

ГОРЕНИЕ ВОДОРОДА В ОСЕСИММЕТРИЧНОМ КАНАЛЕ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

В. А. Забайкин, А. А. Смоголев

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск
lab2@itam.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования горения водорода в сверхзвуковом высокоэнтальпийном воздушном потоке в осесимметричных каналах постоянного и переменного сечения. Исследованы условия перестройки течения при организации теплоподвода в каналах различной геометрии. Показано, что при газодинамическом воздействии достигается устойчивое самовоспламенение и появляется возможность управления горением в расширяющихся каналах специального профиля.

Ключевые слова: сверхзвуковой поток, горение водорода, геометрия каналов.

Анализ исследований, связанных с организацией горения в канале при сверхзвуковой скорости потока на входе, позволяет выделить ряд проблем, без решения которых невозможно обеспечить надежную работу двигателя гиперзвукового летательного аппарата. В первую очередь к ним следует отнести непредсказуемость реализации того или иного режима горения в диапазоне параметров полета, соответствующих числам Маха $M = 5 \div 8$. Речь идет о режимах диффузионного и «псевдоскачкового» горения, а также о проблеме теплового запыления, что становится особенно актуальным при необходимости организации эффективного теплоподвода в этих условиях [1–7]. На переход к тому или иному режиму оказывают значительное влияние конфигурация канала и способ инициирования горения. В гладких, особенно в расширяющихся, каналах существуют также трудности с надежной стабилизацией пламени и достижением приемлемой полноты сгорания. Применяющиеся классические устройства для стабилизации пламени, создающие отрывы потока и зоны рециркуляции (клинья, уступы, пилоны и т. п.), как правило, увеличивают zagrożение канала и находятся под воздействием высокотемпературных потоков. Это повышает требования к системам теплозащиты, которые, в свою очередь, значительно увеличивают вес и габариты двигателя. Существенным фактором является также возрастание потерь полного давления, ведущее, особенно при вы-

соких температурах потока, к ухудшению баланса между тягой, создаваемой за счет химических реакций, и внутренними потерями по тракту двигателя. Поэтому важно развивать газодинамические [8–10] и кинетические [11–14] способы управления горением, являющиеся особенно перспективными при переходе к высоким температурам, характерным для скоростей полета, соответствующих числам Маха $M \geq 8 \div 10$.

Целью данного экспериментального исследования было определение влияния геометрии канала и начальных параметров воздушного потока на стабилизацию пламени и интенсивность горения при спутной подаче водорода.

Исследования проводились на стенде сверхзвукового горения с электродуговым подогревом воздуха [15]. Каналы присоединялись к осесимметричному соплу, рассчитанному на число Маха $M = 2.2$ с диаметром на выходе 50 мм. В экспериментах температура торможения составляла $T_0 = 1500 \div 2700$ К, давление торможения $p_0 = 5 \div 8.5 \cdot 10^5$ Па, расход воздуха $0.5 \div 1$ кг/с. Водород подавался спутно из инжектора ($M = 2.7$, расход $1.9 \div 11$ г/с, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1.4 \div 10$), установленного по оси сопла. В отличие от работы [8], где использовалось сопло с числом Маха $M = 1.4$, что обеспечивало истечение с недорасширением, в данной работе воздушная струя на выходе из сопла (а также из канала) в затопленное пространство была перерасширенной; степень нерасчетности $n \approx 0.6 \div 0.7$.

Канал постоянного сечения (диаметром

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-08-00735).

50 мм) набирался из отдельных секций длиной 100, 150 и 200 мм. Общая длина канала 450 мм.

После включения плазмотрона в горячем воздушном потоке происходило самовоспламенение водорода, однако процесс запуска имел свои особенности, которые существенно влияли на процесс горения в канале. В начальный момент времени всегда происходил значительный рост температуры (до уровня выше $3\,000 \div 4\,000$ К), что, как правило, приводит к немедленному «запиранию» канала до выхода на экспериментальный режим. Поэтому была применена специальная схема запуска, при которой в топливный инжектор сначала подавался воздух (необходимый для охлаждения инжектора), а после выхода на режим происходило переключение на подачу водорода. В этом случае воспламенение и последующее горение водорода определялись только параметрами течения на заданном режиме.

В канале длиной 450 мм при температуре торможения воздуха ниже 2000 К интенсивное горение водорода наблюдалось только на выходе из канала. При этом пламя имело форму, характерную для факела в затопленном пространстве (рис. 1, *a*). Видимое отличие состояло лишь в большей площади поперечного сечения пламени в месте воспламенения (вследствие предварительного перемешивания водорода и воздуха в канале), а регистрация излучения ОН показала отсутствие характерной «бочкообразной» структуры внутри зоны горения

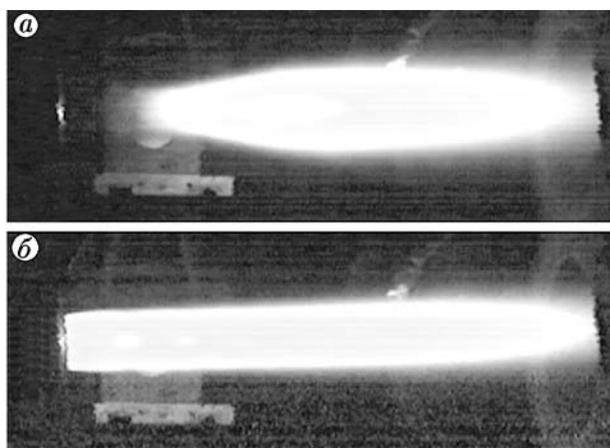


Рис. 1. Фотографии пламени в видимой области за цилиндрическим каналом:

a — горение за каналом, *b* — дозвуковое горение по всей длине канала (режим запирания)

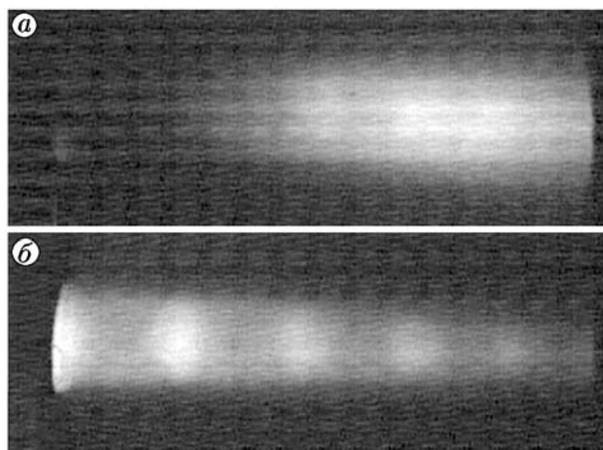


Рис. 2. Излучение радикала ОН в ультрафиолетовой области спектра:

обозначения *a* и *b* соответствуют рис. 1, поток слева направо

ния (рис. 2, *a*). Из оценок следует, что к концу канала при отсутствии горения скорость потока снижается до соответствующего значения $M \approx 1.7$, а так как воспламенение начиналось на некотором расстоянии от выхода из канала, то горение происходит уже при трансзвуковом течении.

Для реализации горения внутри канала непосредственно во время эксперимента повышали температуру торможения. В этом случае происходил «проскок» пламени в канал и осуществлялся переход к дозвуковому горению по всему тракту («запирание» канала). При этом, как и в последующих экспериментах, передачи возмущений в форкамеру не наблюдалось; по видимому, в сверхзвуковой части воздушного сопла образовывалась сложная газодинамическая структура, в которой и происходил переход к дозвуковому течению. Рис. 2, *b* позволяет предположить, что только на выходе из канала поток может разогнаться до сверхзвуковых скоростей. На рис. 1, *b* приведена фотография пламени на выходе из канала в данном режиме; на рис. 3 (поз. 1 и 2) представлено распределение статического давления по длине. Начало координат по оси *X* соответствует срезу сопла. Устойчивого промежуточного, в том числе псевдоскачкового, режима горения в канале данной длины не наблюдалось. Переход от одного режима к другому происходил за время менее 1 с. Различие температур торможения между режимами *a* и *b* составляет около 100° .

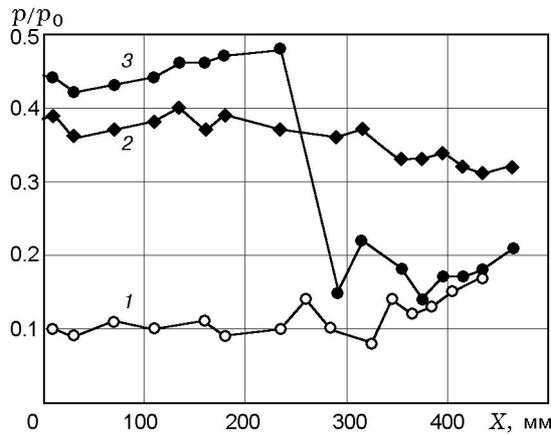


Рис. 3. Распределение статического давления по длине цилиндрического канала при различных режимах горения:

1, 2 — гладкий канал; 3 — канал с клином; $p_0 = 6 \cdot 10^5$ Па, $\alpha = 3.2$; 1 — $T_0 = 1950$ К, 2 — $T_0 = 2050$ К, 3 — $T_0 = 1900$ К

Обратное понижение температуры, а также изменение давления воздуха и расхода водорода не приводили к восстановлению сверхзвукового режима течения внутри канала.

Таким образом, в цилиндрическом канале при заданных параметрах потока устойчивый режим горения с участками сверхзвукового течения не реализовывался. Получены два режима — отсутствие горения в канале или тепловое запираение. В следующей серии экспериментов исследовались другие способы управления течением. Для этого между второй и третьей секциями (на расстоянии 250 мм от сопла) была введена короткая секция, позволявшая устанавливать различные стабилизаторы или производить вдув воздуха (рис. 4). Эксперименты показали, что единственным способом, которым в осесимметричном канале постоянно сечения удалось частично воздействовать на перестройку режима с тепловым запираением, была установка между секциями клина с углом 19° и уступом высотой 3.5 мм (рис. 4, б). Фактически такой клин, несмотря на малые размеры, действовал как сверхзвуковое сопло и обеспечивал переход потока в сверхзвуковой режим ниже по потоку (см. рис. 3, поз. 3).

В случае установки секции с нишей длиной и глубиной 5 мм (см. рис. 4, а) и выдувом из нее небольшого количества воздуха заметного воздействия на горение не наблюдалось: распределение давления по длине канала оставалось практически таким же, как и в глад-

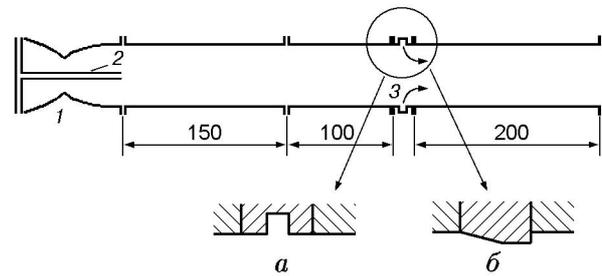


Рис. 4. Схема цилиндрического канала:

а — канал со вставкой, образующей нишу, б — канал с клином; 1 — воздушное сопло, 2 — водородный инжектор, 3 — вдув воздуха из ниши

ком канале без стабилизаторов (рис. 5, поз. 3). Устойчивое горение в псевдоскачке было реализовано только в случае стабилизации на нише без выдува воздуха. Кроме того, потребовалось снизить теплоподвод, для чего расход водорода был уменьшен до $\alpha \approx 9$. Зафиксированное распределение статического давления по длине канала представлено на рис. 5 (поз. 2).

Организация горения в псевдоскачке по сравнению с диффузионным горением позволяет существенно сократить длину камеры сгорания при одинаковом теплоподводе [16], однако управление псевдоскачковым режимом горения в гладком канале постоянного сечения очень сложное, так как промежуточные положения между тепловым запираением и ре-

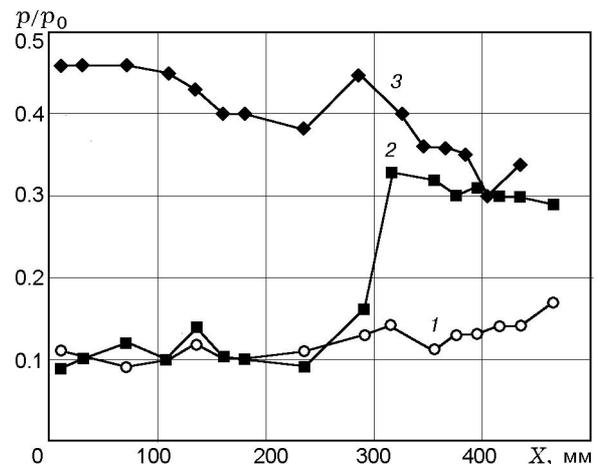


Рис. 5. Распределение статического давления по длине цилиндрического канала с нишей:

1 — статическое давление без горения, $T_0 = 300$ К; 2 — $T_0 = 1900$ К, $\alpha = 9$; 3 — горение + вдув воздуха из ниши, $T_0 = 2100$ К

жимом диффузионного горения неустойчивы. Полученные в проведенных экспериментах результаты подтверждают такой характер изменения режимов горения.

Эксперименты в гладком канале постоянного сечения длиной 450 мм показали, что режимы с промежуточными положениями псевдоскачка существуют в очень узком диапазоне режимных параметров. Оптимальный путь их расширения — организация горения в каналах переменного сечения, что также позволяет избежать теплового запаривания. Однако в расширяющихся каналах при сверхзвуковых скоростях потока сразу уменьшается интенсивность горения вследствие резкого падения статического давления и температуры. В свою очередь, это снижает интенсивность смешения топлива с окислителем, а также увеличивает время реакции. В работе [3] предполагается, что основным фактором замедления горения при малых углах раскрытия является ухудшение смешения, а при углах расширения свыше 3° значительную роль играет кинетика, что подтверждают и данные экспериментальной работы [7].

Перспективным способом управления горением, в том числе в расширяющихся каналах, является применение газодинамического воздействия на сверхзвуковой поток. Значительное влияние волновой структуры как на все течение в целом, так и на характеристики горения [17–20] позволяет рассчитывать на воздействие образующихся скачков уплотнения не только в свободном пространстве, но и в случае организации горения в каналах.

В работе [10] показано, что образование вихрей рециркуляционной зоны, появляющейся при внезапном расширении потока в обечайке, надвинутой на сопло, способствует стабилизации горения. В ИТПМ СО РАН была реализована схема с коротким участком постоянного сечения после небольшого уступа [8]. После сопла диаметром $d = 50$ мм ставилась цилиндрическая секция диаметром 65 мм, которая образовывала небольшой уступ, что давало возможность формироваться волновой структуре, подобной структуре в открытом пространстве. При числе Маха воздушного потока 1.4 и подаче водорода перпендикулярно потоку экспериментально показана возможность организации горения в канале с углом расширения 10° . Здесь нужно отметить, что в данной работе впервые был проверен принцип организации

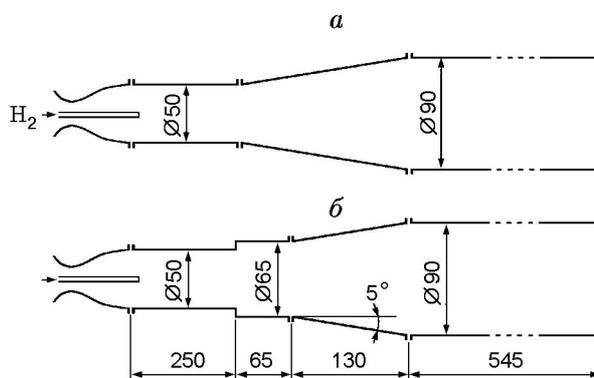


Рис. 6. Схемы расширяющихся каналов:

a — канал с коническим расширением; *b* — канал с уступом высотой 7.5 мм и последующим коническим расширением

горения в расширяющихся каналах, с подробным изучением структуры потока и сравнением изотермических течений и случаев с горением. В то же время, как отмечалось выше, во всех этих экспериментах поток был недорасширенным. Кроме того, секции присоединялись непосредственно к соплу, без какого-либо промежуточного канала. Поэтому в данной работе исследования были направлены на получение информации о влиянии на горение предложенной геометрии в случае перерасширенного течения и в каналах большой длины (свыше 10 калибров).

Схема проточной части экспериментальной установки для исследования горения в канале с уступом при спутной подаче водорода со скоростью, соответствующей значению $M = 2.7$, показана на рис. 6, б. К цилиндрическому каналу ($D = 50$ мм, $L = 250$ мм) пристыковывалась цилиндрическая секция ($D = 65$ мм, $L = 65$ мм), которая образовывала уступ. Далее присоединялись расширяющаяся секция (полный угол расширения 10° , $L = 130$ мм) и цилиндрическая ($D = 90$ мм, $L = 545$ мм). Параметры потока на входе в канал были следующие: $p_0 = 5 \div 7 \cdot 10^5$ Па, $T_0 = 1600 \div 2350$ К, $\alpha \approx 1.4 \div 7$. Для сравнения эксперименты также проводились в канале с плавным расширением (рис. 6, а).

На рис. 7, 8 показано распределение статического давления в каналах. В канале с гладким расширением (*a*) после воспламенения наблюдалось диффузионное горение в последней цилиндрической секции, с небольшим повышением давления при увеличении расхода водо-

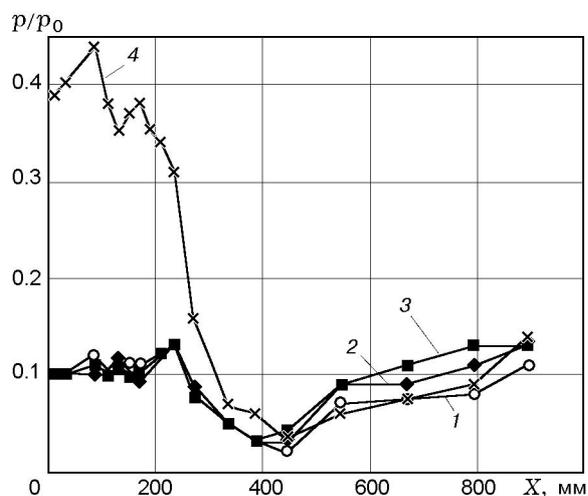


Рис. 7. Распределение статического давления в канале с гладким расширением:

1 — без горения, 2, 3 — диффузионное горение, 4 — тепловое заклинивание

рода (рис. 7, поз. 2, 3). При повышении температуры происходило тепловое заклинивание всего канала с переходом к горению в дозвуковом потоке с самого входа в камеру сгорания (рис. 7, поз. 4). Промежуточные режимы горения носили кратковременный, неустойчивый характер. Такое поведение и перестройка режимов горения наблюдались и в канале постоянного сечения (рис. 3), при этом аналогом горения в цилиндрической секции диаметром 90 мм является горение в свободном пространстве после канала, а заклинивание приводит к распределению давления, подобному в канале с клином (рис. 3, поз. 3 и рис. 7, поз. 4).

В канале с уступом (см. рис. 8) при значительном изменении режимных параметров реализовывалось устойчивое горение на участке с уступом и далее в области расширения и в канале диаметром 90 мм. При этом ступенчатое расширение камеры сгорания не только оказывало стабилизирующее действие на процесс горения, но и ограничивало распространение возмущений из камеры вперед по потоку, вследствие чего теплового заклинивания здесь не наблюдалось. В широком диапазоне параметров по расходу водорода ($\alpha = 1.4 \div 7$) горение было устойчивым. Все кривые распределения давления попадали в область, заштрихованную на рис. 8. Необходимо отметить, что влияние слабого изменения давления в форкамере на положение места воспламенения было более заметным, чем влияние небольшого

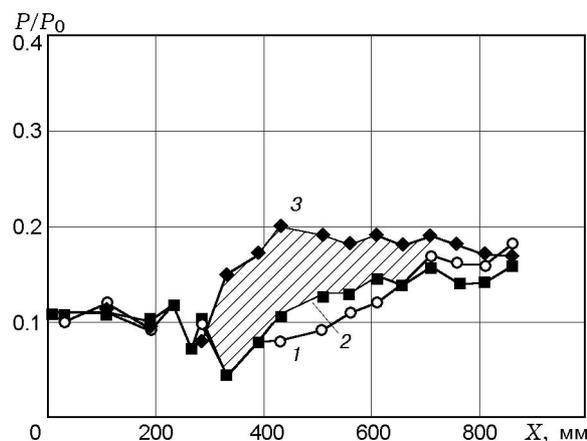


Рис. 8. Распределение статического давления по длине канала с уступом и расширением:

1 — без горения, 2, 3 — границы распределения давления при горении: $T_0 = 1600 \div 2350$ К, $\alpha = 1.4 \div 7$

изменения расхода водорода. Можно предположить, что это также связано с первоочередным воздействием газодинамической структуры, вследствие перемещения скачков уплотнения, к которым привязаны зоны воспламенения, при изменении давления.

Таким образом, эксперименты показали:

— управление горением в гладких каналах (как постоянного, так и переменного сечения) является достаточно сложным и требует введения стабилизаторов. Режим горения в псевдоскачке в канале постоянного сечения диаметром 50 мм и длиной 9 калибров получен только при стабилизации на нише и существует в узком диапазоне режимных параметров;

— возможность организации горения в канале с большим углом расширения при сверхзвуковой скорости потока и спутной сверхзвуковой подаче водорода, при выборе конфигурации канала, обеспечивающей внутреннюю структуру потока, аналогичную не только недорасширенным [8], но и перерасширенным струям. Такая геометрия, создающая волновую структуру с периодическими областями сжатия за скачками уплотнения, позволяет управлять воспламенением и поддерживать эффективное горение в широком диапазоне режимных параметров, в каналах длиной $10 \div 20$ калибров от начального сечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щетинков Е. С. О кусочно-одномерных моделях сверхзвукового горения и псевдоскачка в

- канале // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 9, № 4. С. 473–483.
2. **Третьяков П. К.** Определение теплоподвода к потоку в канале с псевдоскачком // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 3. С. 71–77.
 3. **Зимонт В. Л., Левин В. М., Мещеряков Е. А., Сабельников В. А.** Особенности сверхзвукового горения перемешанных газов в каналах // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 4. С. 75–78.
 4. **Мещеряков Е. А., Сабельников В. А.** Роль смещения и кинетики в уменьшении тепловыделения при сверхзвуковом горении перемешанных газов в расширяющихся каналах // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 5. С. 23–32.
 5. **Горение в сверхзвуковом потоке** / В. К. Баев, В. И. Головичев, П. К. Третьяков и др. Новосибирск: Наука, 1984.
 6. **Виноградов В. А., Кобыжский С. А., Петров М. Д.** Организация горения керосина в модельном ГПВРД // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 4. С. 18–26.
 7. **Строкин В. Н.** Результаты экспериментального исследования стабилизации горения и выгорания водорода в модельных камерах сгорания ГПВРД // Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики. 2000. № 2. С. 33–40.
 8. **Забайкин В. А.** Газодинамический способ организации горения в расширяющихся каналах // Аэромеханика и газовая динамика. 2003. № 4. С. 39–45.
 9. **Koschel W. W., Wepler U., Huhn Ch.** Recent advances on the supersonic mixing and combustion // Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research: Proc. Novosibirsk, 2000. Pt 3. P. 75–82.
 10. **Глотов Г. Ф., Гурылева Н. В., Иванькин М. А.** Экспериментальное исследование газотермодинамики течений в модельных каналах прямоточных двигателей // Проблемы аэрокосмической науки и техники. 2000. № 1. С. 51–61.
 11. **Magre F., Sabel'nikov V. A., Tretyakov P. K., Zabaykin V. A.** On the possible mechanisms of intensification of the combustion in the channel with the supersonic stream // Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research: Proc. Novosibirsk, 2004. Pt 2. P. 130–136.
 12. **Golovitchev V. I., Pilia M. L., Bruno C.** Autoignition of methane mixtures: The effect of hydrogen peroxide // J. Propulsion and Power. 1996. V. 12, N 4. P. 699–707.
 13. **Азатян В. В., Арутюнян Г. А.** Промоти́рование окисления водорода с помощью цепного горения силана // Изв. АН СССР. Сер. хим. 1982. № 3. С. 702–704.
 14. **Третьяков П. К., Воронцов С. С., Гарагин А. Ф. и др.** Иницирование горения пропано-воздушных смесей импульсно-периодическим излучением CO₂-лазера // Докл. АН. 2002. Т. 385, № 5. С. 618–620.
 15. **Забайкин В. А.** Качество высокоэнтальпийного потока при электродуговом подогреве воздуха в установке для исследования сверхзвукового горения // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 1. С. 28–36.
 16. **Zabaikin V. A., Tretyakov P. K., Bruno C.** Hydrogen combustion in confined and unconfined supersonic air flow // Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research: Proc. Novosibirsk, 1998. Pt 2. P. 223–227.
 17. **Колесников О. М.** Влияние нерасчетности на задержку воспламенения пристенной струи водорода в сверхзвуковом потоке // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 5. С. 15–19.
 18. **Жапбасбаев У. К., Макашев Е. К.** Газодинамические структуры при сверхзвуковом горении водорода в системе плоских струй в сверхзвуковом потоке // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 1. С. 25–32.
 19. **Безгин Л. В., Ганжелю А. Н., Копченков В. И.** О влиянии эффектов интеграции на характеристики силовой установки с ГПВРД // Аэродинамика больших скоростей. 1997. № 1. С. 93–102.
 20. **Барановский С. И., Надворский А. С., Перминов В. А.** Расчет горения турбулентной сверхзвуковой неизобарической струи водорода в спутном сверхзвуковом потоке воздуха // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 4. С. 14–18.

Поступила в редакцию 7/II 2006 г.