

УДК 532.525.2:533.6.011.8

## ВЛИЯНИЕ УГЛА МЕЖДУ ОСЯМИ СОПЕЛ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ ОДИНАКОВЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ

Е.И. СОКОЛОВ, И.В. ШАТАЛОВ, В.С. ФАВОРСКИЙ

*Балтийский государственный технический университет,  
Санкт-Петербург*

*Сибирская аэрокосмическая академия, Красноярск*

Проведено экспериментальное исследование взаимодействия двух сверхзвуковых недорасширенных струй при изменении угла между их осями, расстояния от среза сопел до точки пересечения осей и числа Рейнольдса. По результатам измерений амплитудно-частотных характеристик акустического поля и визуализации ударно-волновой структуры выделены несколько стационарных и автоколебательных режимов течения. Определены границы областей их существования в поле начальных параметров и построена карта режимов.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование взаимодействия двух сверхзвуковых недорасширенных струй, оси которых лежат в одной плоскости, при изменении угла  $\alpha$  между осями струй, а также расстояния  $l$  от среза каждого сопла до точки пересечения осей струй. Работа продолжает цикл исследований [1, 2] по взаимодействию сверхзвуковых струй с преградами и между собой. Влияние разреженности на автоколебательные режимы при натекании струи на перпендикулярную плоскую преграду изучено в [1]. В [2] для случая встречного взаимодействия струй выделены характерные режимы течения и определены границы их существования, которые при фиксированных значениях числа Маха  $M_e$ , нерасчетности  $n$  и отношения удельных теплотемкостей  $\gamma$  зависят от расстояния между соплами и параметра разреженности  $Re_L$ .

§ 1. Исследования проводились в барокамере, оборудованной координатными механизмами, системами подачи и контроля расхода газа, а также на газодинамическом стенде с выхлопом в атмосферу. Изучаемое течение схематично изображено на рис. 1, где штриховой линией показана поверхность раздела двух струй. Визуализация газодинамической структуры проводилась тлеющим разрядом и теньвым методом с последующим фотографированием. В некоторых опытах одна из струй заменялась непроницаемой плоской преградой, размеры которой на порядок превышали поперечные размеры струи. Давление на такой преграде, имитирующей поверхность раздела, измерялось ин-

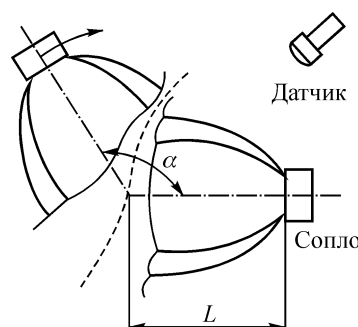
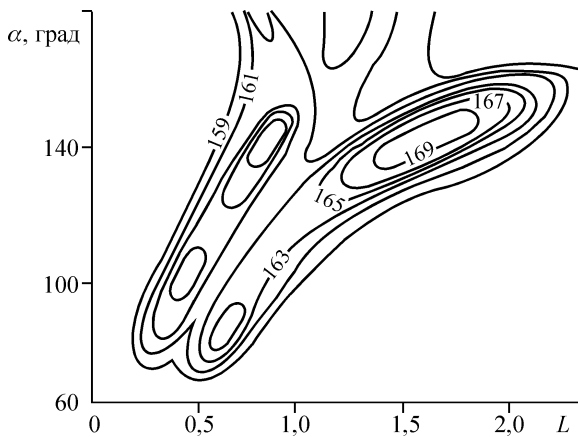


Рис. 1. Ударно-волновая структура сверхзвуковых струй, взаимодействующих под углом.

дуктивными датчиками ДМИ и ДД-10, присоединенными к дренажным отверстиям. Регистрация уровня и частоты акустического излучения проводилась пьезокерамическими датчиками ИС-2156 и ЛХ-611, установленными неподвижно относительно каждого из ресиверов в плоскости среза сопел. При изменении  $l$  и  $\alpha$  положение датчиков относительно сопел оставалось неизменным (см. рис. 1). Для фиксации начала автоколебательного режима использовались также электродинамический микрофон МД-52Б и конденсаторный микрофон МК-221. Чтобы избежать возможного влияния акустической обстановки барокамеры на исследуемое течение, ресиверы в ней были смонтированы так, что соизмеримые с линейными размерами струи ( $\sim 20$  мм) поверхности и стенки камеры находились на расстоянии не менее 500 мм от среза сопел. Подробные описания регистрирующей аппаратуры, методики измерений, оценки погрешностей приведены в [1, 3].

Исследовались струи воздуха при температуре торможения  $T_0 = 290$  К, истекающие из двух одинаковых сопел диаметром  $d_e = 2,8$  мм с параметрами:  $M_e = 1$ ,  $n = p_e/p_\infty = 20 - 100$ ,  $Re_L = Re_*(p_0/p_\infty)^{-0,5} = 40 - 600$  и  $10^5$ ,  $l = 10 - 150$  мм,  $L = l/Q = 0,2 - 5$  ( $Q = M_e d_e (\gamma n)^{0,5}$ ). Индексы 0, \*, e,  $\infty$  относятся к параметрам торможения, критическим, на выходе сопла и окружающего пространства соответственно.

Методика проведения экспериментов состояла в следующем. Одно из сопел оставалось неподвижным, другое было закреплено на поворотном механизме, оснащенный лимбом и обеспечивающем изменение угла между осями сопел от 45 до 315° с точностью до 0,5°. Ось вращения совпадала с точкой пересечения осей струй, поэтому расстояния от среза сопел до этой точки в процессе вращения сопла оставались постоянными. В процессе эксперимента при фиксированных начальных параметрах струй и ряде расстояний из диапазона [2] непрерывно изменялся угол  $\alpha$ . Исследовались все режимы, отмеченные в [1, 2]. Основой для анализа служили полученные одновременно данные визуализации, измерений амплитуды и частоты акустических колебаний. Типичные изолинии уровня пульсаций давления  $S$  для струй с  $Re_L = 10^5$  представлены на рис. 2; на рис. 3 в обобщенных координатах [3] ( $a_0$  — скорость звука в ресивере) приведены зависимости частоты акустического излучения  $f$  от варьируемых параметров  $L$  и  $\alpha$ . Возникновение автоколебаний фиксировалось по появлению в спектре пульсаций акустического излучения дискретных составляющих (узкополосных по частоте максимумов интенсивности излучения), значительно превышающих уровень сплошного шума струи и четко фиксируемых микрофоном, а также визуально, по началу колебаний ударно-волновой структуры (УВС) струй.



В результате анализа выделено несколько стационарных и автоколебательных режимов взаимодействия. Наблюдения обобщены в виде карт режимов, представляющих собой границы существования тех или иных четко выраженных типов течения в поле определяющих параметров  $L$  и  $\alpha$ . Типичная

Рис. 2. Уровень акустического излучения при взаимодействии струй.

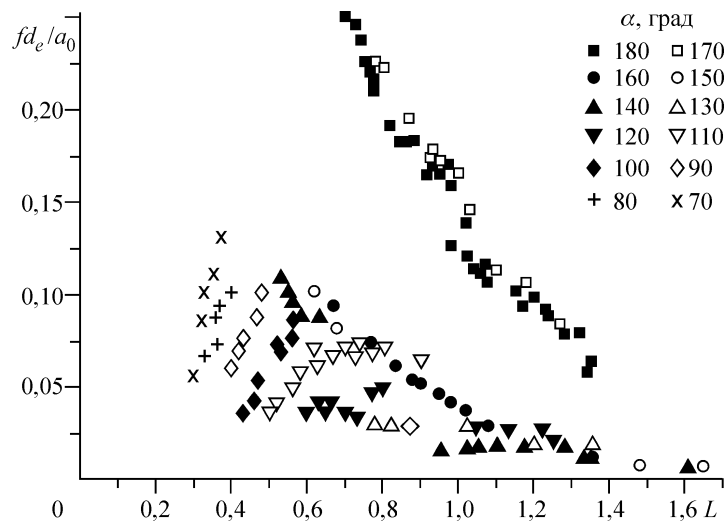


Рис. 3. Частоты акустического излучения на нестационарных режимах.  
 $M_e = 1, n = 53, \gamma = 1,4, d_e = 2,8$  мм.

карта режимов для струй с  $Re_L = 600$  приведена на рис. 4, где также представлены схемы УВС и распределение давления на непроницаемой плоской преграде, наклоненной к оси струи под углом  $\alpha/2$ . Эта преграда имитирует поверхность раздела для случая симметричного взаимодействия. Измерения давления выполнялись для углов  $\alpha/2 = 90, 82, 75, 70, 55, 45^\circ$  и расстояний  $L = 0,55; 1,0; 1,7$ . Согласно [4], диапазон углов, исследованный в настоящей работе, превышает критическое значение  $\alpha$ , и взаимодействие должно характеризоваться отошедшей интерференционной ударной волной и веерным течением вдоль плоскости преграды. Именно такая картина и наблюдается в экспериментах.

§ 2. Пользуясь обобщением полученных результатов в виде, представленном на рис. 4, рассмотрим изменение картины течения при различных  $L$  и  $\alpha$ . Для облегчения систематизации опытных данных условно выделим три диапазона углов.

$\alpha = 180 - 160^\circ$ . Течение качественно сходно с описанным в [1, 2]. С увеличением  $L$  реализуются следующие режимы:

стационарный со стабильной УВС и плоскостной симметрией (I на рис. 4);

автоколебательные режимы II и III с симметричными, продольными относительно осей струй, колебаниями при неподвижной поверхности раздела;

режим IV с нарушением продольной симметрии, когда течение на начальном участке одной струи становится невозмущенным, а поверхность раздела смещается ближе к другому соплу. Первая бочка истекающей из нее струи, возмущенной поверхностью раздела в асимметричном положении, совершает автоколебания. В этом случае наблюдается резкое возрастание уровня пульсаций давления для одного датчика и уменьшение для другого;

стационарный режим V с нарушением продольной симметрии, подобный IV, но без автоколебаний возмущенной струи (на рис. 4 его УВС не показана).

На режимах II, III амплитуды колебаний центрального скачка так же, как и уровень акустического излучения, при увеличении  $L$  достигают некоторого максимума, затем к моменту прекращения колебаний снижаются. В то же время частоты колебаний  $f$ , различные на режимах II и III, при увеличении  $L$  монотонно уменьшаются (см. рис. 3).

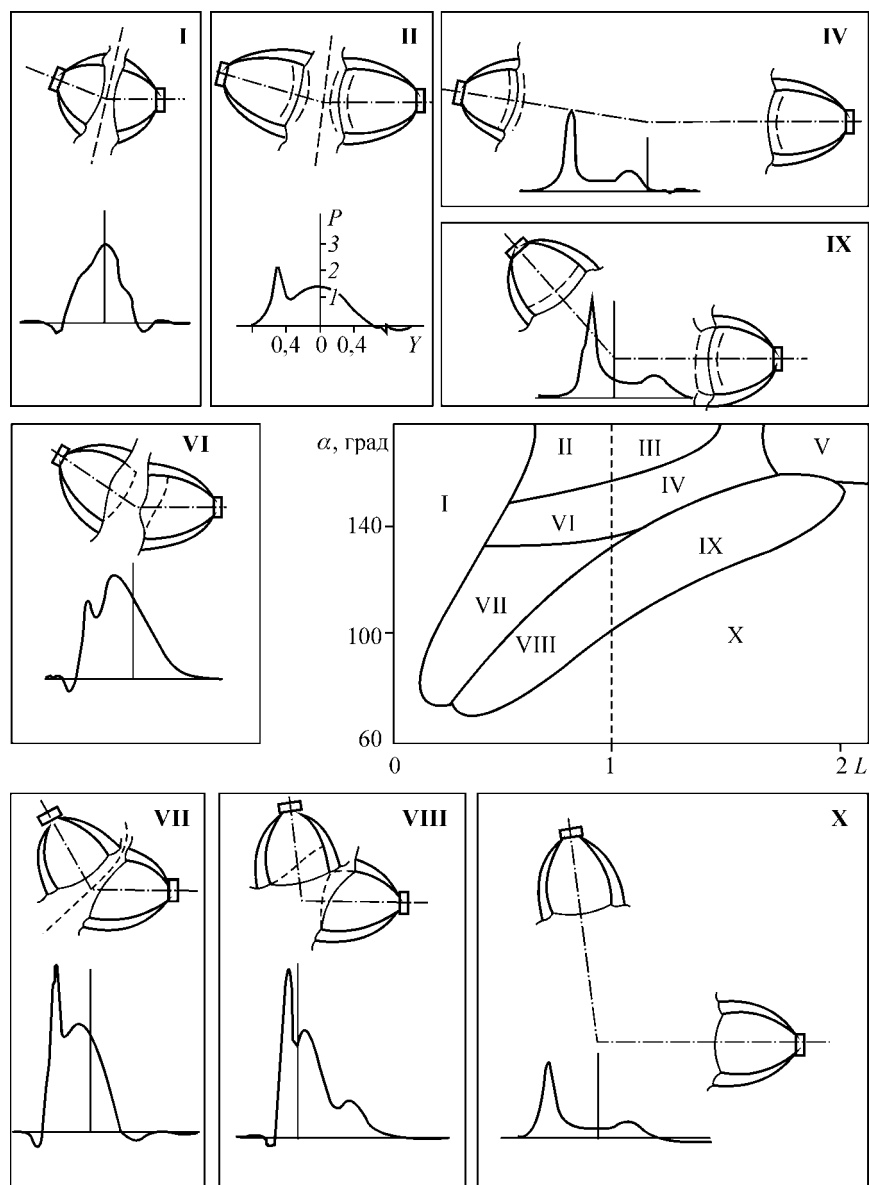


Рис. 4. Карта режимов течения при взаимодействии двух сверхзвуковых струй с переменным углом между их осями.

Распределения давления на имитирующей поверхности раздела преграде при увеличении  $L$  изменяются от кривой с одним центральным максимумом (режим I) к кривой с двумя периферийными максимумами (режим IV). Все кривые, полученные при  $\alpha/2 = 82^\circ$ , несколько деформированы по сравнению с распределением при  $\alpha/2 = 90^\circ$ .

Штриховая линия на рис. 4, продолжающая границу между режимами II и III, является условной границей, разделяющей режимы взаимодействия наклонных струй по следующему признаку: слева от нее деформируется или совершает автоколебания только часть центрального скачка, справа в автоколебаниях участвует вся УВС одной или обеих струй.

$\alpha = 150 - 130^\circ$ . Рассмотрим сначала область малых расстояний  $L$  (слева от штриховой линии на рис. 4). Уменьшение угла сопровождается режимом па-

дением частоты по сравнению с рассмотренными ранее режимами (данные для  $\alpha = 170$  и  $150^\circ$  на рис. 3), что связано, очевидно, с изменением механизма колебаний. Если автоколебания на режимах II и III были полностью подобны тем, что имеют место при встречном взаимодействии, то начиная с  $\alpha = 150^\circ$  возникают колебания УВС, присущие только взаимодействию струй под углом. В этом случае (режим VI на рис. 4) колебания совершает только часть УВС в области тройных точек струй, расположенных ближе друг к другу, причем колебания УВС обеих струй происходят в одной фазе и расстояние между тройными точками в пределах периода колебаний остается постоянным. Поверхность раздела и веерная струя совершают колебания относительно некоторого среднего положения с той же частотой. На распределениях давления видны два максимума. Один, более локализованный и расположенный ближе к соплу, является результатом взаимодействия с преградой потока из сжатого слоя струи, второй соответствует точке растекания потока по преграде.

Справа по условной границы ( $L \cong 1$ ) также фиксируются автоколебательные режимы, но, как отмечалось выше, автоколебания захватывают всю область течения, прилегающую к центральному скачку уплотнения. Описанный выше режим IV сменяется при уменьшении  $\alpha$  режимом IX. Для него характерны колебания УВС с большой амплитудой, которые сопровождаются мощным акустическим излучением. Амплитуды колебаний поверхности раздела и веерной струи близки к значениям в режимах II, III, но частоты колебаний имеют значения на порядок ниже — сотни герц (см. данные для  $\alpha = 170^\circ$  и  $\alpha = 150 - 130^\circ$  на рис. 3), что указывает на смену механизма колебаний. При визуализации течения в этом случае хорошо видны два крайних положения веерной струи и центрального скачка каждой струи. Одно из них близко к положению диска Маха в невозмущенной струе, что говорит в пользу синфазных колебаний УВС струй между двумя крайними положениями. Расстояние между центральными скачками в пределах периода колебаний меняется незначительно. Это подтверждается слабой зависимостью частоты от  $L$  (см. данные для  $\alpha = 150 - 130^\circ$ ,  $L > 1$  на рис. 3). Отметим, что амплитуда колебаний центрального скачка на режиме VI, также реализующемся при этих значениях  $\alpha$ , но при меньших расстояниях  $L = 0,5 - 1,0$ , существенно меньше. Подчеркнем также, что режим IV с автоколебаниями одной струи и невозмущенной первой бочкой другой струи является переходным от симметричных относительно поверхности раздела колебаний (режим III) к стационарному режиму V, а также к режиму IX с синхронными колебаниями УВС.

$\alpha = 130 - 70^\circ$ . С уменьшением  $\alpha$  на близких расстояниях частота  $f$  падает и формируется нестационарный режим VII со случайно-периодическими колебаниями УВС между двумя устойчивыми состояниями. В каждом из них центральный скачок одной струи деформируется в области тройной точки, расположенной ближе ко второй струе, волновая структура которой остается неизменной. Деформации центрального скачка возникают случайным образом попеременно то у одной, то у другой струи с периодом от долей секунд до десятков секунд. Поверхность раздела перестает быть плоской, веерная струя, образующаяся на периферии взаимодействия, направлена под углом около  $45^\circ$  в сторону недеформированной струи. Уровень пульсаций акустического давления соизмерим с уровнями на других режимах, но дискретная составляющая в частотных спектрах не фиксируется. Появление несимметричного течения с деформированной УВС было отмечено в [5] для струй с  $M_e = 1$ ,  $L = 0,51$ ,  $\alpha = 135^\circ$ , но систематические исследования этого режима не проводились. Режим VII реализуется в широких диапазонах  $\alpha$  и  $L$ . С уменьшением  $\alpha$  границы режима смещаются в область малых  $L$ . При осесимметричном взаимодействии [1, 2] этому диапазону расстояний ( $L \leq 0,6$ ) соответствует стационарный режим с радиальным растеканием от оси (см. I на рис. 4).

Природа возникновения неоднозначной газодинамической структуры (режим VII) связана со встречным взаимодействием кольцевых потоков газа в сжатых слоях между висячими скачками и границами струй. Результатом их взаимодействия на преграду или поверхность раздела являются локализованные периферийные пики давления (см. рис. 4). Как показали эксперименты, в диапазоне параметров, соответствующих режиму VII, равновесное симметричное состояние системы взаимодействующих струй с плоской поверхностью раздела не фиксируется и является статически неустойчивым, несмотря на выполнение условий нулевого перепада давлений во всех точках поверхности раздела. Любое малое возмущение периферийных кольцевых потоков, нарушающих условия равновесия, приводит к сдвигу тройных точек вдоль висячих скачков. При этом изменяются направления тангенциального разрыва и отраженного скачка уплотнения, исходящих из тройной точки. Центр давления периферийного потока от одной струи сместится дальше, а другой — ближе к точке пересечения осей струй. Под действием разности давлений от левой и правой струй меняется форма поверхности раздела. В результате распределения давления вдоль искривленной поверхности раздела снова выравниваются и формируется картина течения, показанная на рис. 4 (режим VII). При превышении запаса устойчивости данного асимметричного состояния поверхности раздела возможен переход в зеркально противоположное состояние. Оба эти состояния статически устойчивы.

С увеличением  $L$  в диапазоне углов, соответствующих режиму VII, частота смены струй с деформированной УВС возрастает и формируется автоколебательный режим VIII. Центральные скачки уплотнения двух струй остаются при этом на одинаковом расстоянии друг от друга, совершая синхронные совместные колебания большой амплитуды, причем колеблется только часть УВС, прилегающая к близкорасположенным тройным точкам. Для всех перечисленных ранее нестационарных режимов сохраняется основная тенденция снижения  $f$  при увеличении  $L$ . В области параметров, соответствующей выделенному режиму VIII, наоборот, с увеличением  $L$  частота  $f$  возрастает (см. рис. 3, данные для  $\alpha = 70 - 120^\circ$ ). Это также свидетельствует о принципиально ином, нежели у описанных выше режимов, механизме колебаний. Увеличение  $\alpha$  и приближение тройной точки к поверхности преграды приводит к резкому возрастанию первого максимума давления, что хорошо заметно на распределениях, соответствующих режимам VII и VIII ( $L = 0,55$ ,  $\alpha = 55$  и  $45^\circ$ ).

С уменьшением угла проявляется общая тенденция к стабилизации течения; при  $\alpha < 70^\circ$  и  $Re_L = 600$  течение стационарно при любых расстояниях и углах.

**§ 3.** Как известно, уменьшение параметра разреженности  $Re_L$  приводит к значительным переменам в УВС взаимодействующих струй [1, 2], изменениям границ и исчезновению некоторых характерных режимов взаимодействия. В частности, автоколебательные режимы для струй с  $M_e = 1$  при взаимодействии с преградой исчезают при  $Re_L = 130$  [1], в случае встречного взаимодействия — при  $Re_L = 80$  [2]. В проведенном исследовании автоколебательные режимы фиксировались вплоть до  $Re_L = 50$ . Сокращение области существования автоколебательных режимов с уменьшением  $Re_L$  наиболее интенсивно происходит при больших  $L$  (нижняя и правая границы режима IX). Так, для  $Re_L = 64$  режим IX существует только до  $L = 1,5$ .

Характерной особенностью встречного взаимодействия разреженных струй является появление при снижении  $Re_L$  стационарного режима с кососимметричной структурой между двумя автоколебательными режимами [2]. В данной работе этот режим наблюдался в диапазоне  $\alpha = 180 - 155^\circ$ , т. е. практически на всем протяжении границы II и III режимов. Точно оценить влияние параметра  $Re_L$  на границы между режимами II, IV, VII, VIII по данным визу-

альных наблюдений не удалось вследствие интенсивного размывания УВС при малых  $Re_L$ .

**§ 4.** Таким образом, проведенное исследование позволило выявить существование нескольких автоколебательных режимов различной природы во встречных струях с пересекающимися осями. Если автоколебания при  $\alpha = 180 - 160^\circ$  происходят при неподвижной поверхности раздела и идентичны описанным в [2], то многообразие выделенных в описанных экспериментах режимов обусловлено подвижностью этой поверхности и ее способностью деформироваться. Действительно, эксперименты по взаимодействию струй с плоской преградой, закрепленной на поворотном механизме, показали, что ее наклон, напротив, стабилизирует течение. Так, уменьшение угла наклона преграды к оси струи  $\alpha$  от  $90$  до  $78 - 81^\circ$  приводит к исчезновению автоколебаний и формированию стационарного течения с центральным скачком, наклоненным к оси струи. Напомним, что подвижность поверхности раздела при встречном взаимодействии [2] приводит к формированию режимов с косой симметрией и поверхностью раздела, наклоненной относительно оси, а также к режиму с нарушением продольной симметрии (режим V на рис. 4). В дополнение к этому в рассматриваемом случае поверхность раздела может деформироваться (режим VII) и участвовать в автоколебаниях УВС (режимы VI, VIII, IX).

Общим для описанных режимов (за исключением режима нерегулярных колебаний VII) является четко выраженная дискретная составляющая в частотных спектрах.

В целом, как видно из рис. 4, границы автоколебательных режимов при уменьшении  $\alpha$  расширяются.

В заключение отметим, что автоколебательные режимы можно реализовать при фиксированных газодинамических параметрах, варьируя только угол наклона. Например, при  $L = 1,8$  стационарный режим с нарушением продольной симметрии V при встречном взаимодействии сменяется при  $\alpha = 162^\circ$  режимом IX с интенсивными автоколебаниями, а затем при  $\alpha = 140^\circ$  снова происходит переход к взаимодействию с УВС, симметричной относительно плоскости, проходящей через биссектрису угла  $\alpha$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савин А.В., Соколов Е.И., Фаворский В.С., Шаталов И.В. Влияние разреженности на процесс нестационарного взаимодействия сверхзвуковой недорасширенной струи с перпендикулярной преградой // ПМТФ. — 1991. — № 6. — С. 78 — 83.
2. Соколов Е.И., Шаталов И.В. Встречное взаимодействие сверхзвуковых недорасширенных разреженных соосных струй // Теплофизика и аэромеханика. — 1999. — Т. 6, № 1. — С. 43 — 49.
3. Горшков Г.Ф., Усков В.Н., Фаворский В.С. Особенности нестационарного обтекания безграничной преграды недорасширенной струей // ПМТФ. — 1993. — № 4. — С. 58 — 65.
4. Анцупов А.В. Взаимодействие сверхзвуковой нерасчетной струи с плоской преградой // Тр. ЦАГИ. — 1975. — Вып. 1698.
5. Fujimoto T. and Ni-Iimi T. Three dimensional structures of interacting free jets // Progress in Astronautics and Aeronautics. — Vol. 116. — Pasadena, 1988. — P. 391 — 406.

*Статья поступила в редакцию 17 февраля 1999 г.*