

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 533.6.07

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ФОНОВЫХ ЗАСВЕТКАХ

© 2021 С.И. Герасимов^{*,**}, В.И. Ерофеев^{**}, В.И. Костин^{**}, Е.Г. Косяк^{*},
П.Г. Кузнецов^{*}, Р.В. Герасимова^{*}

^{*}Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Нижегородская обл., Россия

^{**}Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

Описан способ, делающий возможным постановку аэробаллистических испытаний по изучению аэродинамических характеристик высокоскоростных объектов в условиях, когда наблюдается интенсивное самосвечение (сплошной смаз) объекта. При этом обеспечивается удовлетворяющая требованиям аэродинамической отработки точность внешнетраекторных фотограмметрических измерений пространственных линейных координат центра масс.

Ключевые слова: аэробаллистический эксперимент, линейные координаты, самосвечение, фотограмметрия, теневая проекция.

Поступила в редакцию 31.05.2021

После доработки 12.07.2021

Принята к печати 19.07.2021

Определение пространственного положения объекта испытания на траектории полёта основано на применении метода наземных стереофотограмметрических измерений. Данная задача решается по измерениям фотокоординат изображения марок, нанесенных на поверхность объекта испытания, на снимках стереопары, получаемых в процессе стереофоторегистрации объекта испытания в фиксируемый момент времени работы импульсных источников света, с последующей математической обработкой фотограмметрических измерений по заданному алгоритму [1-10].

На рисунке 1 приведены характерные изображения маркированной конической модели в аэробаллистическом эксперименте ($M \approx 5$), зарегистрированные одной из камер, входящей в состав данного стереопоста (№ 6).



Рисунок 1 – Четыре положения модели, зафиксированные в зоне регистрации отдельного стереопоста в аэробаллистическом эксперименте [Four positions of the model fixed in the registration area of a separate stereo post in an aeroballistic experiment]

Получаемые изображения формируются камерами с открытым затвором. При этом каждое последующее положение регистрируемой модели строится в отраженном свете при помощи отдельной импульсной подсветки, синхронизованной по времени с пролетом испытываемой моделью зоны регистрации камеры данного стереопоста [11, 12]. В случае наличия фоновой подсветки качество изображения ухудшается. Если

регистрируемый объект (процесс) сопровождается самосвечением, то ухудшение качества приходится, прежде всего, на зону изображения самого объекта. При увеличении интенсивности самосвечения интегральные фоновые потоки за время пролета моделью зоны регистрации превышают экспозицию импульсной подсветки, и вместе с изображением модели на фоточувствительном материале регистрируется сплошной светящийся трек. Установка экранов в пределах зон регистрации и резкости камер отдельного стереопоста позволяет помимо изображения модели в отраженном свете одновременно получать и ее теневое изображение, качество которого зависит от точности схемы. На рисунке 2 показаны отдельные изображения моделей, полученные при одновременной регистрации теневых изображений. Видно, что начиная с определенных значений скоростей, состояние поверхности модели качественно ухудшается, и нанесенные марки начинают вуалироваться. Приведенные примеры (рис. 2) показывают «стандартные» изображения (1, 2), отвечающие необходимым требованиям дешифровки, и изображения «пограничного» качества (3, 4), когда марки еще просматриваются, и, следовательно, определение всех угловых координат (углов тангажа, рыскания, крена) частично возможно.

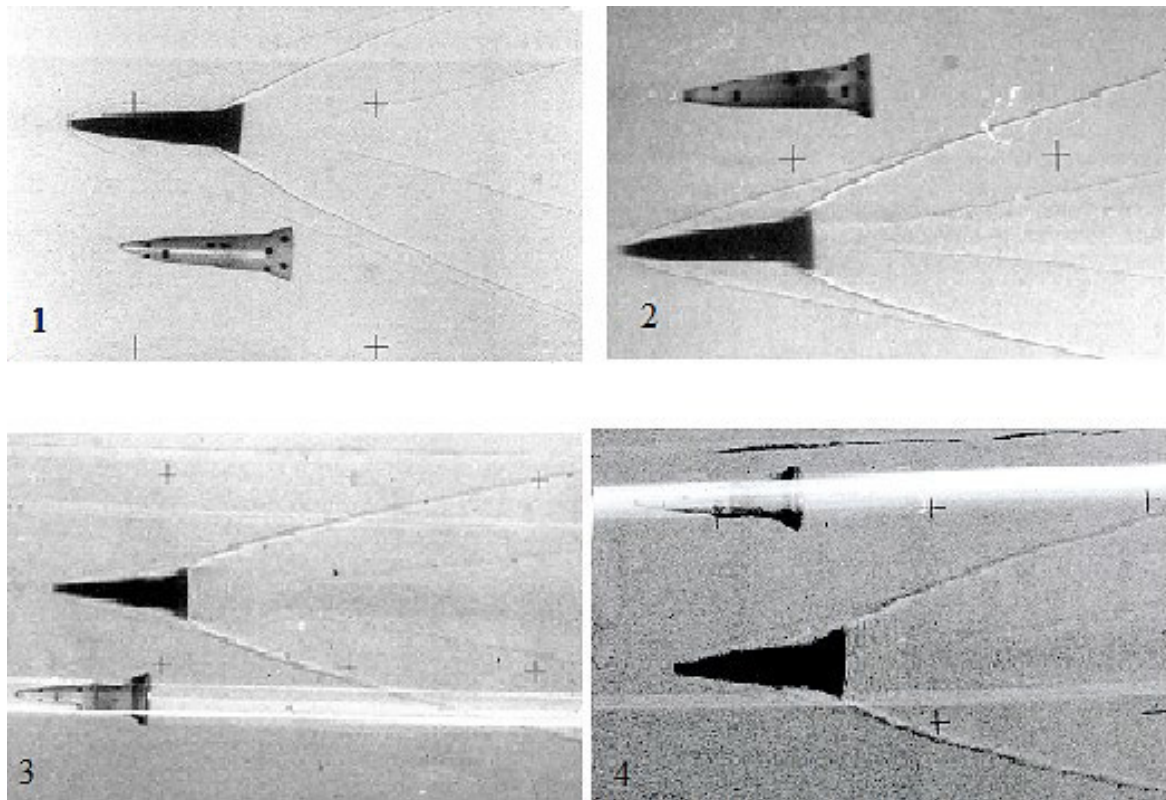
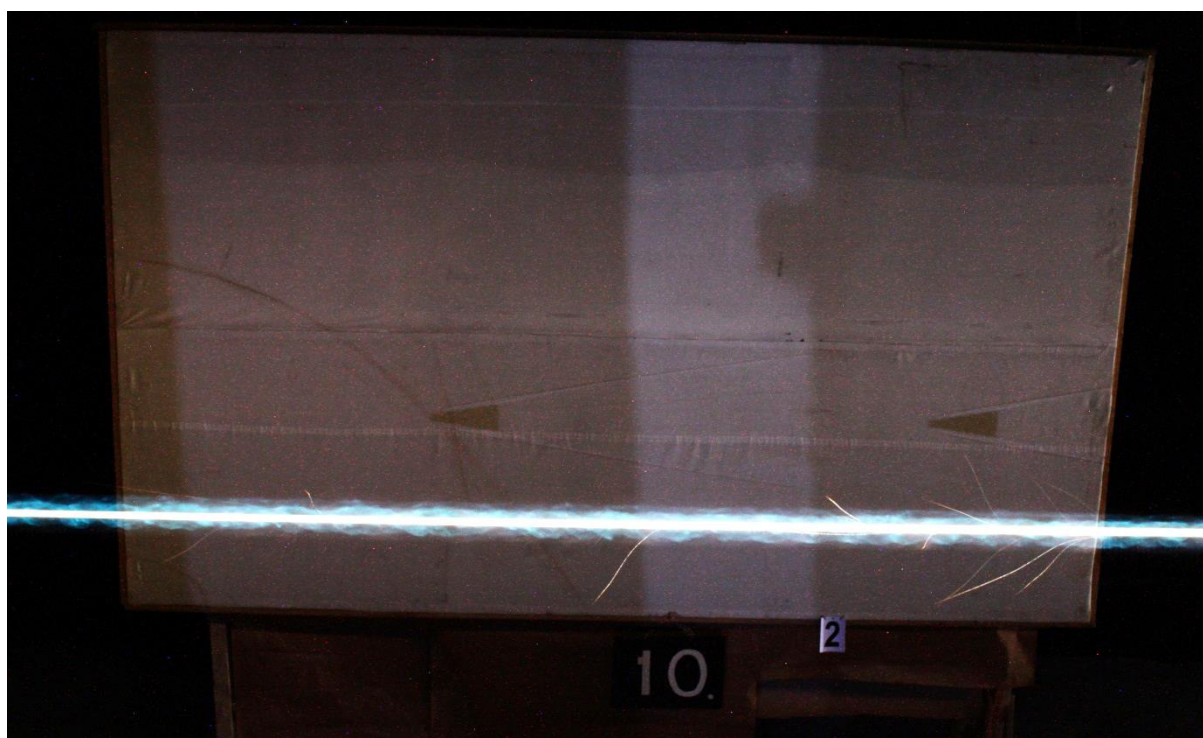


Рисунок 2 – Фотографии летящих моделей в отраженном свете и их теневые изображения, одновременно получаемые фотокамерами стереопостов аэробаллистической трассы с помощью импульсных точечных источников света ($v=1132$ м/с (кадр 1), $v = 1835$ м/с (кадр 2), $v = 1987$ м/с (кадр 3), $v = 2016$ м/с (кадр 4))

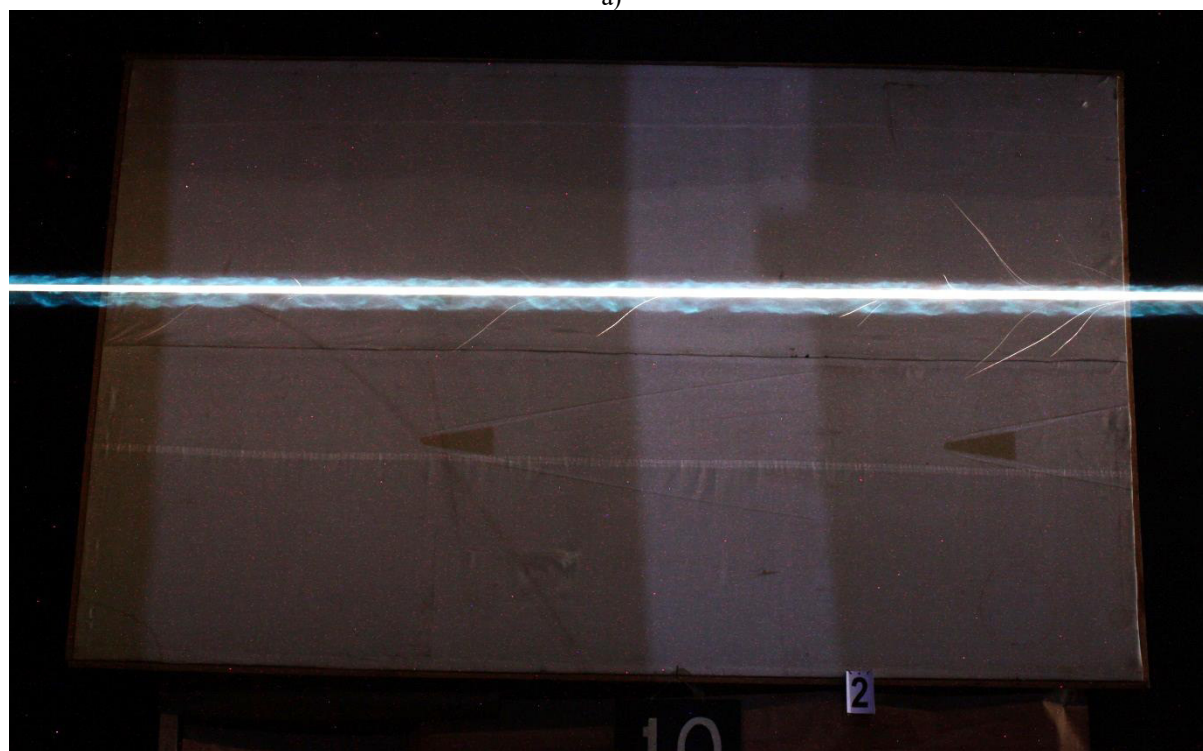
[Photographs of flying models in reflected light and their shadow images, simultaneously obtained by the cameras of the aeroballistic track stereo posts using pulsed point light sources ($v = 1132$ m/s (image 1), $v = 1835$ m/s (image 2), $v = 1987$ m/s (image 3), $v = 2016$ m/s (image 4))]

При более жестких условиях высокоскоростных экспериментов, характеризующихся сильным фоновым свечением ионизованного воздуха и обгаром испытываемых тел из-за большого аэродинамического нагрева и самосвечения высокоскоростной аэродинамической модели в свободном полёте, происходит ее полная засветка (вуалирование) как на высокочувствительной плёнке в случае аналоговых камер, так и на матрице в случае цифровых камер. Траектория полета изображается в виде сплошной линии-трека, на котором невозможно

идентифицировать модель для измерения её положения в пространстве традиционным способом фотограмметрической наземной съёмки (рис. 3).



а)



б)

Рисунок 3 – Кадры с двух цифровых камер одного стереопоста полета модели со скоростью 3.3 км/с
[Images of two digital cameras of one stereo post of the model flight at a speed of 3.3 km/s]

Яркий сплошной трек создается свечением в окрестности носика модели, вихревой след создается летящим вслед модели горящим поддоном. Видны треки частиц, образующихся вследствие аэротермомеханического разрушения материала теплозащитного покрытия. Теневые изображения строятся с помощью точечных

импульсных источников света, запуск которых синхронизирован с моментами нахождения модели в зоне регистрации стереопоста [11, 12].

Получение изображения модели в виде двух проекций, представляющих собой изображение сплошной линии-трека и дискретного теневого изображения модели на снимках, позволяет предложить метод, по которому аналитически можно найти действительное положение модели в пространстве.

Для этого на изображении сплошной линии-трека $n-n$ измеряют не менее двух точек (рис. 4). Через эти точки и центр проекции снимка S , с учётом элементов внутреннего и внешнего ориентирования, строят плоскость SNN . По пересечению прямой, проведенной из центра теневой проекции J и характерную точку T тени модели, с построенной плоскостью SNN определяют пространственные координаты положения точки M высокоскоростной модели на траектории полёта.

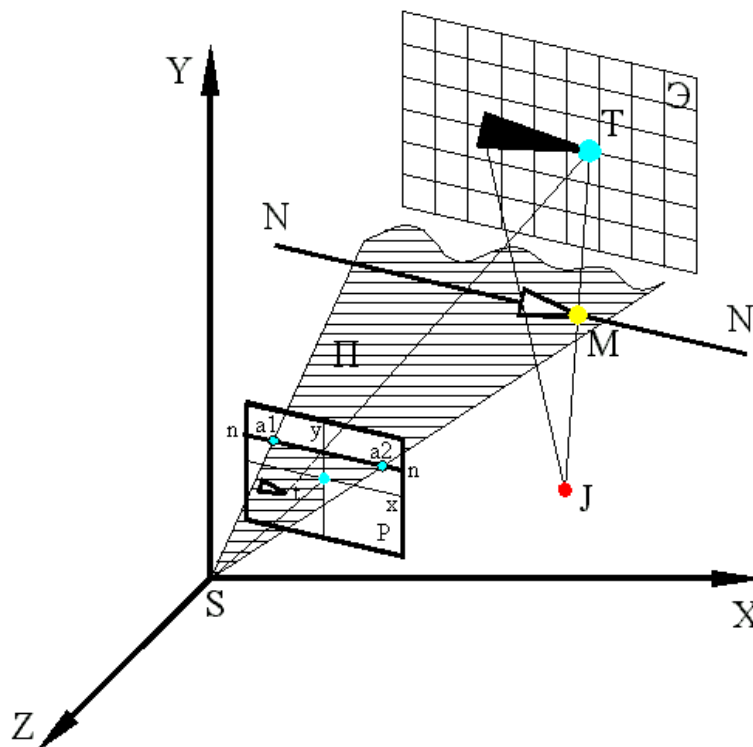


Рисунок 4 – Схема определения пространственного положения модели [Scheme of determining the model spatial position]

По окончании регистрации выполняются измерения на снимке координат изображения характерной точки t тени модели относительно координатных линий экрана и координат двух любых точек a_1, a_2 на изображении сплошной линии nn . По результатам измерений снимка определяются пространственные координаты характерной точки T тени от модели на экране, построение пересекающихся плоскости и прямой и определение пространственных координат летящей модели.

Ниже алгоритм предлагаемого способа описывается более детально.

В процессе движения самосветящейся модели в поле зрения съемочной камеры, располагаемой на близком расстоянии от оси полета модели NN , последняя вследствие вуалирования пленки от самосвечения модели, отобразится на снимке P в прямолинейную сплошную линию nn . В момент подсветки модели гомоцентрическим пучком света от импульсного источника света J с координатами фокуса X_j, Y_j, Z_j , характерная точка M модели с координатами X_M, Y_M, Z_M , проектируемая на экран $\mathcal{E}$ в точку T с координатами X_T, Y_T, Z_T отобразится на снимке P в точке t .

При измерении снимка на изображении прямолинейной линии nn выбирают две любые точки α_1, α_2 , располагаемые на возможно большем взаимном удалении и измеряют координаты этих точек в системе координат снимка. Через измеренные точки α_1, α_2 и центр проектирования S снимка строят плоскость Π с учетом элементов внутреннего и внешнего ориентирования. Уравнение плоскости в общем виде (1):

$$AX + BY + CZ = 0. \quad (1)$$

В этой плоскости Π находится ось NN траектории полета модели. Для повышения точности построения плоскости Π на изображении линии nn целесообразно измерять координаты более двух точек.

По известным координатам X_J, Y_J, Z_J фокуса J точечного импульсного источника света, являющегося центром теневой проекции модели на экране $\mathcal{E}$ и координатам X_T, Y_T, Z_T характерной точки T тени модели на экране, строят прямую JT . Очевидно, что эта прямая проходит через характерную точку M модели.

Уравнение прямой JT в параметрическом виде (2):

$$\begin{aligned} X &= (X_T - X_J) \cdot \alpha + X_J \\ Y &= (Y_T - Y_J) \cdot \alpha + Y_J \\ Z &= (Z_T - Z_J) \cdot \alpha + Z_J \end{aligned} \quad (2)$$

По данным построенных прямой JT и плоскости Π определяются координаты точки M как точки пересечения прямой и плоскости. Подставляя значения X, Y, Z из уравнения прямой (2) в уравнение плоскости (1) получают параметр α . Значение параметра α подставляется в уравнение (2) и определяются пространственные координаты X_M, Y_M, Z_M точки M модели на траектории полета.

По схеме стереопоста съемка траектории полета модели в аэробаллистической установке производится двумя съемочными камерами, располагаемыми на вертикальном базисе. Это дает возможность по измерениям координат изображений идентичных t тени модели на снимках стереопары определять пространственные координаты характерной точки T тени от модели на экране из решения прямой фотограмметрической засечки. Тем самым достигается упрощение процесса измерений, т.к. отпадает необходимость в точной геодезической установке экрана для получения тени и нанесения на нем линий координатной сетки. Экран в данном случае служит в качестве фона для получения тени от модели.

Производя аналогичные описанным выше операции измерений и построений по второму снимку стереопары, реализующие предлагаемый способ определения координат подвижного объекта с последующим осреднением получаемых результатов по двум снимкам, достигается повышение точности определения пространственных координат летящей модели.

Благодаря получению дискретной проекции в виде изображения тени летящей модели, проведению измерений на снимке координат произвольных точек, выбираемых на изображении траектории в виде сплошной линии (трека), и выполнению построений пересекающихся плоскости и прямой, удастся осуществить способ определения пространственных координат самосветящихся моделей в аэробаллистической установке, летящих со скоростью более 2.5 км/с.

Полученные при реализации способа среднеквадратические отклонения пространственных координат модели от их расчетных значений, вычисленных при использовании аппроксимирующей зависимости параметров траектории от времени

точным решением системы уравнений движения модели по методу наименьших квадратов, составили:

$$\delta X_M = \pm 1.5 \text{ мм}; \delta Y_M = \pm 1.5 \text{ мм}; \delta Z_M = \pm 2.0 \text{ мм}.$$

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 20-19-00613.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов, С.И. Повышение информативности аэробаллистического эксперимента как мера повышения точности определения коэффициента сопротивления / С.И. Герасимов, В.А. Кикеев, А.П. Фомкин // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. Вып.11. – С. 125-132.
2. Герасимов, С.И. Кумулятивные источники свет : монография / С.И. Герасимов, Ю.И. Файков, С.А. Холин. – ФГУП Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ. – Саров, 2011. – 119 с.
3. Герасимов, С.И. Теневое фотографирование в расходящемся пучке света : монография / С.И. Герасимов, Ю.И. Файков. – ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. – Саров, 2010. – 344 с.
4. Герасимов, С.И. Об особенностях расчетно-экспериментальных исследований аэродинамических процессов при гиперзвуковых скоростях обтекания / С.И. Герасимов, В.А. Кикеев, А.П. Фомкин // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т.6, №1. – С. 34-40.
5. Герасимов, С.И. Расчетно-экспериментальная визуализация сверхзвукового обтекания управляющих щитков на телах вращения сегментно-конической формы / С.И. Герасимов, И.И. Каньгин, В.А. Кикеев, Р.В. Герасимова, К.В. Тотышев // Научная визуализация. – 2014. – Т.6, №3. – С. 55-67.
6. Герасимов, С.И. Визуализация дульного выхлопа при выстреле из легкогазовой пушки / С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, И.И. Каньгин, Р.В. Герасимова, А.В. Сальников // Научная визуализация. – 2014. – Т.6, №2. – С. 92-103.
7. Герасимов, С.И. Визуализация сверхзвукового обтекания фрагментов кубической формы / С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, В.А. Кикеев, Р.В. Герасимова, И.И. Каньгин, А.П. Фомкин // Научная визуализация. – 2015. – Т.7, №3. – С. 44-52.
8. Герасимов, С.И. Различные механизмы разрушения тел в гиперзвуковом потоке, выявленные с помощью оптической и рентгенографической регистрации / С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, В.А. Кикеев, А.П. Фомкин // Научная визуализация. – 2015. – Т.7, №1. – С. 38-44.
9. Герасимов, С.И. Термомеханические и деформационные процессы при высокоскоростном скольжении нагрузок по рельсовым направляющим ракетного трека / С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, В.Г. Камчатный, И.А. Одзериho // Вестник научно-технического развития. – 2017. – № 10(122). – С. 3-7.
10. Герасимов, С.И. Постановка испытаний топливных упаковочных комплектов на ракетном треке / С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, Р.В. Герасимова, К.И. Ляхов, А.В. Мельник, И.А. Одзериho, Б.А. Яненко // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 3(24). – С. 68-76.
11. Герасимов, С.И. Система запуска и управления оптико-физической аппаратурой на аэробаллистической трассе / С.И. Герасимов, В.Е. Лысенков // Труды четвертой Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные основы баллистического проектирования» – Санкт-Петербург, 2015. – Военмех. Вестник БГТУ. – 2015. – № 29. – С. 162-174.
12. Герасимов, С.И. Диагностика при исследовании эффектов, сопровождающих выход ударной волны на свободную поверхность при ударно-волновом нагружении / С.И. Герасимов // Нелинейный мир. – 2009. – Т.7, №7. – С. 526-527.

REFERENCES

- [1] Gerasimov S.I., Kikeev V.A., Fomkin A.P. Povyshenie informativnosti aeroballisticheskogo eksperimenta kak mera povysheniya tochnosti opredeleniya koefficienta soprotivleniya [Increasing the Information Content of Aeroballistic Experiment as a Measure of Increasing the Accuracy of Determining the Resistance Coefficient]. Povyshenie informativnosti aeroballisticheskogo eksperimenta kak mera povysheniya tochnosti opredeleniya koefficienta soprotivleniya [Journal of Technical Physics]. 2016. T. 86. Issue 11. P. 125-132 (in Russian).

- [2] Gerasimov S.I., Faykov Yu.I., Kholin S.A. Kumulyativnye istochniki svet: monografiya [Cumulative Light Sources: monograph]. FGUP Rossijskij federal'nyj yadernyj centr-VNIIEF [FSUE Russian Federal Nuclear Center-VNIIEF]. Sarov, 2011 (in Russian).
- [3] Gerasimov S.I., Faykov Yu.I. Tenevoe fotografirovanie v raskhodyashchemsya puchke sveta: monografiya [Shadow Photography in a Divergent Beam of Light: monograph]. FGUP RFYAC-VNIIEF [FSUE «RFNC-VNIIEF»]. Sarov, 2010 (in Russian).
- [4] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kikeev V.A., Fomkin A.P. Ob osobennostyah raschetno-eksperimental'nyh issledovanij aerodinamicheskikh processov pri giperzvukovyh skorostyah obtekaniya [Features of Computational and Experimental Studies of Aerodynamic Processes at Hypersonic Flow Velocities]. Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred [Computational Mechanics of Continuous Media]. 2013. Vol.6. No.1. P.34-40 (in Russian).
- [5] Gerasimov S.I., Kanygin I.I., Kikeev V.A., Gerasimova R.V., Totyshev K.V. Raschetno-eksperimental'naya vizualizatsiya sverkhzvukovogo obtekaniya upravlyayushchih shchitkov na telah vrashcheniya segmentno-konicheskoy formy [Computational and Experimental Visualization of Supersonic Flow Around Control Panels on Bodies of Rotation of Segmented-Conical Shape]. Nauchnaya vizualizatsiya [Scientific Visualization]. 2014. Vol.6. No.3. P.55-67 (in Russian).
- [6] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kanygin I.I., Gerasimova R.V., Salnikov A.V. Vizualizatsiya dul'nogo vyhlopa pri vystrele iz legkogazovoy pushki [Visualization of Muzzle Exhaust When Fired from A Light-Gas Gun]. Nauchnaya vizualizatsiya [Scientific Visualization]. 2014. Vol.6. No.2. P.92-103 (in Russian).
- [7] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kikeev V.A., Gerasimova R.V., Kanygin I.I., Fomkin A.P. Vizualizatsiya sverkhzvukovogo obtekaniya fragmentov kubicheskoy formy [Visualization of Supersonic Flow around Cubic Fragments]. Nauchnaya vizualizatsiya [Scientific Visualization]. 2015. Vol.7. No.3. P.44-52 (in Russian).
- [8] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kikeev V.A., Fomkin A.P. Razlichnye mekhanizmy razrusheniya tel v giperzvukovom potoke, vyyavlennye s pomoshch'yu opticheskoy i rentgenograficheskoy registratsii [Various Mechanisms of Destruction of Bodies in a Hypersonic Flow Revealed by Optical and Radiographic Registration]. Nauchnaya vizualizatsiya [Scientific Visualization]. 2015. Vol.7. No.1. P.38-44 (in Russian).
- [9] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kamchatny V.G., Odzericho I.A. Termomekhanicheskie i deformatsionnye processy pri vysokoskorostnom skol'zhenii nagruzok po rel'sovym napravlyayushchim raketnogo treka [Thermomechanical and Deformation Processes During High-Speed Sliding of Loads Along the Rail Guides of a Rocket Track]. Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya [Bulletin of Scientific and Technical Development]. 2017. No.10(122). P.3-7 (in Russian).
- [10] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Gerasimova R.V., Lyakhov K.I., Melnik A.V., Odzericho I.A., Yanenko B.A. Postanovka ispytaniy toplivnyh upakovочnyh komplektov na raketnom treke [Setting Up Tests of Fuel Packaging Kits on the Missile Track]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2017. No.3(24). P.68-76 (in Russian).
- [11] Gerasimov S.I., Lysenkov V.E. Sistema zapuska i upravleniya optiko-fizicheskoy apparaturoj na aeroballisticheskoy trasse [System of Launching and Controlling Optical-Physical Equipment on an Aeroballistic Track]. Trudy chetvertoj Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Fundamental'nye osnovy ballisticheskogo proektirovaniya» [Proceedings of the Fourth All-Russian Scientific and Technical Conference «Fundamental principles of ballistic design»]. St. Petersburg, 2015. Voenmekh. Vestnik BGTU [Voenmeh. Bulletin of BSTU]. 2015. No.29. P.162-174 (in Russian).
- [12] Gerasimov S.I. Diagnostika pri issledovanii effektiv, soprovozhdayushchih vyhod udarnoj volny na svobodnuyu poverhnost' pri udarno-volnovom nagruzhении [Diagnostics in the Study of Effects Accompanying the Output of a Shock Wave on the Free Surface under Shock-Wave Loading]. Nelinejnyj mir [Nonlinear world]. 2009. Vol.7. No.7. P.526-527 (in Russian).

Determining the Model Spatial Position under Intense Background Illumination

S.I. Gerasimov^{*,1} V.I. Erofeev^{**2}, V.I. Kostin^{**3}, E.G. Kosyak^{*4}, P.G. Kuznetsov^{*5},
R.V. Gerasimova^{*6}**

^{}Sarov Physics and Technical Institute of National Research Nuclear University «MEPHI», Nizhny Novgorod region, Sarov, 6 Duchova str., 607186 Russia*

*^{**}Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Belinskogo str., 603024 Russia*

¹ORCID iD: 0000-0002-6850-0816

WOS Researcher ID: L-2727-2016

e-mail: s.i.gerasimov@mail.ru

²ORCID iD: 0000-0002-6637-5564

e-mail: erf04@mts-nn.ru

⁵ORCID iD: 0000-0002-2711-3975

e-mail: costin.vasil@yandex.ru

⁴ORCID iD: 0000-0001-6291-2396

e-mail: keg@sarfti.ru

⁵ORCID iD: 0000-0003-2691-206X

e-mail: kpg@sarfti.ru

⁶ORCID iD: 0000-0002-2711-3975

e-mail: grv@sarfti.ru

Abstract – The paper describes the method that makes it possible to set up aeroballistic tests to study the aerodynamic characteristics of high-speed objects in conditions where there is an intense self-illumination (solid light) of the object. At the same time, the accuracy of external photogrammetric measurements of the spatial linear coordinates of the center of mass that meets the requirements of aerodynamic testing is provided.

Keywords: aeroballistic experiment, linear coordinates, self-illumination, photogrammetry, shadow projection.