

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ИНЖЕКЦИИ

В. А. Забайкин

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Проведено экспериментальное исследование эффективности выгорания водорода в сверхзвуковом воздушном потоке при различных способах подачи топлива. Регистрация излучения радикала ОН по длине факела позволила определить интенсивность горения и полноту сгорания. Выявлены особенности и характер тепловыделения при применении каждого из исследованных способов подачи, что позволяет подбором соответствующих инжекторов реализовать необходимый закон тепловыделения.

Для реализации горения с заданным распределением тепловыделения по длине факела большое значение имеет способ подачи горючего в воздушный поток. Однако систематизированных данных о возможностях различных схем подачи явно недостаточно.

Цель данной работы — исследование различных способов подачи водорода, в том числе комбинированных схем, при неизменных параметрах сверхзвукового воздушного потока.

Эксперименты проводили на стенде сверхзвукового горения с электродуговым подогревом воздуха, описание которого подробно представлено в [1]. Схемы инжекторов и места подачи горючего показаны на рис. 1. Горячий воздух, нагретый в электродуговом подогревателе до температуры, обеспечивающей самовос-

пламенение водорода, истекал через сверхзвуковое профилированное воздушное сопло (числа Маха $M = 1,4$ или $2,2$) в свободное пространство и далее поступал в эжектор. Полное давление воздушного потока составляло $p_0 = (3,5 \div 5) \cdot 10^5$ Па при $M = 1,4$ и $p_0 = (5 \div 7) \cdot 10^5$ Па при $M = 2,2$; в большинстве проведенных экспериментов $p_0 = (4,5 \div 5) \cdot 10^5$ Па. Инжекторы, представляющие собой цилиндрическую трубку с внешним диаметром 10 мм, располагались по оси воздушного сопла. Внутри инжектора размещались различные устройства: цилиндрическая трубка с внутренней диаметром 8 мм для прямоочной подачи (см. рис. 1, а), сверхзвуковое сопло ($M = 2$) (см. рис. 1, б), устройство для закрученной подачи, описанное в [1, 2], трубка с отверстиями для перпендикулярной подачи топлива (см. рис. 1, в). Для встречной подачи использовали в основном схему с тремя пилонами, разнесенными на угол 120° (см. рис. 1, г и 2, а). Пилоны монтировали в секцию длиной 20 мм, которая пристыковывалась непосредственно к соплу. Диаметр отверстий на пилонах 0,8 мм. Диапазон температур в большинстве экспериментов (кроме специально оговоренных случаев) составлял $1300 \div 2200$ К.

В экспериментах регистрировалось распределение интенсивности I ультрафиолетового излучения радикала ОН по длине факела, что позволяло исследовать структуру факела и определять полноту сгорания [1–3]. Кроме того, проводилась фото- и киносъемка факела, а в ряде экспериментов — и теневая съемка. Регистрация велась вдоль струи на расстоянии до 300 мм от среза воздушного сопла, а в некоторых случаях — до 600 мм.

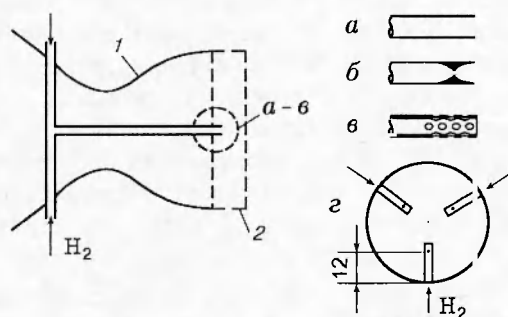


Рис. 1. Схема эксперимента и конструкции инжекторов:

1 — воздушное сопло, 2 — место установки секции г; а-в — осевые инжекторы, г — секция встречной подачи топлива с трех пилонов (вид спереди)

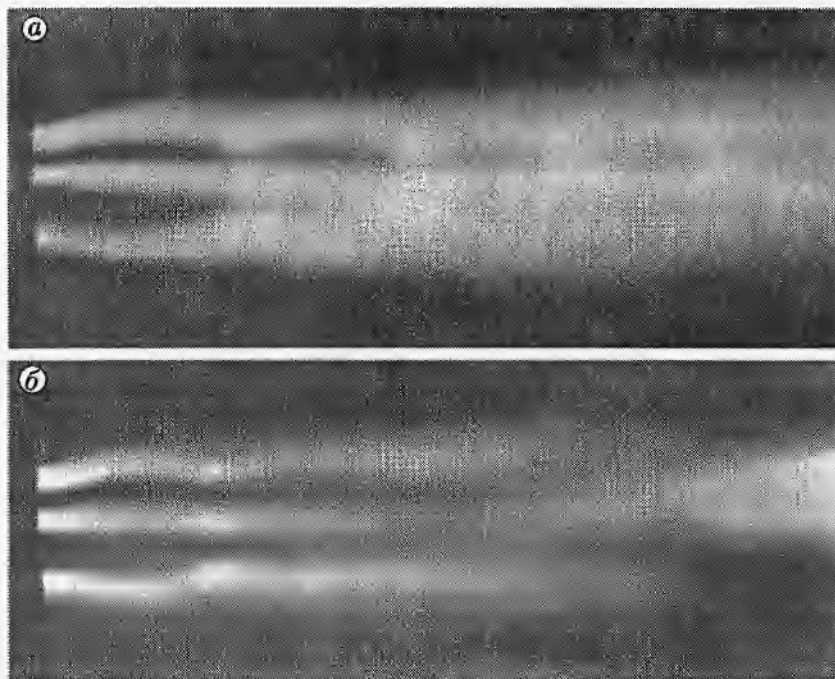


Рис. 2. Фотографии пламени при встречной подаче топлива с трех пилоннов (а) и при комбинированной подаче (б)

Прямоточный способ подачи топлива наиболее изучен. Поэтому в данной работе он использован для сравнения. Монотонный характер нарастания интенсивности горения при таком способе подачи несколько искажается только волновой структурой сверхзвуковой воздушной струи. Вследствие этого наблюдается периодическое повышение и понижение интенсивности излучения радикалов ОН [1, 2]. Выгорание практически полностью определяется турбулентной диффузией водорода в воздушный поток, т. е. процессом смешения. Полуугол раствора конуса пламени, измеренный по фотографиям, равнялся 3° . Граница воздушной струи, по тепловым снимкам того же режима, расширялась в данной области на угол до 4° .

Во всех случаях с воспламенением H_2 от кромки инжектора ($M = 2,2$, $T \geq 1300$ К; $M = 1,4$, $T \geq 2200$ К) полнота сгорания на длине до 300 мм была невысокой (до 30% для расхода топлива $G_{H_2} = 6$ г/с, рис. 3,а). При изменении расхода H_2 интенсивность горения факела на данной длине существенно не менялась — начальные части кривых интенсивности излучения ОН при $G_{H_2} = 2 \div 8$ г/с достаточно хорошо повторяли друг друга. Это еще раз свидетельствует о диффузионном механиз-

ме горения со слабым смещением топлива с воздухом в сверхзвуковом потоке при таком способе подачи. Достаточно большая полнота сгорания в этом случае возможна только на большом расстоянии.

В данной работе исследование спутной прямоточной струи проводили с инжекторами различной длины, выступавшими за срез сопла на расстояние $0 \div 35$ мм. В некоторых опытах при большой длине инжектора (> 20 мм) на его конец падал веер волн разрежения, исходящий от кромки воздушного сопла. Это приводило к образованию отрывной зоны, в которую поступал водород, и горение начиналось с боковой поверхности инжектора, а не за ним. Однако плавный характер выгорания всей струи, угол расширения факела и количество сгоревшего H_2 были те же, что и в других случаях горения водорода при таком способе подачи.

Спутная подача топлива со сверхзвуковой скоростью. Сверхзвуковой поток H_2 обеспечивался коническим соплом (см. рис. 1,б). Данная схема подачи широко применяется во многих исследованиях (см., например, [4, 5]). В условиях настоящих экспериментов ($M_{\text{возд}} = 2,2$, $T \geq 1300$ К) интенсивность горения при сверхзвуковой подаче на расстояниях до $8 \div 12$ ка-

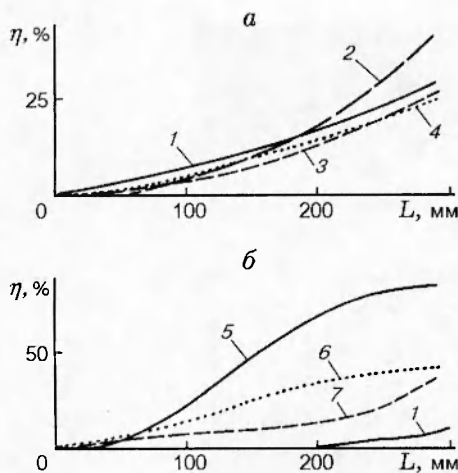


Рис. 3. Полнота сгорания водорода при прямооточной (1), закрученной (2, 3), сверхзвуковой (4), перпендикулярной (5), встречной (6) и комбинированной (7) подачах:

2, 3 — степень закрутки $n = 2,4$ и 1 соответственно; L — расстояние от среза воздушного сопла; а — $M = 2,2$, $T_0 = 1300$ К, $G_{H_2} = 6$ г/с; б — $M = 1,4$, $T_0 = 1850$ К, $G_{H_2} = 2$ г/с

либров водородного инжектора возрастает слабее, чем при прямооточной (при прочих равных условиях), причем возможен и отрыв пламени от инжектора. Полуугол расширения зоны горения вначале равняется $\approx 2,5^\circ$ далее он возрастает до 3° с появлением хорошо заметного факела. Характер и интенсивность горения достаточно близки к наблюдаемым в опытах для прямооточного факела (с поправкой на сдвиг начала активного тепловыделения (см. рис. 3,а)). Угол раскрытия факела близок к таковому при прямооточной подаче и к данным работы [4], где при подаче H_2 с $M = 1,46$ по оси в горячий воздушный поток с $M = 1,86$ полуугол раствора конуса пламени равнялся $2 \div 3^\circ$. Такую подачу (как и прямооточную) можно использовать в случаях, когда требуется слабый теплоподвод, например в каналах постоянного сечения при необходимости избежать режимов теплового запыриания.

Подача топлива навстречу потоку. Такой способ по характеру выгорания также близок к прямооточной подаче, но имеются и свои особенности. Во-первых, непосредственно в месте вдува встречная струя быстро расширяется, занимая сечение, большее диаметра инжектора. Во-вторых, устройства подачи (пилонны), находящиеся внизу по потоку, всегда влияют

на стабилизацию пламени. Поэтому в тех условиях, когда при прямооточной подаче факел уже оторвался от инжектора, при встречной подаче задержки воспламенения не наблюдается (см. рис. 3,б, кривые 1 и 6, для которых $G_{H_2} = 2$ г/с). Более того, эксперименты показали, что после поджигания топлива горение могло продолжаться и при понижении температуры воздушного потока до 1100 К. При прямооточной подаче в этом случае горение полностью прекращалось. Однако, это относится, скорее, к конструктивным особенностям инжекторов, а не к физике процесса горения в сверхзвуковом потоке. Отметим, что секция с тремя пилоннами применялась в дальнейшем для организации совместной подачи с рядом осевых инжекторов.

Подача топлива осевым инжектором через отверстия перпендикулярно потоку характеризуется большой интенсивностью смешения и высокой полнотой сгорания на малой длине (рис. 3,б, 4,а, 5,а). В исследованиях использовали инжектор с 28 отверстиями (диаметром $0,8$ мм), расположенными в шахматном порядке, по 3–4 отверстия в ряд, каждый ряд через 45° по окружности (см. рис. 1,в), а также инжекторы с 8 и 16 отверстиями, в том числе расположенными в ряд. Характер горения практически не изменялся для всех модификаций этого типа инжектора. Горение всегда начиналось от среза инжектора, чему способствует зона рециркуляции за торцом. Эта зона настолько эффективно стабилизирует пламя, что горение за инжектором обычно продолжается и при отключении подогрева воздуха, в широком диапазоне скоростей воздушного потока — от дозвуковой до сверхзвуковой. Следует отметить, что шахматное расположение отверстий оказалось эффективнее расположения в ряд. Так, при отключении подогревателя и последующем быстром снижении температуры потока до 270 К у инжектора с расположением отверстий в ряд иногда наблюдался срыв пламени. В случае шахматного расположения отверстий горение всегда продолжалось.

Сегнерово колесо. В такой конструкции активного инжектора часть трубки с перпендикулярной подачей (где находятся отверстия) сделана вращающейся. Для обеспечения ее самовращения отверстия просверлены под углом к окружности трубки, и выходящий водород закручивает кольцо (принцип сегнерова колеса). Скорость вращения в рабочих режимах $1900 \div 2000$ об/мин. Эксперименты показали,

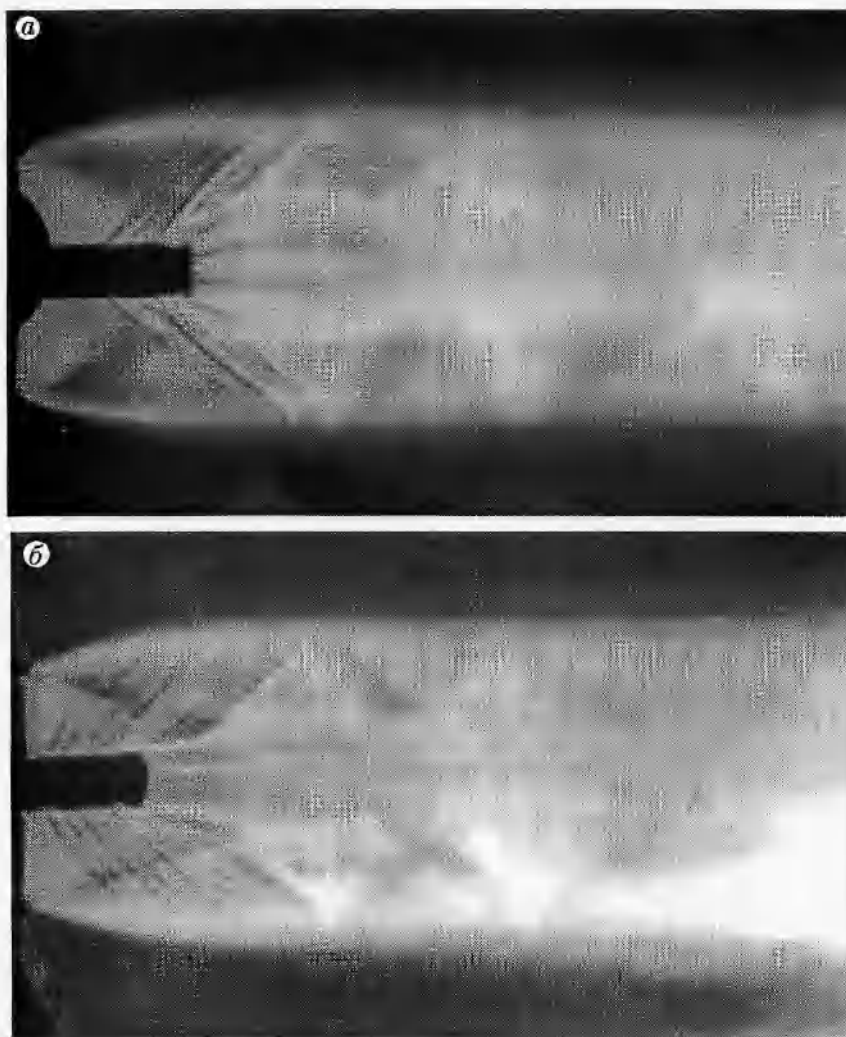


Рис. 4. Тепевые фотографии факела в холодном потоке:
а — перпендикулярная подача, *б* — сегнерово колесо

что наблюдался факел, похожий на факел при чисто перпендикулярной подаче. Однако интенсивное горение начиналось только на некотором расстоянии от торца инжектора (равном 2–3 калибрам инжектора). Это особенно хорошо видно в сравнении с перпендикулярной подачей в холодном потоке (см. рис. 4, *а, б*). Использование «активного» инжектора дает возможность реализовать факел с небольшой задержкой фазы интенсивного горения. В дальнейшем выгорание происходит так же, как при перпендикулярной подаче.

Закрученная подача топлива. Данный способ по характеру выгорания занимает промежуточное положение между прямоточной и

перпендикулярной подачами и подробно исследован и описан в [1, 2]. Напомним, что при закрутке диаметр топливной струи на начальном участке увеличивается быстрее, чем при прямоточной подаче. Это приводит к сдвигу максимума тепловыделения к началу факела, после чего начинается плавный спад интенсивности горения. Другая особенность закрученной подачи — задержка воспламенения при снижении температуры воздушного потока — наблюдается раньше, чем у прямоточной струи, что также связано с лучшим смешением на начальном участке холодного водорода с воздухом.

Дополнительные эксперименты показали, что данные отличия наглядно проявляются

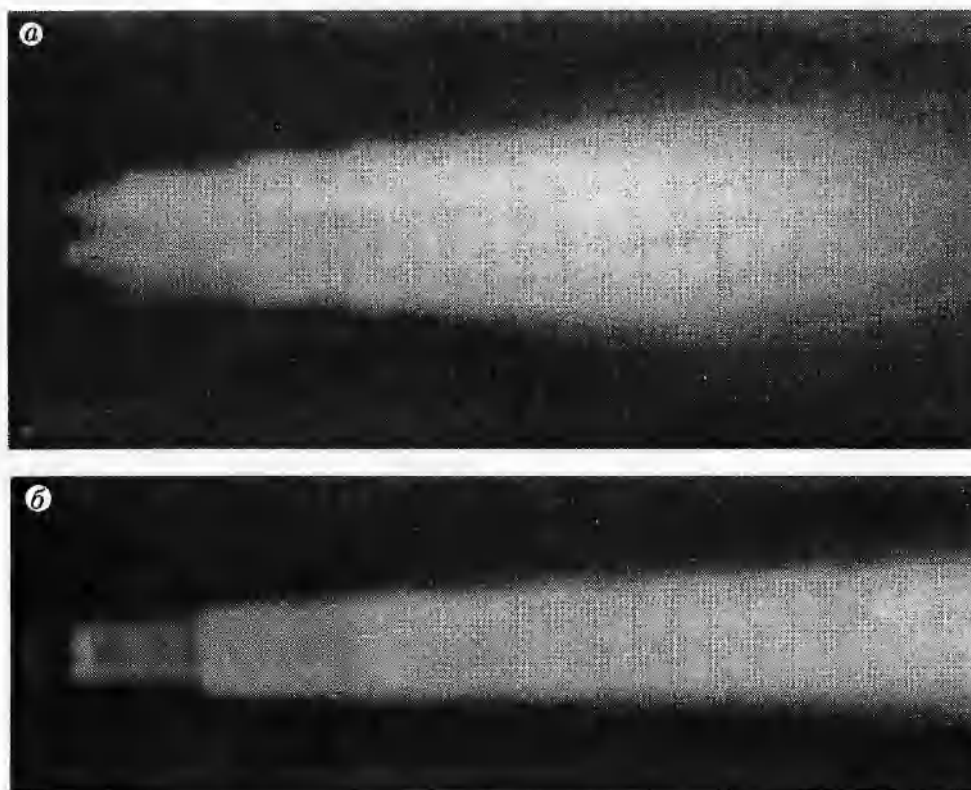


Рис. 5. Вид факела H_2 при перпендикулярной подаче топлива:
a — инжектор выдвинут в поток, *б* — инжектор внутри канала

только при сильной закрутке. В работах [1, 2] степень закрутки n инжектора, определенная как отношение средних по расходу значений тангенциальной и осевой скоростей, равнялась $\approx 2,4$ (см. рис. 3, *a*, кривая 2). При снижении до $n = 1$ интенсивность горения возрастает не намного быстрее, чем при прямооточной струе, однако задержка воспламенения может сохраниться (см. рис. 3, *a*, кривая 3), т. е. закрученная подача теряет свои преимущества перед прямооточной.

Комбинированная подача топлива. Исследованы следующие схемы комбинированной подачи топлива: встречная подача с трех пилонов с одновременной осевой подачей прямооточным инжектором, закрученным или перпендикулярным. Доля встречной подачи от общего расхода водорода составляла $15 \div 20\%$. Общий результат всех комбинаций — снижение интенсивности горения по сравнению с одиночными подачами. На рис. 3, *б* представлены кривые выгорания водорода как при одиночной, так и при совместной подаче (инжектор с перпендикуляр-

ной подачей). Интенсивность горения и полнота сгорания снижались в любой из вышеназванных комбинаций, причем полнота сгорания на расстоянии $280 \div 300$ мм могла уменьшаться в 2–3 раза. Возможно появление задержки воспламенения осевой струи, даже в случае, когда применяется инжектор с перпендикулярной подачей (см. рис. 2, *б*). Видно, что внешние факелы (периферийные струи) противодействуют расширению осевой струи и ухудшают ее горение — один тип подачи активно воздействует на другой. С увеличением расхода водорода отдельные факелы сливаются в один общий (примерно в 100 мм от места подачи), но только на расстоянии больше 200 мм внешний диаметр единого факела начинает заметно расти. Это соответствует и фиксируемому тепловизором улучшению хода кривой полноты сгорания (см. рис. 3, *б*, кривая 7).

Здесь можно провести аналогию с действием твердой стенки. Это подтверждается экспериментом, в котором устанавливался только инжектор с перпендикулярной подачей,

но к соплу пристыковывался небольшой цилиндрический канал, по длине равный выступающей части инжектора (35 мм), так что отверстия подачи H_2 оказывались внутри канала. В таком случае отдельные струйки водорода уже не имели свободы для расширения, а факел видоизменял свою форму и уменьшался в диаметре, снижая и интенсивность горения по длине (см. рис. 5). Возможно, что при комбинированной подаче горящие топливные струи оказывают сильное воздействие друг на друга, подобное воздействию твердой поверхности, изменяя тем самым геометрию факела, интенсивность горения и характер тепловыделения.

ВЫВОДЫ

Тепловыделение по длине факела при различных способах подачи топлива имеет свои особенности.

Прямоточная подача и сверхзвуковой спутный вдув дают слабое монотонное увеличение интенсивности горения, связанное с плохим перемешиванием струй со сверхзвуковым воздушным потоком. Возможен также отрыв пламени от инжектора. Такой способ подачи целесообразно применять при необходимости слабого теплоподвода, например, чтобы не вызвать теплового заклинивания в каналах постоянного сечения. Достоинство прямоточного инжектора заключается и в простоте конструкции.

Встречная подача сходна с прямоточной, но горение всегда начинается от места подачи и начальный диаметр факела из-за лучшего смешения в точке вдува превышает диаметр отверстий подачи.

Закрученная подача отличается более быстрым нарастанием интенсивности горения на начальном участке, после чего следует такой же плавный спад, как у прямоточной подачи.

Подача с осевого инжектора перпендикулярно потоку воздуха дает наибольшую скорость возрастания интенсивности горения и, соответственно, наименьшую длину полного выгорания топлива. Такая подача рекомендуется для получения особо интенсивного горения на малой длине. Модернизация последнего

способа вращением инжектора (сегнерово колесо) позволяет отодвинуть от торца инжектора начало зоны интенсивного горения топлива.

Комбинация встречной подачи с осевой при расположении инжекторов в одном сечении приводит к снижению интенсивности горения по сравнению с одиночным вдувом. Это необходимо учитывать при многоточечной (многопилонной) подаче топлива, даже если факелы не сливаются друг с другом.

Используя особенности различных способов подачи топлива либо комбинируя их, можно получить необходимый закон тепловыделения, а перераспределяя подачу — управлять им.

ЛИТЕРАТУРА

1. Забайкин В. А., Лазарев А. М. Влияние различных способов подачи водорода на его выгорание в сверхзвуковом потоке воздуха // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1986. Вып. 1. С. 44–49.
2. Забайкин В. А., Лазарев А. М., Соловова Е. А. Выгорание прямой и закрученной спутных струй водорода в сверхзвуковом потоке горячего воздуха // Структура газофазных пламен: Материалы Междунар. семинара по структуре газофазных пламен. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1984. Ч. 1. С. 226–233.
3. Горение в сверхзвуковом потоке / В. К. Баев, В. И. Головичев, П. К. Третьяков и др. Новосибирск: Наука, 1984. С. 304.
4. Cohen L. S., Guile R. N. Measurements in free jet mixing/combustion flows // AIAA Journal. 1970. V. 8, N 6. P. 1053–1061. (См. также: Козн Л. С., Гиль Р. Н. Экспериментальное определение поля течения свободных струй при наличии смешения и горения // Ракет. техника и космонавтика. 1970. Т. 8, № 6. С. 79–90).
5. Барановский С. И., Левин В. М., Надворский А. С., Турицев А. И. Экспериментально-теоретическое исследование спутных сверхзвуковых реагирующих струй // Турбулентные течения в реагирующих потоках: Материалы Междунар. школы-семинара. Минск: ИТМО АН БССР, 1986. С. 84–98.

Поступила в редакцию 30/XII 1997 г.,
в окончательном варианте — 5/V 1998 г.