

О развитии техники аэробаллистического эксперимента для визуализации течений

С.И. Герасимов^{1,А,В,С,Д}, В.И. Ерофеев^{2,А,Д}, В.А. Кикеев^{3,А,Д}, К.В. Тотышев^{4,С},
Е.Г. Косяк^{5,В}, П.Г. Кузнецов^{6,В}, Р.В. Герасимова^{7,В}

^А Институт проблем машиностроения РАН – филиал Института прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

^В Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

^С Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

^Д Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Россия

¹ ORCID: 0000-0002-6850-0816, s.i.gerasimov@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-6637-5564, erfo4@mts-nn.ru

³ ORCID: 0000-0002-2375-0803, vkikeev@mail.ru

⁴ ORCID: 0000-0002-7141-0408, ktotyshev@yandex.ru

⁵ ORCID: 0000-0001-6291-2396, keg@sarfti.ru

⁶ ORCID: 0000-0003-2691-206X, kpg@sarfti.ru

⁷ ORCID: 0000-0002-2711-3975, grv@sarfti.ru

Аннотация

Рассмотрены схемы теневой визуализации, дополняющие методику проведения аэробаллистического эксперимента, заключающуюся в отстреле модели, установленной в специальном разделяющемся поддоне, баллистической установки; разделении и улавливании части поддона отсекателем; пролету модели с заданными начальными условиями движения по скорости и углу атаки на измерительном участке аэробаллистической трассы; бесконтактной внешнетраекторной регистрации модели синхронным фотографированием модели цифровыми камерами стереопостов, работающих в ждущем режиме на фоне реперных марок базовой системы координат. Фотографирование происходит в момент синхронного с движением модели срабатыванием импульсных источников света. В этих условиях работоспособны схемы теневой визуализации, представляющие модернизированный метод светящейся точки с использованием защитного ракорда, комбинированный метод, включающий регистрацию в проходящем свете с помощью камеры с электронно-оптическим затвором, теневой фоновый метод. Приведены характерные картины регистрации.

Ключевые слова: баллистический эксперимент, аэродинамические характеристики, легкогазовая установка, фоторегистрация.

1. Введение

Одной из задач современного баллистического эксперимента является точное измерение аэродинамических характеристик тел, движущихся со сверх- или гиперзвуковыми скоростями в воздухе. Аэродинамические характеристики свободно летящих тел определяются косвенными методами, основывающимися на использовании дифференциальной связи между коэффициентами аэродинамических сил и моментов и параметрами зарегистрированного движения исследуемого тела, устанавливаемой системой общих уравнений движения [1-4]. Рассмотрение уравнений показывает, что задача определения аэродинамических характеристик по данным траекторных измере-

ний, выполняемых в баллистическом эксперименте, сводится в основном к вычислению входящих в эти уравнения первых и вторых производных координат по времени или координате. Поскольку эти ошибки пропорциональны погрешностям измерения координат, то величина погрешностей определения аэродинамических характеристик в баллистическом эксперименте в значительной мере зависит от величины погрешностей измерения координат модели [1].

Традиционная постановка аэробаллистического эксперимента (АБЭ) на баллистических трассах состоит в том, что модель летательного аппарата (ЛА), отстреливается из пороховой или легкогазовой баллистической установки (БУ) с заданными программой испытаний начальными условиями по числу M и углу атаки α [5-7]. Синхронно с полетом модели, с помощью оптических средств системы внешнетраекторных измерений (ВТИ) трассы, осуществляется многократная регистрация в фиксированные моменты времени t_i линейного (координаты X_i, Y_i, Z_i) и углового ($\vartheta_i, \psi_i, \gamma_i$) положения объекта испытания (ОИ) в пространстве. Последовательность синхронизирующих команд на срабатывание импульсных источников света (ИИС), обеспечивающих фоторегистрацию модели в полете, вырабатывалась с помощью автоматической системы управления аппаратурой оптического измерительного комплекса [8].

Методика расчёта внешнетраекторных параметров пространственного положения ОИ состоит в уравнивательных вычислениях по методу наименьших квадратов (МНК) зависимостей между измеренными величинами – координатами снимков и неизвестными (определяемыми) внешнетраекторными параметрами ОИ [9]. Принцип уравнивания включает процесс вычислений, общий как при уточнении элементов ориентирования снимков, так и при вычислении определяемых параметров пространственного положения ОИ. Задача расчёта параметров пространственного положения ОИ решается путём составления соответствующих уравнений, в которые подставляются известные величины:

- уточнённые значения элементов внутреннего и внешнего ориентирования снимков;

- приближенные значения параметров пространственного положения ОИ ($X^0, Y^0, Z^0, \vartheta^0, \varphi^0, \gamma^0$).

Поскольку уравнения нелинейны и обычно измеряется большее количество точек, чем требуется, решение осуществляется по МНК, путем минимизации функционала:

$$\Phi(\bar{a}_u) = \sum_{j=1}^K \left(W_j \cdot \sum_{i=1}^N \overline{\Delta r_i^2} \right) = \min,$$

где:

\bar{a} – вектор параметров согласования - линейные и угловые координаты ОИ ($X, Y, Z, \vartheta, \varphi, \gamma$);

Δr_i – вектор невязок между измеряемыми значениями координат точек ОИ на снимках и вычисляемыми по известным формулам;

$W_j = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_x^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_y^2} \end{pmatrix}$ – весовая матрица (2x2) измерений координат x_i, y_i точек на снимках

(принимаются независимыми, с одинаковым весом);

$u = 1, 2, \dots, 6$ – индекс параметров согласования;

K – количество цифровых камер снимков по которым производятся измерения координат изображений точек маркировки ОИ ($2 \leq K \leq 4$);

N – количество измеряемых на снимках стереопары изображений точек ОИ;

i, j – индексы суммирования.

При этом находится такое положение ОИ в пространстве, т.е. значения координат X, Y, Z центра тяжести и углов ориентации $\vartheta, \varphi, \gamma$, при котором вычисляемые по проективным соотношениям координаты изображений реперных точек маркировки ОИ на

стереопарных снимках (левом и правом и/или верхнем и нижнем) совпадают с измеренными.

На каждом шаге процесса итераций вычисляются и вносятся поправки в значения параметров предыдущего приближения. Расчет ведется по формуле:

$$a_u^{v+1} = a_u^v + (G_{uu}^{-1})^V \cdot D^T,$$

где:

G^{-1} – обращённая матрица (6x6) коэффициентов системы нормальных уравнений (частных производных от расчетных значений координат изображения точек ОИ на снимках по приближенным значениям пространственных линейных и угловых координат ОИ);

D – матрица (1x6) свободных членов системы нормальных уравнений;

v – номер итерации;

T – индекс транспонирования.

Избыток информации дает возможность получить статистическую оценку среднеквадратических погрешностей определения внешнетраекторных (ВТ) параметров движения ОИ по материалам стереофотограмметрических измерений:

$$\sigma_{a_u} = \sqrt{\frac{\Phi_K}{4N - u} G_{uu}^{-1}},$$

Вычисленные для известных моментов фотографирования в опыте дискретные значения координат центра тяжести и угловой ориентации ОИ в пространстве принимаются в качестве основных исходных данных для последующего этапа расчёта аэродинамических характеристик ОИ.

При выполнении ВТИ используются паспортизованные цифровые камеры Canon, физическое разрешение которых известно из паспорта и характеризуется размером пиксела изображения 6-8 мкм. Для фотограмметрической обработки снимков используется программа, обеспечивающая «инструментальную» погрешность измерения координат цифровых снимков с субпиксельной точностью - 2-3 мкм. В связи с этим погрешности фотограмметрической обработки снимков считаются известными величинами. По данным статистического анализа материалов погрешность измерений координат по цифровым фотоснимкам характеризуется случайным средним квадратическим отклонением $\sigma_{x,y} = 5 - 10$ мкм с вероятностью $P = 0,95$.

2. Описание фотопоста.

Средства фоторегистрации с электронно-оптическими преобразователями (ЭОП) получили большое распространение при регистрации быстропротекающих процессов [7]. На базе фотокамер с ЭОП создан комбинированный фотопост (КФП), позволяющий получать изображение аэродинамической модели в отраженном свете и теневую картину ее обтекания [10]. Наличие затворных систем обеспечивает возможность фоторегистрации в любое время суток и практически при любой фоновой подсветке. КФП с использованием аналоговых камер целесообразно использовать на начальном участке выстрела в более жестких условиях воздействия дульного выхлопа [11]. КФП на базе цифровых камер применяется на измерительном участке аэробаллистической трассы вне зоны разлета продуктов горения, после отсечки элементов поддона и т.п. На рис.1 приведена схема реализации данной схемы вблизи на этапе промежуточной баллистики. При проведении аэробаллистического эксперимента, а именно метании испытываемой модели со скоростью 0.5...3.0 км/с из баллистической установки (БУ), одной из важнейших задач промежуточной баллистики является исследование процессов взаимодействия элементов сложной системы: собственно модели, ведущих элементов (поддонов, обкладок, обтюраторов), ствола БУ, продуктов горения порохового заряда, ударных волн, генерируемых движущимися телами.

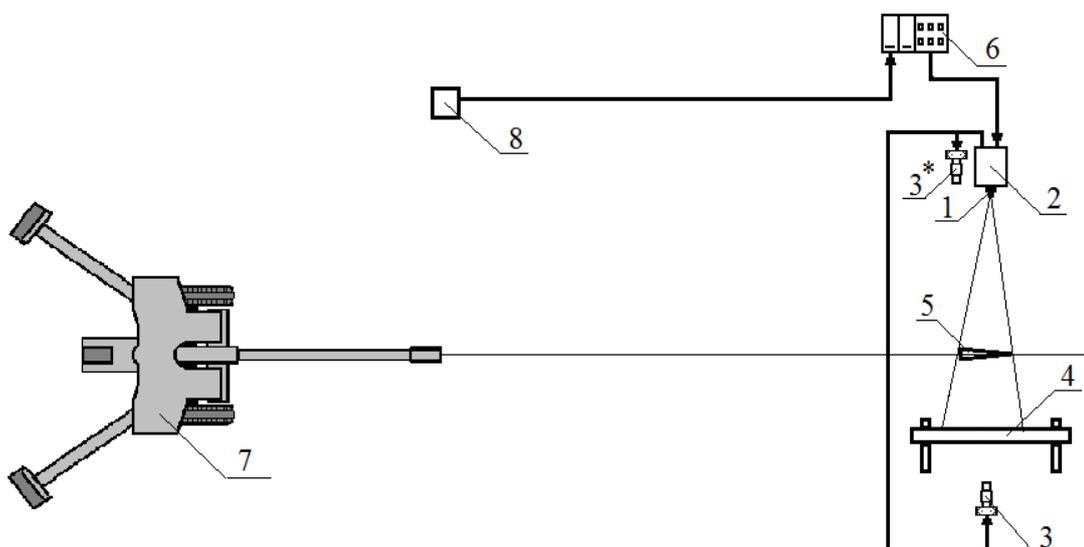


Рисунок 1 – Система двухканальной оптической регистрации: 1 - Точечный излучатель; 2 - Накопитель электрической энергии; 3 - Камеры с электронно-оптическим затвором; 4 – Экран; 5 – Модель; 6 - Блок синхронизации; 7 - Ствольная баллистической установка, 8 - Фотоприемник.

При выстреле БУ (7), в области дульного среза появляется светящаяся область, на которую ориентирован фотоприёмник (8), запускающий схему с необходимой задержкой. Точечный импульсный излучатель (1) газоразрядный с ограничением распространения разряда сконструирован таким образом, что, с одной стороны, он обладает необходимыми светотехническими параметрами, достаточными для построения изображения модели в отражённом свете (яркость ≈ 6.2 Мсб, тело свечения 0.785 см^2 ; при чувствительности фотоплёнки $S_{0.8}=1000$ ед. ГОСТ), а с другой, имеет достаточно малое тело свечения ($\varnothing 10$ мм) для того, чтобы являться точечным источником теневой схемы и строить на матовом экране теневые спектры удовлетворительного качества. Излучатель (1), приводится в действие накопителем энергии (2) ($E=150$ Дж), генерируя световой импульс, одновременно выдаётся синхроимпульс на открытие затворов самодельных аналоговых фотокамер (основную и дополнительную) ЭПОС (3 и 3*), одна из которых фотографирует теневое изображение, а другая – в отражённом свете. Экспонирование фотоматериала (время работы затвора) – $0.5...1$ мкс [10].

Цифровой стереопост состоит из двух цифровых камер, располагаемых на вертикальном базисе, и двух камер, располагаемых на горизонтальном базисе - симметрично относительно первых двух. Цифровые камеры располагаются в замкнутом (запирающемся) боксе-сейфе, исключая любые механические и физические воздействия от возможных осколков при проведении опытов и человеческого фактора. На передней стенке бокса предусмотрено отверстие для объектива диаметром 50-60 мм, снабжённое автоматической шторкой-задвижкой, открывающей объектив перед фотосъёмкой и запирающей его после выполнения фотосъёмки.

На рис.2 показаны характерные изображения в отраженном свете, получаемые одновременно камерами поста с открытым затвором при последовательной работе импульсных газоразрядных источников света длительностью 1 мкс [7].



Рисунок 2 – Пример регистрации камерой одного из стереопостов нескольких положений модели, движущейся со скоростью 1,2 км/с.

На рисунке 3 показан пример использования схемы в баллистическом эксперименте на участке промежуточной баллистики.

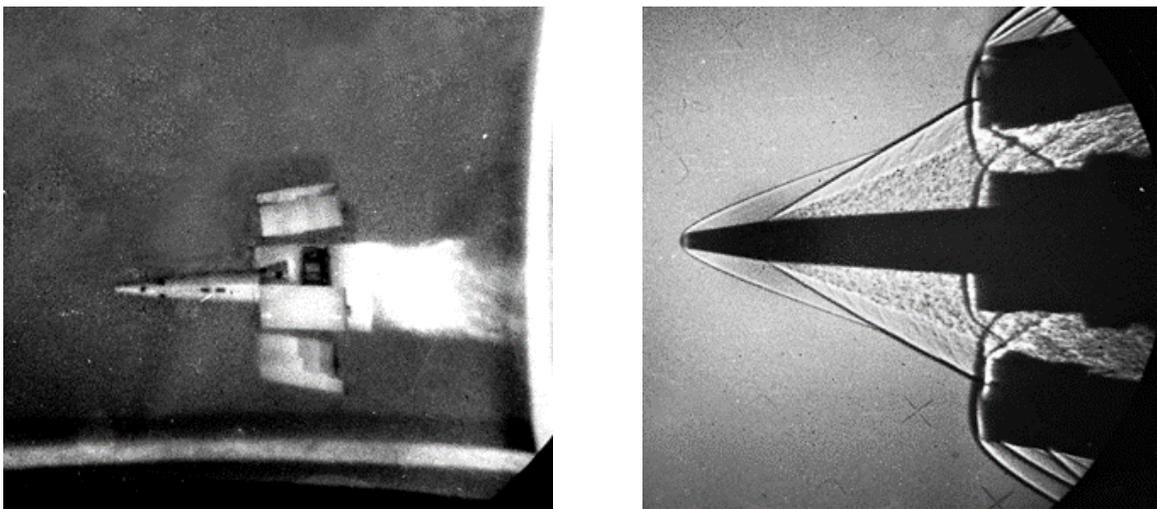
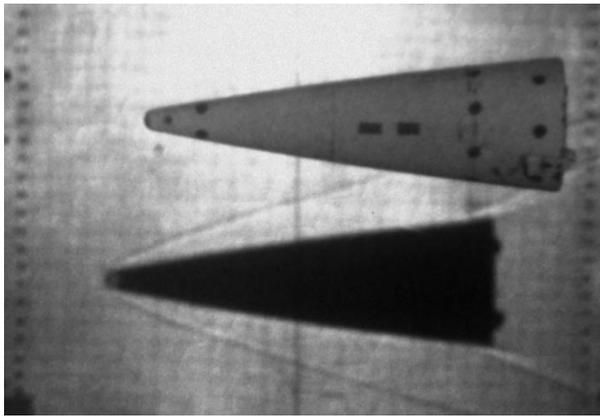
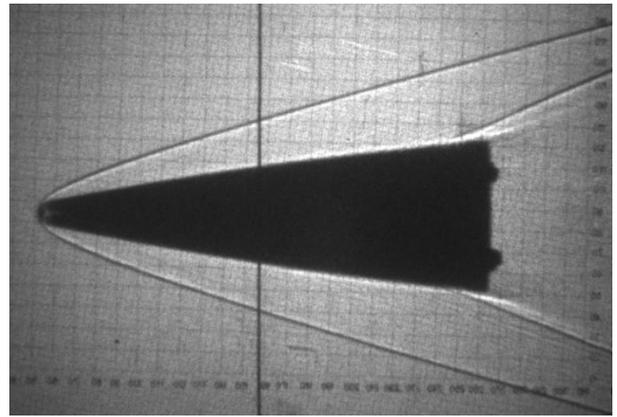


Рисунок 3 – Движение элементов сборки, регистрируемое аналоговыми камерами с ЭОП.

Все элементы данной системы мобильные и позволяют организовывать комбинированный фотопост практически в любых условиях проведения эксперимента. На этапе внешней баллистики (в том числе на измерительном участке аэробаллистической трассы), когда элементы поддона отсечены, в данной схеме можно использовать более дорогостоящие цифровые камеры с ЭОП [12]. Пример получения информации при установке фотопоста на измерительном участке аэробаллистического тира с применением программно-управляемого многокадрового электронно-оптического комплекса для скоростной регистрации серии изображений быстропротекающего процесса представлен на рисунке 4.



а)



б)

Рисунок 4 – Результаты регистрации КФП: изображение аэродинамической модели, движущейся со скоростью 1480 м/с в отраженном свете (а) и теневая картина ее обтекания (б).

Качество получаемой информации позволяет проводить измерения внешнетраекторных параметров с заявленной выше точностью. Это, в свою очередь, позволяет с требуемой точностью определять характеристики аэродинамических сил и моментов, действующих на ЛА в полете, например, $Cd(\alpha, M)$ -коэффициента центра давления, Ct – коэффициента тангенциальной силы; Cn^α – производную от коэффициента нормальной аэродинамической силы по углу атаки; $m_z^{\omega_z}$ – производную от коэффициента поперечного аэродинамического момента по безразмерной угловой скорости $\omega_z = \omega_z \cdot \frac{L}{V}$ (V – скорость полета модели).

Вместе с тем, для ряда ЛА помимо решения основной задачи в АБЭ – определения характеристик аэродинамических сил и моментов возникает необходимость визуализации спектров обтекания модели.

Например, основной аэродинамической особенностью модели при задействовании щитковых органов управления, является наличие большой нормальной силы и некоторого угла атаки при нулевом поперечном моменте. Это приводит к значительным радиальным отклонениям относительно основной линии прицеливания аэробаллистической трассы и наличием значительных балансировочных углов атаки. При этом колебания по углу атаки носят затухающий характер. Вращение моделей относительно продольной оси (по γ) вследствие закрутки в стволе БУ (появление начальной угловой скорости вращения модели относительно продольной оси при движении в канале ствола) приводит к значительному изменению угла крена γ . Поэтому существенным обстоятельством в постановке аэродинамических экспериментов с такими моделями является выявление локальных особенностей обтекания органов аэродинамического управления. Полезную информацию для исследования картины обтекания в этой зоне в зависимости от числа Маха и углов α_n и φ_n могут дать теневые снимки. А поскольку эти параметры меняются на траектории и существенно зависят от начальных условий движения и параметров объекта испытаний, необходима многоракурсная теневая съемка и съемки в различных точках траектории. Реализация таких возможностей может существенно повысить эффективность каждого отдельного эксперимента.

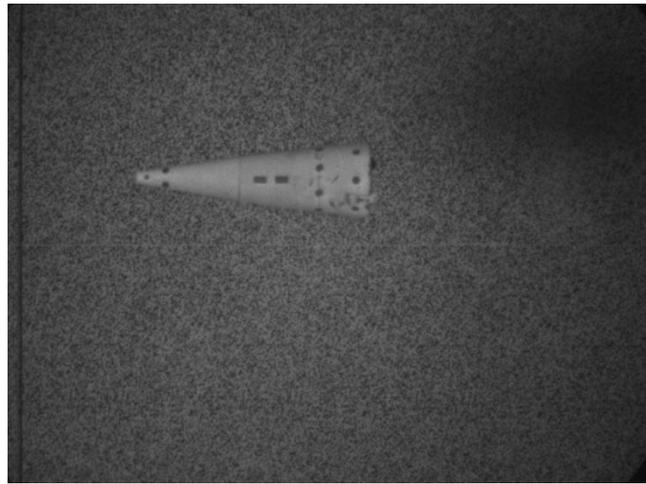
Аэродинамика объекта, разделяющегося на секции, существенно осложняется в сравнении объектами неразделяющимися. При этом в начальной фазе движения может быть существенная аэродинамическая взаимосвязь обеих секции, а при расхождении в осевом направлении на некоторое расстояние взаимосвязь пропадает и проявляются особенности движения второй секции в спутном следе первой. Действующие на секции аэродинамические силы проявляются через линейные перемещения под действием этих аэродинамических сил (второй интеграл от силы по времени), а аэродинамические моменты – через угловые перемещения под действием этих моментов (вто-

рой интеграл от момента по времени). Эти особенности могут существенно затруднить обработку аэробаллистического эксперимента с моделями, разделяющимися на отдельно летящие секции. Это обусловлено тем, что действующие на секции аэродинамические силы и моменты могут существенно и нелинейно зависеть от линейных и угловых координат, определяющих их расположение относительно друг друга и векторов скорости. Эти зависимости могут иметь качественно иной характер в зависимости от того, находится вторая секция в ближней (до «горловины») или в дальней части спутного следа. Указанные сложности в анализе аэробаллистического эксперимента с разделяющимися объектами означают, что для эффективного проведения его целесообразно проводить многократную теневую регистрацию теневых спектров обтекания секции в различных точках траектории. Это позволяет выявить особенности течения в различных фазах процесса разделения и обосновать реальный характер аэродинамических зависимостей.

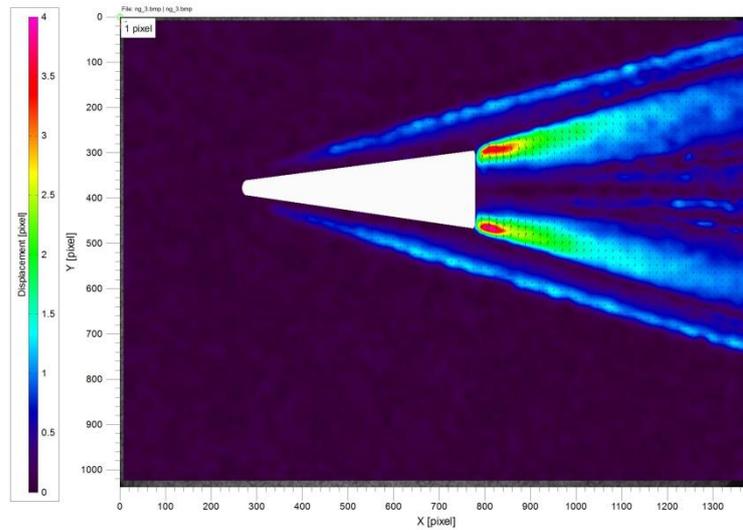
Сложность задачи заключается в том, что вышеприведенный алгоритм получения ВТИ подразумевает получение до сотни (от десятков стереопостов) качественных изображений испытываемой модели в отраженном свете (для визуализации не менее трех марок, нанесенных на поверхность модели в заданных точках). Соответствующая «фоновая» подсветка существенно затрудняет качественную теневую съемку и делает невозможной применение классической прямотеневой съемки на открытую пленку. Совмещение определения ВТ параметров и получение качественной картины теневых спектров обтекания в одном опыте осуществляется применением специальных схем регистрации в проходящем свете.

3. Применение теневого фонового метода

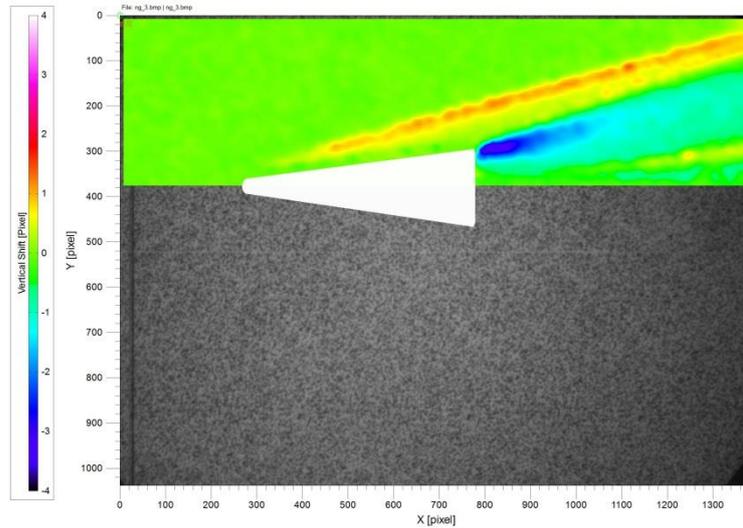
Тенденцией последнего десятилетия в развитии научных исследований аэрогидродинамических потоков является стремительное сближение визуализации результатов численного моделирования с визуализацией результатов экспериментов. Сравнение цифровых численных и экспериментальных полей течений может служить эффективным инструментом анализа аэрогидродинамических процессов с опорой на результаты экспериментальных и численных исследований сложных течений. Одним из таких направлений в области регистрации быстропротекающих процессов является теневой фоновый метод (ТФМ) [13]. В работе [14] ТФМ использовался для визуализации областей с градиентом плотности при обтекании модели в аэродинамической трубе, однако отсутствуют работы по применению ТФМ в прямом аэродинамическом эксперименте. Применяя элементы КФП и алгоритмы ТФМ, возможно визуализировать области с градиентом плотности, обусловленные движением аэродинамической модели со сверхзвуковой скоростью. На рисунке 5 приведены результаты регистрации движущейся аэродинамической модели с помощью ТФМ. Регистрация осуществлялась камерой с ЭОП на фоне контрастного экрана при его подсветке импульсным источником света. Дополнительно, до проведения эксперимента, зарегистрировано опорное (без модели) изображение контрастного экрана. Обработка двух полученных кадров кросскорреляционным алгоритмом позволила визуализировать области возмущения. Обработка проводилась с помощью программы PIVview (демоверсия). Использовался многопроходный кросскорреляционный алгоритм обработки с квадратным окном опроса и 50 % перекрытием. Размер окна опроса итерационно уменьшался с 256 до 16 пикселей. Аппроксимация корреляционной функции проводилась с помощью трехточечной гауссовой интерполяции без предварительной обработки изображений. Для расчета корреляционной функции использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье. Полученные результаты представлены в виде абсолютного значения (б) и вертикальной составляющей (в) поля смещения элементов изображения вызванных рефракцией зондирующего излучения при прохождении через область возмущения.



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Результат регистрации ТФМ: исходное изображение (а) и результаты кросскорреляционной обработки (б, в).

Другой задачей, которую можно решать с помощью ТФМ в эксперименте, является определение скорости ОИ, движущегося со сверхзвуковой скоростью

При движении ОИ со сверхзвуковой скоростью перед ним образуется в общем случае криволинейная УВ, которая вдали от ОИ вырождается в слабую (звуковую) волну воз-

мушения. На измерении УВ вдали от ОИ основан способ [1]. Вычисление скорости движения ОИ производится по формуле:

$$V_{\text{ои}} = \frac{a}{\sin(\alpha)}, \quad (1)$$

где $V_{\text{ои}}$ – скорость движения ОИ;

a – скорость звука в воздухе;

α – половина угла раствора головной УВ.

Форма УВ в непосредственной близости от ОИ зависит от формы тела. Способ [12] основан на измерении угла раствора УВ в непосредственной близости от ОИ конической формы. Вычисление скорости движения ОИ производится по формуле:

$$V_{\text{ои}} = \frac{a}{\sqrt{\sin(\alpha)^2 - 1,2\sin(\beta)^2}}, \quad (2)$$

где β – половина угла раствора ОИ конической формы.

Таким образом, в известных способах [15, 16] регистрируется одно положение ОИ находящегося в зоне регистрации фоторегистратора и определяется одно значение скорости ОИ. Кроме того, типичные схемы фоторегистрации головной УВ [17] предполагают: наличие элементов схемы регистрации, соизмеримых с размерами ОИ; использование точечного источника света; отсутствие внешней (фоновой) подсветки либо использование фоторегистратора с электронным затвором. Перечисленные факторы сужают область применения известных способов. Для устранения данных недостатков разработаны способы [15, 16], они основаны на проведении видеорегистрации ОИ, движущегося со сверхзвуковой скоростью, на фоне, представляющем собой поверхность со структурой множества мелких деталей с высоким оптическим контрастом (искусственный фоновый экран, лес, трава, песок, кирпичная стена...). За счет рефракции зондирующего луча при прохождении области головной УВ происходит смещение элементов фонового экрана в его изображении. Путем анализа смещений элементов изображения фонового экрана определяются положение и форма головной УВ. На основе измерения угла раствора УВ вдали от ОИ определяется его скорость движения [4]. В случае видеорегистрации движения ОИ конической формы крупным планом его скорость определяется на основе информации о наклоне косого скачка уплотнения относительно поверхности скорость ОИ [18,19].

Достоверность получаемых данных о скорости ОИ на основе проведения высокоскоростной видеорегистрации процесса его движения, последующей визуализации УВ и анализа полученной информации проверена экспериментально. Осуществлялась видеорегистрация полета пули патрона 7,62×54R ПС, выпущенной из снайперской винтовки Драгунова (СВД). Регистрация осуществлялась на участке свободного полета пули, на расстоянии ~ 10 м от среза ствола СВД, с помощью высокоскоростной видеокамеры (частота съемки 2128 к/с; время экспозиции 5 мкс;) на фоне контрастного экрана шириной 1,4 м. На рисунке 6 приведены результаты регистрации головной УВ в сверхзвуковом полете при проведении одного из экспериментов. Используя полученные изображения головной УВ, путем измерения угла раствора УВ на удалении от пули, по формуле (1) вычислены значения скорости пули ($V_{\text{ои}}$). Результаты приведены в таблице 1, где также приведена информация о скорости пули, полученная с помощью светоблокирующих сечений ($V_{\text{взу}}$). Видеорегистрация осуществлялась на расстоянии ~ 7 м от места установки светоблокирующих сечений. Отметим, что на дистанции 7 м падение скорости полета пули составляет ~ 5 м/с. Откорректированное с учетом этого обстоятельства значение скорости полета пули $V_{\text{кор}}$ также представлено в таблице 1.

На рисунке 7 представлен один из кадров регистрации ОИ конической формы (угол раствора $\beta = 15,3^\circ$) и головной УВ. На основании измерения угла раствора головной УВ вблизи ОИ ($\alpha = 31,2^\circ$) вычислена скорость ОИ. Вычисленное значение скорости составило 1508 м/с, что согласуется со значением скорости, полученным с помощью светоблокирующих сечений ($V=1482$ м/с) в пределах 2 %.

фиксируется единой хронографической системой аэробаллистической трассы. Размер зоны регистрации 800×600×600 мм. На получаемом теневом изображении видны конфигурации головной ударной волны и слабых ударных волн (волны Маха), зона образования пограничного слоя и его структура, структура донного следа и другие тонкие эффекты, возникающие при обтекании летящего объекта. Характерный пример теневого изображения приведен на рисунке 8.

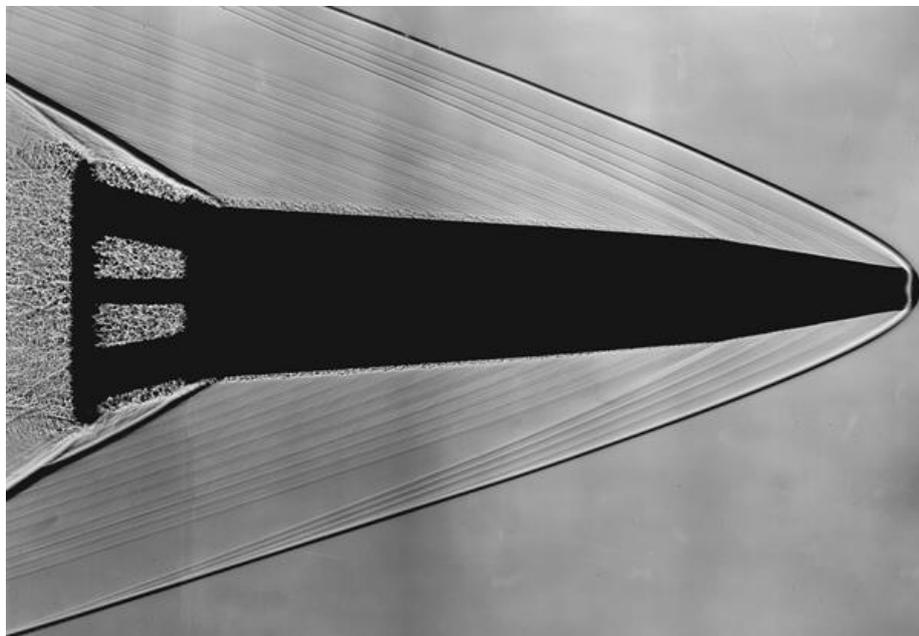
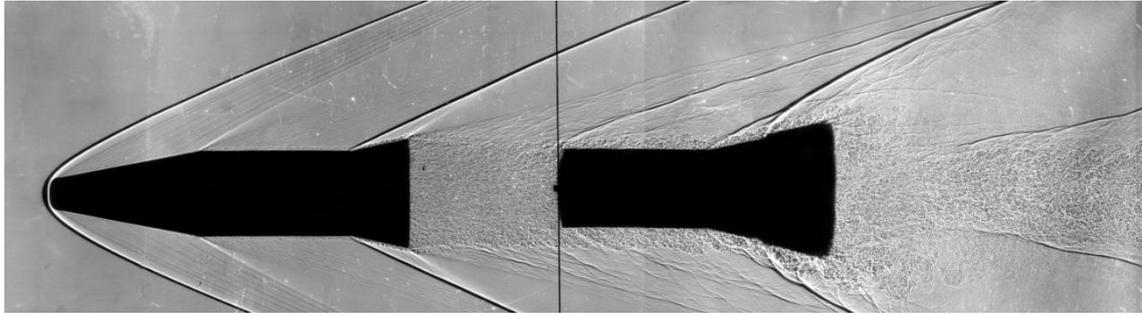


Рисунок 8 - Теневой спектр обтекания модели, движущейся со сверхзвуковой скоростью.

Возможность получения качественных теневых картин в схеме светящейся точки в условиях работы импульсных источников света, строящих изображения в отраженном свете на чувствительных элементах фотокамер стереопостов (см. выше) достигается за счет соблюдения ряда условий. Во-первых, выбирается техническая фотопленка, обладающая максимальным разрешением (до 500 пар линий на миллиметр) нечувствительная в красной области спектра и обладающая низкой светочувствительностью (несколько единиц ГОСТ). Во-вторых, фотоматериал закрывается пленочным слоем ракорда – синим светофильтром, ограничивающим возможность экспонирования ближним ультрафиолетовым - фиолетовым спектром излучения [20]. В-третьих, применяется мощный короткий точечный источник света с максимумом излучения в ультрафиолетовой части спектра, достаточной для экспонирования низкочувствительной, защищенной светофильтром пленки с плотностью почернения выше вуали [7]. Рисунок 9 демонстрирует качество получаемой в одном опыте изображения в отраженном свете и теневую картину движения системы тел ($V = 1240\text{м/с}$).



а



б

Рисунок 9 - Характерные изображения, получаемые в одном аэробаллистическом эксперименте для проведения ВТИ (а) и анализа картины обтекания (б) (вертикальный отвес – нить координатника).

На рис.10 показан теневой спектр обтекания асимметричной модели с отрицательным углом тангажа



Рисунок 10 - Теневой спектр модели при $V \approx 790 \frac{M}{c}$, $\vartheta \approx -6^\circ$, $\gamma = -170^\circ$.

На рис.11 показан теневой спектр модели с щитковым органом управления. Обтекание щитка происходит с образованием зоны отрывного течения перед ним, косоуго скачка уплотнения (от точки отрыва течения) и более интенсивного прямого скачка уплотнения. Расстояние от точки отрыва до щитка ($l' = l / h_{ш}$) составило 3,75 ед. при величине угла наклона косоуго скачка уплотнения 20° .

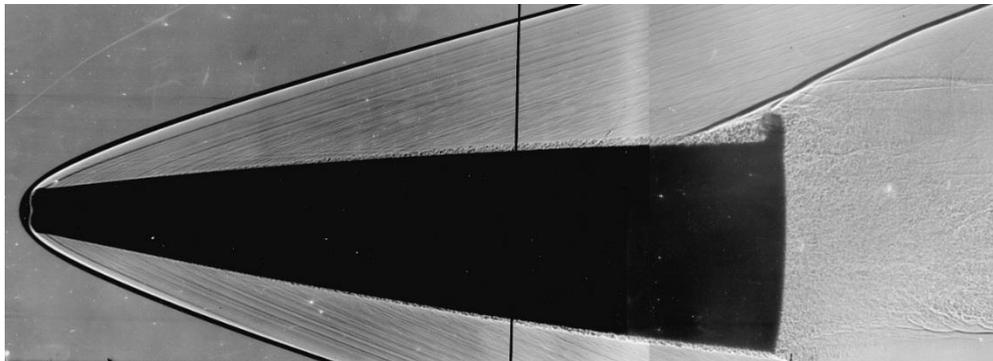


Рисунок 11 – Теневой спектр обтекания модели с щитковым органом управления, $V \approx 1410 \frac{M}{c}$, $\alpha \approx -1,5^\circ$, $\gamma = -165^\circ$

5. Заключение.

Использование фоторегистрации в аэробаллистическом эксперименте дает возможность получения теневых снимков спектров обтекания высокого качества, которые позволяют изучать структуры течения вблизи поверхности испытываемой модели в полете. Достоинство рассмотренных схем заключается в том, что они применяются одновременно с решением базовой задачи – получением информации (десятков фотоизображений маркированной модели в отраженном свете) для проведения внешнетраекторных измерений, т.е. в условиях «фоновых засветок».

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (гранты 18-08-00715, 18-29-10073)

Список литературы

1. Касьянов В.А., Ударцев Е.П. Определение характеристик воздушных судов методами идентификации. М. Машиностроение, 1988.
2. Златин Н.А., Красильщиков А.П., Мишин Г.И., Попов Н.Н. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. М., изд. "Наука", ГРФМЛ, 1974.
3. Кастров А.В., Шатило А.М. Модельно-экспериментальные методы определения аэродинамических характеристик летательных аппаратов на баллистических трассах. М., Изд. МО СССР, 1982.
4. G.T. Chapman, D.V. Kirk A Method for Extracting Aerodynamic Coefficients from Free-Flight Data AIAA Journal, № 4, pp 753-758, 1970.
5. Звегинцев В.И., Потапкин А.В. О развитии техники аэробаллистического эксперимента для исследования характеристик звукового удара. // Теплофизика и аэромеханика 2018 г., № 3, сс. 333-342.
6. De Sacco, M., Francesconi, A. Impact facility based upon high frequency two-stage light-gas gun // Acta Astronautica, 2003, Volume 53, Issue 3, p. 185-189.
7. Герасимов С.И., Файков Ю.И., Холин С.А. Кумулятивные источники света. Монография. Саров. ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2011г. 327 с.
8. Герасимов С.И., Лысенков В.Е. Система запуска и управления оптико-физической аппаратурой на аэробаллистической трассе. Сборник 4 всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные основы баллистического проектирования» С.-Петербург, 2014г., с.197.
9. Герасимов С.И., Костин В.И., Менде Н.П. Алгоритмы определения внешнетраекторных параметров и аэродинамических характеристик движения тела вращения: пособие для студентов вузов СарФТИ НИЯУ МИФИ, 2013, 44с
10. Пат. 100313 РФ, МПК G03 В39/00. Комбинированный фотопост для оптической регистрации быстропротекающих процессов. С.И. Герасимов, К.В. Тотышев // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 34.
11. Герасимов С.И., В. И. Ерофеев, А.В. Сальников. Визуализация дульного выхлопа при выстреле из легкогазовой пушки. Научная визуализация, кв.2, т.6, №2, 2014.
12. Крутик М.И. Патент РФ на полезную модель №63153, М. Кл. Но4N, 5/235, опублик. 10.05.2007.
13. Raffel, M. Background-oriented schlieren (BOS) techniques. *Exp Fluids* **56**, 60 (2015) <https://doi.org/10.1007/s00348-015-1927-5>
14. Bichal A., Thurov B. Development of a background oriented schlieren based wavefront sensor for aero-optics. Paper AIAA-2010-4842, 40th Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2010.
15. Струйные и отрывные течения: [Сб. статей]; Под ред. Г.Г. Черного, С.Ю. Чернявского - М.: Изд-во МГУ, 1979.

16. Н.П. Менде. Об одном методе определения нелинейных аэродинамических сил и моментов. Сборник статей "Физико-газодинамические баллистические исследования". Л., "Наука", 1980 г, стр. 200-224.
17. Шкворников П.Н., Платонов Н.М. Экспериментальная баллистика. Приборы и методы баллистических измерений. София: Изд-во ВЪВ ВТС, 1976.
18. Способ определения скорости объекта метания: пат. 2692116 Рос. Федерация: СПК G01P 3/38, G01S 5/18 / Герасимов С.И., Фомкин А.П., Трепалов Н.А. - № 2018132081; заявл. 06.09.18; опубл. 21.06.2019, Бюл. № 18. - 8 с.
19. Способ определения скорости объекта метания конической формы большого удлинения: пат. 2702955 РФ: СПК G01P 3/38, / Герасимов С.И., Фомкин А.П., Трепалов Н.А. - № 2018132358; заявл. 10.09.2018; опубл. 14.10.19, Бюл. № 29. - 8 с.
20. Система теневого фотографирования быстропротекающего процесса: патент №76166 РФ/ Герасимов С.И., Менде Н.П., Тотышев К.В., опуб. 10.09.2008 Бюл. №25– 5с.

On the development of aeroballistic experiment techniques for flow visualization

S.I. Gerasimov^{1,A,B,C,D}, V.I. Erofeev^{2,A,D}, V.A. Kikeev^{3,A,D}, K.V. Totyshev^{4,C}, E. G. Kosyak^{5,B}, P. G. Kuznetsov^{6,B}, R.V. Gerasimova^{7,B}

^A Institute for Problems of Mechanical Engineering, Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603024 Russia

^B Sarov State Physics and Technical Institute National Research Nuclear University MEPhI, Sarov, 607186 Russia

^C Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, 607188 Russia

^D Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

¹ ORCID: 0000-0002-6850-0816, s.i.gerasimov@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-6637-5564, erfo4@mts-nn.ru

³ ORCID: 0000-0002-2375-0803, vkikeev@mail.ru

⁴ ORCID: 0000-0002-7141-0408, ktotyshev@yandex.ru

⁵ ORCID: 0000-0001-6291-2396, keg@sarfti.ru

⁶ ORCID: 0000-0003-2691-206X, kpg@sarfti.ru

⁷ ORCID: 0000-0002-2711-3975, grv@sarfti.ru

Abstract

The schemes of shadow rendering, supplementing the methodology of aeroballistic experiment, consisting in the ejection model, mounted in a special separable pallet, ballistic installation; the separation and capture of the pallet by the clipper; the span of the model with given initial conditions of motion speed and angle of attack on the measuring site aeroballistic tracks; contactless external trajectory registration model of the synchronous photographing models of digital cameras stereophotos, operating in standby mode on the background of reference marks of the coordinate reference system. Photographing takes place at the moment when pulsed light sources are triggered synchronously with the model's movement. Under these conditions, shadow visualization schemes are functional, which represent an upgraded method of a luminous point using a protective lens, a combined method that includes registration in passing light using a camera with an electron-optical shutter, and a shadow background method. Typical registration patterns are given.

Keywords: ballistic experiment, aerodynamic characteristics, light-gas installation, photoregistration.

References

1. Kasyanov V.A., Udartsev E.P. Determination of aircraft characteristics by identification methods. M. Mashinostroenie, 1988.
2. Zlatin N.A., Krasilshchikov A.P., Mishin G.I., Popov N.N. Ballistic installations and their application in experimental research. Nauka, GRFML, 1974.
3. Kastrov A.V., Shatilo A.M. Model-experimental methods for determining the aerodynamic characteristics of aircraft on ballistic routes. MO SSSR, 1982.
4. G.T. Chapman, D.B. Kirk. Method for Extracting Aerodynamic Coefficients from Free-Flight Data. AIAA Journal, No. 4, pp 753-758, 1970.
5. Zvegintsev V.I., Potapkin A.V. On development of aeroballistic range experiments for studying the acoustic shock// 2018, № 3, pp. 333-342

6. De Cecco, M., Francesconi, A. Impact facility based upon high frequency two-stage light-gas gun // *Acta Astronautica*, 2003, Volume 53, Issue 3, pp. 185-189
7. Gerasimov S.I., Faykov Yu.I., Kholin S.A. Cumulative light sources. Sarov, 2002.
8. De Cecco, M., Francesconi, A. Impact facility based upon high frequency two-stage light-gas gun // *Acta Astronautica*, 2003, Volume 53, Issue 3, p. 185-189
9. Gerasimov S.I., Lysenkov V.E. Launch and control system for optical and physical equipment on aeroballistic track. Collection of the 4th All-Russian Scientific and Technical conference "Fundamentals of ballistic design" St. Petersburg, 2014, p. 197.
10. Gerasimov S.I., Kostin V.I., Mende N.P. Algorithms for determining trajectory and aerodynamic parameters for moving revolution bodies: Handbook for University students SarFTI NRU MEPhI, 2013, 44 p
11. Patent 100313 of the Russian Federation, IPC G03 B39/00. Photopost combined for optical detection of fast processes. S.I. Gerasimov, K.V. Totyshev // *Inventions. Utility model*. 2010. № 34.
12. Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Salnikov A.V. Visualization of Muzzle Exhaust Following the Light Gas Gun Shot. Scientific visualization. Vol. 6. No 2, 2014.
13. Krutik M.I. Patent of the Russian Federation for utility model No. 63153, M. KL. H04N, 5/235, publish. 10.05.2007.
14. Raffel, M. Background-oriented schlieren (BOS) techniques. *Exp Fluids* **56**, 60 (2015) <https://doi.org/10.1007/s00348-015-1927-5>
15. Bichal A., Thurow B. Development of a background oriented schlieren based wavefront sensor for aero-optics. Paper AIAA-2010-4842, 40th fluid dynamics conference and exhibit, Chicago.
16. Collection of articles. Edited by G. G. Cherny, S. Yu. Chernyavsky M. MSU publishing house, 1979.
17. N.P. Mende. On a method for determining nonlinear aerodynamic forces and moments. Collection of articles. Physical and gas-dynamic ballistic research. L., Nauka, 1980. PP. 200-224.
18. Shkvornikov P.N., Platonov N.M. Experimental ballistics. Devices and methods of ballistic measurements. Sofia: VVV VTS publishing House, 1976.
19. Method for determining the speed of a throwing object: Pat. 2692116 ROS. Federation: SEC G01P 3/38, G01S 5/18 / Gerasimov S.I., Fomkin A.P., Trepalov N.A. No. 2018132081; application 06.09.18; publ. 21.06.19, bull. No. 18.
20. Method for determining the speed of the object throwing a conical shape of large elongation: Pat. 2702955 RF: SEC G01P 3/38, / Gerasimov S.I., Fomkin A.P., Trepalov N.A. No. 2018132358; claimed. 10.09.18; publ. 14.10.19, bull. no. 29.
21. System of shadow photographing of a fast-flowing process: patent no. 76166 of the Russian Federation/ Gerasimov S. I., Mende N. P., Latyshev K. V., pub. 10.09.2008 Byul. no. 25-5s