

УДК 532.526

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
РАЗВИТИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ
КОНТРОЛИРУЕМЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ
В ГИПЕРЗВУКОВОМ ВЯЗКОМ УДАРНОМ СЛОЕ
НА ПЛАСТИНЕ***

С.Г. МИРОНОВ, И.С. ЦЫРЮЛЬНИКОВ

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

Представлены результаты измерений характеристик поля средней плотности и пульсаций плотности при введении периодических возмущений в гиперзвуковой вязкий пограничный слой на пластине. Эксперименты выполнены при числе Маха потока $M_\infty = 21$, единичном числе Рейнольдса $Re_{1,\infty} = 6 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$ и температурном факторе поверхности $T_w/T_0 = 0,26$. Возмущения в ударный слой вводились кососрезным газодинамическим свистком.

ВВЕДЕНИЕ

При движении на больших высотах с большими скоростями течение на поверхности тела реализуется в виде вязкого ударного слоя, когда все пространство между ударной волной и поверхностью является зоной вязкого течения. Понимание механизмов развития возмущений в вязком ударном слое является необходимым условием разработки эффективных методов управления ламинарно-турбулентным переходом при гиперзвуком обтекании. Процесс возникновения и эволюции возмущений в ударном слое теоретически пока еще слабо изучен. Задача усложняется присутствием взаимодействия между возмущениями и ударной волной, значительной непараллельностью течения, наличием скольжения и скачка температуры на стенке. В описываемой области аэродинамики выполнены лишь единичные экспериментальные исследования.

В настоящее время одним из основных методов изучения неустойчивости пограничного слоя в аэродинамических трубах непрерывного действия является метод контролируемых периодических возмущений [1, 2]. Суть его заключается в изучении эволюции характеристик волн, искусственно вводимых в пограничный слой. Для сверхзвуковых и умеренно гиперзвуковых течений возмущения вводятся периодическим электрическим разрядом. В случае гиперзвуковых течений разреженного газа предпочтительным является использование газодинамических свистков. Примеры успешной реализации таких источников возмущений в исследованиях устойчивости ударного слоя имеются, например, в [3, 4]. В этих работах получены данные о развитии контролируемых и естественных возмущений в ударном слое на пластине и поверхности сжатия на интенсивной продольной структуре,

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 04-01-00474 и 05-08-33436).

возникающей при деформации поля среднего течения следом за кососрезным газодинамическим свистком. Поэтому представляет интерес получение данных о развитии контролируемых возмущений в невозмущенном или слабо возмущенном ударном слое на простой модели типа пластины с острой кромкой.

В представленной работе реализована новая схема введения в ударный слой на пластине контролируемых периодических возмущений с помощью кососрезного свистка, приведены результаты измерений среднего течения и волновых характеристик возмущений плотности.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты выполнены в гиперзвуковой азотной аэродинамической трубе Т-327А Института теоретической и прикладной механики СО РАН для следующих условий: число Маха $M_\infty = 21$, единичное число Рейнольдса $Re_{1\infty} = 6 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$, температура торможения $T_0 = 1200 \text{ К}$, температурный фактор поверхности $T_w/T_0 = 0,26$. В экспериментах использовалась пластина длиной 340 мм с острой передней кромкой шириной 100 мм. Пластина изготовлена из алюминия и имеет угол клина передней кромки 7° .

Измерения в ударном слое выполнены для нулевого угла атаки пластины. Возмущения в ударном слое создавались цилиндрическим кососрезным газодинамическим свистком [5] с внутренним диаметром 4 мм, расположенным под пластиной, как показано на схеме рис. 1. Угол среза переднего торца свистка составлял 45° . Столь большой угол среза позволял максимально уменьшить длину резонатора свистка и получить максимальные значения основной частоты колебаний (свыше 20 кГц). Для уменьшения волнового сопротивления толщина трубки корпуса свистка увеличивалась от носика с нулевой толщины до 1 мм в конце трубки, как конус. Конец среза переднего торца свистка располагался вровень с передней кромкой пластины и нормаль к плоскости среза была направлена под пластину (см. рис. 1). В задний торец свистка герметично вставлен пьезокерамический датчик, формирующий опорный сигнал для системы регистрации. При обтекании пластины со свистком возмущения периодически вводятся в ударный слой с передней кромки пластины в момент локального отхода головной ударной волны вперед от ее кромки под воздействием импульса давления, создаваемого свистком. Согласно данным [6], газодинамический свисток в области течения, охватываемой головной ударной волной, создает акустические возмущения медленной моды, а вихревые возмущения распространяются вблизи следа за свистком. При таком расположении свистка на пластине ожидалось, что вихревые возмущения при истечении газа из полости резонатора будут сноситься потоком под пластину, а в область измерений смогут проникать только акустические возмущения, а также будет минимизировано возмущение среднего течения.

Ранее применяемая схема введения возмущений в ударный слой на пластине и поверхности сжатия [3, 4] использовала взаимодействие передней кромки модели с конической ударной волной от свистка, колеблющейся нормально к кромке. При этом нормаль к плоскости среза переднего торца была направлена в ту же сторону, что и нормаль к поверхности пластины, так как в этом направлении

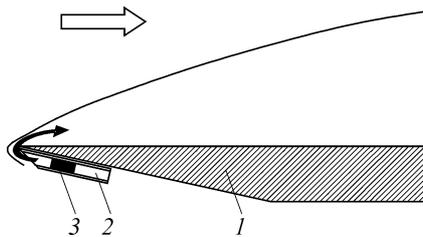


Рис. 1. Схема модели пластины с источником периодических возмущений.

1 — пластина, 2 — корпус кососрезного свистка, 3 — датчик пульсаций плотности.

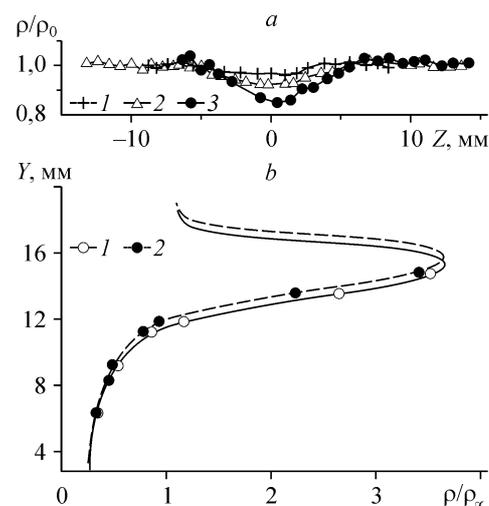
амплитуда колебаний ударной волны максимальна. Для того, чтобы вихревые возмущения не проникали в область измерений, тело свистка выносилось далеко вперед и располагалось ниже передней кромки модели. Следствием этого стала существенная ширина возмущенной области ($\cong 20$ мм) и значительная деформация поля среднего течения (до 40 % по плотности). Такой источник вполне удовлетворял задаче исследования развития возмущений варикозного типа на интенсивной продольной структуре.

Методом электронно-пучковой флюоресценции азота [7] измерялись распределения средней плотности, распределение амплитуды и фазы пульсаций плотности в продольном, нормальном и трансверсальном направлениях относительно поверхности модели. Электрический фильтр отсекал сигнал системы регистрации флюоресценции ниже 1 кГц. Для контролируемых возмущений измерялись распределения амплитуды и фазы пульсаций плотности по продольной (x), нормальной (y) и трансверсальной (z) координате. По этим данным вычислялись продольные фазовые скорости и скорости роста возмущений в ударном слое. Наличие в свистке датчика пульсаций давления позволило в небольшом диапазоне частот дополнительно измерить фазовые скорости естественных возмущений, взаимодействующих с ударным слоем, которые наряду с периодическими пульсациями давления в свистке также регистрируются датчиком. Это оказалось возможным потому, что хаотические возмущения внешнего потока, по крайней мере, для низких частот, имеют высокую пространственную когерентность, обусловленную достаточной локальностью и удаленностью от области измерений источника возмущений [8]. Скорее всего, источником естественных возмущений является участок неустойчивого пограничного слоя вблизи критического сечения сопла.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ряде сечений по продольной координате, для различных положений по нормали к поверхности пластины, были измерены распределения средней плотности в трансверсальном направлении. Получено, что стационарное возмущение свистком поля средней плотности не превышает 13 % (рис. 2, *a*) и реализуется как локальное смещение ударного слоя от поверхности пластины на величину 2,5 % его толщины (рис. 2, *b*). Согласно данным расчета поля среднего течения [9], соответствующее уменьшение средней скорости составляет менее 2,5 % от скорости внешнего потока. Поперечный размер стационарной возмущенной области среднего течения на передней кромке пластины — 10 мм и вниз по потоку сначала линейно увеличивается с углом расширения $\cong 5^\circ$, а с середины пластины сохраняет постоянную ширину. Такую же ширину по координате z имеет область периодических пульсаций плотности.

Рис. 2. *a* — Профили относительной деформации средней плотности по трансверсальной координате z в сечении $x = 75$ мм для разных значений координаты y : 8,7 (1), 9,8 (2), 13 (3) мм; *b* — невозмущенный профиль средней плотности в сечении $x = 75$ мм (1) и возмущенный профиль средней плотности (2). Точками обозначены положения, в которых проводились измерения.



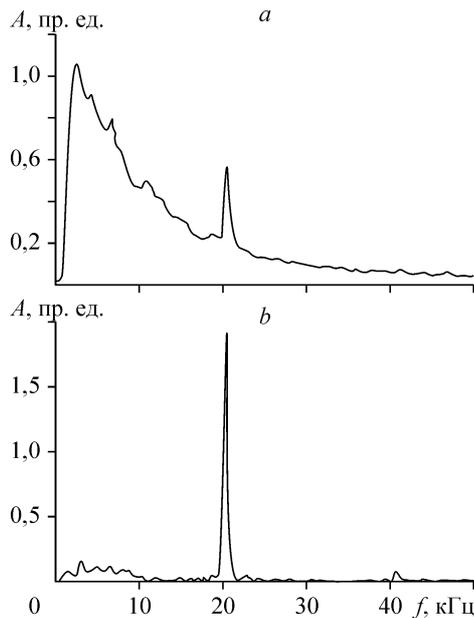


Рис. 3. *a* — Автоспектр пульсаций интенсивности флюоресценции в ударном слое в сечении $x = 75$ мм в области максимума периодических пульсаций, *b* — взаимный спектр пульсаций интенсивности флюоресценции и пульсаций давления в свистке в той же точке измерения.

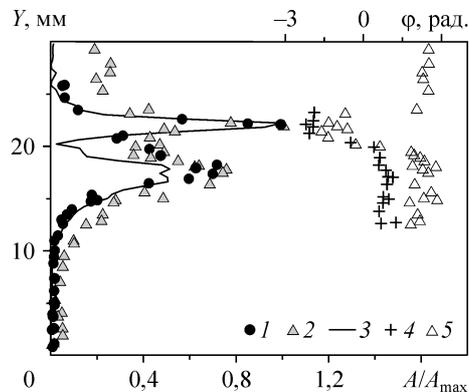
Типичный автоспектр интенсивности пульсаций флюоресценции и взаимный спектр между пульсациями давления в полости свистка и пульсациями флюоресценции потока в ударном слое пластины приведены на рис. 3, *a*, *b*. Взаимный спектр пульсаций вычислялся с помощью алгебраических соотношений [10]. Амплитудный и фазовый спектры равнялись $I_{12}(f) = \sqrt{Q_{12}^2(f) + R_{12}^2(f)}$ и $\varphi_{12} = a \tan(R_{12}/Q_{12})$ соответственно, где Q_{12} — взаимный коспектр, R_{12} —

квадратурный спектр пульсаций. Автоспектр вычислялся по этим же соотношениям, но для одного и того же сигнала. Из графиков видно, что в спектрах имеется пик на основной частоте $f = 20,5$ кГц (безразмерный частотный параметр $F = 2\pi f / (Re_{1\infty} \cdot U_{\infty}) = 1,5 \cdot 10^{-4}$) и небольшой пик на частоте гармоники $f = 41$ кГц ($F = 3 \cdot 10^{-4}$). Внешние возмущения создают в автоспектре интенсивный широкополосный сигнал на низких частотах, слабо заметный во взаимном спектре.

Характерные распределения амплитуды пульсаций плотности (*I*) и фазы (*φ*) на основной частоте поперек ударного слоя для $x = 125$ мм и $z = 0$ приведены на рис. 4. Кривой 3 на рисунке представлен профиль поперечного градиента средней плотности. Такое же распределение амплитуды и фазы было получено для гармоники. Символами 2 и 5 на рис. 4 обозначены распределения амплитуды и фазы пульсаций плотности, вызываемые в ударном слое естественными возмущениями внешнего потока на частоте $f = 4,7$ кГц. Видно хорошее совпадение амплитудных и фазовых распределений естественных и искусственных возмущений. Совпадение профилей амплитуд с распределением поперечного градиента средней плотности и скачок фазы пульсаций на величину π между максимумами свидетельствует о возбуждении колебаний ударного слоя по координате *y*. В работе [11] для случая взаимодействия акустических возмущений внешнего потока с ударным слоем на пластине показано, что такие колебания вызываются вихревыми возмущениями. Тогда узкий пик соответствует

Рис. 4. Профили амплитуд и фаз пульсаций плотности поперек ударного слоя в сечении *y* при $x = 125$ мм и $z = 0$.

1 — амплитуда контролируемых пульсаций плотности на основной частоте, 2 — амплитуда естественных пульсаций плотности на частоте 4,7 кГц, 3 — зависимость градиента средней плотности поперек ударного слоя, 4 — фаза контролируемых пульсаций, 5 — фаза естественных пульсаций плотности.



поперечным колебаниям ударной волны, а более широкий — поперечным колебаниям склона распределения средней плотности внутри ударного слоя (см. рис. 2, *b*), который является верхней границей пограничного слоя. Следует отметить, что аналогичное распределение амплитуды и фазы пульсаций было получено в [12] при введении периодических возмущений в гиперзвуковой след за свистком, что свидетельствует об общности процесса генерации возмущений.

На рис. 5 приведены изолинии периодических пульсаций плотности в плоскости (x, y) для $z = 0$ для основной частоты (*a*) и для гармоники (*b*). Видно, что имеется два максимума пульсаций, упомянутых в предыдущем абзаце, причем возмущения на границе пограничного слоя движутся заметно быстрее возмущений на ударной волне. Это говорит о том, что продольная фазовая скорость возмущений на границе пограничного слоя C_x^{nc} выше, чем фазовая скорость возмущений

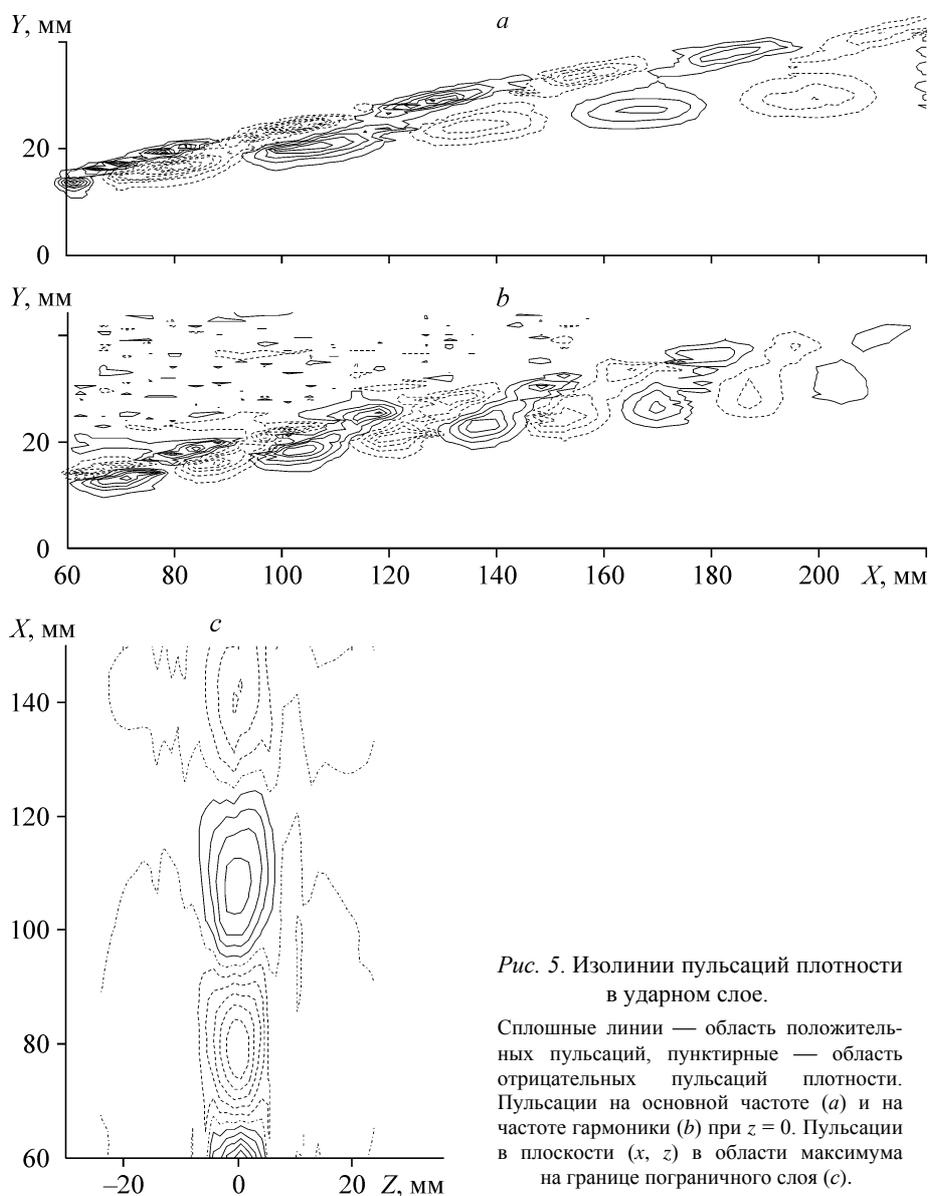


Рис. 5. Изолинии пульсаций плотности в ударном слое.

Сплошные линии — область положительных пульсаций, пунктирные — область отрицательных пульсаций плотности. Пульсации на основной частоте (*a*) и на частоте гармоники (*b*) при $z = 0$. Пульсации в плоскости (x, z) в области максимума на границе пограничного слоя (*c*).

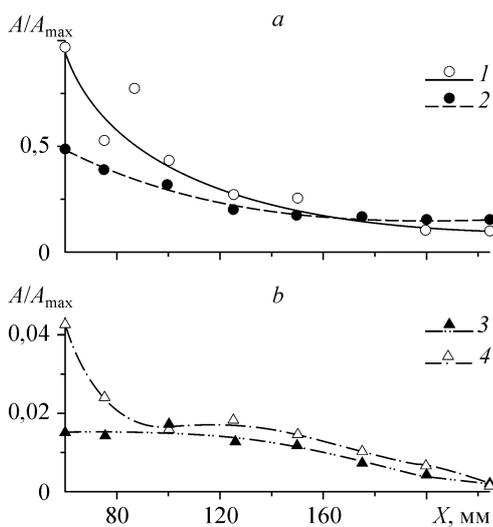
на ударной волне C_x^{yB} . Измерения показали, что вдали от передней кромки пластины $C_x^{пс}$ и C_x^{yB} имеют значения для основной частоты $0,88 \pm 0,015$ и $0,84 \pm 0,03$ соответственно, а для гармоники — $C_x^{пс} = C_x^{yB} = 0,94 \pm 0,015$. Полученные значения фазовых скоростей близки к величине $1 - 1/M_\infty = 0,952$ — скорости распространения акустических возмущений медленной моды. Фазовые скорости возмущений вычислялись по соотношению $C_x = 2\pi f \Delta x / \Delta \varphi_x U_e$. Здесь $\Delta \varphi_x$ — увеличение фазы при сдвиге на величину Δx по продольной координате, U_e — скорость газа за ударной волной.

Следует отметить, что близкие к этим величинам значения фазовой скорости были получены для периодических возмущений в следе за свистком [12]. Отставание в фазовой скорости на ударной волне может быть объяснено увеличением расстояния между ударной волной и верхней границей пограничного слоя при удалении от передней кромки пластины. При этом за счет конечной скорости передачи воздействия происходит дополнительное увеличение сдвига фазы возмущений на ударной волне относительно возмущений на границе пограничного слоя.

По измеренным в трансверсальном направлении распределениям амплитуды и фазы возмущений были получены спектры по поперечным волновым числам β . β -спектры вычислялись по соотношению $A(\beta) \exp[i\varphi(\beta)] =$

$$= \int_{-Z_0}^{Z_0} A(z) W(z) \exp[i\varphi(z)] \exp[-i\beta z] dz. \text{ Здесь } A(z) \text{ и } \varphi(z) \text{ — амплитуда и фаза}$$

пульсаций плотности в точке z , определяемые из взаимного спектра, Z_0 и $-Z_0$ — координаты боковых кромок пластины, $W(z)$ — спектральное окно Хэмминга. Было обнаружено, что β -спектры вводимых возмущений во всех сечениях по продольной координате имеют максимум при нулевом волновом числе и конечную ширину пика, что свидетельствует о том, что периодические возмущения представляют собой квазидвумерные волны, распространяющиеся в ограниченном канале. В качестве иллюстрации к сказанному на рис 5, с приведены изолинии пульсаций плотности в плоскости (x, z) в области максимума пульсаций на границе пограничного слоя.



Измерения зависимости амплитуды пульсаций плотности от координаты x (рис. 6) показали, что возмущения на ударной волне (1, 3) и на границе пограничного слоя (2, 4) затухают как на основной частоте (а), так и на частоте гармоники (b). При этом скорость затухания возмущений на частоте гармоники выше, чем на основной частоте. Для следа за свистком [12] был получен быстрый рост возмущений, но на

Рис. 6. Амплитуды пульсаций плотности на ударной волне (1, 3) и на верхней границе пограничного слоя (2, 4) на основной частоте (а) и на частоте гармоники (b).

частоте вдвое меньшей, чем в данной работе ($f = 10,5$ кГц). Тем не менее, в следе за свистком также обнаружено затухание возмущений на частоте гармоники ($f = 21$ кГц).

Важным моментом работы является проверка того, создает ли данная схема введения возмущений симметричные положительные и отрицательные импульсы возмущений. Их, в какой-то степени, можно рассматривать как волны из источника типа вдув–отсос. Если головная ударная волна близко примыкает к острой передней кромке пластины и при увеличении давления на входе в свисток отходит от нее, пропуская положительный импульс акустического возмущения, то должен существовать только вдув или же неполный отсос. При этом возмущения должны иметь несинусоидальную форму. В частности, гармоники должны иметь высокую интенсивность. Кроме того, должна существовать интенсивная субгармоника, как это наблюдается при использовании периодического электрического разряда с синусоидальным питанием. В спектрах на рис. 3 видно отсутствие заметной субгармоники и интенсивной гармоники. Это говорит о том, что деформация поля средней плотности не связана с преобладанием вдува над отсосом, а, скорее всего, со стационарным отходом ударной волны от кромки пластины в области расположения свистка из-за большого угла среза переднего торца. Этот постоянный отход ударной волны несколько деформирует поле среднего течения, но позволяет в равной степени вводить в ударный слой как положительные, так и отрицательные импульсы давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе реализована новая схема введения контролируемых периодических возмущений в гиперзвуковой вязкий ударный слой на пластине кососрезным газодинамическим свистком. Показано, что схема создает в ударном слое симметричные положительные и отрицательные возмущения плотности.

Измерены характеристики поля средней плотности, амплитудные и фазовые характеристики поля пульсаций плотности. Показано формирование в ударном слое затухающих квазидвумерных возмущений, представляющих собой колебания ударного слоя по нормали к поверхности пластины, с продольной фазовой скоростью распространения, близких к величине $1-1/M_\infty$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кендолл Дж. Экспериментальное исследование процесса перехода к турбулентному режиму в сверхзвуковых и гиперзвуковых пограничных слоях на моделях в аэродинамической трубе // Ракетная техника и космонавтика. — 1975. — Т. 13, № 3. — С. 47–60.
2. Косинов А.Д., Маслов А.А. Развитие искусственно вызванных возмущений в сверхзвуковом пограничном слое // Изв. АН СССР, МЖГ. — 1984. — № 5. — С. 37–42.
3. Mironov S.G., Maslov A.A. Experimental study of secondary instability in a hypersonic shock layer on a flat plate // J. Fluid Mech. — 2000. — Vol. 412. — P. 259–277.
4. Mironov S.G., Aniskin V.M. Experimental study of hypersonic shock layer stability on a circular surface of compression // Comptes Rendus — Mécanique. — 2004. — Vol. 332, No. 9. — P. 701–708.
5. Маслов А.А., Миронов С.Г. Экспериментальное исследование обтекания полузамкнутой цилиндрической полости гиперзвуковым потоком низкой плотности // Изв. РАН, МЖГ. — 1996. — № 6. — С. 155–160.
6. Цырюльников И.С., Миронов С.Г. Исследование волнового поля контролируемых возмущений двух источников // Теплофизика и аэромеханика. — 2005. — Т. 12, № 3. — С. 318–324.
7. Mironov S.G., Maslov A.A. An experimental study of density waves in hypersonic shock layer on a flat plate // Phys. Fluids A. — 2000. — Vol. 12, No. 6. — P. 1544–1553.

8. Ван Цитгера–Цернике теорема. Физическая энциклопедия. — М.: Из-во Советская энциклопедия, 1988. — Т. 1. — 242 с.
9. Maslov A.A., Mironov S.G., Poplavskaya T.V., Shplyuk A.N., Vetlutsky V.N. Viscous shock layer on a plate in hypersonic flow // Europ. J. Mech. B/Fluids. — 1999. — Vol. 18, No. 2. — P. 213–226.
10. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. — М.: Мир, 1983. — 478 с.
11. Кудрявцев А.Н., Миронов С.Г., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С. Экспериментальное исследование и прямое численное моделирование развития возмущений в вязком ударном слое на плоской пластине // ПМТФ. — 2006. — Т. 47, №5 (в печати).
12. Maslov A.A., Mironov S.G., Aniskin V.M. Hypersonic shear layer stability experiments // J. Spacecraft and Rockets. — 2005. — Vol. 42, No. 6. — P. 999–1004.

Статья поступила в редакцию 21 апреля 2006 г.