

УДК 629.7.018.3

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-641-656

Для цитирования: Астахов С. А., Бирюков В. И., Катаев А. В. К вопросу об эффективности гидродинамического торможения при высокоскоростных испытаниях на ракетно-рельсовом треке // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 4. С. 641–656. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-641-656.

For citation: Astakhov S. A., Biryukov V. I., Kataev A. V. [On the issue of hydrodynamic braking efficiency while high-speed testing on a rocket-rail track]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 4, P. 641–656. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-641-656.

К вопросу об эффективности гидродинамического торможения при высокоскоростных испытаниях на ракетно-рельсовом треке

С. А. Астахов¹, В. И. Бирюков^{1, 2}, А. В. Катаев^{1, 2*}

¹Федеральное казенное предприятие «Государственный казенный научно-испытательный полигон авиационных систем имени Л. К. Сафронова»

Российская Федерация, 140250, Московская обл., г.о. Воскресенск, г. Белоозерский

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Российская Федерация, 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4

*E-mail: a-kataev@mail.ru

В настоящее время, как в России, так и за рубежом, перспективным направлением в развитии авиации и вооружения является создание высокоскоростных летательных аппаратов. Увеличение скоростных характеристик вновь разрабатываемых образцов предъявляет новые требования к испытательному стендовому оборудованию, в том числе к ракетно-рельсовым трекам. Растут требования как к средствам разгона, так и к средствам торможения, обеспечивающим сохранность испытуемой материальной части. Предлагаемая работа посвящена методу гидродинамического торможения, применяемого при высокоскоростных динамических испытаниях на ракетно-рельсовом треке в ФКП «ГкНИПАС имени Л. К. Сафронова». Приводится описание тормозных устройств, представлены зависимости, определяющие расчетные значения развиваемой ими тормозной силы. Описаны способы управления интенсивностью торможения, повышающие его эффективность и безопасность, а также расширяющие допустимый скоростной диапазон применения гидродинамических тормозных устройств. Представлена методика повышения эффективности функционирования тормозных устройств за счет применения специальной формы профиля его рабочей части. Для сравнительной оценки параметров эффективности торможения при использовании тормозных устройств со специальным и треугольным профилями приведены соответствующие примеры обеспечиваемых ими режимов торможения. Профиль рабочей части гидродинамического тормозного устройства, рассчитанный по предлагаемой методике, обеспечивает более эффективное и безопасное торможение, чем применяемый ранее профиль треугольной формы, за счет поддержания постоянной по величине останавливающей силы в широком скоростном диапазоне.

Ключевые слова: ракетный трек; рельсовая каретка; наземные испытания; динамические испытания, торможение; гидроторможение.

On the issue of hydrodynamic braking efficiency while high-speed testing on a rocket-rail track

S. A. Astakhov¹, V. I. Biryukov^{1, 2}, A. V. Kataev^{1, 2*}

¹Scientific Test Range of Aviation Systems named after L. K. Safronov
Beloozersky, Moscow region, 140250, Russian Federation

²Moscow Aviation Institute (National Research University)

4, Volokolamskoe highway, Moscow, 125993, Russian Federation

*E-mail: a-kataev@mail.ru

At present, a promising direction in the development of aviation and armament is the creation of high-speed aircraft both in Russia and abroad. The increase in speed characteristics of newly developed specimens imposes new requirements on test bench equipment, including rocket-rail tracks. The requirements are growing for both acceleration and braking means, which ensure the tested materiel safety. The proposed work deals with a hydrodynamic braking method used in high-speed dynamic tests on the rocket-rail track at the Scientific Test Range of Aviation Systems named after L. K. Safronov. The description of the braking devices is given, the dependencies determining the calculated values of the braking force developed by the braking devices are presented. The braking intensity control methods are described, which increase the efficiency and safety of braking as well as expand the permissible speed range of the hydrodynamic braking device application. The method of increasing the efficiency of the braking devices functioning by using a special form of its working part profile is presented. The corresponding examples of the braking modes are given for a comparative assessment of the braking efficiency parameters when using braking devices with special and triangular profiles. The working part profile of the hydrodynamic braking device, calculated according to the proposed method provides more efficient and safe braking compared with the previously used triangular profile, by maintaining a constant stopping force in a wide speed range.

Keywords: rocket-rail track, rocket sled, ground tests, dynamic tests, braking, hydrodynamic braking.

Введение

Обязательным требованием при разработке и создании систем авиационной техники и ракетного вооружения является проведение испытаний их основных агрегатов и систем на скоростях применения. Трековые испытания – это наиболее экономичный и эффективный метод с точки зрения аэродинамического силового нагружения, позволяющий испытывать натурные изделия и их крупномасштабные макеты на скоростных режимах, максимально приближенных к условиям полета [1]. По сравнению с полномасштабными летными испытаниями наземные трековые испытания обеспечивают более высокую безопасность для персонала [2].

В настоящее время, как в России, так и за рубежом, перспективным направлением в развитии авиации и вооружения является создание высокоскоростных летательных аппаратов. Значительное увеличение скорости вновь разрабатываемых летательных аппаратов баллистического типа формирует новые требования к испытательному стендовому оборудованию, в результате чего регулярно возникает необходимость в его модернизации [3]. Расширение возможностей испытательных трековых стендов предусматривает как повышение их технических характеристик, так и внедрение новых технологий в испытательный процесс. Новые требования предъявляются не только к средствам разгона [4], но и к средствам торможения, которые позволяют сохранять подвижную материальную часть (ракетную трековую каретку) для повторного использования, что сокращает сроки и стоимость проведения испытаний.

Для остановки ракетных трековых кареток, движущихся по ракетному треку на максимально достигнутой высокой скорости, например, 500–860 м/с, торможение должно осуществляться в широком диапазоне скоростей. Однако каждый из существующих видов торможения ограничен скоростным диапазоном эффективного и безопасного применения. Следовательно, торможение высокоскоростных ракетных кареток целесообразно осуществлять комбинированным способом: с использованием различных видов торможения, например, путем последовательного применения аэродинамических и гидродинамических тормозных устройств. Такая схема позволит сохранить требуемую интенсивность торможения в широком диапазоне скоростей и избежать чрезмерного нагружения используемых тормозных устройств и других элементов ракетной каретки [5].

Расширение технических характеристик любого тормозного устройства, задействованного в комбинированной схеме торможения, повышает ее эффективность в целом. Таким образом, задача по снижению скорости ракетной трековой каретки до полной остановки на ограниченной длине рельсового пути с применением комбинированной схемы делится на связанные части, в каждой из которых рассматривается вопрос об эффективности применения для каждого отдельного вида торможения.

Гидродинамическое торможение сохраняемой каретки на ракетном треке

В настоящее время гидродинамическое торможение считается наиболее надежным и отработанным видом торможения на ракетном треке, который позволяет развивать стабильную останавливающую силу в широком диапазоне скоростей. Этот метод использует преимущества более высокой плотности воды по сравнению с воздухом для обеспечения требуемых значений тормозной силы [6]. Наиболее часто гидроторможение используется для остановки ракетных кареток, движущихся по двум рельсовым направляющим. Вместе с тем, известны устройства, позволяющие осуществлять гидродинамическое торможение монорельсовых ракетных кареток [7; 8]. В качестве рабочей энергопоглощающей среды преимущественно используется вода, но в отдельных случаях могут применяться и другие жидкости.

Принцип действия гидротормоза основан на взаимодействии тормозного устройства, установленного на движущейся ракетной каретке, с неподвижной водой, в результате чего возникает сила реакции, останавливающая каретку. Вода, используемая в качестве тормозной массы, перед запуском ракетной каретки заливается в один или несколько резервуаров, расположенных вдоль участка торможения, или специальный лоток, представляющий собой гидроканал, выполненный в бетонном основании ракетного трека. С торцов лоток закрывается с помощью пробиваемых перегородок, которые удерживают воду в лотке, а также позволяют регулировать ее уровень. Рельсовые направляющие ракетных треков могут быть расположены параллельно горизонту или иметь наклон к нему. Соответственно, уровень воды в лотке относительно рельсов будет либо постоянным, либо изменяемым по пути движения каретки. Использование лотка при гидроторможении является наиболее предпочтительным, однако, в соответствии с техническими особенностями используемой материальной части, для заливки воды может применяться рукав, закрепленный над рельсовой направляющей, или емкости, размещаемые слева и справа относительно движущейся каретки.

Гидродинамические тормозные устройства, как и устройства других видов торможения, имеют скоростное ограничение для их применения. Верхний скоростной предел связан с прочностными характеристиками конструкции применяемых тормозных устройств. Например, при взаимодействии гидротормоза с водой на скорости выше 700 м/с на его рабочей части возникают напряжения близкие к разрушающим для ряда конструкционных марок сталей [9].

По принципу действия гидродинамические тормозные устройства (ГДТУ) условно делятся на два типа.

Принцип действия ГДТУ первого типа

В основе работы лежит принцип торможения за счет обмена количеством движения. Схема тормозного устройства приведена на рис. 1. Торможение осуществляется следующим образом: вода поступает в заборное сечение тормоза, затем разворачивается и выбрасывается под некоторым углом, в результате чего импульс ракетной каретки преобразуется в импульс воды [10; 11]. Таким образом, возникает сила, направленная против движения каретки и обеспечивающая ее торможение. Конфигурация устройства зависит как от конструкции ракетной каретки, так и от возможностей трека и используемого стендового оборудования. Помимо воды, в качестве тормозной массы могут использоваться другие жидкости с требуемыми физическими характеристиками.

Для торможения ракетных кареток, движущихся по двум рельсовым направляющим, применяются ГДТУ, взаимодействующие с водой, находящейся в лотке ракетного трека. В основном с этой целью применяются тормозные устройства, выполненные в виде ковша, который состоит из водозаборника, отвечающего за формирование струи, и рукавов, обеспечивающих ее разворот. Гидродинамический ковш устанавливается на ракетную каретку в ее задней части для обеспечения беспрепятственного выхода воды из его рукавов. При наличии одного рукава разворот струи воды осуществляется в вертикальной плоскости, после чего она выбрасывается вверх. Гидродинамический ковш с двумя рукавами производит разворот струи воды в наклонной плоскости с ее выводом в стороны под некоторым углом к горизонту. В результате воздей-

ствия струи воды на конструкцию ковша возникает сила реакции, направленная против движения каретки. В связи с тем, что вода из ковша выбрасывается под некоторым углом α вверх, возникает вертикальная сила, которая непосредственного участия в торможении не принимает, но существенно нагружает конструкцию. Боковые силы, возникающие при использовании ковша с двумя рукавами, взаимно компенсируются вследствие симметричности конструкции.

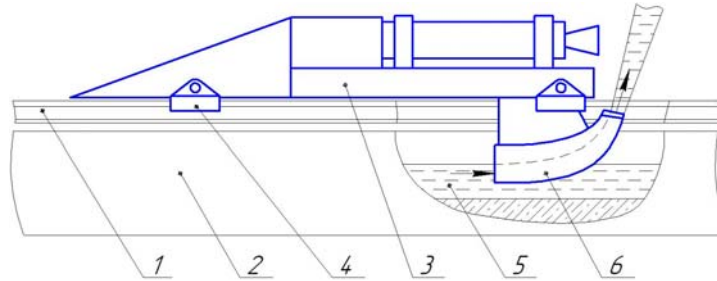


Рис. 1. Схема работы гидродинамического тормозного устройства первого типа:
1 – рельсовая направляющая; 2 – железобетонное основание; 3 – ракетная каретка; 4 – башмак;
5 – вода; 6 – тормозное устройство

Fig. 1. Scheme of operation of the hydrodynamic braking device of the first type:
1 – rail guide; 2 – reinforced concrete base; 3 – rocket sled; 4 – slipper; 5 – water; 6 – braking device

Кроме того, для торможения двухрельсовой каретки может применяться тормозное устройство, выполненное в виде желоба, расположенного в ее передней части. В процессе торможения вода из лотка ракетного трека поступает в нижнюю водозаборную часть желоба, затем поднимается и разворачивается в нем на заданный угол (до 180°), после чего выбрасывается.

Для торможения монорельсовых ракетных кареток применяются устройства, выполненные в виде водозаборника с криволинейным каналом или желобом, которые устанавливаются перед ее передней опорой. Такие тормозные устройства являются достаточно миниатюрными и легкими. Вода, используемая в качестве тормозной массы, заливается в легко разрушаемый рукав, который закрепляется над рельсовой направляющей. При торможении водозаборник захватывает неподвижную воду и, развернув её в криволинейном канале на заданный угол (в пределах до 180°), выбрасывает вперёд со скоростью почти в 2 раза превосходящей скорость самой каретки [12]. Тем самым, в тормозном устройстве возникает сила реакции, останавливающая ракетную каретку.

Расчет тормозной силы, развиваемой ГДТУ первого типа

Для расчета тормозной силы ГДТУ принимается как неподвижное твердое тело, взаимодействующее с набегающим потоком воды, движущимся вдоль продольной оси каретки – оси x . Масса воды, попадающая в заборное сечение ГДТУ за бесконечно малое время dt , определяется по формуле

$$dm_b = \rho_b \omega v dt, \quad (1)$$

где ρ_b – плотность воды; ω – площадь струи воды попадающей в заборное сечение ГДТУ; v – скорость ракетной каретки.

Сила, действующая на каретку со стороны потока воды, поступающего в заборное сечение ГДТУ, равна

$$F_T = \frac{dQ_x}{dt}, \quad (2)$$

где dQ_x – изменение проекции импульса воды на ось x .

$$dQ_x = dm_b (v_{x_{вх}} - v_{x_{вых}}), \quad (3)$$

где $v_{x_{вх}}$ – проекция скорости потока воды на ось x на входе в ГДТУ; $v_{x_{вых}}$ – проекция скорости потока воды на ось x на выходе из ГДТУ.

Проекция скорости воды на ось x на входе в тормозное устройство $v_{x\text{ вх}}$ по величине равна скорости ракетной каретки v . Проекция скорости воды на ось x на выходе из ковша определяется углом разворота струи воды, задаваемым формой рабочей стенки ГДТУ, а также падением скорости потока струи воды внутри ГДТУ. Падение скорости потока воды, проходящего через ковш, обусловлено его гидравлическим сопротивлением и характеризуется следующим коэффициентом:

$$R_v = \frac{v_{\text{вых}}}{v_{\text{вх}}}. \quad (4)$$

Согласно данным экспериментальных исследований, приведенным в работе [10], значение коэффициента R_v находится в диапазоне от 0,66 до 0,81.

Таким образом, изменение проекции импульса воды на ось x на выходе из ковша определяется

$$dQ_x = dm_b v (1 - R_v \cos \alpha). \quad (5)$$

Подставляя полученную зависимость в соотношение (2) с учетом (1), определяется значение составляющей тормозной силы, развиваемой в тормозном устройстве за счет разворота струи набегающего потока воды:

$$F_T = \rho_b \omega v^2 (1 - R_v \cos \alpha). \quad (6)$$

При использовании тормозных устройств, которые в процессе работы погружаются в воду и взаимодействуют с ней своими наружными поверхностями, создается дополнительное сопротивление движению каретки, повышающее интенсивность торможения. Это связано с вязким трением боковых поверхностей тормоза о воду, а также с образованием волнового и кильватерного сопротивления.

Волновое сопротивление возникает в виде срывных струй и выражается их кинетической энергией, в связи с этим термин волновое сопротивление принят чисто условно, поскольку он не имеет ничего общего с волновым сопротивлением, возникающим при движении судов. Кильватерное сопротивление имеет своим эквивалентом кинетическую энергию струи, образующуюся в кильватерном потоке за ГДТУ [13].

Учитывая малое значение динамической вязкости воды (например, при температуре 20 °C всего $1,004 \cdot 10^{-6}$ Па·с), вклад трения боковых поверхностей ГДТУ о воду в торможение каретки весьма мал [14]. В то же время волновое и кильватерное сопротивление ГДТУ создает существенную останавливающую силу. С увеличением скорости взаимодействия ГДТУ с водой наружные срывные струи превращаются в мощные потоки, а кильватерный поток вырастает в высокий гребень за ковшом, сравнимый по мощности с основными струями, выходящими из рукавов.

Для расчета тормозной силы формулу (6) можно преобразовать в следующую зависимость:

$$F_T = C_x(v, h) \rho_b \omega(h) v^2 (1 - \cos \alpha), \quad (7)$$

где C_x – коэффициент гидродинамического сопротивления гидротормоза; h – глубина погружения рабочей части гидротормоза в воду; ω – поперечная площадь рабочей части гидротормоза, погруженной в воду.

Принцип действия ГДТУ второго типа

В основе работы лежит принцип торможения за счет создания гидравлического сопротивления набегающему потоку воды. Схема тормозного устройства приведена на рис. 2. Сила торможения появляется в результате взаимодействия рабочей части ГДТУ с водой, залитой в лоток ракетного трека или резервуары, расположенные вдоль него. Рабочая часть ГДТУ может быть выполнена в виде плоской пластины или иметь другую форму, например, выполненную в виде клина. Конструкция ГДТУ может содержать как одну, так и нескольких рабочих частей, ориентированных ортогонально направлению движения ракетной каретки.

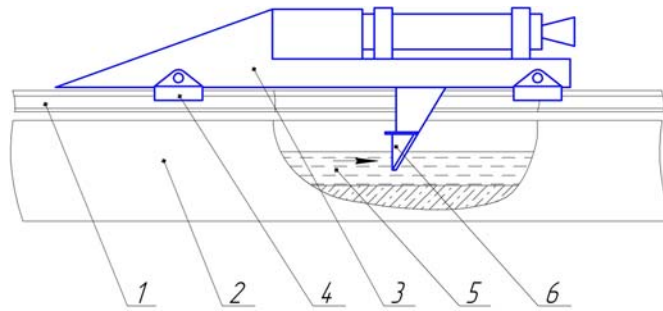


Рис. 2. Схема работы гидродинамического тормозного устройства второго типа:
1 – рельсовая направляющая; 2 – железобетонное основание; 3 – ракетная каретка;
4 – башмак; 5 – вода; 6 – тормозное устройство

Fig. 2. Scheme of operation of the hydrodynamic braking device of the second type:
1 – rail guide; 2 – reinforced concrete base; 3 – rocket sled; 4 – slipper; 5 – water; 6 – braking device

При использовании в качестве резервуара с тормозной массой лотка ракетного трека с залитой в него водой, тормозное устройство размещается между рельсовыми направляющими под ракетной кареткой. Такое исполнение конструкции тормозного устройства позволяет осуществлять торможение ракетных кареток, движущихся по двум рельсовым направляющим. Для торможения монорельсовых кареток преимущественно используется устройство, установленное перед передней опорой каретки, которое взаимодействует с водой, залитой в рукав из легко разрушаемого материала, закрепленного над рельсовой направляющей [8]. Также известно тормозное устройство, рабочие части которого располагаются на силовых кронштейнах по бокам ракетной каретки. Они взаимодействуют с водой, находящейся в специальных емкостях, которые устанавливаются слева и справа вдоль рельсовой направляющей [7]. Такое устройство позволяет осуществлять торможение монорельсовой ракетной каретки или ее составных частей, например, отделяемого разгонного блока.

Выбор тормозных устройств и их конфигурации зависит от конструктивных особенностей ракетной каретки, достигаемых скоростей, технических возможностей существующих видов и средств торможения, а также решаемых торможением задач [15].

Расчет тормозной силы, развиваемой ГДТУ второго типа

При рассмотрении задачи обтекания пластины без учета кавитации, расположенной перпендикулярно потоку и полностью погруженной в воду, сила торможения определяется из разности давлений на фронтальную и тыльную поверхности пластины. В этом случае, возникающие вязкие касательные напряжения на поверхности пластины, перпендикулярные вектору скорости, не вносят существенного вклада в силу сопротивления и при расчете не учитываются.

В центральной точке пластины – в точке торможения потока – гидродинамическое давление составит

$$p = \frac{\rho_B v^2}{2}. \quad (8)$$

С удалением от центральной точки к краям давление уменьшается. На тыльной стороне формируется давление существенно ниже, чем давление в невозмущенном потоке. Для бесконечно длинной пластины шириной L среднее давление на фронтальной и тыльной стенках составит

$$p_{\text{ф ср}} = 0,8 \frac{\rho_B v^2}{2}, \quad p_{\text{т ср}} = -1,2 \frac{\rho_B v^2}{2}. \quad (9)$$

При этом сила сопротивления на единицу длины будет равна

$$F_{m(y\partial)} = 0,8 \frac{\rho_B v^2}{2} L - \left(-1,2 \frac{\rho_B v^2}{2} \right) L. \quad (10)$$

Таким образом, для бесконечно длинной пластины шириной L коэффициент сопротивления C_x будет равен 2,0. Для ограниченной пластины с квадратным профилем площадью $S_{пл}$ коэффициент сопротивления C_x будет равен 1,2.

В свою очередь, в процессе торможения ГДТУ лишь частично погружается в поток воды и процесс его взаимодействия с ней будет отличаться от того, что описывается выше для случая с полностью погруженной в воду пластиной. Набегающий поток воды, взаимодействующий с частично погруженным в него тормозным устройством, делится на две части. Первая часть потока воды взаимодействует с погруженной в него областью рабочей части тормоза, находящейся ближе к его граням, и обтекает ее. Вторая часть потока воды взаимодействует с погруженной в него областью тормоза, находящейся ближе к границе с воздухом, после чего устремляется вверх, где под воздействием возвышающейся над поверхностью воды поверхностью тормоза разворачивается и выбрасывается вперед по направлению движения каретки либо под некоторым углом к нему. В связи с тем, что разворот второй части потока позволяет увеличивать останавливающую силу, конструкция тормозных устройств может включать элементы, обеспечивающие этот разворот, тем самым повышая эффективность торможения в целом.

С тыльной стороны ГДТУ при торможении образуется впадина, заполненная воздухом, которая может рассматриваться как кавитационная каверна. Давление в каверне постоянно и равно давлению на свободной поверхности воды и не вносит вклада в формирование тормозной силы. В связи с тем, что вода имеет малое значение динамической вязкости, силы вязкого трения также не оказывают существенного влияния на формирование тормозной силы. При использовании в качестве энергопоглощающей среды более вязкой жидкости, необходимо учитывать действие сил вязкого трения.

Таким образом, для определения тормозной силы, развиваемой тормозным устройством второго типа при взаимодействии с водой, используется следующая зависимость:

$$F_T = C_x(v, h) \frac{\rho_v v^2}{2} \omega(h), \quad (11)$$

где h – глубина погружения рабочей части гидротормоза в воду; ω – поперечная площадь рабочей части гидротормоза, погруженной в воду.

Расчет тормозной силы, развиваемой конкретным тормозным устройством, сводится к определению коэффициента сопротивления, который представляет собой функцию, зависящую от скорости набегающего потока воды, уровня погружения тормозного устройства в воду, конфигурации тормозного устройства, так и прочих факторов: числа Рейнольдса, относительной шероховатости поверхности и т. п.

Таким образом, коэффициенты сопротивления для обоих типов устройств могут быть достоверно определены лишь экспериментально. На стадии проектирования тормозного устройства поставленная задача решается методами вычислительной гидродинамики (также CFD от англ. computational fluid dynamics) [16] с использованием программно-вычислительного комплекса. Производится серия расчетов работы гидротормоза на различных режимах: разных скоростях взаимодействия с водой и уровнях погружения его рабочей части в воду [17]. Тем самым определяются параметры конструкции гидротормоза и его эксплуатационные характеристики.

Способы управления интенсивностью торможения

С точки зрения эффективности и безопасности, наиболее предпочтительным режимом торможения будет такой, при котором развиваемая останавливающая сила будет постоянной на протяжении всего тормозного пути. Такой режим позволит снизить пиковое значение нагрузки, действующей на тормозное устройство, а также обеспечить заданную эффективность торможения. Требуемый тормозной импульс обеспечивается путем регулирования параметров, входящих в правую часть уравнений (7) и (11), которые задают величину тормозной силы по пути движения ракетной каретки.

Наиболее широкое распространение получили методы, позволяющие регулировать поперечную площадь погруженной в воду рабочей части ГДТУ ω в зависимости от текущего значения

скорости каретки v . Площадь заглубленной части тормоза может регулироваться как наземным технологическим оборудованием ракетного трека, так и бортовыми средствами ракетной каретки.

К наземному оборудованию ракетного трека относится гидрлоток с системой перегородок, а также другие средства торможения – емкости, рукава с водой и т.п. Проектное положение рельсовых направляющих на участке торможения предусматривает их уклон к горизонту, что обеспечивает плавное увеличение уровня воды в лотке по пути следования каретки. Поэтому при торможении водой, залитой в гидрлоток ракетного трека, происходит непрерывное увеличение площади погруженной части гидротормоза, что позволяет поддерживать заданный уровень тормозной силы, компенсируя падение скорости ракетной каретки. Перегородки, устанавливаемые в гидрлоток, позволяют обеспечить первоначальную глубину погружения гидротормоза в воду и последующую коррекцию уровня воды при необходимости. При использовании рукавов с водой или других емкостей, площадь тормозного устройства, взаимодействующая с водой, регулируется их геометрическими размерами или расположением вдоль пути движения каретки.

К бортовым средствам относится тормозное устройство и вспомогательное оборудование: средства бортовой автоматики, силовые приводы и др. Площадь погруженной в воду части гидротормоза может регулироваться за счет изменения его положения с помощью силовых приводов, управляемых средствами бортовой автоматики. Однако подвижная рабочая часть тормозного устройства усложняет и утяжеляет конструкцию гидротормоза, а также требует размещения дополнительного оборудования на ракетной каретке, что существенно ограничивает область его применения. Заданное изменение площади погруженной в воду части гидротормоза по пути движения каретки может задаваться за счет использования специальной формы профиля его рабочей части.

В качестве параметров, регулирующих интенсивность торможения, могут также выступать физические характеристики материалов, применяемых в качестве энергопоглощающей среды. Например, в работе [14] в качестве энергопоглощающих жидких сред предложено использовать дилатантные (неньютоновские) жидкости с различной степенью консистенции или электроореологические суспензии.

Методика расчета формы профиля рабочей части гидротормоза

Реализовать требуемый тормозной импульс предлагается за счет использования гидротормоза со специальной формой профиля его рабочей части. Расчет формы проводится численно с помощью программного-вычислительных средств по следующему алгоритму:

1. Ввод исходных данных:

- параметры каретки: m – масса, S_m – площадь миделевого сечения, C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления, s_0 – начало участка торможения, v_0 – начальная скорость;
- параметры импульса силы проектируемого тормозного устройства $F_t(t)$: F_0 – сила торможения, развиваемая в первоначальный момент взаимодействия с водой, $F_{\max}$ – максимальная развиваемая сила торможения, t – время нарастания силы торможения от F_0 до $F_{\max}$;
- параметры прототипа тормозного устройства: $F(v, \omega)$ – зависимость развиваемой тормозной силы от скорости и площади заглубленной части рабочей части гидротормоза, $a_{\max}$ – максимальная допустимая ширина специального профиля рабочей части;
- параметры ракетного трека и окружающей среды: γ – угол уклона рельсовых направляющих к горизонту; $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения башмаков ракетной каретки о рельсовые направляющие, ρ – плотность воздуха; ρ_v – плотность воды.

2. Расчет режима движения.

Расчет режима движения заданной каретки, в соответствии с установленным тормозным импульсом, производится путем решения задачи Коши:

$$\begin{aligned} m \frac{dv}{dt} &= \Sigma F, \\ m \frac{ds}{dt} &= v. \end{aligned} \quad (12)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} s(t_0) &= s_0, \\ v(t_0) &= v_0, \end{aligned} \quad (13)$$

где ΣF – сумма сил, воздействующих на каретку в процессе торможения, которая состоит из трех составляющих:

- силы аэродинамического сопротивления:

$$F_a(v) = \frac{C_x S_m \rho v^2}{2}, \quad (14)$$

- силы трения башмаков о рельсы:

$$F_{тр} = mgf_{тр}, \quad (15)$$

- силы торможения, которая в данном случае является заданной силой, развиваемой проектируемым тормозным устройством $F_t(t)$.

В результате решения определяются параметры движения каретки: $s(t)$, $v(t)$, в условиях воздействия заданного тормозного импульса.

3. Расчет формы профиля рабочей части тормозного устройства.

По зависимости $s(t)$ определяется заглубление гидротормоза в воду:

$$h_i(s_i) = s_i \operatorname{tg} \gamma. \quad (16)$$

Площадь заглубленной в воду рабочей части тормозного устройства ω , обеспечивающей заданный уровень тормозной силы F_i , определяется из заданных параметров прототипа тормозного устройства. Например, для описываемого выше прототипа ГДТУ первого типа, требуемая площадь, заглубленной в воду рабочей части, определяется из следующего соотношения:

$$\omega_i = \frac{F_i}{C_x(v_i, h_i) \rho_v v_i^2 (1 - \cos \alpha)}. \quad (17)$$

Таким образом, определяется зависимость требуемой площади рабочей части гидротормоза от уровня его заглубления в воду $\omega(h)$.

Далее рассчитываются начальные параметры: a_0 – начальная ширина профиля (ширина нижней части); h_0 – уровень первоначального заглубления (высота нижней части).

Рабочая часть гидротормоза, на которую приходится первоначальная нагрузка F_0 , имеет прямоугольную форму шириной a_0 , высотой h_0 . Следовательно, параметры рабочей части гидротормоза, обеспечивающие первоначальную тормозную силу F_0 следующие:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{\omega_1 - \omega_0}{(s_1 - s_0) \operatorname{tg} \gamma}, \\ h_0 &= \frac{\omega_0}{a_0}. \end{aligned} \quad (18)$$

Затем рассчитываются дальнейшие геометрические параметры профиля:

$$\begin{aligned} h_i &= h_0 + s_i \operatorname{tg} \gamma, \\ a_i &= \begin{cases} \frac{\omega_{i+1} - \omega_i}{h_{i+1} - h_i} & \text{если } a_i \leq a_{\max}; \\ a_{\max} & \text{если } a_i > a_{\max}, \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

где $a_{\max}$ – ограничение по максимальной ширине профиля, задаваемое исходя из конструктивных ограничений.

Таким образом, определяется требуемая форма профиля рабочей части в виде зависимости ширины профиля от высоты $a(h)$.

4. Контрольный расчет режима движения.

Производится расчет параметров движения каретки: $s(t)$, $v(t)$ при использовании гидротормоза со специальным профилем. При корректном расчете профиля, параметры режима движения каретки с заданным тормозным импульсом должны совпадать с параметрами контрольного расчета за исключением участка, где ширина профиля a принимается равной максимально-допустимому значению $a_{\max}$.

Для оценки эффективности применения специального профиля рабочей части гидротормоза ниже приводится пример расчета формы профиля и реализуемого им режима торможения.

Пример расчета профиля рабочей части гидротормоза специальной формы

Допустим, по рельсовому пути ракетного трека движется каретка массой $m = 400$ (кг), скоростью $v_0 = 500$ (м/с) и аэродинамическими характеристиками: $S_m = 0,2$ (м²), $C_x = 0,6$. В точке $s_0 = 0$ (м) на каретку начинает действовать тормозная сила, импульс которой изображен в виде графика на рис. 3. Необходимо определить параметры профиля рабочей части гидротормозного устройства, если известно, что максимальная допустимая ширина рабочей части $a_{\max} = 0,2$ (м), плотность воздуха $\rho = 1,205$ (кг/м³), плотность воды $\rho_w = 1000$ (кг/м³), коэффициент трения башмаков о рельсовые направляющие $f_{\text{тр}} = 0,035$, тангенс угла уклона рельсовых направляющих к горизонту $\text{tg} \gamma = 0,0002$. Зависимость развиваемой тормозной силы от скорости и площади погруженной в воду рабочей части гидротормоза определяется уравнением (7), используемым для расчета тормозной силы, развиваемой ГДТУ первого типа.

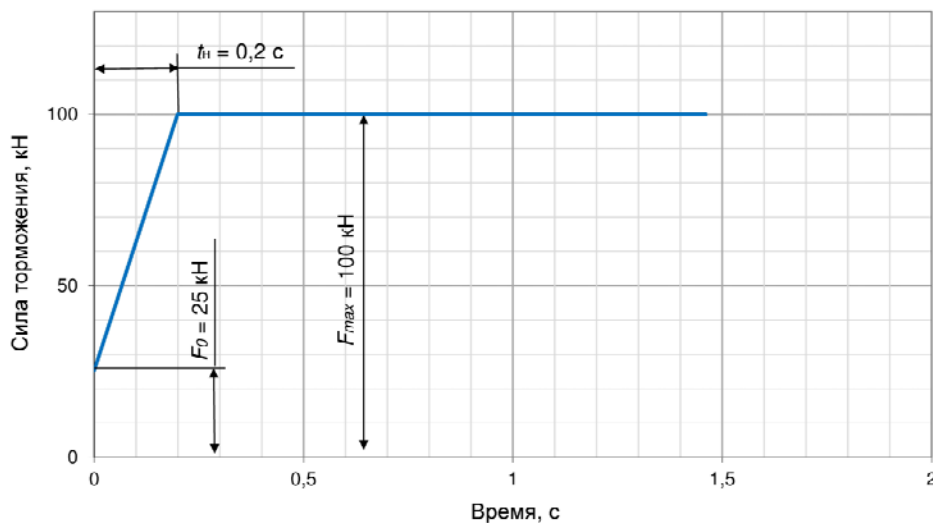


Рис. 3. График зависимости требуемой силы торможения от времени

Fig. 3. Required braking force versus time graph

Расчет режима торможения ракетной каретки с заданным тормозным импульсом производился в соответствии с уравнениями движения:

$$m \frac{dv}{dt} = -F_T(t) - \frac{\rho v^2}{2} C_x S_m - mg f_{\text{тр}},$$

$$\frac{ds}{dt} = v.$$

Начальные условия:

$$s(t_0) = 0 \text{ м},$$

$$v(t_0) = 500 \text{ м/с}.$$

Далее производился расчет требуемой формы профиля рабочей части гидротормоза $a(h)$ и контрольный расчет реализуемого режима торможения $s(t)$, $v(t)$.

Для оценки эффективности применения специального профиля были выполнены два варианта расчета режима торможения с применением профиля рабочей части гидротормоза в виде треугольника:

1. В первом случае режим торможения имел ограничение по длине тормозного пути. Для данного примера торможение каретки необходимо обеспечить на участке протяженностью не более 615 м, что и в случае применения тормоза со специальным профилем.

2. В втором случае режим торможения имел ограничение по величине тормозной силы. Для данного примера развиваемая тормозная сила не должна превышать 100 кН, что и в случае применения тормоза со специальным профилем.

Исходя из этих условий были определены значения вершинных углов треугольного профиля для обоих случаев и выполнены соответствующие расчеты режимов торможения. Результаты расчетов представлены в виде графиков на рис. 4–7.

Результаты расчетов показали, что применение тормозного устройства со специальным профилем позволяет снизить нагрузку на тормозное устройство и другие элементы конструкции ракетной каретки на 36 % или сократить тормозной путь на 31 %. Повышение показателей эффективности достигнуто за счет обеспечения постоянной тормозной силы на значительной части тормозного пути.

Режим, реализуемый гидротормозом с рассчитанным по предложенной методике профилем его рабочей части, будет зависеть от параметров останавливаемой ракетной каретки. Например, начальная скорость торможения влияет на величину развиваемой тормозной силы, которая пропорциональна квадрату скорости, но существенно не влияет на форму импульса и длину тормозного пути.

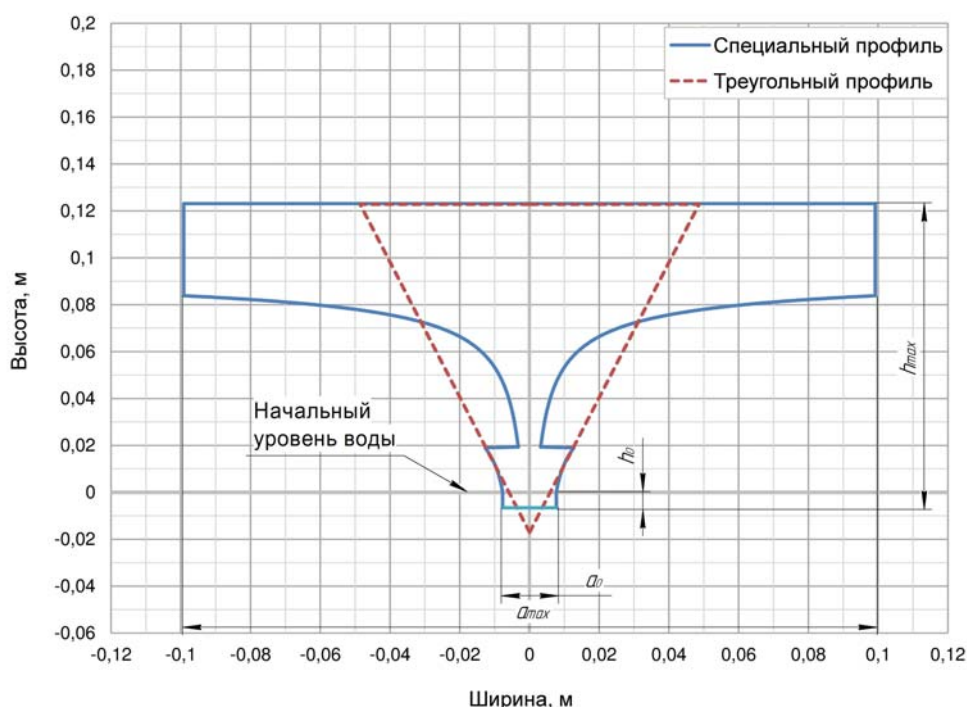


Рис. 4. Контурь специального и треугольного профилей рабочей части тормозного устройства при режиме, ограниченном длиной тормозного пути

Fig. 4. Contours of special and triangular profiles of the brake device working part when the mode is limited by the braking distance length

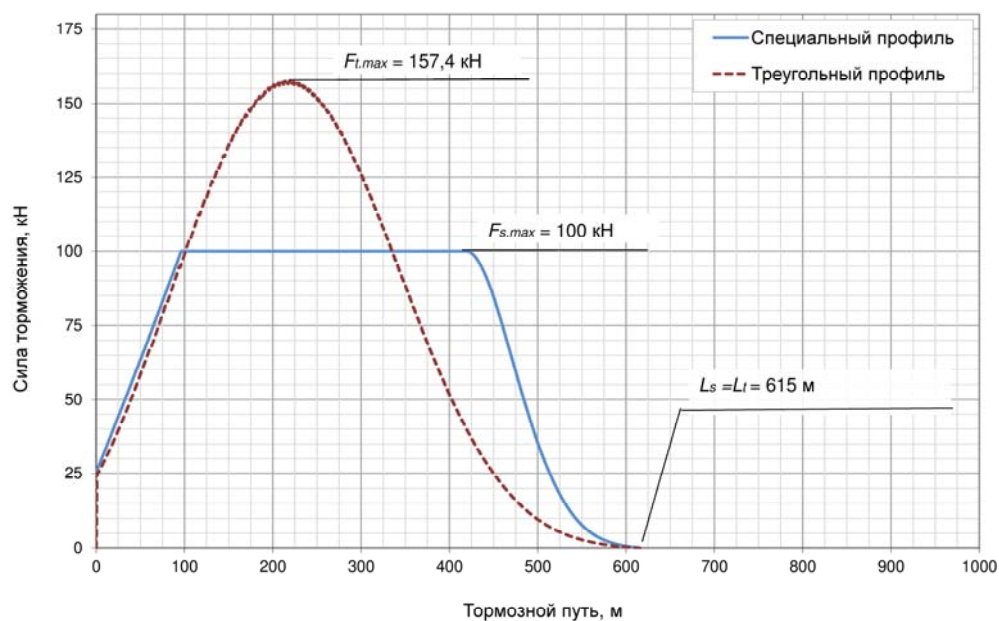


Рис. 5. Результаты контрольного расчета развиваемых тормозных сил при режиме, ограниченном длиной тормозного пути

Fig. 5. Results of the checking calculation of the developed braking forces along the way when the mode is limited by the braking distance length

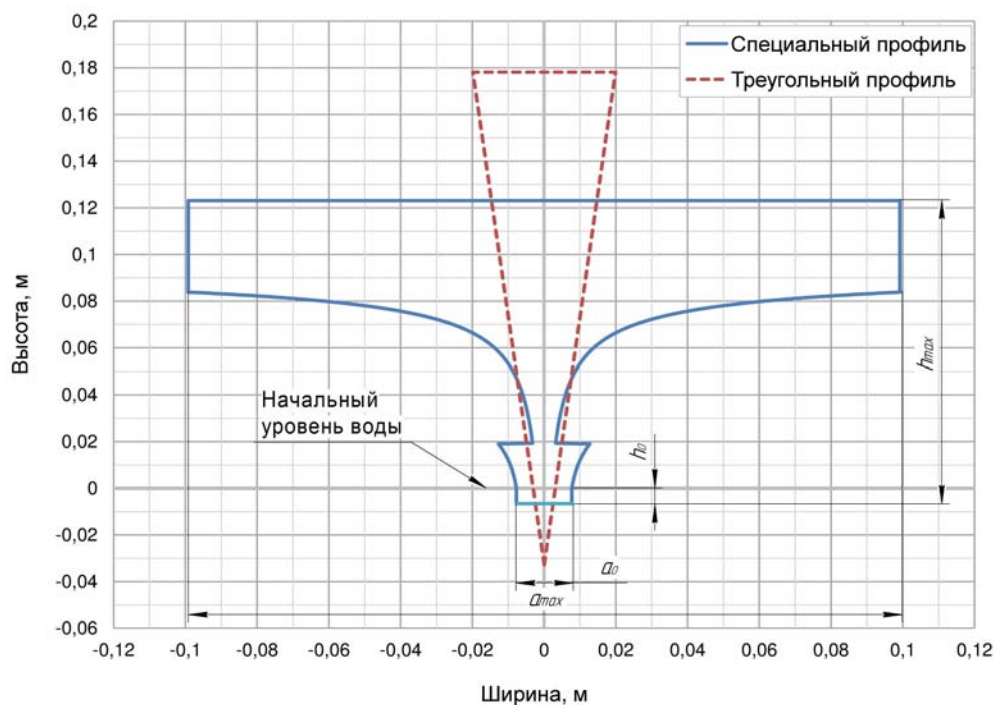


Рис. 6. Контуры специального и треугольного профилей рабочей части тормозного устройства при режиме, ограниченном величиной тормозной силы

Fig. 6. Contours of special and triangular profiles of the brake device working part when the mode is limited by the braking force magnitude

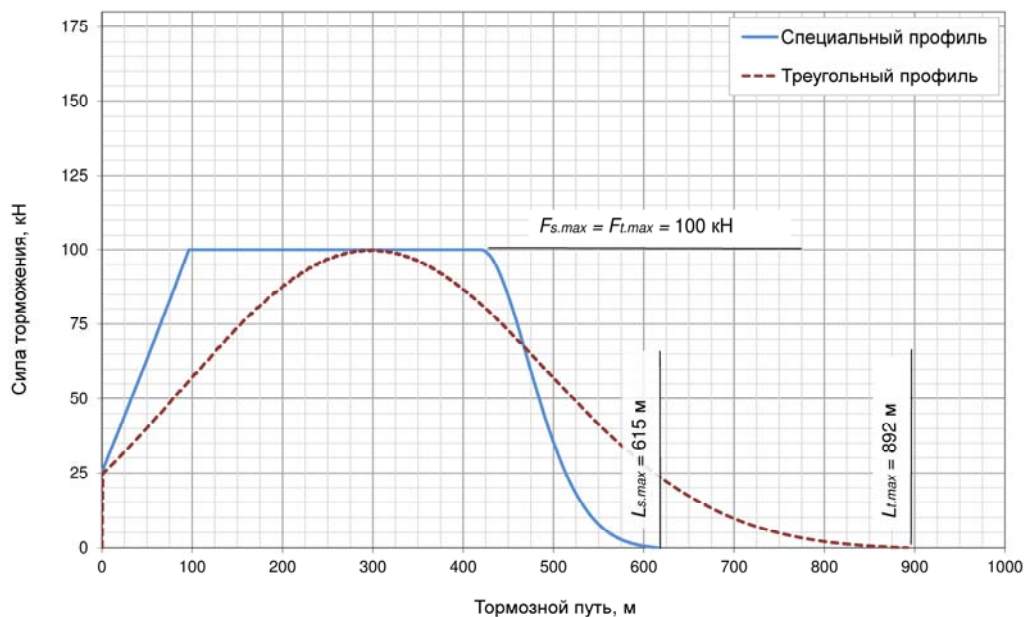


Рис. 7. Результаты контрольного расчета развиваемых тормозных сил при режиме, ограниченном величиной тормозной силы

Fig. 7. The results of the checking calculation of the developed braking forces when the mode is limited by the braking force magnitude

К параметрам, от которых форма импульса зависит существенно, относятся масса ракетной каретки и ее аэродинамические характеристики. Таким образом, специальный профиль рассчитывается под конкретную ракетную каретку с фиксированными параметрами и обеспечивает ее остановку на заданном участке при условии, что начальная скорость торможения не превышает допустимую, которая определяется исходя из прочностных ограничений конструкции тормозного устройства.

При проектировании тормозных устройств следует учитывать, что воздействующие на него нагрузки в процессе эксплуатации могут существенно превышать расчетные значения. Это связано с тем, что параметры, влияющие на режим торможения, могут отличаться от исходных данных, используемых при расчете. К ним можно отнести:

- характеристики ракетной каретки: масса, аэродинамические параметры, скорость в момент начала торможения и др.;
- параметры, влияющие на уровень погружения тормозного устройства в воду: высота поверхности воды в лотке (точность установки резервуаров с водой), наличие и высота водяной волны в лотке, отклонение высотного положения рельсовых направляющих от проектного значения, зазоры между башмаками ракетной каретки и рельсовыми направляющими и др.;
- характеристики тормозного устройства: геометрические размеры, шероховатость рабочей поверхности, жесткость конструкции и др.;
- параметры окружающей среды: физические характеристики энергопоглощающей среды и окружающего воздуха, коэффициент трения башмаков о рельсовые направляющие и др.

Таким образом, сохранность тормоза в процессе эксплуатации должна обеспечиваться необходимым коэффициентом запаса прочности его конструкции, учитывающим приведенные выше факторы, а также динамический характер приложения нагрузки.

Заключение

Как показали ранее проведенные исследования, для обеспечения эффективного торможения ракетных кареток в широком скоростном диапазоне целесообразно использовать несколько видов торможения, каждый из которых задействуется в приемлемом для него скоростном интер-

вале. Увеличение технических характеристик применяемых средств торможения в составе комбинированной схемы, например, гидродинамических тормозных устройств, повысит ее эффективность в целом. Расширение технических возможностей средств торможения, связано как с повышением их прочностных характеристик, так и с оптимизацией режимов их функционирования.

Применение гидродинамических тормозных устройств с рабочей частью специальной формы позволит обеспечить эффективное и безопасное торможение ракетной каретки в широком скоростном диапазоне. Для расчета формы профиля рабочей части гидротормоза, обеспечивающего требуемый тормозной импульс, разработана соответствующая методика. Пример расчета режима торможения условно-заданной каретки показал, что применение тормозных устройств со специальной формой его рабочей части вместо треугольной позволяет снизить уровень максимальной нагрузки, воздействующей на тормозное устройство на 36 % либо сократить тормозной путь на 31 %.

Библиографические ссылки

1. Высокоскоростной ракетный трек для испытаний авиационных систем / А. И. Кошелев, В. Я. Ниязов, С. Н. Мансуров, И. В. Воротынцева // Русский инженер. 2011. № 2 (29). С. 40–41.
2. Rocket Sled Based High Speed Rail Track Test Facilities / S. Walia, V. Satya, S. Malik et al. // Defence Science Journal. 2022. Vol. 72, No. 2. P. 182–194. DOI: 10.14429/dsj.72.17014.
3. Astakhov S. A. Biriukov 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. P. 33–42. DOI: 10.13111/2066-8201.2020.12.S.3.
4. Пронин О. Ю. Исследования по разработке перспективного прямоточного воздушно-реактивного двигателя для разгона объектов испытаний при высокоскоростных трековых испытаниях авиационной техники // Русский инженер. 2013. № 4(39). С. 41.
5. Катаев А. В., Астахов С. А., Бирюков В. И. Поиск решений проблемы сохранения материальной части ракетных кареток и средств измерения при трековых испытаниях изделий авиационной и ракетной техники при скорости (1200–1500) м/с на ограниченной длине // Авиация и космонавтика : сб. тезисов 20-й Междунар. конф. (22–26 ноября 2021; МАИ, Москва). М. : Перо, 2021. С. 37–38.
6. Three-Dimensional Two-Phase Flow Simulations of Water Braking Phenomena for High-Speed Test Track Sled / J. Terrazas, A. Rodriguez, V. Kumar et al. // ASME 2021 Fluids Engineering Division Summer Meeting. 2021. Vol. 1: Aerospace Engineering Division Joint Track; Computational Fluid Dynamics (10–12 August 2021; Virtual, Online). DOI: 10.1115/FEDSM2021-65799.
7. Патент RU 136573 U1. Устройство для торможения высокоскоростных монорельсовых ракетных тележек / Мансуров С. Н., Воротынцева И. В., Сысуев А. В. и др. ; Бюл. № 1, 10.01.2014.
8. Патент RU 2741736 C1. Способ торможения объекта, движущегося по рельсовой направляющей / Киняев А. А., Краюхин С. А. ; Бюл. № 4, 28.01.2021.
9. 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.
10. Research on a new open water-brake method for double-track rocket sled test / H. Xia, B. Hu, J. Tian, S. Lv // 3rd International Conference on Mechanical, Electric and Industrial Engineering (23–25 May 2020; Kunming, China). 2020. Vol. 1633. DOI: 10.1088/1742-6596/1633/1/012077.
11. Derivation of drag calculation model of rocket sled water brake / J. Xiao, W. W. Zhang, Q. Xue et al. // 2nd International Conference on Numerical Modelling in Engineering (19–22 August 2019; Beijing, China). 2019. Vol. 657. DOI: 10.1088/1757-899X/657/1/012029.

12. Развитие динамических испытаний на ракетном треке / Н. М. Ватутин, И. Г. Роберов, В. А. Тарновский, Ю. С. Фурсов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 1(116). С. 139–148.
13. Гуревич М. И. Теория струй идеальной жидкости. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 536 с.
14. Методы торможения разгонной каретки в процессе динамических испытаний на ракетном треке / В. Т. Волков, Н. М. Ватутин, В. В. Колтунов, Ю. С. Фурсов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 4 (119). С. 97–104.
15. Астахов С. А., Бирюков В. И., Катаев А. В. Исследование эффективности методов торможения на ограниченной длине при высокоскоростных трековых испытаниях изделий авиационной и ракетной техники // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы 28-го Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова (16–20 мая 2022, Кременки) Т. 2. М. : ТРИП, 2022. С. 137–153.
16. Terrazas J. A. Using Computational Fluid Dynamics And Machine Learning To Predict Sled Profile During High Speed Water Braking At Holloman High Speed Test Track. 2020. Open Access Theses & Dissertations. 3126. URL: https://scholarworks.utep.edu/open_etd/3126.
17. Brake Force Calculation for Water-Brake Device in High Speed of Double Track Rocket Sled Test / J. Xiao, X. Y. Li, L. R. Zhang et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. April 2019. Vol. 490. No. 5. P. 052002. DOI:10.1088/1757-899X/490/5/052002

References

1. Koshelev A. I., Niyazov V. Ya., Mansurov S. N., Vorotyntseva I. V. [High-speed rocket-rail track for testing aviation systems]. *Russkii inzhener*. 2011, No. 2 (29), P. 40–41 (In Russ.).
2. Walia S., Satya V., Malik S., Chander S., Devi S., Sharma A. C. Rocket Sled Based High Speed Rail Track Test Facilities. *Defence Science Journal*. 2022, Vol. 72, No. 2, P. 182–194. DOI: 10.14429/dsj.72.17014.
3. Astakhov S. A., Biriukov V. I. Problems of ensuring the acceleration dynamics of aircraft during track test at 12. a speed of 1600 m/s. *INCAS Bulletin*. 2020, Vol. 12, P. 33–42. DOI: 10.13111/2066-8201.2020.12.S.3.
4. Pronin O. Yu. [Research on the development of a promising ramjet engine for accelerating test objects while high-speed track tests of aviation equipment]. *Russkii inzhener*. 2013, No. 4(39), P. 41 (In Russ.).
5. Kataev A. V., Astakhov S. A., Biryukov V. I. [Search for solutions to the problem of preserving the material part of rocket sleds and measuring instruments while track tests of aircraft and rocket engineering products at a speed of (1.200-1.500) m/s at the limited length]. *Sbornik tezisev XX Mezhdunarodnoi konferentsii "Aviatsiya i kosmonavtika"*. Moscow, Pero Publ., 2021, P. 37–38.
6. Terrazas J., Rodriguez A., Kumar V., Adansi R., Kotteda, V. M. K. Three-Dimensional Two-Phase Flow Simulations of Water Braking Phenomena for High-Speed Test Track Sled. *ASME 2021 Fluids Engineering Division Summer Meeting*. Vol. 1: Aerospace Engineering Division Joint Track; Computational Fluid Dynamics (10–12 August 2021; Virtual, Online). DOI: 10.1115/FEDSM2021-65799.
7. Mansurov S. N., Vorotyntseva I. V., Sysuev A. V. et al. *Ustroystvo dlya tormozheniya vysokoskorostnykh monorel'sovykh raketnykh telezhek* [A device for braking high-speed monorail rocket sleds]. Patent RF, no. 136573 U1, 2014.
8. Kinyaev A. A., Krayukhin S. A. *Sposob tormozheniya ob"ekta, dvizhushchegosya po rel'sovoy napravlyayushchey* [The method of braking an object moving along a rail guide]. Patent RF, no. 2741736 S1, 2021.
9. Astakhov S. A., Biriukov V. I., Kataev A. V. [Effectiveness evaluation of various methods of the retainable equipment braking at a limited length while high-speed track tests of aircraft and rocket

engineering products]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo institute*. 2022, Vol. 29, No 2, P. 20–34 (In Russ.). DOI 10.34759/vst-2022-2-20-34.

10. Xia H., Hu B., Tian J., Lv S. Research on a new open water-brake method for double-track rocket sled test. *3rd International Conference on Mechanical, Electric and Industrial Engineering* (23–25 May 2020; Kunming, China). 2020, Vol. 1633. DOI: 10.1088/1742-6596/1633/1/012077.

11. Xiao J., Zhang W.W., Xue Q., Gao W., Zhang L. Derivation of drag calculation model of rocket sled water brake. *2nd International Conference on Numerical Modelling in Engineering* (19–22 August 2019; Beijing, China). 2019. Vol. 657. DOI: 10.1088/1757-899X/657/1/012029.

12. Vatutin N. M., Roberov I. G., Tarnovskii V. A., Fursov Iu. S. [Development of dynamic tests on the rocket-rail track]. *Izvestiia Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*. 2021, No. 1 (116), P. 139–148 (In Russ.).

13. Gurevich M. I. *Teoriya struy ideal'noy zhidkosti* [The theory of the ideal fluid jets]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 536 p.

14. Volkov V. T., Vatutin N. M., Koltunov V. V., Fursov Yu. S. [Methods of acceleration carriage braking while dynamic testing on a rocket-rail track]. *Izvestiia Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*. 2021, No. 4 (119), P. 97–104 (In Russ.).

15. Astakhov S. A., Biryukov V. I., Kataev A. V. [Research of the effectiveness of braking methods at a limited length while high-speed track tests of aircraft and rocket engineering products]. *Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruksii i sploshnykh sred: Materialy XXVIII Mezhdunarodnogo simpoziuma A. G. Gorshkova* (16–20 May 2022, Kremenki). 2022, Vol. 2, P. 137–153.

16. Terrazas J. A. Using Computational Fluid Dynamics And Machine Learning To Predict Sled Profile During High Speed Water Braking At Holloman High Speed Test Track. 2020. Open Access Theses & Dissertations. 3126. URL: https://scholarworks.utep.edu/open_etd/3126.

17. Xiao J., Li X. Y., Zhang L. R., Li X. P., Zhang W. W. Brake Force Calculation for Water-Brake Device in High Speed of Double Track Rocket Sled Test. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, Vol. 490, No. 5, P. 052002. DOI:10.1088/1757-899X/490/5/052002.

© Астахов С. А., Бирюков В. И., Катаев А. В., 2022

Астахов Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, директор; Государственный казенный научно-испытательный полигон авиационных систем имени Л. К. Сафронова. E-mail: info@gknipas.ru.

Бирюков Василий Иванович – доктор технических наук, доцент, научный сотрудник, Государственный казенный научно-испытательный полигон авиационных систем имени Л. К. Сафронова; профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: aviatex@mail.ru.

Катаев Андрей Владимирович – ведущий инженер, Государственный казенный научно-испытательный полигон авиационных систем имени Л. К. Сафронова; аспирант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: a-kataev@mail.ru.

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

Biryukov Vasily Ivanovich – Dr. Sc, Docent; Research assistant of Scientific Test Range of Aviation Systems named after L. K. Safronov; Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: aviatex@mail.ru.

Kataev Andrey Vladimirovich – Lead engineer, Scientific Test Range of Aviation Systems named after L. K. Safronov; Postgraduate student, Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI. E-mail: a-kataev@mail.ru.
