

УДК 621.793

## **Формирование конических отрывных зон при натекании сверхзвуковой струи на преграду в условиях ХГН\***

**А.П. Алхимов, В.Ф. Косарев, С.В. Клинков, А.А. Сова,  
Г.В. Трубачеев, В.Н. Зайковский**

*Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: vkos@itam.nsc.ru

Рассмотрено натекание сверхзвуковой струи на преграду, перед которой искусственно с помощью иглы или частицы создается коническая отрывная зона в условиях, близких по геометрическим и динамическим параметрам к условиям холодного газодинамического напыления. Проведено численное моделирование, результаты которого качественно соответствуют наблюдаемым экспериментальным данным. Предварительный анализ формирующейся картины натекания показывает, что в локальной кольцевой области возможна реализация более благоприятных условий холодного газодинамического напыления высокодисперсных частиц с размером близким или несколько меньше 1 мкм, чем в обычных условиях.

**Ключевые слова:** сверхзвуковая струя, коническая отрывная зона, холодное газодинамическое напыление.

### **Введение**

Вопросы натекания сверхзвуковой струи на преграду представляют научный и практический интерес в связи с разработкой и оптимизацией новых технологий и, в частности, холодного газодинамического напыления (ХГН). Ранее были исследованы основные закономерности натекания сверхзвуковой струи прямоугольного сечения, характерного для ХГН поперечного размера 2–3 мм, на преграду при числах Маха на срезе сопла  $M = 1,8 - 2,5$  и углах натекания близких к нормальному [1]. Результаты исследований показали, что величина и характер распределения давления по поверхности преграды при натекании под углом 90 градусов, а также толщина сжатого слоя (область между отошедшей ударной волной и поверхностью преграды) в расчетном режиме и близком к нему, имеют хорошую повторяемость при характерных расстояниях от преграды до среза сопла не более 5 – 7 калибров. При увеличении этого параметра значительно изменяется геометрия струи (возникают колебания) и характер распределения давления по поверхности преграды, что затрудняет предсказуемость реализации ХГН. При формировании покрытий из высокодисперсных малоинерционных частиц размером

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №: 09-08-00543-а, 08-01-00108-а).

менее 5 мкм [1], последние значительно теряют скорость в сжатом слое между напыляемой поверхностью и отошедшей ударной волной, что приводит к ухудшению процесса напыления или даже к полному его отсутствию.

Ранее при исследовании обтекания затупленных тел двухфазным потоком [2] было обнаружено явление формирования передних конических отрывных зон частицами, движущимися от тела навстречу сверхзвуковому потоку. На этой основе было предложено техническое решение для уменьшения сопротивления затупленных тел, движущихся в атмосфере со сверхзвуковой скоростью. Кроме того, изучение газодинамических особенностей образующихся конических отрывных зон позволило использовать эти результаты для разработки способа нанесения покрытий и компактирования материалов малоинерционными частицами (~ 1 мкм) методом ХГН [3]. В этом способе напыляемый порошковый материал используют совместно с обрабатываемым материалом, в качестве которого используют грубодисперсные сфероидизированные частицы с размером 70 – 300 мкм. Крупные частицы обрабатываемого материала в связи с большой инерционностью имеют сравнительно низкую по сравнению с напыляемыми частицами скорость соударения с поверхностью. При этом под действием упругой энергии частицы обрабатываемого материала отражаются от поверхности на расстояние около 10 собственных диаметров, трансформируют прямую ударную волну газа перед напыляемой поверхностью в коническую и тем самым обеспечивают высокую скорость натекающего газа и частиц. Следует отметить, что время существования таких отрывных зон ограничено временем нахождения частиц в сверхзвуковой области потока и составляет порядка нескольких миллисекунд. В связи с этим исследована возможность использования конических отрывных зон, формируемых с помощью иглы. Имеется большое число публикаций, посвященных изучению характера обтекания сверхзвуковым потоком затупленных тел с иглой (см., например, работы [4 – 7]) с целью управления тепловыми потоками, сопротивлением тел и структурой течения. Установлено, что в зависимости от длины иглы  $l_n$  и диаметра тела  $D_b$  реализуются следующие режимы обтекания: при  $l_n/D_b < 1$  — пульсационный режим, в процессе которого значительно изменяется во времени как форма ударной волны, так и газодинамические параметры после нее; при  $1 < l_n/D_b < (l_n/D_b)_{cr}$  — колебательный режим, со слабым изменением структуры присоединенного косоугольного скачка уплотнения (концевой отрыв) и параметров течения; в случае  $l_n/D_b > (l_n/D_b)_{cr}$  реализуется затянутый отрыв.

Анализ публикаций выявил отсутствие работ по исследованию натекания сверхзвуковых струй на преграду с иглой при характерных для ХГН условиях, что явилось поводом для проведения исследований, результаты которых представлены ниже.

### **Экспериментальная установка и методы исследования**

Газодинамические исследования проводились на экспериментальной установке, схематическое изображение которой приведено на рис. 1. Она включала в себя такие стандартные узлы, как сверхзвуковое сопло 1, подогреватель газа 2, дозатор частиц 3, преграду 4 с закрепленной на ней иглой 5.

Сверхзвуковые конические сопла с диаметром критического  $d_{cr} = 2 - 6$  мм и выходного  $d_{exit} = 4 - 10$  мм сечения и длиной сверхзвуковой части  $L_n = 40 - 100$  мм позволяли получать струю воздуха с числом Маха на выходе  $M_{ex} = 2 - 3$  при давлении торможения  $p_0 = 1,2 - 2,5$  МПа и температуре торможения  $T_0 = 290 - 700$  К. Экспериментальная установка была собрана в камере аэродинамической трубы Т-333 с возможностью проведения оптической съемки с помощью теневого

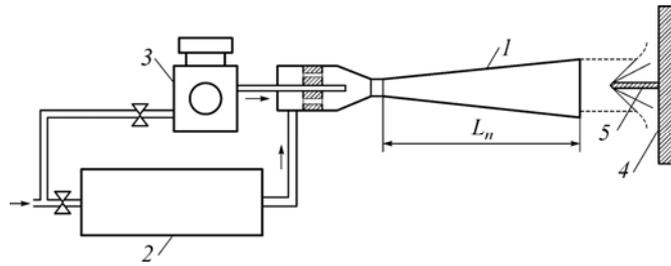


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

прибора ИАБ-451 с адаптивным визуализирующим транспарантом (АВТ) [8]. В качестве источника света использовалась ртутная лампа ДРШ-250 с источником переменного тока. Регистрация изображения выполнялась фотокамерой Canon 450D с размером матрицы  $22,2 \times 14,8$  мм ( $4272 \times 2848$  pxl) с минимальным временем экспозиции  $t_{\text{ex}} = 250$  мкс.

Измерение давления на поверхности преграды проводилось с помощью дренажных отверстий диаметром 0,4 мм, расположенных на расстоянии 0,8 мм друг от друга. Для визуализации картины растекания струи по поверхности использовался метод сажемасляного покрытия.

#### Метод расчета и постановка задачи

Общая картина натекания сверхзвуковой струи исследовалась также численно, и проводилось сравнение с экспериментальными данными. Расчет газового течения проводился с помощью программного пакета FLUENT путем решения двумерных осесимметричных уравнений Навье–Стокса. Влияние турбулентности на параметры газового потока моделировалось с помощью известной RNG  $k - \varepsilon$  модели, подробно описанной в работе [9]. Число ячеек в расчетной области — около 100 000. В расчетах использовалась пространственная конфигурация, соответствующая эксперименту по изучению газодинамической картины, которая включала в себя сопло с критическим сечением диаметром  $d_{\text{кр}} = 6$  мм, выходным сечением диаметром  $d_{\text{ex}} = 9,2$  мм и длиной сверхзвукового участка  $L_n = 90$  мм. На подложке была закреплена игла длиной  $l_n = 14$  мм, ось иглы совпадала с осью симметрии сопла. Данная конфигурация использовалась для изучения качественной картины взаимодействия сверхзвуковой струи с преградой, на которой установлена игла. Полученные в результате расчетов данные (распределение давления на подложке, картина натекания, векторы скорости газа) сравнивались с данными, полученными в ходе эксперимента.

#### Экспериментальные данные и результаты расчетов

На рис. 2 показаны примеры теневых картин, полученных экспериментально (рис. 2, *a, c, e*) и в расчетах (рис. 2, *b, d, f*).

На теневых картинах наблюдается головной косой скачок уплотнения от иглы и образование ниже по потоку конической отрывной зоны с дозвуковым внутренним течением. В целом можно отметить, что картины, получаемые при расчете, адекватно воспроизводят теневые фотографии при различных условиях экспериментов.

Результаты измерения давления на поверхности преграды  $p_s$  в сравнении с результатами расчетов показаны на рис. 3.

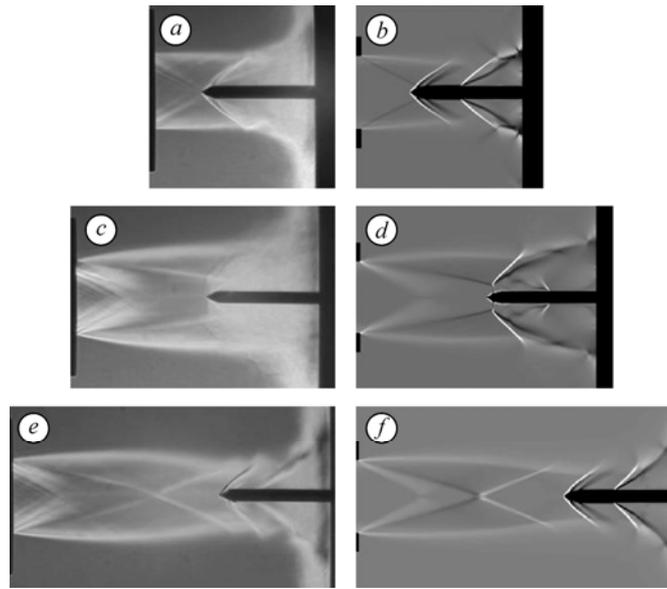


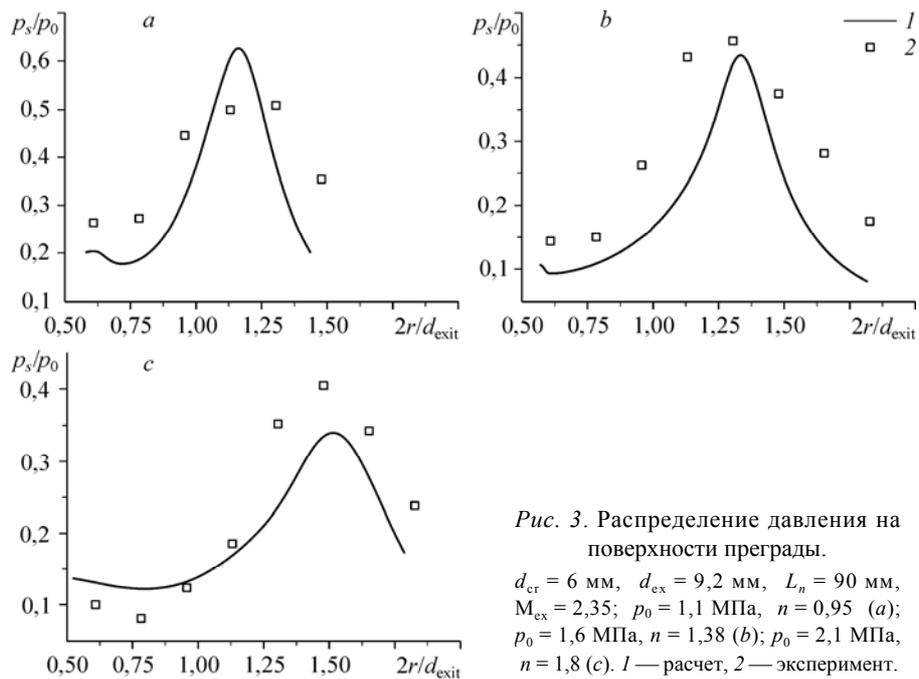
Рис. 2. Экспериментальные и расчетные теневые картины визуализации течения.

$d_{cr} = 6$  мм,  $d_{ex} = 9,2$  мм,  $L_n = 90$  мм,  $M_{ex} = 2,35$ .  $a, b$  —  $p_0 = 1,1$  МПа,  $l_{ns} = 20$  мм;  $c, d$  —  $2,1$  МПа,  $l_{ns} = 30$  мм;  $e, f$  —  $p_0 = 1,6$  МПа  $l_{ns} = 40$  мм.

Отметим, что качественно положение и величина максимумов давления, полученных в расчетах при различных давлениях торможения, согласуется с экспериментами. В расчетах отражается, что максимум давлений смещается к периферии с увеличением давления торможения, что связано с увеличением диаметра струи. Также с увеличением давления торможения происходит снижение максимума давления на преграде. При истечении, близком к расчетному (степень нерасчетности  $n = 0,95$   $p_0 = 1,1$  МПа), измеренная величина максимума давления на преграде оказалась ниже рассчитанной на  $\approx 20$  %. При давлении торможения  $p_0 = 1,6$  МПа ( $n = 1,38$ ) наблюдаются близкие значения экспериментальных и расчетных значений максимумов давлений. С увеличением давления до  $p_0 = 2,1$  МПа ( $n = 1,8$ ) измеренное максимальное давление оказывается выше рассчитанного на 13 %.

Следует обратить внимание на то, что характерная ширина измеренных распределений давления оказывается всегда больше рассчитанных. Наиболее вероятным объяснением наблюдаемых несоответствий является трехмерность реальной струи. Характерные диаметры струй, применяемых для ХГН, составляют несколько миллиметров, т. е. достаточно малые, что способствует возбуждению колебаний (неустойчивости) в поперечном направлении. Реальная струя совершает поперечные перемещения по поверхности преграды в окрестности центра натекания. При измерении давления с использованием инерционных датчиков происходит усреднение данных, что может повлиять на экспериментальную величину давления и ширину его наблюдаемых распределений.

Использование результатов моделирования позволяет восстановить качественную картину течения в окрестности преграды с иглой. Сверхзвуковая кольцевая струя, обтекающая газовый конус, перед преградой тормозится в скачке уплотнения в непосредственной близости от преграды. Это видно из рис. 4,  $a$ , где приведены направления вектора скоростей газа и величины чисел Маха. Область  $I$



с  $M = 1,5 \pm 1,9$  резко переходит в область 2 с  $M = 0,8 \pm 1,2$ . Сразу за областью 2 (которая занимает очень небольшую по размерам область) вдоль поверхности преграды располагается область 3 высоких скоростей газа, достигающих величин, сравнимых с начальными на выходе сопла. Внутри дозвукового конуса реализуется циркуляционное течение с направлением движения газа вдоль иглы против натекающего потока.

На фотографии сажемазляной визуализации на преграде (рис. 4, b), показанной в одном масштабе с картиной течения по результатам расчета, наблюдается светлое кольцо интенсивного растекания — унос сажи от натекания кольцевой

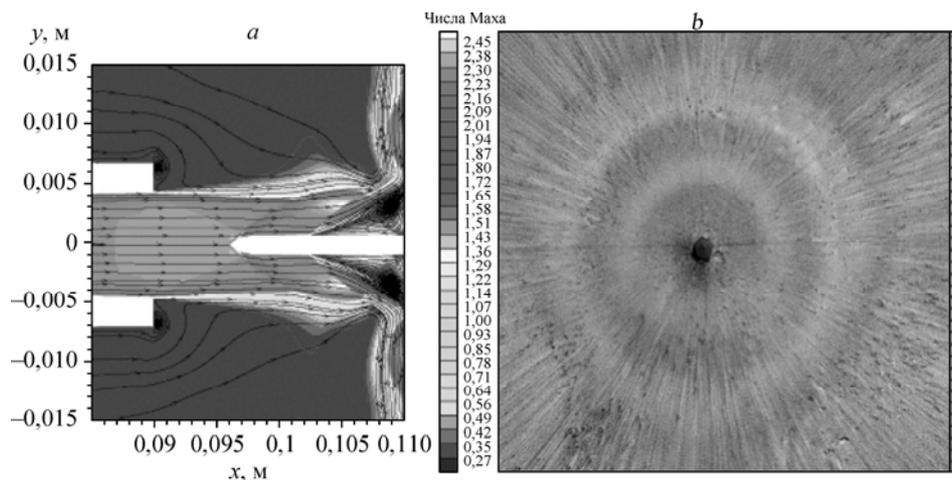


Рис. 4. Структура течения в окрестности преграды с иглой.

$d_{cr} = 6$  мм,  $d_{ex} = 9,2$  мм и  $L_n = 90$  мм,  $M_{ex} = 2,35$ . a — расчетные линии тока и величины чисел Маха, b — сажемазляная визуализация.

струи. Две темные выраженные кольцевые линии стекания сажи свидетельствуют об образовании двух интенсивных тороидальных вихрей, сопровождающихся образованием локальных отрывных зон при растекании струи по преграде. К тем же выводам можно прийти, рассматривая рис. 4, *a*.

Таким образом, сравнение полученных экспериментальных и расчетных данных позволяет сделать вывод о возможности применения расчетов газового течения исследуемой геометрии с использованием пакета FLUENT. В свою очередь, использование расчетных данных помогает восстановить структуру течения в тех областях, где натурные измерения крайне затруднительны (например, в окрестности преграды).

### Обсуждение

Анализ публикаций по обтеканию затупленных тел с иглой [5–7], двух соизмеримых тел, одно из которых находится в следе другого [10], а также результатов по натеканию сверхзвуковой струи на преграду с иглой или частицей показывает, что существует подобие в геометрии образующихся конических отрывных зон и структуре течений газа (см. рис. 5).

Во всех рассматриваемых случаях при  $1,5 < l_n/D_b < (l_n/D_b)_{\text{кр}}$  ( $l_n$  — длина иглы или расстояние от первого тела до поверхности второго, или преграды;  $(l_n/D_b)_{\text{кр}}$  — длина, при которой отрывная зона отделяется от частицы (переднего тела) или реализуется затянутый отрыв на игле;  $D_b$  — диаметр затупленного тела или диаметр струи в пятне натекания на преграду) в следе за первым телом [10], частицей [2] и вдоль иглы формируется коническая отрывная зона, которая для внешнего набегающего сверхзвукового потока является квазителом в виде острого (игла, частица) или затупленного конуса. При обтекании такой отрывной зоны (газового конуса), как и на твердом конусе, формируется косой скачок уплотнения и высокоэнергетическая, высоконапорная сверхзвуковая струя с кольцевым пятном натекания. Об этом свидетельствуют результаты расчета и пневмоизмерений по поверхности преграды, данные визуализации, а также результаты обработки мгновенных

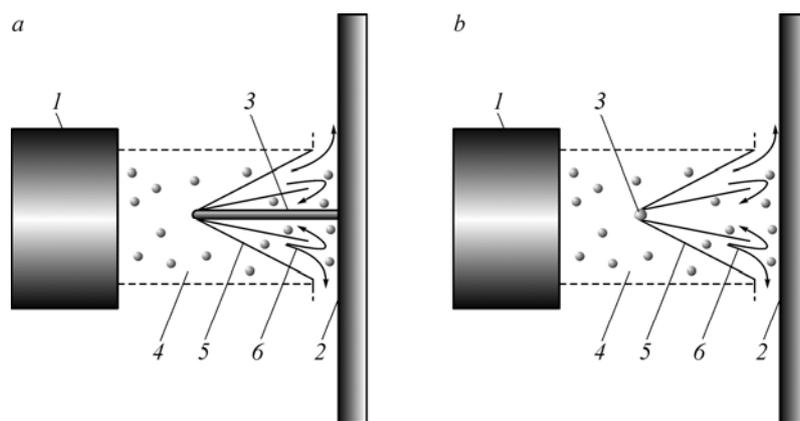


Рис. 5. Качественная картина натекания сверхзвуковой струи на преграду с иглой (*a*) и с отраженной от нее частицей (*b*).

1 — сверхзвуковое сопло, 2 — подложка, 3 — игла (частица), 4 — сверхзвуковой двухфазный поток, 5 — коническая ударная волна, 6 — кольцевая сверхзвуковая струя.

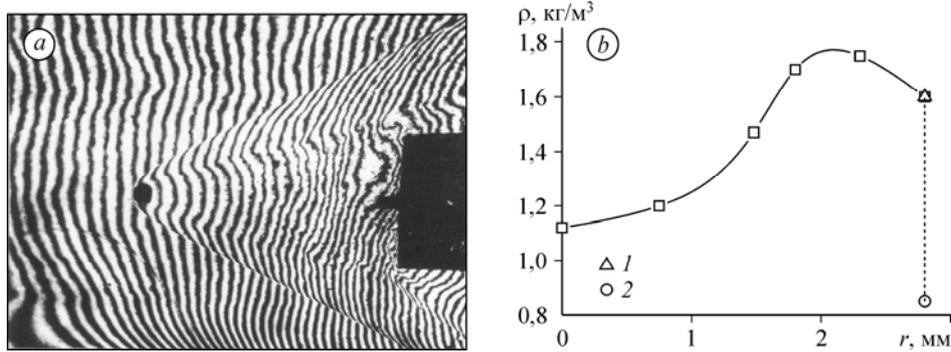


Рис. 6. Интерферограмма течения (а) и распределение плотности газа по радиусу (б) в сечении, отстоящем от тела на расстоянии полутора диаметров тела  $D_b$ .  $M_\infty = 3,0$ ,  $D_b = 11$  мм.

интерферограмм (рис. 6, а), на основании которых получено распределение плотности газа (рис. 6, б) по сечению, нормальному к направлению набегающего потока — в газовом конусе (отрывной зоне) и в зоне смешения (между поверхностью газового конуса и косым скачком уплотнения).

В частности, по результатам сажемасляной визуализации видно, что пятно натекания струи представляет собой кольцо с характерным диаметром, соизмеримым с диаметром струи. Данные расчета и пневмоизмерений в этой области фиксируют максимальное значение давления. И так как после косога скачка сохраняется сверхзвуковая скорость, а плотность газа в области смешения более чем в 2 раза (рис. 6, б) выше, чем в набегающем потоке, можно сделать вывод, что в зоне смешения формируется струя с высоким напорным давлением  $\rho v^2$ . Именно наличие такой струи обуславливает возможность переноса мелких частиц с минимальной потерей скорости и получения высокой скорости удара их о поверхность, что обеспечивает улучшение условий для напыления.

### Заключение

Проведены визуализация и расчеты картины натекания сверхзвуковой струи на преграду с иглой в условиях, близких к ХГН. Показано качественное соответствие расчетных и экспериментальных данных, приемлемое для выполнения расчетных оценок. Предварительный анализ формирующейся картины натекания показывает, что в локальной кольцевой области возможна реализация более благоприятных условий ХГН высокодисперсных частиц с размером близким или несколько меньше 1 мкм, чем в обычных условиях.

### Список литературы

1. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Клинков С.В., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. М.: Издательство Физматлит, 2010. 580 с.
2. Алхимов А.П., Яненко Н.Н., Нестерович Н.И., Папырин А.Н., Фомин В.М. Изменение волновой структуры при обтекании тел двухфазным потоком // ДАН СССР. 1981. Т. 260, № 4. С. 821–825.
3. Патент РФ № 2353706. МПК с23с24/04, с23с28/02. Способ изготовления функциональной поверхности / Алхимов А.П., Фомин В.М., Косарев В.Ф. и др., патентообладатели: ИТПМ СО РАН, Физический ин-т РАН, АКЦ ФИ АН, ОАО КБСМ. № 20071149/02; заявл. 27.10.2008; опублик. 27.10.2008, Бюл. № 12.
4. Чжен П. Отрывные течения. Т. 2, перев. с англ., М.: Мир, 1973. 280 с.

5. **Панарас А.Г.** Пульсирующие течения около осесимметричных выпуклых тел // Ракетная техника и космонавтика 1981. Т. 19, № 8. С. 157–159.
6. **Запрягаев В.И., Миронов С.Г.** Особенности механизма пульсаций отрывного течения перед цилиндром с острой иглой при сверхзвуковом обтекании // ПМТФ. 1991. № 6. С. 101–108.
7. **Запрягаев В.И., Кавун И.Н.** Экспериментальное исследование возвратного течения в передней отрывной области при пульсационном режиме обтекания тела с иглой // ПМТФ. 2007. Т. 48, № 4. С. 30–39.
8. **Бойко В.М., Оришич А.М., Павлов А.А., Пикалов В.В.** Теоретические основы и методы оптической диагностики в аэрофизическом эксперименте: учебн. пособие. Новосибирск: НГУ, 2008. 412 с.
9. **Lauder В.Е., Spalding D.B.** Mathematical models of turbulence. London: Academic Press. 1972. 169 p.
10. **Хлебников В.С.** Исследование течения перед сферой, помещенной в следе тела, при сверхзвуковом обтекании // Уч. зап. ЦАГИ. 1971. Т. 11, № 1. С. 42–48.

*Статья поступила в редакцию 1 февраля 2011 г.*