

**УПРАВЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ТЕЛ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ ГАЗА ЗА СЧЕТ ВЫДУВА СТРУЙ ЖИДКОСТИ \****А. Е. Бердюгин, В. М. Фомин, В. П. Фомичев**Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,  
630090 Новосибирск*

Существуют различные подходы, позволяющие изменять структуру течения в ближней зоне около тел, обтекаемых сверхзвуковым потоком. Одним из активных способов управления сопротивлением тел в сверхзвуковых потоках является использование тонкой иглы, выступающей из головной части затупленного тела навстречу потоку [1]. При этом происходит перестройка течения, которая приводит к образованию так называемого отрывного течения и существенному уменьшению сопротивления обтекаемого тела. Основные исследования в области управления отрывом потока представлены в [2, 3]. Дальнейшее обобщение работ по управлению сопротивлением тел состояло в выдуве из иглы различных инертных и реагирующих газов, позволяющем управлять пульсациями потока в отрывных зонах около иглы, что существенно влияет на аэродинамические характеристики тел [4].

Активная перестройка сверхзвукового течения осуществляется, если в потоке присутствуют мелкие твердые частицы, особенно когда имеет место отскок частиц от обтекаемого тела [5–9] или специально организованный выдув двухфазного потока [10, 11]. Такая перестройка потока приводит к существенному уменьшению сопротивления затупленных тел.

Аналогичный эффект следует ожидать при локальном выдуве струй жидкости из затупленных тел навстречу сверхзвуковому потоку. Физическая картина взаимодействия струи жидкости со встречным потоком газа описана в [12]. Явление уменьшения сопротивления различных тел при локальном выдуве струй жидкости установлено авторами в [13, 14]. В данной работе проведено подробное изучение этого явления и установлены оптимальные режимы выдува струи жидкости, при которых происходит максимальное уменьшение сопротивления.

**1. Экспериментальная установка и измерения.** Изучались структура течения и последствия, которые возникают при взаимодействии струй жидкости, истекающих из передних критических точек различных осесимметричных тел, со встречным сверхзвуковым потоком газа. Эксперименты проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе ИТПМ СО РАН (Т-313) с размером рабочей части  $0,6 \times 0,6$  м при числах Маха набегающего потока  $M = 1,75; 2; 3; 4$  и числах Рейнольдса, полученных по параметрам набегающего потока и отнесенных к размеру  $1$  м ( $Re = (2,5 \div 5,5) \cdot 10^7$ ).

В качестве обтекаемых тел использовались тестовые модели НВ-1 и НВ-2, а также цилиндр диаметром  $60$  мм, длиной  $300$  мм со следующими головными частями: плоский торец (модель Т), конусы с углами при вершине  $20, 30, 38, 52, 110^\circ$  (соответственно модели Н20, Н30, Н38, Н52, Н110). Модели фиксировались в потоке на осевой державке. Жидкость подавалась из передней критической точки модели навстречу потоку через

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 94-01-01453).

цилиндрический канал (сопло) диаметром от 0,6 до 3 мм и длиной пять его диаметров. Кроме того, на модели Н110 вместо цилиндрического сопла устанавливались центробежные форсунки с углами распыла 15 и 25°. В качестве выдуваемой жидкости использовались незамерзающие при низких температурах этанол, керосин и смесь этиленгликоля с водой.

Конструкция моделей позволяла вместо сопел для выдува жидкости устанавливать стержень диаметром 6 мм с глубиной выдвижения из головной части модели до трех ее диаметров, который в зависимости от наконечника мог быть иглой или державкой для тела-лидера. В качестве тела-лидера использовались затупленные стреловидные наконечники или плоские диски диаметром 8; 12 и 16 мм. Все эксперименты проводились при нулевом угле атаки. Модели и сменные головные части приведены на рис. 1.

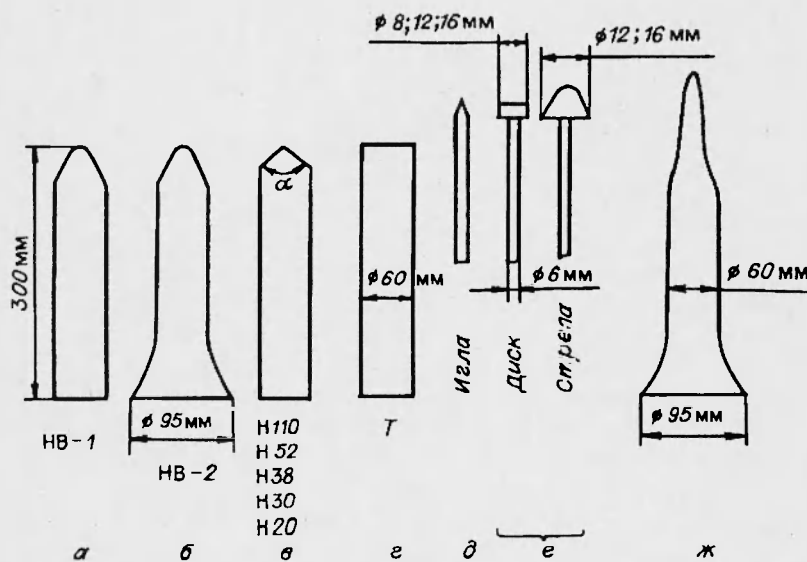


Рис. 1

В процессе экспериментов измерялись исходные параметры набегающего потока, весовые характеристики, а также производилась тепловизионная съемка картины течения с экспозицией  $1/30$  и  $4 \cdot 10^{-6}$  с.

Расход жидкости определялся по измерениям давления в коллекторе перед соплом, а также электромагнитным измерителем расхода ИР-61. При этом осуществлялась предварительная тарировка каждого сопла.

**2. Результаты экспериментов и их обсуждение.** По аналогии с обтеканием цилиндрических тел с иглой [1] естественно было ожидать уменьшения аэродинамического сопротивления моделей в сверхзвуковом потоке при подаче струи жидкости из головной части модели навстречу потоку. Эффект уменьшения аэродинамического сопротивления был зафиксирован при обтекании тестовой модели NB-2 и по абсолютной величине превосходил уменьшение сопротивления, вызванное установкой на модель NB-2 иглы оптимальной длины [1-3]. Как и в случае модели с иглой, подача струи жидкости приводила к изменению волновой структуры потока перед телом. Физическая картина взаимодействия струй жидкости со сверхзвуковым потоком, зафиксированная теневыми фотографиями, качественно совпадает с результатами [12], поэтому на особенностях, которые имеют место из-за различных геометрических форм моделей, остановимся

ниже.

Исследования эффективности воздействия на набегающий поток струй жидкости различных диаметров выполнены на модели НВ-2 при  $M = 2; 3; 4$ . Они показали, что величина уменьшения аэродинамического сопротивления модели определяется не только расходом жидкости, но и диаметром струи.

На рис. 2 приведены относительные изменения коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_x$  тестовой модели НВ-2 при различных

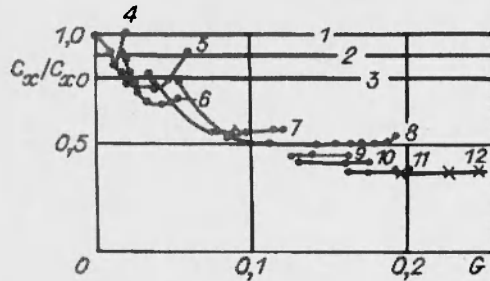


Рис. 2

условиях обтекания ее сверхзвуковым потоком при  $M = 4$ . Линия 2 показывает уменьшение  $C_x$ , вызванное установкой иглы длиной  $1,5D$  ( $D$  — диаметр цилиндрической части модели). Кривые 4–12 соответствуют значениям коэффициента  $C_x$  в зависимости от массового расхода жидкости при различных диаметрах  $d$  выходного отверстия сопел для подачи жидкости. Кривая 4 отвечает  $d/D = 0,006$ ; 5 — 0,009; 6 — 0,013; 7 — 0,025; 8 — 0,03; 9 — 0,033; 10 — 0,0366; 11 — 0,04; 12 — 0,05. Видно, что для каждого размера сопла существует величина относительного расхода, при которой коэффициент  $C_x$  минимален. Дальнейшее увеличение расхода жидкости приводит к росту  $C_x$ . По этому эффекту можно говорить о некоторой критической величине относительного расхода жидкости для каждого диаметра струи. По мнению авторов, критическую величину расхода можно описать числом Рейнольдса струи  $Re_c = V_c d_c / \nu_{ж}$  ( $V_c$  — скорость жидкости на выходе из сопла,  $d_c$  — диаметр сопла,  $\nu_{ж}$  — кинематическая вязкость жидкости). Значения  $Re_c$ , определенные по экспериментальным данным, для кривых 5–12 имеют предел  $(1,2 \div 1,4) \cdot 10^5$ , и только для очень тонкой струи (кривая 4)  $Re_c = 0,63 \cdot 10^5$ .

Из рис. 2 видно также, что увеличение диаметра струи более чем на  $0,04D$  не приводит к уменьшению аэродинамического сопротивления. Поэтому дальнейшее исследование эффекта снижения аэродинамического сопротивления различных затупленных тел при подаче струи жидкости из передней критической точки проводилось при толщине струи  $0,04D$ . В условиях данного эксперимента диаметр струи 2,4 мм. Изучение обтекания цилиндрических тел с различными головными частями было выполнено при одинаковых условиях подачи жидкой струи, близких к оптимальным.

На рис. 3 представлены результаты измерения коэффициентов аэродинамического сопротивления  $C_x$  различных моделей в зависимости от относительного расхода жидкости  $G$ :

$$G = \frac{\rho_c V_c d^2}{\rho_\infty V_\infty D^2}.$$

Здесь  $\rho_c$  и  $V_c$  — плотность и скорость жидкости на выходе из сопла;  $\rho_\infty$  и  $V_\infty$  — плотность и скорость натекающего газа.

Параллельно на оси абсцисс приведена шкала относительного скоростного напора  $K = \rho_c V_c^2 / \rho_\infty V_\infty^2$ . На всех исследуемых моделях при числах Маха от 1,75 до 4 увеличение относительного скоростного напора  $K$  от 1 до  $\sim 5$  приводит к уменьшению сопротивления. Причем у затупленных моделей типа НВ-1 или Н110 это уменьшение происходит в несколько раз. При дальнейшем увеличении расхода  $G$  сопротивление моделей начи-

нает расти, и лишь при  $M = 1,75$  и  $2$  выдув струи жидкости из острой модели Н20 не приводит к уменьшению сопротивления. С увеличением  $M$  эффект снижения сопротивления возрастает, и на оптимальных режимах выдува струи жидкости ( $1 \lesssim K \lesssim 5$ ) сопротивление моделей все меньше зависит от формы ее головной части.

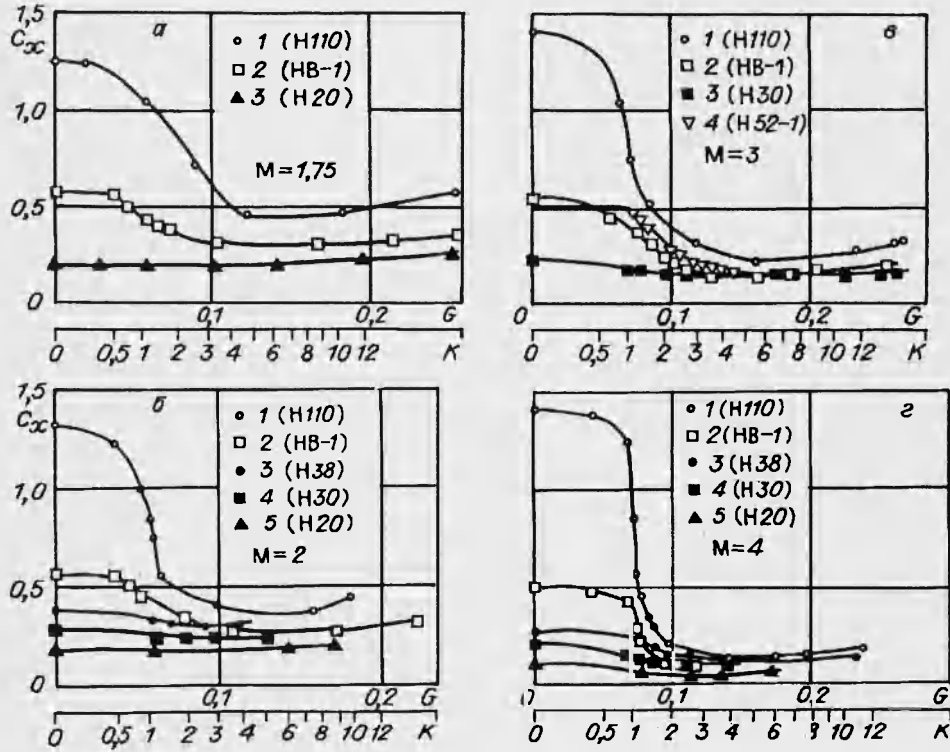


Рис. 3

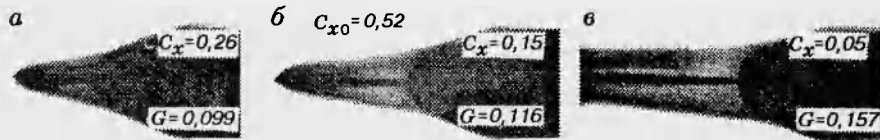


Рис. 4

На рис. 4 представлена серия теневых фотографий структуры течения при различных расходах жидкости, выдуваемой из модели НВ-1 через сопло диаметром  $d = 2,4$  мм при  $M = 4$ . Продолжительность экспозиции  $1/30$  с. В нижнем углу приведены значения расходов жидкости, выдуваемой через сопло, в верхнем дано соответствующее этой конфигурации значение коэффициента  $C_x$ , а также коэффициента  $C_{x0}$  при  $G = 0$ . На основе теневых фотографий была получена зависимость относительной глубины проникания струи  $L/r$  от относительного скоростного напора  $\sqrt{K}$  и представлена на рис. 5 для  $M = 2$  и  $4$ .

Поведение струи при взаимодействии со встречным потоком зависит от глубины проникания и относительного скоростного напора. При  $K < 1$

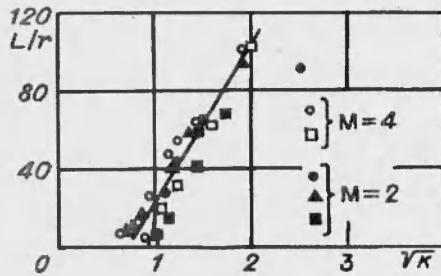


Рис. 5

струя жидкости не выходит за пределы ударного слоя у тела и положение ударной волны стационарное. Увеличение  $K$  приводит к перемещению ударной волны навстречу набегающему потоку. Струя жидкости расширяется до  $(1,6 \div 1,8)d$ , затем переходит в цилиндрический участок, длина которого возрастает с увеличением  $K$ . При достижении некоторой предельной для данного расхода глубины проникания струя утолщается, приобретает грибо- или каплеобразную форму, останавливается и распадается. Жидкость каплями уносится набегающим потоком. Особенно хорошо это видно на теневых картинах, приведенных на рис. 4, где показано обтекание модели НВ-1 сверхзвуковым потоком ( $M = 4$ ) при расходах жидкости 69; 81 и 110 г/с,  $K = 1,92; 2,65; 4,89$  соответственно. В случае, когда струя жидкости взаимодействует с ударной волной, осуществляется перестройка течения, имеющая существенно нестационарный характер. Частота пульсаций определялась по числу положений ударных волн на теневых фотографиях, полученных за время одной экспозиции  $3,3 \cdot 10^{-2}$  с.

На рис. 6 видны зафиксированные за время одной экспозиции  $5 \div 10$  положений ударной волны, что отвечает частоте  $0,15 \div 0,3$  кГц. Пульсации проявляются также и в форме границы «жидкого конуса», образованного газокпельным потоком после распада струи. Это хорошо видно на рис. 7, где приведена фотография потока с экспозицией  $4 \cdot 10^{-6}$  с при  $M = 2$  (модель Н110). Величины относительного расхода и коэффициента аэродинамического сопротивления даны на рис. 7. На рис. 8 приведены значения коэффициента сопротивления в зависимости от глубины проникания струи или длины выдвигания иглы (или стрелы) для различных моделей при  $M = 2$  и 4.

Как показывают результаты проведенных экспериментов, физическая картина взаимодействия жидкой струи с набегающим потоком газа качественно совпадает с обтеканием затупленных тел с иглой. Если сравнение режимов обтекания затупленных тел со струей, иглой и телами-лидерами типа стрелы проводить по величине уменьшения коэффициента сопротивления моделей, то режимы со струей жидкости лучше соотносятся с режимами обтекания модели со стрелой (рис. 1, е), что хорошо видно на рис. 8, а (модель Н110). В этом случае хорошо совпадают структуры течения перед телами (в частности, формы границ отрывного течения и «жидкого конуса», рис. 7, в, д). Однако для острых тел, когда установка иглы, согласно [1], не влияет на сопротивление и скачок остается присоединенным, выдув струи жидкости приводит к существенному уменьшению сопротивления. Например, на модели Н52 при  $M = 4$  выдув струи на оптимальном режиме снижает сопротивление в 8 раз (рис. 9), при  $M = 3$  — в 3 раза; игла и стрела в этих условиях на сопротивление не влияют.

Анализ опытных данных позволяет сделать вывод, что выдуваемая струя формирует фиктивное «жидкое» тело, имеющее оптимальное сопротивление в данном сверхзвуковом потоке. Для проверки этой гипотезы по форме фиктивного тела, получаемого при обтекании модели НВ-2 при  $M = 4$  с выдувом струи жидкости, создана модель со «сплошной» головной частью оживальной формы (рис. 1, ж). Испытания показали, что в обоих

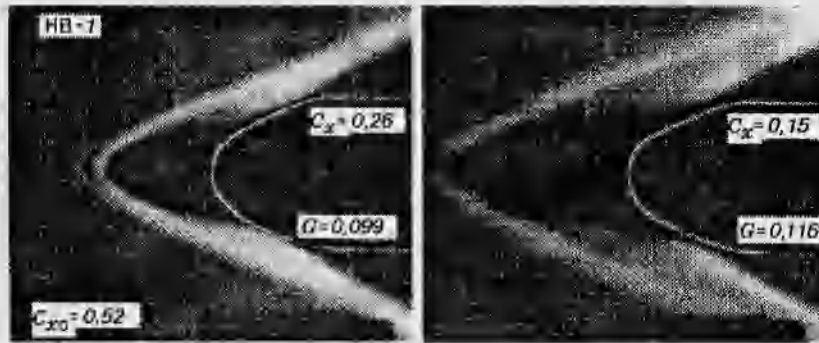


Рис. 6

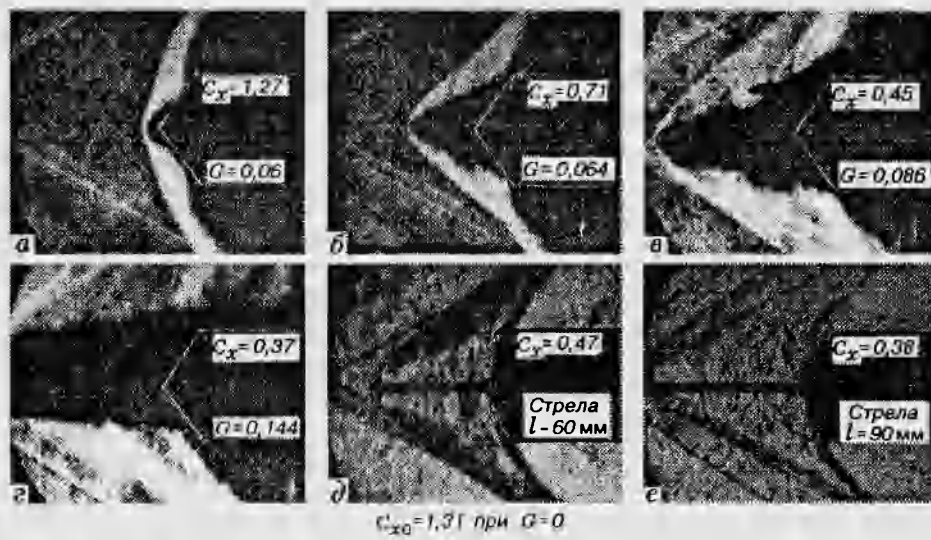


Рис. 7

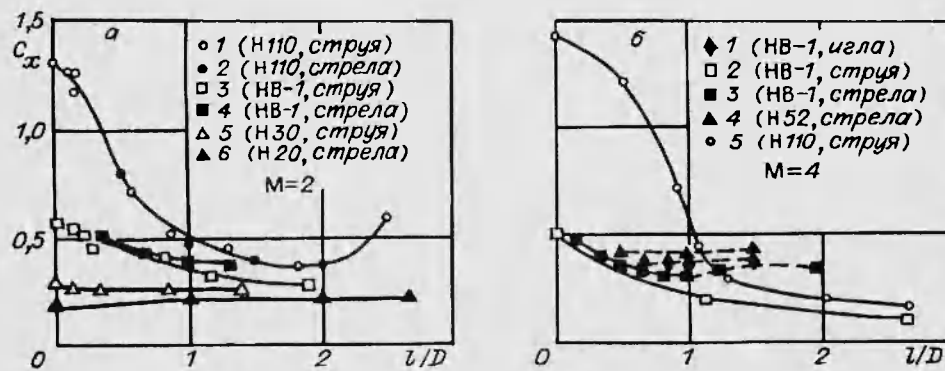


Рис. 8

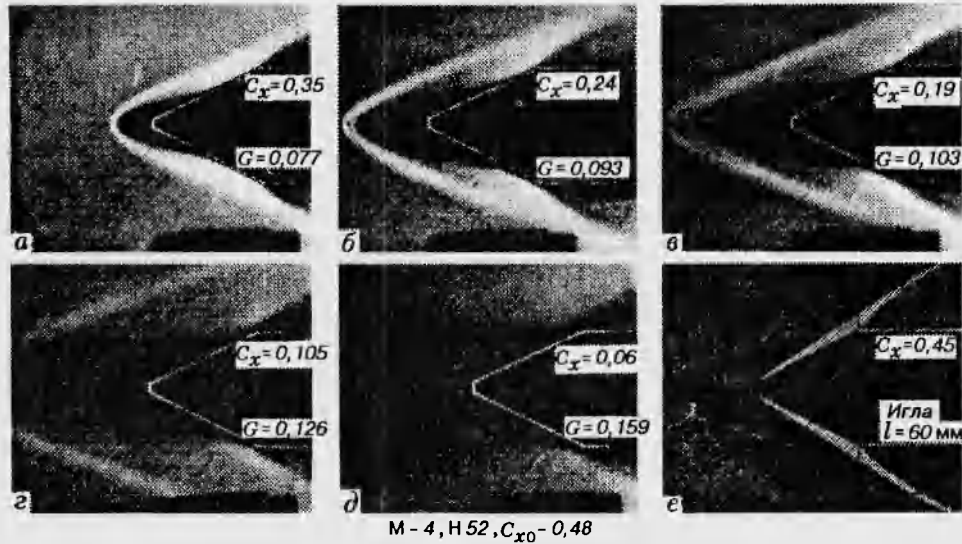


Рис. 9

случаях уменьшение сопротивления было сильнее, чем для модели с иглой ( $l/D = 1,5$ ) при  $M = 4$ . На рис. 2 линия 2 соответствует модели с иглой, 3 — модели с оживальной головной частью, 7 — модели НВ-2 с жидкой струей (диаметр сопла 1,5 мм), треугольником показан режим с длиной струи, равной длине выступающей оживальной части.

Сравнение режимов обтекания моделей со струей и оживалом показывает, что в случае воздействия струи жидкости на набегающий поток имеет место более сильное снижение сопротивления. Такое снижение не может быть объяснено только уменьшением сопротивления трения из-за уменьшения обтекаемой поверхности тестовой модели НВ-2 по сравнению с моделью, имеющей оживальную головную часть. Вероятно, что необходимый эффект снижения сопротивления обусловлен наличием циркуляционной зоны внутри «жидкого» тела перед головной частью модели.

В заключение отметим следующее: 1) установлено, что при локальном выдуве струй жидкости из затупленных тел навстречу сверхзвуковому потоку газа происходит перестройка течения, приводящая к существенному уменьшению сопротивления; 2) найдены режимы течения, при которых уменьшение сопротивления тел имеет оптимальные параметры.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Wood C. J. A Study of Hypersonic Separated Flow: Thes. ... doct. philosophy. Univ. of London, 1961.
2. Чжен П. Отрывные течения. М.: Мир, 1973. Т. 2.
3. Чжен П. Управление отрывом потока. М.: Мир, 1979.
4. Баев В. К., Гаранин А. Ф., Третьяков П. К. О взаимодействии струи водорода со встречным сверхзвуковым потоком // Физическая газодинамика: Сб. ст. / АН СССР. Сиб. отд.-ние. Ин-т теорет. и прикл. механики. 1976. Вып. 6. С. 50-52.
5. Brinich P. Blunt body separation at supersonic speeds // J. Aeronaut. Sci. 1958. V. 5. P. 336-337.
6. Бакум Б. И., Домбровская Т. Н., Лагутин В. И. Влияние запыленности потока на результаты испытаний в гиперзвуковых аэродинамических трубах // Изв. АН СССР. МЖГ. 1970. № 4. С. 187-189.

7. Хоув Д. Т., Смит А. А. Голографический анализ возмущений головной ударной волны за счет присутствия частиц в гиперзвуковом потоке // Ракетная техника и космонавтика: Пер. журн. AIAA Journal. 1975. Т. 13, № 7. С. 135–137.
8. Данбар Л. Е., Котни Я. Ф., Макмиллен Л. Д. Возрастание тепловых нагрузок в условиях обтекания тел запыленными гиперзвуковыми потоками // Там же. С. 83–89.
9. Яненко Н. Н., Алхимов А. П., Нестерович Н. И. и др. Изменение волновой структуры при обтекании тел сверхзвуковым двухфазным потоком // Докл. АН СССР. 1981. Т. 260, № 4. С. 821–825.
10. А. с. 906203 СССР. Способ воздействия на сверхзвуковой поток / С. С. Кацнельсон, Ю. Н. Нечаев, В. М. Фомин и др. // Открытия. Изобрет. 1982. № 6. С. 270.
11. Гриднев Н. П., Кацнельсон С. С., Фомин В. М., Фомичев В. П. Экспериментальное и теоретическое исследование улучшения аэродинамических характеристик сверхзвукового обтекания тел при выдуве из них струи газа с частицами // Сиб. физ.-техн. журн. 1991. Вып. 4. С. 36–39.
12. Коваль М. А., Швец А. И. Взаимодействие струи жидкости со встречным потоком газа // Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. № 3. С. 178–181.
13. А. с. 1520957 СССР. Способ воздействия на сверхзвуковой поток / Ю. Н. Нечаев, В. Е. Подзин, Л. Н. Пузырев и др. // Открытия. Изобрет. 1989. № 41. С. 275.
14. Фомин В. М., Фомичев В. П., Бердюгин А. Е. и др. Исследование обтекания модели со струей, подаваемой из головной части модели навстречу потоку // Современные проблемы механики жидкости и газа: Тез. докл. V Всесоюз. школы-семинара. Иркутск, 1990. С. 299–300.

*Поступила в редакцию 28/VII 1994 г.,  
в окончательном варианте — 10/X 1994 г.*

---