

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ВОЗМУЩЕНИЙ ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ЗА СЧЕТ ПРИСУТСТВИЯ ЧАСТИЦ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

С.И. Герасимов^{1,2,3}

В.И. Ерофеев⁴

Е.Г. Косяк³

s.i.gerasimov@mail.ru

erof.vi@yandex.ru

keg@sarfti.ru

¹РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация

²НГТУ, Нижний Новгород, Российская Федерация

³СарФТИ НИЯУ МИФИ, Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация

⁴ИПМ РАН, Нижний Новгород, Российская Федерация

Аннотация

Область исследований специальности «Приборы и методы экспериментальной физики» включает в себя, в частности, создание установок для проведения опытов по физике многофазных неравновесных потоков. Обтекание тел многофазными потоками имеет существенное значение в различных областях техники, например в энергетике, методах контактной визуализации, аэрозольных технологиях, при нанесении различных покрытий и т. д. При обтекании тел высокоскоростным двухфазным потоком важную роль играет физика столкновения частицы с поверхностью и взаимодействие летящих частиц с головной ударной волной. Большая часть экспериментов в указанной области, включающей в себя прохождение моделью зоны дождя, снега, пыли, охлажденного облака и т. п., проводится в обращенной постановке. При этом модель фиксируется, а течение создается той или иной высокоэнталийной аэродинамической установкой. Такой подход не соответствует начальной стадии взаимодействия, сформированной до входа в зону двухфазной среды, головного скачка с налетающей частицей. Тем не менее для некоторых подходов представляет интерес визуально подтвердить возможность отбрасывания со сверхзвуковой скоростью встречной частицы фронтом головной ударной волны и увидеть торможение модели по теневой картине с изменением «линии Маха». Рассмотрена постановка

Ключевые слова

Многофазный неравновесный поток, головной скачок, сверхзвуковое течение, аэродинамическое сопротивление

прямого баллистического эксперимента для проверки теневой визуализацией возможности кавернообразования около тела, пересекающего на траектории участки атмосферы, насыщенные частицами пыли

Поступила 12.05.2020
Принята 22.06.2020
© Автор(ы), 2021

Работа выполнена в рамках государственного задания на проведение фундаментальных научных исследований по теме № 0035-2019-0027, номер госрегистрации 01201458047 и при поддержке РФФИ (грант РФФИ № 18-29-10073)

Введение. Движение летательных аппаратов (ЛА) в условиях облачности или входа в запыленные атмосферы планет сопровождается изменением параметров потока вблизи тела и его аэродинамических характеристик вследствие присутствия мелких, твердых или жидких частиц [1–3]. Старт ракеты с различных пусковых позиций, пескоструйная обработка поверхностей и другие приложения связаны с учетом влияния соударения сверхзвуковой двухфазной струи с преградой [4–6]. Обработка и анализ результатов экспериментов с многофазными течениями осложняются тем, что исследуемые процессы зависят от различных параметров аэродинамических установок, применяемых в обращенной постановке (геометрия, неоднородность потоков, диапазон чисел Маха и Рейнольдса, массовый спектр «частиц»), а также от плотностей, модулей упругости и пределов текучести материалов частиц и модели [7–10].

Полный анализ обтекания тела двухфазным потоком затруднен вследствие многообразия проходящих физических процессов, включающих в себя движение частиц в зоне торможения и их взаимодействие между собой и поверхностью тела. Структура сжатого слоя определяется физико-механическими свойствами налетающей частицы и поверхности ЛА. Согласно модели двух предельных скоростей [11], частицы либо проникают (прилипают) в поверхностный слой с образованием устойчивых покрытий (скорость частиц меньше скорости, при которой имеет место адгезия), либо происходит эрозия и унос материала вследствие необратимой деформации частиц и поверхностного слоя бомбардируемого тела (скорость частиц больше скорости, при которой начинается эрозия). Внутри этого интервала предельных скоростей реализуется отскок частиц.

Отскок частиц, в частности, приводит к эффекту возмущения головного скачка при обтекании тел сверхзвуковым двухфазным потоком. В отличие от падающих частиц взаимодействие отраженных частиц с головным скачком носит более сложный характер. Переход отраженной частицы через фронт ударной волны приводит к возникновению сложной структуры течения в следе за частицей в результате того, что высокое

давление из дозвуковой области может передаваться через след частицы в сверхзвуковую часть потока. Наличие этого эффекта ставит, в частности, вопрос о возможности изменения сопротивления затупленных тел, летящих со сверхзвуковой скоростью, за счет выдува частиц вперед с трансформацией прямого скачка в конический [12].

Для этого необходима постановка экспериментов, позволяющих измерять локальные параметры двухфазного потока и наблюдать за движением отдельных частиц при их взаимодействии с головным скачком. Это требует использования методов диагностики, обеспечивающих высокое пространственное и временное разрешение при отсутствии возмущения, вносимого в исследуемый поток. В отличие от экспериментов в обращенной постановке, когда тело неподвижно, а поток создается различного типа аэрогазодинамическими установками интересна прямая постановка, когда сформированный головной скачок в «чистой» атмосфере начинает взаимодействовать с запыленным участком еще до прихода частиц к поверхности тела. Решение отдельных задач по результатам прямого эксперимента подразумевает предварительное нахождение оптимальных условий проведения экспериментов и способов оптической регистрации особенностей течения, позволяющих, в частности, наблюдать результат взаимодействия отдельных частиц с головным скачком.

Описание экспериментов. Для наблюдения общей картины обтекания тел двухфазными потоками и выяснения основных физических закономерностей этого процесса первые эксперименты в прямой постановке посвящены визуализации течения с использованием тел разной геометрии при введении в поток частиц песка.

Приведенные ниже результаты получены для цилиндрических остроугольной и плоскозатупленной моделей калибра 23 мм, изготовленных по чертежам, представленным на рис. 1.

Для метания моделей использовалась пороховая баллистическая установка калибра 23 мм. Стрельбы моделями проводились на светоизолированной трассе по «мишеням», представляющим собой зоны искусственно запыленного воздуха, формируемые на сравнительно небольших участках траектории полета модели. Зона «запыленного» воздуха создавалась с использованием специально сконструированного стенда. Стенд представляет собой стальной каркас, в верхней части которого (примерно 500 мм от линии стрельбы) размещаются:

– деревянный ящик размером $600 \times 600 \times 50$ мм³, нижнее днище ящика выполнено из медной сетки (размер ячейки $0,7 \times 0,7$ мм²), перед экспери-

ментом ящик засыпается песком* с частицами размером $d \approx 0,6$ мм, в состоянии покоя песок не высыпается из ящика;

– электромотор мощностью 2,4 кВт, ось которого с насаженным на нее эксцентриком располагается параллельно линии стрельбы и соединяется со втулкой, вмонтированной в стенку ящика-сита.

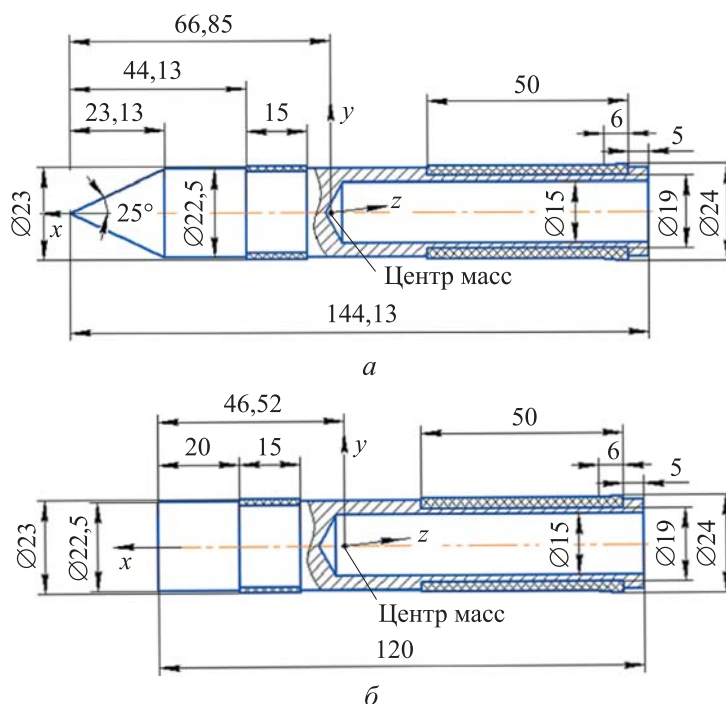


Рис. 1. Цилиндрические остроугольная (а) и плоскозатупленная (б) модели (материал корпуса сталь ЭП639)

В заданный момент времени запускается электромотор, приводящий в движение ящик-сито. Из вибрирующего с большой частотой ящика высыпается песчаная масса, перекрывая «пылевой» завесой траекторию полета модели.

В экспериментах осуществлялись:

- контроль плотности «пылевых» образований;
- измерения скорости модели непосредственно перед входом в зону регистрации (по данным регистрации моментов пробития хронографических датчиков);
- фотографирование модели и прилегающей к ней области течения в вертикальной плоскости стрельбы.

* Сухая масса естественного песка просеивается через сито с ячейкой размером $a = 0,7$ мм, а затем — через сито с ячейкой размером $a = 0,5$ мм.

Схема проведения эксперимента приведена на рис. 2.

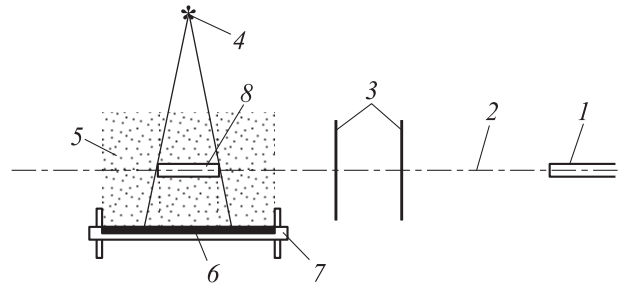


Рис. 2. Схема проведения эксперимента:

1 — пушечный ствол; 2 — линия полета модели; 3 — контактные датчики;
4 — импульсный источник света; 5 — зона «пыли»; 6 — фотопленка; 7 — подставка
с кассетой для фиксации фотопленки; 8 — модель

Измерения осуществлялись следующим образом. На высоте примерно 0,5 м в зоне осаждения частиц устанавливались специальные металлические стаканчики, в которых за время Δt накапливалась некоторая масса «пыли» M . Входное сечение мерной посуды (площадь сбора осадков S) известно, поэтому можно рассчитать интенсивность — высоту количества осадков в единицу времени по соотношению:

$$h = \frac{M}{\rho_0 S},$$

где ρ_0 — плотность насыпного песка.

Для оценки объемной плотности ρ «пыли» в воздухе использовалось соотношение:

$$M = \rho_0 \bar{u} S \Delta t.$$

Здесь M — количество осадков, собранных в мерный сосуд за время Δt ; \bar{u} — средняя скорость падения капель дождя (частиц «пыли»); S — площадь сбора осадков (площадь входного сечения мерной посуды); Δt — время сбора осадков.

Оценка средней скорости падения жидких и твердых частиц выполнялась следующим образом. Предполагалось, что при падении на частицу действует сила тяжести и сила аэродинамического сопротивления. Частица пыли (песчинка) — абсолютно твердая сфера с коэффициентом лобового сопротивления $C_x = 0,44$ [13].

Уравнение движения такой частицы имеет вид

$$\frac{mdu}{dt} = -\rho Vg + \frac{C_x S \rho_B u^2}{2}, \quad (1)$$

где m — масса частицы, $m = V\rho$, V — объем частицы, $V = \pi D^3/6$, ρ — плотность частицы; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $S = \pi D^2/4$ — площадь миделя сферы.

Расчеты по формуле (1) показывают, что для характерного размера частицы $D = 0,5 \dots 1,0 \text{ мм}$, падающей с высоты $2,0 \dots 2,5 \text{ м}$, значение скорости составит $\dot{y} \approx 3 \dots 5 \text{ м/с}$.

В качестве источника света применялся газоразрядный импульсный источник с телом свечения 1 мм , яркостной температурой $20 \cdot 10^3 \text{ К}$, длительностью импульса по полуширине $0,3 \text{ мкс}$. Для повышения точности источника (увеличения расстояния от источника до пленки в 2 раза при том же теле свечения) использовался взрывной источник света с рабочим газом ксеноном начального атмосферного давления. Сжатие ксенона в условиях остроугольной геометрии с отсечкой светового импульса при взаимодействии с кварцевым транслятором [14] позволяет реализовать в таком точечном источнике световой импульс с яркостной температурой 90 кК и длительностью $0,2 \text{ мкс}$. В качестве фотоматериала использовалась широкоформатная рулонная изопанхроматическая пленка чувствительностью 1100 ед. (ГОСТ 10691.2–84).

Результаты эксперимента. Теневая фотография (рис. 3, а) получена с применением газоразрядного источника при точечности схемы регистрации $\delta = 1,56 \cdot 10^{-8}$ ($\delta = r^2/(r^2 + L^2)$, где r — радиус излучателя; L — расстояние до плоскости построения изображения). Объект регистрации — плоский цилиндр массой $192,7 \text{ г}$, скорость на измерительном участке (на входе в запыленный участок) — 820 м/с . Следующие более резкие снимки получены при использовании взрывного источника света при точечности схемы регистрации $\delta \approx 2 \cdot 10^{-9}$. Модель на рис. 3, б — заостренный цилиндр массой 192 г , вошедший в зону запыленного воздуха со скоростью 800 м/с . Отклонение модели в рабочей зоне составило 20 мм вправо от линии стрельбы. Несмотря на увеличение расстояния модели до пленки вследствие высокой точечности схемы изображение имеет достаточно высокое качество для анализа деталей происходящего процесса. Отметим, что несколько наблюдаемых скачков уплотнения у модели связаны с наличием обтюрирующих вставок (см. рис. 1), образующих изломы поверхности. Запыленный след от модели, прошедший зону регистрации примерно $0,8 \times 0,8 \text{ м}$ вдоль линии стрельбы и перебивший нить координатника, показан на рис. 3, в. Видны как отдельные песчинки, так и спектр мельчайших зон оптической неоднородности.

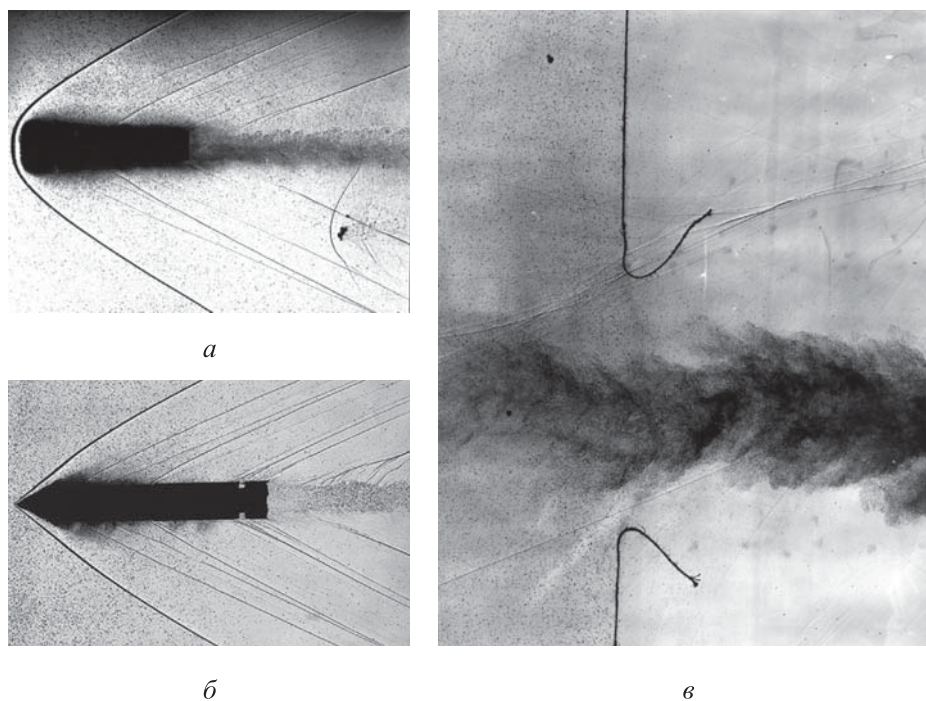


Рис. 3. Теневые фотографии плоского цилиндра (*а*) и цилиндра с коническим наконечником (*б*), движущихся со сверхзвуковой скоростью в запыленном воздухе, турбулентного следа модели (*в*), движущейся в запыленном воздухе

Фрагменты теневых картин взаимодействия частиц с головным скачком уплотнения обтекания, показывающих зону между скачком и отраженными от тела частицами и зону между скачком и невозмущенным воздухом, приведены на рис. 4. Хорошо заметно струйное течение измельченного песка вдоль боковой поверхности модели. Мельчайшие пылинки засасываются

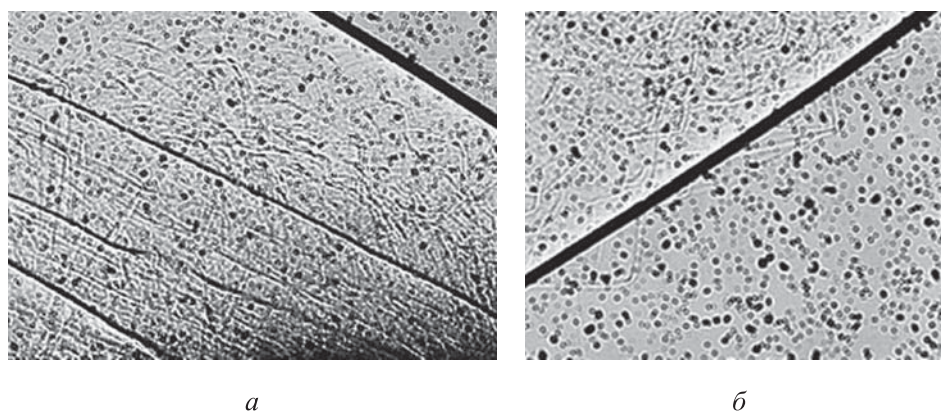


Рис. 4. Фрагменты теневых картин взаимодействия частиц с головным скачком уплотнения обтекания, показывающих зону между скачком и отраженными от тела частицами (*а*) и зону между скачком и невозмущенным воздухом (*б*)

в область разрежения за донным срезом. На фотографиях отчетливо видны мельчайшие детали течения вблизи летящей модели: головной и внутренние скачки уплотнения; сход «запыленного» воздуха вдоль боковой поверхности модели вниз по потоку; присоединенные скачки уплотнения перед отдельными микрочастицами, ускоренными до сверхзвуковых скоростей; «глиссирующие» микрочастицы пыли, отброшенные со сверхзвуковой скоростью в область невозмущенного головным скачком потока воздуха.

Результаты анализа. Наличие частиц, которые могут многократно соударяться с телом с последовательным уменьшением длины отскока, приводит к их скоплению вблизи лобовой части тела. Происходит образование зоны повышенной концентрации дисперсной фазы, в которой осуществляется интенсивное взаимодействие падающих и отраженных частиц. Частицы песка пересекают фронт головной ударной волны ($P_{\phi}/P_0 = 6,55$; $\rho_{\text{в}} = 4,14 \text{ кг/м}^3$, $M_{\text{у.в}} = 2,4$) со скоростью полета модели ($u \approx 800 \text{ м/с}$) (лишь незначительно тормозятся) и достигают поверхности модели. Натываясь на торцевую поверхность модели, частица испытывает значительную силу удара, разрушается, образуя фонтан мельчайших пылинок из материала частиц и тела (для сравнения: давление в ударной волне, бегущей по песчинке (кварц) после удара о торец модели, по оценкам, составляет 75...80 тыс. атм, а ее механическая прочность $\sigma \approx 35...50$ тыс. атм [15]). Хотя число песчинок, бомбардирующих поверхность торца, невелико (среднее расстояние между частицами составляет 40 мм, и на пути длиной 0,6 м на торец упадет примерно 15 песчинок), суммарный объем микрочастиц пыли значителен (пространство между торцевой поверхностью модели и поверхностью головного скачка для этого режима и размера тела около 11 мм) и перед торцом образуется пылевая подушка, плотность которой по меньшей мере в 2 раза ниже плотности сжатой головной ударной волны воздуха. По оценкам, средняя плотность массы всех песчинок, ударившихся о торец на эрозионном участке траектории модели и остающихся условно в слое между торцом и головной ударной волной, равна $\rho_{\text{п}} \approx 1,9 \text{ кг/м}^3$. В действительности унос пыли из этого пространства начинается вскоре после разрушения первых песчинок. Струйки запыленного воздуха сместились далеко вниз по потоку, следовательно, средняя плотность пыли в ударном слое к концу процесса будет меньше оценки, приведенной выше.

Пылевой слой принимается плоским и тонким, если $\Delta_{\text{п}}$ — толщина пылевого слоя, примыкающего непосредственно к поверхности тела, и $\Delta_{\text{п}} < S_{\text{у.в}}$, $S_{\text{у.в}}$ — расстояние отхода ударной волны. Этот запыленный

воздух, по всей видимости, мало изменяет аэродинамику обтекания модели, перетекает в окружающее пространство по тем же струйкам тока, что и «чистый» воздух, попадая в пограничный слой, в задонной области засасывается в разреженную область — к оси симметрии.

На конической поверхности столь значительного скопления пыли не происходит — запыленный воздух также стекает вниз по потоку, вероятно, подчиняясь тем же законам, что и чистый воздух.

Заключение. Полученные в экспериментах фотоматериалы позволяют сделать вывод о том, что в исследуемом диапазоне скоростей ($u = 800 \dots 1000$ м/с) около модели, пересекающей участки траектории с пылью, не возникает отрывного течения (каверны), а дробящиеся на мельчайшие фрагменты песчинки образуют на торцевой поверхности модели запыленный слой воздуха, который рассасывается вниз по потоку по законам аэродинамики обтекания тела. Для начала кавитации слоя твердых частиц, скапливающихся у поверхности их торможения, сжатие слоя и его плотность должны быть достаточными для того, чтобы волна разгрузки, приходящая с краев торцевой поверхности, могла сообщить им необходимую скорость в поперечном полету модели направлении. Возможно, что при гиперзвуковых скоростях (3000...4000 м/с) полета модели, на высотах возможной встречи ЛА с пылевыми и дождевыми образованиями, соотношение темпов прироста массы и ее расхода (истечение из зоны сжатия) окажется таким, что на поверхности торможения будет формироваться слой сильно сжатой пыли («воды»), который, разгружаясь, образует около тела каверну со значительным углом раскрытия.

Форма головного скачка для заостренного цилиндра свидетельствует о резком торможении модели, взаимодействующей с «пылью» (см. рис. 3, б). Для выявления структуры возмущений головной ударной волны, возникающей при обтекании затупленного тела гиперзвуковым потоком с примесью твердых частиц, необходима точность схемы, обеспечиваемая взрывным источником света. Согласно полученным картинкам возмущения, это обусловлено отраженными частицами различной природы. Все углы конических возмущений скачка существенно больше углов Маха; это свидетельствует о связи возмущений скачка с областью высокого давления за скачком.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Callens E.E., Blanks J.R., Carver D.B. Development of a snow erosion test capability for the hyperballistic range. *J. Spacecr. Rockets*, 1977, vol. 14, no. 3, pp. 183–188. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.57177>

- [2] Василевский Э.Б., Осипцов А.Н., Чирихин А.В. и др. Теплообмен на лобовой поверхности затупленного тела в высокоскоростном потоке, содержащем малоинерционные частицы. *Инженерно-физический журнал*, 2001, т. 74, № 6, с. 34–42.
- [3] Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке. М., Янус-К, 2007.
- [4] Давыдов Ю.М., Потапов Ю.Ф., Стасенко А.Л. Закрученное течение газа с дробящимися каплями в сопле и перпендикулярной к преграде струе. *Ученые записки ЦАГИ*, 1987, т. 18, № 6, с. 31–39.
- [5] Моллесон Г.В., Стасенко А.Л. Газодинамика двухфазной струи, натекающей на нормальную преграду. *Ученые записки ЦАГИ*, 1990, т. 21, № 5, с. 51–58.
- [6] Моллесон Г.В., Стасенко А.Л. Особенности обтекания затупленного тела сверхзвуковой полидисперсной струей с закруткой отраженных частиц. *ТВТ*, 2011, т. 49, № 1, с. 73–80.
- [7] Вараксин А.Ю. Столкновения в потоках газа с твердыми частицами. М., ФИЗМАТЛИТ, 2008.
- [8] Springer G.S., Yang C.-I., Larsen P.S. Analysis of rain erosion of coated materials. *J. Compos. Mater.*, 1974, vol. 8, iss. 3, pp. 229–252.
DOI: <https://doi.org/10.1177%2F002199837400800302>
- [9] Яненко Н.Н., Солоухин Р.И., Папырин А.П. и др. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц. Новосибирск, Наука, 1980.
- [10] Laderman A.J., Lewis C.H., Byron S.R. Two-phase plume impingement effects. *AIAA J.*, 1970, vol. 8, no. 10, pp. 1831–1839. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.5997>
- [11] Стасенко А.Л. Коэффициенты восстановления скорости частицы при отражении от поверхности твердого тела. *Инженерно-физический журнал*, 2007, т. 80, № 5, с. 38–44.
- [12] Алхимов А.П., Нестерович Н.И., Папырин А.Н. Экспериментальное исследование обтекания тел сверхзвуковым двухфазным потоком. *ПМТФ*, 1982, № 2, с. 66–74.
- [13] Probst R.F., Fassio F. Dusty hypersonic flows. *AIAA J.*, 1970, vol. 8, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.5755>
- [14] Герасимов С.И., Холин С.А. Взрывной кумулятивный источник излучения. Патент РФ 2038529. Заявл. 14.07.1992, опублик. 27.06.1995.
- [15] Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М., Наука, 1970.

Герасимов Сергей Иванович — д-р физ.-мат. наук, начальник отдела РФЯЦ-ВНИИЭФ (Российская Федерация, 607188, Саров, Нижегородская обл., Мира пр-т, д. 37); заведующий кафедрой аэрогидродинамики, прочности машин и сопротивления материалов Института транспортных систем НГТУ (Российская Федерация, 603950, Нижний Новгород, Минина ул., д. 24); профессор, СарФТИ НИЯУ МИФИ (Российская Федерация, 607184, Саров, Нижегородская обл., Духова ул., д. 6).

Ерофеев Владимир Иванович — д-р физ.-мат. наук, директор ИПМ РАН (Российская Федерация, 603024, Нижний Новгород, Белинского ул., д. 85).

Косяк Евгений Григорьевич — старший преподаватель кафедры физики СарФТИ НИЯУ МИФИ (Российская Федерация, 607184, Саров, Нижегородская обл., Духова ул., д. 6).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Косяк Е.Г. Постановка экспериментов для анализа возмущений головной ударной волны за счет присутствия частиц в сверхзвуковом потоке. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2021, № 1 (94), с. 34–46. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-1-34-46>

SETTING UP EXPERIMENTS FOR ANALYZING DISTURBANCES OF THE HEAD SHOCK WAVE DUE TO THE PRESENCE OF PARTICLES IN THE SUPERSONIC FLOW

S.I. Gerasimov^{1,2,3}

V.I. Erofeev⁴

E.G. Kosyak³

s.i.gerasimov@mail.ru

erof.vi@yandex.ru

keg@sarfti.ru

¹**Russian Federal Nuclear Center–All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation**

²**Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation**

³**Sarov Physical-Technical Institute — branch of NRNU MEPhI, Sarov, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation**

⁴**Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation**

Abstract

The research in the field of devices and methods of experimental physics includes, in particular, the creation of installations for conducting experiments in the physics of multiphase nonequilibrium flows. Multiphase flow around bodies is of significant importance in various fields of technology, for example, in power engineering, contact visualization methods, aerosol technologies, in the application of various coatings, etc. In the high-speed two-phase flow around bodies, the physics of particle collisions with the surface and the interaction of flying particles with the head shock wave play an important role. Most of the experiments in this area, including the passage of the model through the zone of rain, snow, dust, cooled clouds, etc., are carried out in the

Keywords

Multiphase nonequilibrium flow, head shock, supersonic flow, aerodynamic drag

reverse setting. In this case, the model is fixed, and the flow is made by one or another high-enthalpy aerodynamic installation. This approach does not correspond to the initial stage of the interaction formed before the entrance to the zone of the two-phase medium, between the head shock and the incident particle. Nevertheless, for some approaches, it is of interest to visually confirm the possibility of an oncoming particle being ejected at a supersonic speed by the front of the head shock wave and to see the deceleration of the model from the shadow pattern with a change in the Mach line. The paper considers a direct ballistic experiment which by shadow visualization tests the possibility of cavern formation near a body crossing the trajectory of the atmosphere saturated with dust particles

Received 12.05.2020
Accepted 22.06.2020
© Author(s), 2021

The work was carried out within the state task for fundamental scientific research on the topic no. 0035-2014-0402, state registration number 01201458047 and with the support of the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-29-10073)

REFERENCES

- [1] Callens E.E., Blanks J.R., Carver D.B. Development of a snow erosion test capability for the hyperballistic range. *J. Spacecr. Rockets*, 1977, vol. 14, no. 3, pp. 183–188. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.57177>
- [2] Vasilevskii É.B., Osiptsov A.N., Chirikhin A.V., et al. Heat exchange on the front surface of a blunt body in a high-speed flow containing low-inertia particles. *J. Eng. Phys. Thermophy.*, 2001, vol. 74, no. 6, pp. 1399–1411. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1013996332270>
- [3] Mikhatulin D.S., Polezhaev Yu.V., Reviznikov D.L. *Teploobmen i razrushenie tel v sverkhzvukovom geterogennom potoke* [Heat transfer and body destruction in a supersonic heterogeneous flow]. Moscow, Yanus-K Publ., 2007.
- [4] Davydov Yu.M., Potapov Yu.F., Stasenko A.L. Swirling gas flow with crushing droplets in the nozzle and a jet perpendicular to the barrier. *Uchenye zapiski TsAGI*, 1987, vol. 18, no. 6, pp. 31–39 (in Russ.).
- [5] Molleson G.V., Stasenko A.L. Gas dynamics of a two-phase jet flowing to a normal obstacle. *Uchenye zapiski TsAGI*, 1990, vol. 21, no. 5, pp. 51–58 (in Russ.).
- [6] Molleson G.V., Stasenko A.L. Peculiarities of flow over a blunted body by a supersonic polydispersed jet with a swirl of reflected particles. *High Temp.*, 2011, vol. 49, no. 1, pp. 72–80. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X11010135>
- [7] Varaksin A.Yu. *Stolknoveniya v potokakh gaza s tverdymi chastitsami* [Collisions in solid gas streams]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008.
- [8] Springer G.S., Yang C.-I., Larsen P.S. Analysis of rain erosion of coated materials. *J. Compos. Mater.*, 1974, vol. 8, iss. 3, pp. 229–252. DOI: <https://doi.org/10.1177%2F002199837400800302>

- [9] Yanenko H.H., Soloukhin P.I., Papyrin A.P., et al. Sverkhzvukovye dvukhfaznye techeniya v usloviyakh skorostnoy neravnovesnosti chastits [Supersonic two-phase flows under conditions of high-speed particle nonequilibrium]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980.
- [10] Laderman A.J., Lewis S.H., Byron S.R. Two-phase plume impingement effects. *AIAA J.*, 1970, vol. 8, no. 10, pp. 1831–1839. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.5997>
- [11] Stasenko A.L. Velocity recovery factors of a particle repelled from a solid surface. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 2007, vol. 80, no. 5, pp. 885–891. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-007-0119-4>
- [12] Alkhimov A.P., Nesterovich N.I., Papyrin A.N. Experimental investigation of supersonic two-phase flow over bodies. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1982, vol. 23, no. 2, pp. 219–226. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00911002>
- [13] Probstein R.F., Fassio F. Dusty hypersonic flows. *AIAA J.*, 1970, vol. 8, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.5755>
- [14] Gerasimov S.I., Kholin S.A. Vzryvnoy kumulyativnyy istochnik izlucheniya [Explosive cumulative radiation source]. Patent RU 2038529. Appl. 14.07.1992, publ. 27.06.1995 (in Russ.).
- [15] Loytsyanskiy L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Liquid mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1970.

Gerasimov S.I. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Head of Department, Russian Federal Nuclear Center–All-Russian Research Institute of Experimental Physics (Mira prospect 37, Sarov, Nizhny Novgorod Region, 607188 Russian Federation); Head of the Department of Aerohydrodynamics, Machine Strength and Material Resistance, Institute of Transport System, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (Minina ul. 24, Nizhny Novgorod, 603950 Russian Federation); Professor, Sarov Physical-Technical Institute — branch of NRNU MEPhI (Dukhova ul. 6, Sarov, Nizhny Novgorod Region, 607184 Russian Federation).

Erofeev V.I. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Director, Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences (Belinskogo ul. 85, Nizhny Novgorod, 603024 Russian Federation).

Kosyak E.G. — Assist. Professor, Department of Physics, Sarov Physical-Technical Institute — branch of NRNU MEPhI (Dukhova ul. 6, Sarov, Nizhny Novgorod Region, 607184 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kosyak E.G. Setting up experiments for analyzing disturbances of the head shock wave due to the presence of particles in the supersonic flow. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2021, no. 1 (94), pp. 34–46 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-1-34-46>