

МЕХАНИКА

УДК 533.6

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ
ПЕРЕД ЗАТУПЛЕННЫМ ТЕЛОМ,
СОЗДАВАЕМОГО ПУТЕМ ЛОКАЛЬНОГО ЭНЕРГОПОДВОДА
В НАБЕГАЮЩИЙ ПОТОК***К. В. Бабарыкин*

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

В работе изучается явление снижения сопротивления при локальном выделении энергии перед обтекаемым телом. Цель работы заключается в выявлении связей между изменением сопротивления тела, а также измеряемого локального параметра с характером нестационарных процессов в передней отрывной зоне. Проводится численное моделирование взаимодействия нагретой области с ударно-волновой структурой перед цилиндром с плоским торцом. В расчетах используется вычислительная программа Ansys Fluent. На основании полученных численных данных исследуется развитие возникающей перед преградой отрывной области, проводится сравнение численных результатов с картиной течения, полученной в эксперименте. Выявлены общие черты с аналогичным явлением, имеющим место на теле с вынесенной вперед иглой, что позволяет по-новому взглянуть на процесс. Уточняется механизм поступления газа в отрывную область и связанного с ним роста этой зоны. Учитывается взаимовлияние процессов в отрывной области и в обтекающем ее потоке. Библиогр. 12 назв. Ил. 5.

Ключевые слова: поток, преграда, ударная волна, волна разрежения, нагрев, отрывная область.

Введение. Энергоподвод в сверхзвуковой поток перед обтекаемым телом является довольно эффективным средством управления аэродинамическими и тепловыми характеристиками тела. Исследования в этой области осуществляются уже несколько десятилетий и не утратили актуальности на сегодняшний день. В работах по взаимодействию неоднородностей потока с ударно-волновыми структурами, начавшихся с 80-х годов прошлого века [1, 2], рассматривалось обтекание различных компоновок, таких как конус, тело овальной формы, тело со сферическим затуплением. Последняя компоновка вызывала наибольший интерес, так как при локальном подводе энергии в набегающий на нее поток могут реализовываться режимы с образованием развитой передней отрывной зоны. Такая перестройка течения приводит к существенному снижению сопротивления при сравнительно небольшом энергокладе. Эффективность энерговложения при обтекании затупленных тел является причиной интереса и к рассматриваемой в данной работе компоновке в виде цилиндра с плоским торцом (своего

рода предельный случай затупления). Известно также, что в случае плоского торца эффект снижения давления на преграде (торцевая поверхность) может проявляться сильнее, чем в случае более обтекаемого тела, например цилиндра со сферическим затуплением.

Необходимо отметить, что сам процесс формирования отрывного течения, инициируемый энерговкладом в набегающий поток, носит сложный характер и требует более детального изучения. В то же время рассматриваемая задача близка к задаче об обтекании тела с выдвинутой вперед иглой. На протяжении ряда лет проводились исследования процесса автоколебаний, возникающих при обтекании тел неравномерными сверхзвуковыми потоками газа с образованием передней срывной зоны. Нестационарные режимы обтекания тела с иглой, когда неравномерность в набегающем потоке создается за счет геометрии тела, были подробно исследованы в [3–6]. Взаимодействие сверхзвуковой струи с преградой, когда неравномерность присутствует в самой структуре потока, изучалось в [7], в [8] рассматривался случай задания неравномерного распределения скорости. Нагрев газа в небольшой области также является причиной появления неравномерности распределения полного давления в набегающем на преграду потоке. Поэтому данная задача при имеющихся отличиях довольно близка к рассмотренным в [3–8], и настоящее исследование в определенной степени является продолжением этого цикла работ. Полученные ранее представления о нестационарных процессах в отрывной зоне, имеющих место на автоколебательных режимах, позволяют существенно уточнить картину течения и в этой задаче.

Постановка задачи и основные результаты. Проведено численное моделирование сверхзвукового ($M_\infty = 2$) обтекания тела равномерным потоком газа при добавлении в поток перед телом небольшой нагретой области. Явление исследовалось на примере цилиндра, ось которого совпадает с направлением вектора скорости набегающего потока. Выбор параметров для вычислительного эксперимента сообразовывался с набором исходных данных и результатами экспериментальной работы [9]. Моделирование процесса проводилось с помощью известной программы ANSYS Fluent. Задача решалась в осесимметричном варианте как для случая вязкого, так и невязкого газов. Представление о постановке вычислительного эксперимента дает рис. 1.

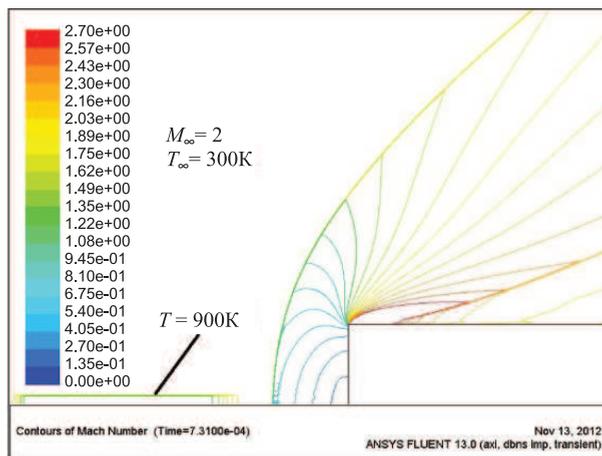


Рис. 1. Поля изолиний числа Маха M до взаимодействия.

Расчетная область заключала 460–550 тыс. ячеек. На свободных границах устанавливалось стандартное условие дальнего поля, нижняя граница совпадала с осью. Расчет проводился сначала до установления стационарной картины обтекания с головной ударной волной перед торцевой поверхностью цилиндра. Затем в расчетной области на оси стандартными методами программы выделялась небольшая цилиндрическая область, в которой записывалось большее по сравнению с основным потоком значение температуры. Газодинамические параметры в этой области пересчитываются следующим образом: сохраняются статическое давление и скорость, уменьшается плотность, соответственно падают число Маха и полное давление. Так как плотность уменьшается, можно говорить о введении в поток тонкого разреженного канала. Такой подход, с бесконечным или конечной длины каналом, использовался ранее в целом ряде работ, например [10, 11]. Далее расчет возобновлялся.

Наличие неравномерности в потоке, когда полное давление вблизи оси меньше, чем на периферии, и приводит к формированию отрывного течения перед торцевой поверхностью. Проводилось сравнение выводимых в процессе расчета зависимостей осредненной по площади торцевой поверхности величины давления от числа шагов по времени в вязкой и невязкой постановках для некоторых режимов. Ни в характере изменения, ни в величине этого параметра, отражающего изменение во времени сопротивления тела, заметных расхождений обнаружено не было, поэтому основная часть расчетов проводилась в невязкой постановке.

Далее приведены полученные численные данные для идеального газа при отношении радиуса нагретой области к радиусу цилиндра 0.18, а ее длины к радиусу цилиндра — 2.25. Температура газа в основном потоке составляет 300 К, в области нагрева — 900 К. На рис. 2,а представлена полученная зависимость давления в центре преграды от количества шагов по времени (точка расположения датчика давления в [9]). Зависимость осредненного по площади давления для этого варианта дана на рис. 2,б. Давление на этих графиках отнесено к статическому давлению в набегающем потоке. На рис. 3 для наиболее важных моментов, отмеченных на рис. 2, представлены изолинии давления (слева) и числа Маха (справа), позволяющие судить о характере наблюдаемого процесса.

Детально исследован механизм формирования, развития и разрушения отрывной области. Выявлено, что во многом он схож с механизмом эволюции отрывной зоны на автоколебательных режимах обтекания сверхзвуковым потоком затупленного тела, имеющего выдвинутую вперед иглу. В общих чертах он выглядит следующим образом.

Описание картины течения. Весь процесс можно разделить на две фазы: фазу затекания газа в отрывную зону из обтекающего ее внешнего (периферийного) потока и фазу истечения газа из нее. После того, как нагретая область, в которой число Маха и полное давление ниже, чем на периферии, подходит к головной ударной волне, по ней распространяется ударная волна, с которой во внешнем потоке согласуется косая ударная волна W'_0 . Она выходит на головную ударную волну W_0 перед торцом преграды, формируя λ -конфигурацию ударных волн $W'_0 - W_{II} - W_0$ (рис. 3, моменты времени 1, 2). В моменты времени 3 и 4, после прохождения области низконапорного газа, отрывная зона приобретает оформившийся вид. Обтекающий ее периферийный поток газа (ППГ) тормозится на отошедшей головной ударной волне W'_0 , затем отклоняется к оси на скачке W_{II} и большая его часть вовлекается в возвратное (от преграды) течение. При этом разгон газа в формирующемся встречном потоке происходит в волне разрежения RW , выходящей к оси течения и согласо-

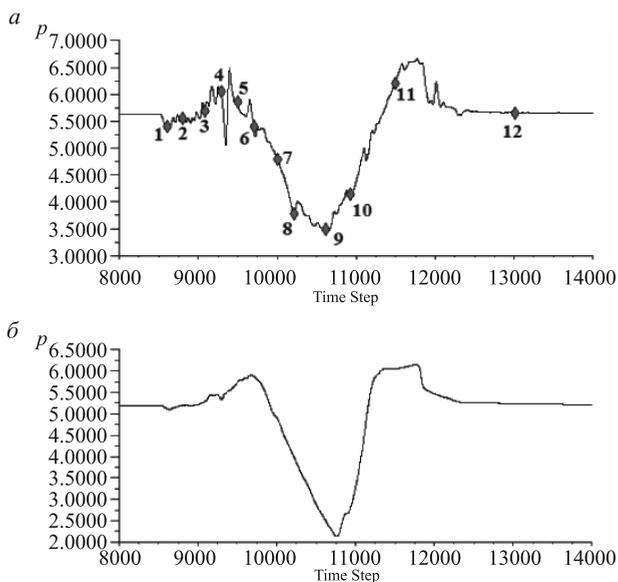


Рис. 2. Изменение давления *а* — в центре преграды; *б* — среднего по площади преграды.

ванной с ударной волной в периферийном потоке $W_{\text{П}}$. Величина перепада давления в этой волне достаточна, чтобы газ встречного потока разогнался до сверхзвуковой скорости. Таким образом, в области отрыва появляется внутренняя сверхзвуковая зона и внутренний скачок уплотнения $W_{\text{В}}$, на котором встречный поток тормозится при столкновении с основным потоком.

После прохождения области низконапорного газа рост вверх по основному потоку продольных размеров отрывной зоны прекращается, продолжают расти радиальные размеры. Отметим, что рост радиальных размеров отрывной зоны отчасти сдерживается формирующимся распределением давления в приосевой области. Важную роль здесь играет скачок $W_{\text{В}}$ во встречном потоке газа. В периферийном потоке с этим скачком согласуется волна разрежения, в которой обтекающий отрывную область периферийный поток, прошедший ударную волну W'_0 и первоначально отклонившийся от оси, вновь разворачивается в сторону оси. Этому развороту способствует и появление области пониженного давления в отрывной зоне у контактной поверхности, которое связано с ростом радиальных размеров отрывной области.

Характер течения в последующие моменты времени (5–8, рис. 3) весьма близок к тому, что наблюдался при исследовании автоколебаний на цилиндре с иглой в фазе затекания газа в отрывную область из периферийного потока и, соответственно, роста ее размеров. Периферийный поток теперь натекает на торцевую поверхность, что приводит к появлению в распределении давления на преграде так называемого периферийного максимума давления p_{max} , обеспечивающего активное вначале поступление газа из периферийного потока в область отрыва. Его возникновение связано с торможением на преграде газа, прошедшего два косых скачка уплотнения, и следовательно, сохранившего большее полное давление. Наличие максимума давления на поверхности преграды отмечалось и в работе [12]. Эта область легко диагностируется по изолиниям давления (моменты времени 5, 6). По мере роста размеров отрывного

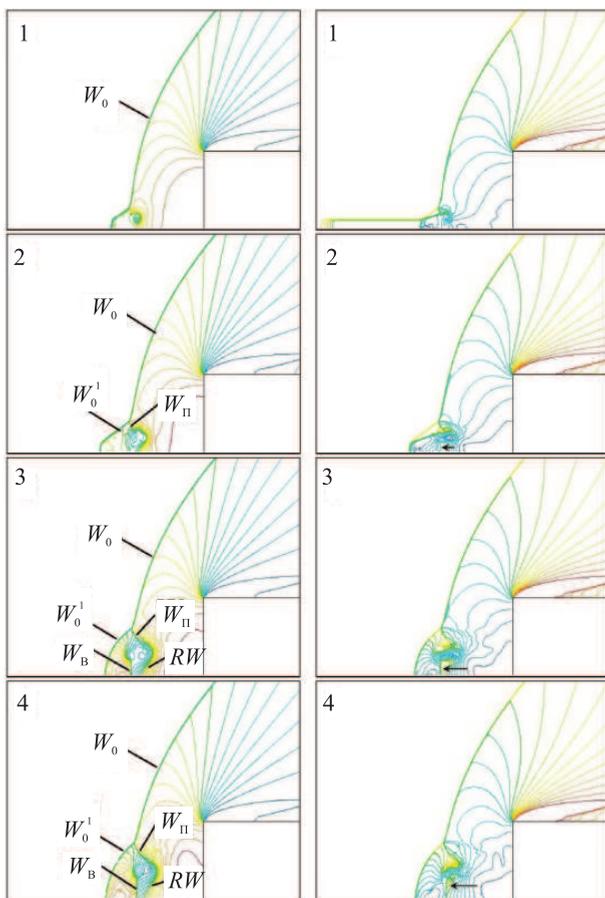


Рис. 3. Поля изолиний давления p и числа Маха M .

течения и оттеснения периферийного потока в сторону от оси смещается и положение периферийного максимума, а его значение постепенно уменьшается.

Теперь во встречный поток вовлечен весь газ в приосевой области вплоть до поверхности преграды. Это и приводит к тому, что давление вблизи центра преграды начинает уменьшаться. Следует отметить, что в фазе затекания, начиная с некоторого момента времени, газ, поступающий с периферии в отрывную область, не доходит до оси течения, а разворачивается в окрестности локального минимума давления под контактной поверхностью p_{\min} . Поэтому наличие периферийного максимума давления не может поддерживать высокое давление в центре преграды. Отметим также, что вследствие такого распределения давления по поверхности преграды, несмотря на отток газа от преграды и начинающийся спад давления в центре, осредненное по площади давление несколько возрастает. Небольшой рост лобового сопротивления в начале этого процесса фиксировался и в эксперименте.

Далее поступление периферийного газа в область пониженного давления под контактной поверхностью со стороны преграды уменьшается и постепенно прекращается. Продолжают расти радиальные размеры области встречного течения, становясь сопоставимыми с размерами преграды (моменты времени 7, 8). Этому способствует рост

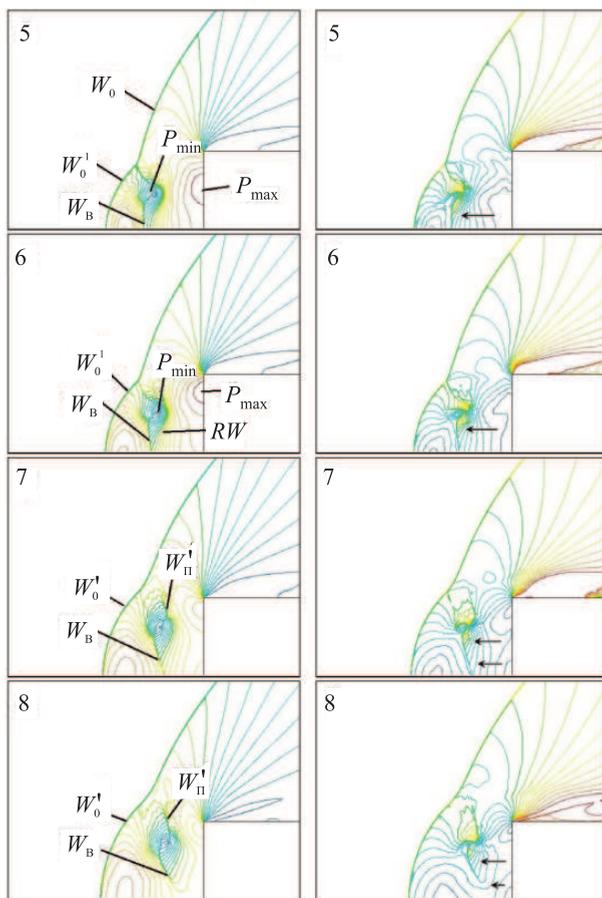


Рис. 3. Поля изолиний давления p и числа Маха M (продолжение).

давления у вершины отрывной области (наиболее удаленная от преграды точка на оси), усиливающий начальное отклонение ППГ от оси. При этом давление в отрывной зоне у преграды, которое начало падать раньше в основном из-за оттеснения ППГ к кромке преграды, теперь падает быстрее из-за продолжающегося во встречном потоке, «по инерции», оттока газа от преграды, который не компенсируется поступлением газа с периферии. Идет перетекание газа в отрывной области от преграды к вершине отрывной зоны. Вовлечение во встречное движение все большей массы газа приводит к тому, что на этом отрезке времени быстро падает и осредненное по площади давление.

В обтекающей отрывную область периферийном потоке изменение ее размеров приводит к тому, что в моменты времени 7 и 8 уже не наблюдается тройной конфигурации ударных волн, на головной волне W_0 присутствует изгиб, смещающийся вниз по течению. В ППГ вблизи кромки преграды формируется новый скачок W_{II}' , с которым также согласуется волна разрежения, разгоняющая газ во встречном потоке. Таким образом, скорость газа во встречном течении, а также интенсивность оттекания газа от преграды на периферии заметно сильнее, чем вблизи оси. Поэтому и давление на периферии преграды падает сильнее, чем в центре, что сказывается

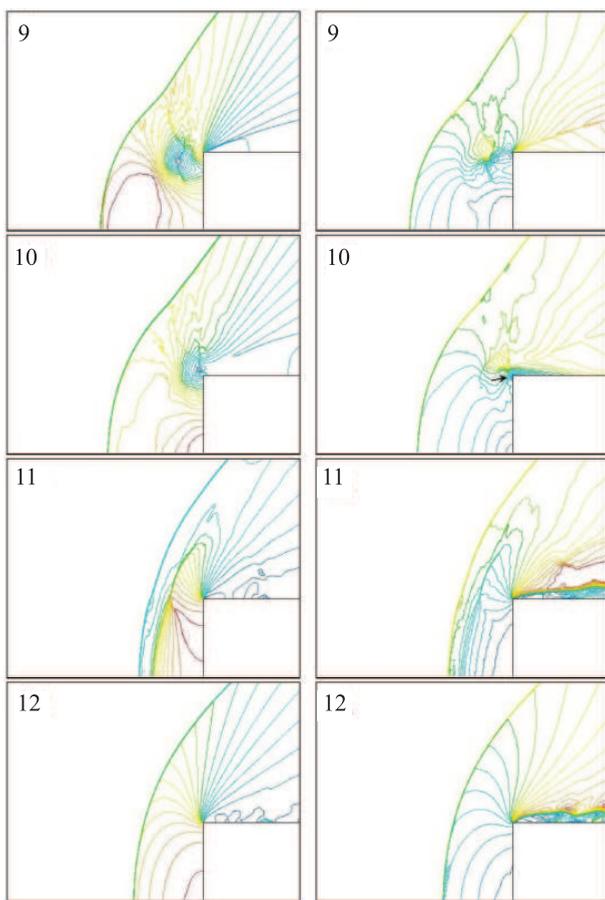


Рис. 3. Поля изолиний давления p и числа Маха M (окончание).

на степени уменьшения сопротивления тела, которая оказывается значительно больше, чем уровень падения локального параметра, то есть давления в центре. В этом проявляется отличие от картины формирования отрывной зоны, которая наблюдалась на теле с иглой. На данном режиме из-за того, что вблизи оси быстрее слабеет встречный поток, также несколько по-иному выглядит и внутренняя ударная волна.

Когда контактная поверхность, разделяющая внутреннюю и внешнюю области течения, подходит к кромке преграды, создаются условия для перехода к фазе истечения. Взаимовлияние процессов во внутренней и внешней областях течения проявляется и в том, что внешний поток в фазе затекания отклоняется к оси в волне разрежения, согласованной с внутренней ударной волной, что приводит к затягиванию схода контактной поверхности, разделяющей эти области, с торца преграды.

Уменьшение скорости встречного потока газа, вызванное уменьшением давления у преграды, в свою очередь приводит к ослаблению и смещению к преграде внутреннего скачка уплотнения в отрывной зоне W_b . В области повышенного давления между этим скачком и вершиной отрывной зоны газ постепенно вовлекается в движение к преграде. Этому способствует и характер распределения давления у контактной поверхности, складывающийся в периферийном потоке, с минимумом вблизи преграды.

Когда внутренний скачок в отрывной области W_v отражается от преграды (между моментами 8 и 9), давление у преграды несколько возрастает, хотя величина давления за отраженным скачком может быть намного ниже регистрируемой в начале процесса.

Так как у кромки преграды давление значительно ниже, чем в центре, о чем можно судить по изолиниям p в момент времени 9, начинается фаза истечения газа из отрывной области (момент времени 10, рис. 3). Этому способствует тот факт, что складывающееся к концу фазы затекания распределение давления в приосевой области приводит только к отклонению периферийного потока от оси. Начавшееся еще раньше и усиленное оттоком газа из отрывной области перетекание газа в отрывной области от вершины ее к преграде приводит к быстрому уменьшению продольных и радиальных размеров отрывной области. Частицы газа отрывной области «выталкиваются» набегающим потоком, который затем начинает тормозиться на вновь формирующейся перед торцевой поверхностью ударной волне. Эта волна усиливается и отходит от преграды, сливаясь со «старой» ударной волной (момент времени 11). Результирующий скачок начинает отходить от преграды. Таким образом, после схода контактной поверхности с кромки преграды, раскрытия отрывной области и истечения газа из нее картина обтекания возвращается к исходной (момент времени 12).

Заключение. Проведено численное моделирование и по его результатам предложен механизм формирования и развития зоны отрывного течения, возникающего при локальном нагреве газа в набегающем на тело потоке. Рассмотрены черты, объединяющие эту задачу с хорошо изученными ранее задачами об автоколебаниях в неравномерном потоке, набегающем на преграду. Выделены фазы затекания газа в отрывную область и роста ее размеров и истечения газа из нее. Рост радиальных размеров отрывной области связан в первую очередь с ростом размеров встречного (от преграды) потока. Обусловленный этим характер эволюции ударно-волновой структуры перед телом вполне соответствует наблюдавшемуся в эксперименте, что свидетельствует об адекватности полученных численных данных. Важным моментом является взаимовлияние процессов в отрывной области и обтекающем ее потоке. От этого взаимодействия существенно зависит как длительность всего процесса, так и его характеристики. Таким образом, выявленные особенности позволяют уточнить представления об эффекте наблюдаемого при локальном энергоподводе снижения давления на поверхности тела и, соответственно, его сопротивления.

Исследования были проведены с использованием вычислительных ресурсов Ресурсного центра «Вычислительный центр СПбГУ» (<http://cc.spbu.ru>)

Литература

1. Георгиевский П. Ю., Левин В. А. Сверхзвуковое обтекание тел при наличии внешних источников тепловыделения // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 8. С. 684–687.
2. Артемьев В. И., Бергельсон В. И., Немчинов И. В., Орлова Т. И., Смирнов В. А., Хазинс В. М. Изменение режима сверхзвукового обтекания препятствия при возникновении перед ним тонкого разреженного канала // Изв. РАН. МЖГ. 1989. № 5. С. 146–151.
3. Бабарыкин К. В., Кузьмина В. Е., Угрюмов Е. А., Цветков А. И. Автоколебания при натекании равномерного сверхзвукового потока на преграду «цилиндр–игла с диском» // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 1. 2000, вып. 4. С. 54–64.
4. Бабарыкин К. В., Кузьмина В. Е., Цветков А. И. Автоколебания при натекании равномерно сверхзвукового потока на тело с выступающей острой иглой // Аэродинамика / под ред. Р. Н. Мирошина. СПб., 2001. С. 128–149.

5. *Бабарыкин К. В., Кузьмина В. Е., Матвеев С. К., Цветков А. И.* Исследование автоколебательных режимов сверхзвукового обтекания цилиндрической преграды с тупой иглой // *Аэродинамика* / под ред. Р. Н. Мирошина. СПб., 2003. С. 204–219.

6. *Бабарыкин К. В., Кузьмина В. Е.* Исследование особенностей автоколебательных режимов обтекания тела с иглой в случае больших чисел Маха // *Аэродинамика* / под ред. Р. Н. Мирошина. СПб., 2005. С. 61–83.

7. *Бабарыкин К. В., Кузьмина В. Е., Матвеев С. К., Петрова В. Н.* Исследование автоколебаний в импактных струях // *Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 1.* 2009, вып. 1. С. 59–67.

8. *Бабарыкин К. В., Кузьмина В. Е., Матвеев С. К., Петрова В. Н.* Автоколебания в неравномерных сверхзвуковых потоках, набегающих на преграду // *Избр. труды всеросс. сем. по аэрогидродинамике, посвящ. памяти С. В. Валландера.* СПб., 2008. С. 19–22.

9. *Lashkov Valeriy, Mashek Igor, Anisimov Yuri, Ivanov V., Kolesnichenko Yuri, Ryukin M.* Gas Dynamic Effect of Microwave Discharge on Supersonic Cone-shaped Bodies // *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004, 10.2514/6.2004-671.*

10. *Lashkov V. A., Mashek I. Ch., Anisimov Yu. I., Ivanov V. I., Kolesnichenko Yu. F., Azarova O. A.* Gas Dynamics Effects Around the Body Under Energy Deposition in Supersonic Flow // *Paper AIAA-2007-1231.* P. 1–13.

11. *Азарова О. А., Колесниченко Ю. Ф.* Численное моделирование воздействия тонкого разреженного канала на сверхзвуковое обтекание цилиндрического тела с полостью сложной формы // *Матем. моделирование.* 2008. Т. 20, № 4. С. 27–39.

12. *Левин В. А., Громов В. Г., Афонина Н. Е.* Численное исследование влияния локального энергоподвода на аэродинамическое сопротивление и теплообмен сферического затупления в сверхзвуковом потоке воздуха // *ПМТФ.* 2000. Т. 41, № 5. С. 171–179.

Статья поступила в редакцию 26 марта 2015 г.

Сведения об авторе

Бабарыкин Константин Валентинович — кандидат физико-математических наук, инженер; konst20@mail.ru

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF SEPARATED ZONE BEFORE A BLUNTED BODY INITIATED BY LOCALIZED ENERGY SUPPLY IN THE FLOW

Konstantin V. Babarykin

St.Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7/9, St.Petersburg, 199034, Russian Federation; konst20@mail.ru

The phenomena of drag force decreasing under localized energy supply before blunt body is investigated. The aim of this work is to identify relationships between changes in body resistance and the measured local parameter, with the nature of non-stationary processes in the front tear-off zone. The numerical simulation of the interaction of heating zone with shock-wave structure before face plane cylinder is carried out. The well known solver Ansys Fluent is used for computations. On the base of obtained numerical data's the evolution of arising before obstacle separated zone is researched, the numerical results are compared with the flow picture, obtained in the experiment. Share traits with analogous phenomena taking place on the body having needle are discovered, that lets to look at process in a new fashion. A mechanism of gas flowing into the separated zone and agreed upon it increasing of this zone is improved. The interference of processes in the separated zone and flow around it is considered. Refs 12. Figs 5.

Keywords: flow, obstacle, shock wave, rear wave, heating, separated zone.

References

1. Georgievskii P. Yu., Levin V. A., "Supersonic flow around bodies in the presence of external heat sources", *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, **14**(8), 684–687 (1988) [in Russian].

2. Artemiev V. I., Bergelson V. I., Nemchinov I. V., Orlova T. I., Smirnov V. A., Khazins V. M., "Change of regime in supersonic flow past an obstacle preceded by a thin channel of reduced density", *Fluid Dynamics*, **24**(5), 779–784 (1989).

3. Babarykin K. V., Kouzmina V. E., Ugriunov E. A., Tsvetkov A. I., "Self-oscillations under interaction of the homogenous supersonic stream with the barrier "cylinder — needle with a disk"", *Vestn. S.-Peterb. un-ta. Matematika, mekhanika, astronomia*, **1**(4), 54–64 (2000) [in Russian].

4. Babarykin K.V., Kouzmina V.E., Tsvetkov A.I., “Self-oscillations under interaction of the homogenous supersonic stream with the needle-sharped body”, *Aerodynamics* (ed. by R.N.Miroshin, St.Petersburg, 2001), 128–149 [in Russian].
5. Babarykin K.V., Kouzmina V.E., Matveev S.K., Tsvetkov A.I., “The pulse mode interaction of a supersonic stream with a cylinder having obtuse needle”, *Aerodynamics* (ed. by R.N.Miroshin, St.Petersburg, 2003), 204–219 [in Russian].
6. Babarykin K.V., Kouzmina V.E., “Peculiarities of thr high Mach number flowing self-oscillations regimes on the body with a needle”, *Aerodynamics* (ed. R.N.Miroshin, St.Petersburg, “VVM”, 2006), 61–83 [in Russian].
7. Babarykin K.V., Kouzmina V.E., Matveev S.K., Petrova V.N., “Research of self-oscillations in the impacting jets”, *Vestn. S.-Peterb. un-ta. Matematika, mekhanika, astronomia*, **1**(1), 59–67 (2009) [in Russian].
8. Babarykin K.V., Kouzmina V.E., Matveev S.K., Petrova V.N., “Self-oscillations in non-uniform supersonic streams incident on the obstacle”, *Fav. proceedings of the Aerohydrodynamics sem., memory C. V. Wallander*, (St.Petersburg, 2008), 19–22 [in Russian].
9. Lashkov V., Mashek I., Anisimov Yu., Ivanov V., Kolesnichenko Yu., Ryvkin M., “Gas Dynamic Effect of Microwave Discharge on Supersonic Cone-shaped Bodies”, *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2004, 10.2514/6.2004-671.
10. Lashkov V. A., Mashek I. Ch., Anisimov Yu. I., Ivanov V. I., Kolesnichenko Yu. F., Azarova O. A., “Gas Dynamics Effects Around the Body Under Energy Deposition in Supersonic Flow”, Paper AIAA-2007-1231. 1–13.
11. Azarova O. A., Kolesnichenko Yu. F., “A thin low density channel effect on supersonic flow past cylinder body with complicated cavity”, *Matematicheskoe modelirovanie*, **20**(4), 27–39 (2008) [in Russian].
12. Levin V. A., Gromov V. G., Afonina N. E., “Numerical analysis of the effect of local energy supply on the aerodynamic drag and heat transfer of a spherically blunted body in a supersonic air flow”, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, **41**(5), 915–922 (2000).