoop type soft recovering apparatus: № 1-163229, заявл. 26.06.1989. Опубл.

- 06.02.1991/Fujiwara Masaharu, Arizono Yukimichi; JAPAN TECH RES & DEV INST DAIKIN IND LTD. 7 с., ил.
- 7. Кошелев А.И., Козлов Н.Н., Подобнова М.А. и др. Патент № 112420 РФ, МПК G01М 15/02 (2006.01). Мобильное устройство для обогрева тормозного участка ракетного трека, № 2011129923: заявл, 20.07.2011, опубл. 10.01.2012/ МИНПРОМТОРГ от имени РФ. 3 с., ил.
- 8. Колтунов В.В., Фурсов Ю.С., Ватутин Н.М. и др. Патент № 2710870 РФ, F42В 35/00 (2006.01), G01М 7/08(2006.01). Лоток для торможения разгонных кареток: № 2019128124: заявл. 06.09.2019, опубл. 14.01.2020/; ФКП «НИИ «Геодезия». 13 с., ил.
- 9. Фурсов Ю.С., Колтунов В.В., Ватутин Н.М. и др. Патент № 193361 РФ, G01М 7/00 (2006.01), F41F 7/00 (2006.01). Устройство для улавливания разгонных кареток и их фрагментов: № 2019128123, заявл. 06.09.2019, опубл. 28.10.2019/ ФКП «НИИ «Геодезия». 6 с., ил.
- 10. Краснов И.Ю., Гусев Н.В., Ланграф Л.В., Ляпушкин С.В. Обеспечение плавного разгона и торможения промышленных механизмов // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 4. С. 122–127.
- 11. Камчатный В.Г. Особенности динамики взаимодействия высокоскоростных объектов с рельсовой направляющей // Сборник докладов научной конференции Волжского регионального центра РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2000.
- 12. Бутова С.В., Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Камчатный В.Г. Устойчивость движения высокоскоростных объектов по направляющим ракетного трека // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 1. С. 3–8.