

приближенным характером решения диффузионной задачи. При этом, если точность приближенного решения при $k=0$ удовлетворительна², то описание поля концентраций с помощью квадратичного полинома в осесимметричном факеле связано с существенными погрешностями. Этот недостаток интегрального метода широко распространен и проявляется также в ряде задач теории струйных течений [2].

Порядок решения задачи. Определив концентрацию c_{b*} , найдем из уравнения Клапейрона — Клаузиуса соответствующую ей равновесную температуру Θ_* . Затем при заданных значениях инвариантов I_0 и M_0 по соотношениям [1] определим константы A_1 и B , характеризующие гидродинамику факела, и, согласно (12), его длину и полюсное расстояние (в зависимости от заданной в сечении полюса концентрации c_{a0}). Полагая при $\bar{x} = \bar{x}_0$ величину $c_{*0} = 1 - c_{a0}$, из (8) при $t=2$ вычислим инвариант R_0 . Затем при заданных значениях координаты $\bar{x} > \bar{x}_0$ по формулам (8), (9), (11) найдем функции $c_{*m}(\bar{x})$, $c_{b*}(\bar{x})$, $G_m(\bar{x})$ и $\Theta_m(\bar{x})$, а из соотношения теплового баланса на фронте факела (см. [1]) — его температуру $\Theta_\phi(\bar{x})$.

Найденные таким образом граничные значения температуры и концентраций однозначно определяют поля тепловых и диффузионных величин в ламинарном погружном факеле.

Поступила в редакцию 17/V 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Сухов, Л. П. Ярин. ФГВ, 1981, 17, 2.
2. Л. А. Вулис, В. П. Кашкаров. Теория струй вязкой жидкости. М.: Наука, 1965.

НЕУСТОЙЧИВЫЕ РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ ТЕРМИТНЫХ СИСТЕМ

А. Г. Струнина, А. В. Дворянкин, А. Г. Мержанов

(Черноголовка)

Процесс горения конденсированных систем весьма многолик. В зависимости от параметров систем и условий реагирования превращение исходных компонентов в продукты может проходить в форме стационарной волны горения (равномерное перемещение фронта реакции [1, 2]) либо автоколебательного горения (скачкообразное перемещение [3]), движения всевозможным образом искривленных фронтов, либо в виде спирального горения (спиралевидное перемещение очага реакции по образцу цилиндрической формы [4]). До недавнего времени считалось, что разные режимы горения присущи различным системам (например, автоколебательное — безгазовым, спиновое — гибридным). Затем это представление было опровергнуто теоретическим [5—7] и экспериментальным [8, 9] исследованиями. Оказалось, что различные режимы могут наблюдаться при горении одних и тех же систем в зависимости от их параметров, а в определенных системах и в зависимости от начального теплового импульса [10, 11]. Вопрос о перестройке режимов горения при варьировании условий протекания процесса без изменения параметров самой системы

² Точность полученных решений контролировалась сопоставлением равных по смыслу интегралов, определяющих с точностью до постоянной поток окислителя

через эквивалентное сопло $\int_0^{y_*} u_{10} c_{a0} y^k dy$ и его количество, выгоревшее на фронте

пламени $\Omega D \int_{x_0}^{x_\phi} \left(\frac{\partial c_b}{\partial y} \right)_{y_\phi} \cdot y_\phi^k dx.$

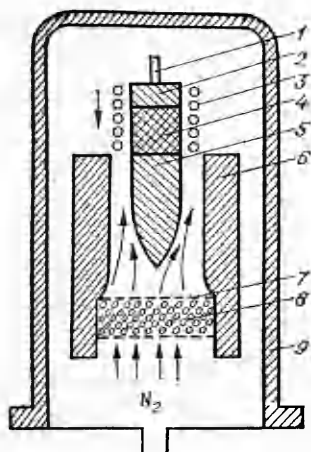


Рис. 1. Схема проведения эксперимента.

1 — пружинный держатель; 2 — воспламенитель; 3 — спираль; 4 — поджигаемый образец; 5 — обтекатель; 6 — корпус сопла; 7 — сетка; 8 — селикагель; 9 — стеклянный колпак.

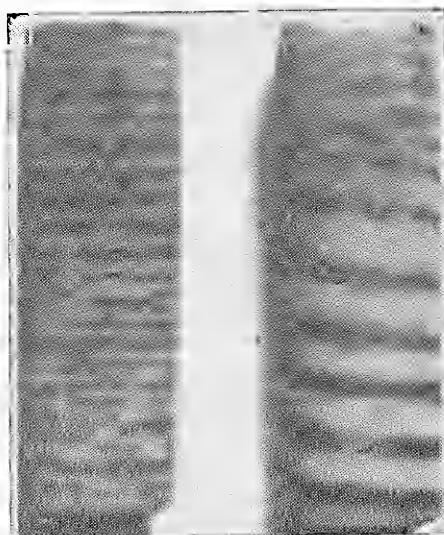


Рис. 2. Образцы железозиркониевого термита, сгоревшие в различных режимах.

экспериментально не исследован. Между тем возможность плавно регулировать и легко менять условия организации процесса — наиболее очевидный путь анализа закономерностей нестационарной перестройки различных режимов горения.

Ниже представлены результаты исследования влияния начального теплового импульса, условий теплообмена с окружающей средой и вынужденного изменения теплового баланса на закономерности неустойчивого горения.

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 1. Цилиндрические образцы прессованных реагирующих составов помещались на подставку, прижимаемую пружинным держателем, и сжигались в различных условиях: на воздухе, под колпаком в атмосфере аргона, без обогрева и при включенной спирали, без обдува и при его наличии. Процесс горения анализировался визуально во время горения и после него (по следам на сгоревших образцах) и снимался кинокамерой «Конвас». Скорость перемещения фронта горения фиксировалась фоторегистратором ФР-11.

Начальный тепловой импульс для инициирования термитной системы задавался тепловой волной горящего воспламенителя [12]. Величина теплового импульса регулировалась изменением параметров воспламенителя (термит иного состава, чем поджигаемый). Наличие у термитных систем раскаленных шлаков создавало после сгорания воспламенителя перепад температур вдоль оси поджигаемого образца. Расчет, проведенный в предположении, что воспламенитель — раскаленная стенка с температурой, равной температуре горения, а поджигаемая система сама не выделяет тепло (лишь прогревается от стенки [13]), показал, что скорость перемещения тепловой волны по поджигаемой системе превышает скорость движения фронта при ее горении. В результате разные по высоте участки поджигаемой системы сгорают при различной температуре.

Оставшиеся после сгорания следы¹ на поверхности цилиндрического образца (рис. 2) позволяли анализировать последовательность режимов горения и протяженность участков, сгоревших в том или ином режиме.

¹ После стационарного горения поверхность ровная, достаточно гладкая, после автоколебательного испещрена рядом параллельно расположенных кольцевых углублений, неупорядоченное перемещение искривленных фронтов оставляет короткие штрихи — углубления, спиновое горение — спиралевидную кривую, опоясывающую цилиндрический образец.

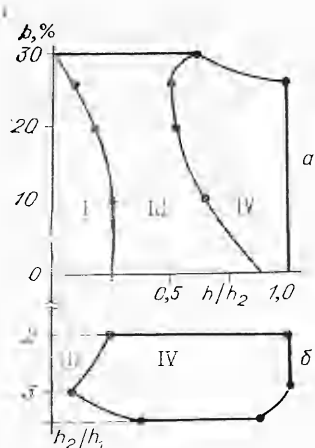


Рис. 3. Влияние калорийности и высоты воспламенителя на процесс горения железозиркониевого термита (76%-ного разбавления — *a* и 70%-ного разбавления — *б*).

Воспламенитель: *a*) хромоалюминиевый состав, $h_1=15$ мм; *б*) хромоциркониевый стехиометрический состав.

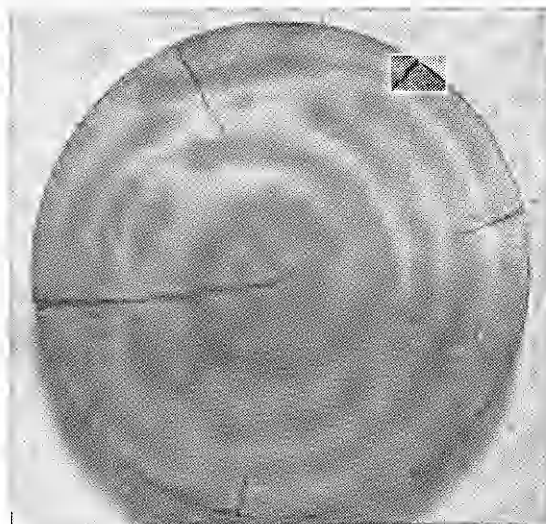


Рис. 4. Фотография сгоревшего образца железозиркониевого термита.

Результат такого анализа при иницировании железозиркониевого термита хромоалюминиевым и хромоциркониевым воспламенителями представлен на рис. 3, *a, б* соответственно. По оси абсцисс отложено отношение высоты участка поджигаемого образца, сгоревшего в том или ином режиме, ко всей высоте поджигаемой системы ($h_2=30$ мм), по оси ординат — параметры воспламенителя: процент разбавления (σ) исходной стехиометрической смеси компонентов продуктами реакции (см. рис. 3, *a*) и отношение высот воспламенителя и поджигаемой системы (см. рис. 3, *б*).

Анализ результатов показал, что:

1) существует определенная последовательность смены режимов горения: стационарное (*I*), автоколебательное (*II*), горение в виде множества бегающих светящихся точек (назовем его многоточечным (*III*)), спиновое (*IV*);

2) некоторые звенья в этой последовательности могут отсутствовать (например, автоколебательный режим на рис. 3);

3) переход от стационарного горения к автоколебательному происходит скачком, автоколебательное горение перестраивается в спиновое через область многоточечных режимов;

4) многоточечный режим является менее устойчивым, чем спиновый. Затуханию горения, как правило, предшествовал многоточечный режим;

5) существуют оптимальные условия по начальному тепловому импульсу, обеспечивающие скорейший выход процесса на спиновое горение.

Самостоятельный интерес представляют опыты по иницированию воспламенителем, диаметр которого значительно меньше диаметра поджигаемого образца. В таком случае перемещение фронта горения вдоль оси цилиндрического образца сопровождается его распространением по торцу и моделируется горение при плавном нарастающем диаметре. В опытах образцы железозиркониевого термита (диаметром 25 и 60 мм) иницировали хромоциркониевым воспламенителем (диаметром 5 и высотой 20 мм), помещенным посередине торца поджигаемой таблетки. Варьировались высота (от 2 до 10 мм) и калорийность поджигаемой системы: железозиркониевый термит разбавляли окисью циркония на 50—60% (в пределах 100%). Горение проводили в атмосфере аргона на подложке из асбеста либо металла.

При малом разбавлении (50—55%) поджигаемая таблетка сгорала быстро, сильно деформируясь (образец расслаивался и разваливался). Визуальные наблюдения за распределением горения по торцу при разбавлении от 55 до 60% показали, что фронт горения представляет собой замкнутую, плавно расширяющуюся окружность. С увеличением разбавления (от 60 до 64%) фронт горения уже разорван и представляет собой множество беспорядочно двигающихся точек. Таблетка после горения сохраняет свою первоначальную форму. В узком диапазоне (от 65 до 67%) реализуется спиновой режим горения. При разбавлении выше 67% поджигаемая система не инициировалась. Замена металлической подложки на асбестовую приводила к более интенсивному горению.

Смену режимов горения по мере расширения зоны горения (диаметр сгоревшей части торца возрастает от диаметра воспламенителя до диаметра поджигаемой таблетки) удобно изучать для случаев, когда процесс начинается со спинового режима. Для облегчения визуальных наблюдений после инициирования поджигаемой таблетки воспламенитель убирался. Появляющаяся около центра светящаяся точка начинает движение по спирали, по мере приближения к боковой поверхности таблетки она раздваивается, затем появляется множество светящихся точек, которые то возникают на горячей поверхности, то исчезают.

На рис. 4 представлена типичная фотография торца сгоревшего образца. В работах [6, 7] показано, что «одноголовый» спиновой режим горения перестраивается в «двухголовый» при увеличении радиуса образца примерно в 2 раза. Анализ сгоревших образцов подтверждает этот вывод. Раздвоение светящейся точки, независимо от диаметра поджигаемой таблетки, происходит на расстоянии 10—12 мм от центра (зарождение у основания воспламенителя на расстоянии 5 мм). Распространение фронта горения по торцу цилиндрического образца, как показано выше, сопровождается перемещением его вдоль оси. Осевой шлейф показывает, что фронт горения имеет вид «купола», обращенного вершиной по ходу движения фронта. В результате перестройки режимов на нижнем торце таблетки, несколько сдвинутая в пространстве, повторяет картину, наблюдаемую сверху.

С увеличением высоты цилиндрического образца (при прочих равных параметрах) изменяется и процесс горения, наблюдаемый с торца. Развитие процесса горения таблеток высотой 2—3 мм начинается с перемещения по спирали одной светящейся точки, более высоких таблеток — с двух светящихся точек, движущихся навстречу друг другу и образующих при встрече замкнутое кольцо, либо сразу с замкнутого расширяющегося кольца. Вероятность растрескивания и разрушения таблетки при горении с ростом высоты увеличивается.

Закономерности нестационарной перестройки различных режимов горения с изменением условий теплообмена с окружающей средой изучались при обдуве горячей системы потоком газа комнатной температуры либо при обогреве раскаленной спиралью (см. рис. 1). Варьировались скорость обдува и время обогрева. Опыты проводились на железодиркониевом и хромово-диркониевом термитах, разбавленных продуктами реакции.

В опытах с обдувом использовались такие составы, которые без обдува сгорали в автоколебательном режиме со слабо выраженными пульсациями. С увеличением скорости обдува одинаковые образцы сгорают последовательно в автоколебательном, многоточечном, спиновом режимах и совсем затухают при большой скорости обдува. На рис. 5 представлены фоторегистрации процесса горения хромово-диркониевого термита при различных скоростях обдува потоком азота. Независимо от того, какой из режимов горения был предельным (на фоторегистрации это спиновой режим), отношение средней скорости горения без обдува к предельной для обоих исследованных термитов оказалось равным $\sim 1,3$, что согласуется с результатами исследования предельных режимов нестационарного горения [14]. Использование вольфрам-ренийевых термо-

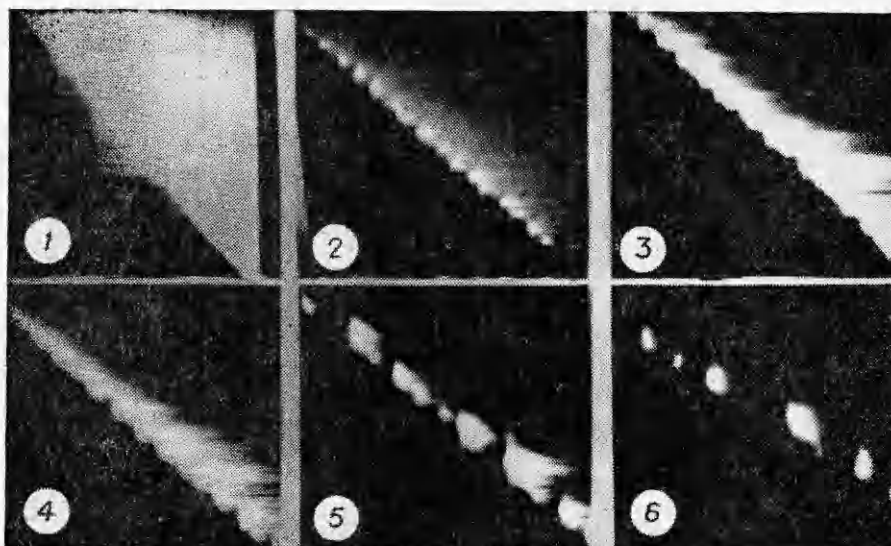


Рис. 5. Фоторегистрации процесса горения хромово-циркониевого термита при разных скоростях обдува потоком азота.

1—4 — автоколебательный режим горения; 5 — многоточечный; 6 — спиновый.

пар, распределенных по диаметру образцов, показало, что с ростом скорости обдува температурный профиль изменяется в основном лишь у боковой поверхности цилиндрического образца (при спиновом режиме перепад температур достигает $\sim 200^\circ$ в пограничном слое толщиной 0,3 радиуса).

В опытах с обогревом², использовались такие составы, которые в данных условиях без обогрева не горят. С увеличением времени обогрева удалось реализовать последовательно спиновый, многоточечный, автоколебательный и стационарный режимы горения. Измерения с помощью дифференциальных термопар (один спай помещался в центре образца, а второй — у поверхности) показали, что при обогреве спиралью образуется своеобразный «тепловой цилиндр» (температура на поверхности образца выше, чем в центре). После выключения спирали «тепловой цилиндр» становится менее выраженным (происходит выравнивание температур по диаметру образца). Модель горения «теплового цилиндра» тем корректнее, чем меньше отношение времени сгорания образца ко времени его нагрева.

Результаты опытов, проведенных на модели железоциркониевого термита (70%-ного разбавления продуктами реакции), инициируемого хромово-циркониевым термитом стехиометрического состава, приведены в таблице. С увеличением времени нагрева образца t перепад температур ΔT между поверхностью T_1 и центром T_2 образца к моменту выключения спирали средняя температура по сечению образца T_n и температура горения T_r возрастают. К моменту подхода фронта горения к термопарам (расстояние от воспламенителя $\sim 1,5$ см) температура у поверхности превышает температуру в центре \sim на 30° . При $t < 5$ с, систему не удалось инициировать, при $t > 80$ с происходило ее самовозгорание. Чем больше плотность образца, тем более длительным должен быть и обогрев для реализации того или иного режима.

Тепловой баланс системы, не меняя ее общего состава и геометрической формы образца, можно регулировать введением инертных или реак-

² Каждый образец из партии одинаковых помещался внутрь нихромовой спирали (см. рис. 1) на расстоянии 2—3 мм от боковой поверхности. Спираль включалась на определенное время до начала горения образца. Поджигаемые образцы инициировались одинаковыми воспламенителями.

ционнспособных преград и включений. С этой целью проводилась теплоизоляция нижнего торца цилиндрического образца асбестовой тканью и вводились в боковую поверхность инертные или реакци-

	Режим горения	$T_r, ^\circ\text{C}$	$\Delta T = T_1 - T_2$	$T_n, ^\circ\text{C}$
10	Спиновый	1050	40	80
15	Многоочечный	1150	60	140
30	Автоколебательный	1300	100	170
60	Стационарный	1400	160	320

оннспособные «очаги». Использовался железциркониевый термит 70%-ного разбавления. Горение фиксировалось кинокамерой.

При подходе фронта горения к теплоизолирующей асбестовой ткани происходит перестройка теплового баланса горящего образца. Запас тепла в прогретом слое, не находя стока, разогревает систему, что приводит к появлению иных режимов горения. Спиновый режим переходит в автоколебательный через неупорядоченное многоочечное горение.

В качестве «очага» использовался продукт реакции изучаемого состава (инертный очаг) или сам состав, но с меньшим процентом разбавления (очаг реакционноспособный — инициатор). Точечный «очаг» впрессовывался в специально приготовленное углубление на боковой поверхности цилиндрического образца. Наличие инертного включения, как показали опыты, не вносит каких-либо изменений в режим горения: фронт горения лишь на время искажается и вскоре «забывает» о помехе.

Иная картина развивается при наличии реакционноспособного очага. Согласно [5], тепловое возмущение может вывести процесс горения из депрессии и способствовать установлению спинового режима. Это теоретическое положение экспериментально исследовалось следующим образом. В качестве поджигаемого использовалась система, горение которой в данных условиях затухало на расстоянии 5—6 мм от воспламенителя. В боковую поверхность цилиндрического образца из такого состава на расстоянии 5—6 мм впрессовывался точечный инициатор. Варьировались его калорийность и размеры. Инициатор срабатывал, когда поджигаемая система должна была затухнуть. Последующий ход развития процесса зависел от теплового импульса инициатора. Оказалось, что надежная перестройка к спиновому горению возможна лишь при наличии оптимального набора параметров инициатора.

Результаты многочисленных опытов представлены на рис. 6, где по оси абсцисс отложено отношение величины участка поджигаемого образца, сгоревшего в том или ином режиме, ко всей высоте образца, а по оси ординат — процент разбавления исходных компонентов инициатора конечным продуктом реакции и отношение диаметра образца d_2 к диаметру «пятна» инициатора d_1 . Видно, что с уменьшением калорийности реакционноспособного «очага» и его размеров выход на режим спинового горения облегчается. При дальнейшем снижении этих параметров область спинового горения (IV) резко сужается. В таких случаях горение, как правило, затухает. Затухание процесса имеет место и в случае, если калорийность инициатора значительно выше калорийности основной системы (реакционноспособный «очаг» при вспышке «отстреливается»). Процесс установления спинового горения в системе, которая без «очага» затухает, снят кинокамерой и представлен на рис. 7. Яркая вспышка инициатора, как правило, раздваивается на перемещающиеся в противоположные стороны светящиеся пятна, которые при встрече, сливаясь в одно, давали начало одноголовому спину, движущемуся по спирали к нижнему торцу образца.

В работе [7] показано, что множество определенным образом расположенных по периметру точечных инициаторов могут перестроить спиновое горение в автоколебательное. Возможность подобной перестройки на выбранных термитных составах реализовать не удалось. Тепловой импульс множества источников лишь на некоторое время дестабилизировал

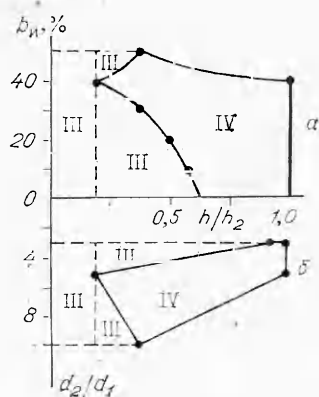


Рис. 6. Влияние калорийности при $d_1 = 5$ мм (а) и размера пятна инициатора (железоциркониевый термит 40%-ного разбавления) (б) на динамику перестройки режимов горения железоциркониевого термита 70%-ного разбавления.

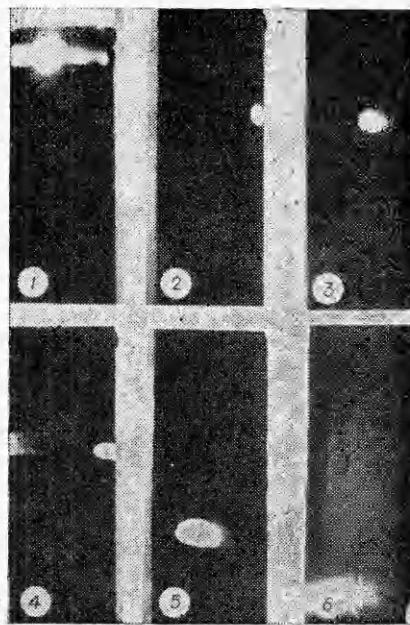


Рис. 7. Процесс перестройки автоколебательного режима горения в спиновое с помощью инициатора.

τ, с: 0 (1), 14 (2), 15 (3), 18 (4), 25 (5), 38 (6).

тепловой баланс процесса. Спустя это время горение продолжалось в установившемся режиме.

В заключение необходимо отметить, что проанализированная выше нестационарная перестройка режимов горения с изменением условий протекания процесса была реализована вблизи границы устойчивости различных режимов. Ряд теоретических положений получил экспериментальное подтверждение. Показано, что переход от стационарного режима к автоколебательному происходит скачком; с ростом диаметра образца реагирующей системы увеличивается число спиновых мод, а введение точечного источника возбуждения может перестроить автоколебательное горение в спиновое. Некоторые экспериментальные результаты, расширяя представления об изучаемом процессе, стимулируют дальнейшие теоретические исследования. Обнаружено, например, что переход от автоколебательного режима к спиновому и наоборот осуществляется через многоточечное горение, вынужденная перестройка автоколебательного режима в спиновое возможна при наличии оптимального очагового возбуждения. Представляет интерес изучение процессов горения при наличии тепловой цилиндрической трубы разного сечения.

Поступила в редакцию 26/II 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. И. Хайкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1966, 2, 3.
2. Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов, В. М. Шкиро. ФГВ, 1965, 1, 4.
3. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1971, 7, 1.
4. А. Г. Мержанов, А. К. Филоненко, И. П. Боровинская. Докл. АН СССР, 1973, 208, 4.
5. Т. П. Ивлева, А. Г. Мержанов, К. Г. Шкадинский. Докл. АН СССР, 1978, 239, 5.
6. Т. П. Ивлева, А. Г. Мержанов, К. Г. Шкадинский. ФГВ, 1980, 16, 2.
7. А. П. Алдушин, Я. Б. Зельдович, Б. А. Маломед. Докл. АН СССР, 1980, 251, 5.
8. Ю. М. Максимов, А. Т. Пак, Г. В. Лавренчук и др. ФГВ, 1979, 15, 3.
9. Ю. М. Максимов, А. Г. Мержанов, А. Т. Пак, М. П. Кучкин. ФГВ, 1981, 4, 4.
10. Б. И. Хайкин, С. И. Худяев.— В кн.: V Всесоюз. симпозиум по горению и взрыву. Черноголовка, 1977.
11. Б. И. Хайкин, С. И. Худяев. Докл. АН СССР, 1979, 245, 1.
12. А. Г. Струнина, Т. М. Мартемьянова, В. В. Барзыкин, В. И. Ермаков. ФГВ, 1974, 10, 4.
13. А. И. Пехович, В. М. Жидких. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1968.
14. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.