

ФИЗИЧЕСКАЯ
ХИМИЯ

УДК 536.46

СПИНОВЫЙ РЕЖИМ ГАЗОФАЗНОГО ГОРЕНИЯ
КОНДЕНСИРОВАННОГО ТОПЛИВА

© 2000 г. А. А. Коржавин, В. А. Бунев, И. Г. Намятов, В. С. Бабкин

Представлено академиком А.Г. Мержановым 11.07.2000 г.

Поступило 01.08.2000 г.

Научный интерес к проблеме спинового горения обусловлен тем, что это – ярко выраженное нелинейное волновое явление, альтернативное обычному послойному горению. Известна спиновая детонация в газах [1]. Описание спинового газофазного горения авторам неизвестно. Впервые спиновое горение обнаружено при сжигании пористых металлических образцов в газообразном окислителе с образованием твердых продуктов реакции [2]. При зажигании цилиндрического образца на его поверхности возникает небольшое светящееся пятно, которое движется по спирали по внешней части образца. Скорость движения пятна по окружности v превышает среднюю скорость горения в направлении вдоль оси цилиндра u на один–полтора порядка [3, 4]. Приближенный аналитический метод исследования такого поверхностного спинового режима предложен в [5].

В данной работе экспериментально показана возможность спинового горения с газофазной химической реакцией. В качестве горючей системы использовали пленку жидкого топлива на металлической подложке. Физико-химические характеристики как топлив, так и подложек хорошо известны. Исследование проблемы возможно в наиболее простой постановке: термически тонкая система, газофазная химическая реакция, отсутствие структурных изменений подложки и других осложняющих факторов, таких, как пиролиз, газификация и т.д. В работах [6, 7] экспериментально изучено послойное распространение диффузионного пламени в такой системе.

Опыты проводили на воздухе при атмосферном давлении и комнатной температуре. В экспериментах использовали два вида металлических подложек – длинные полосы прямоугольной формы и полые цилиндры. Полосы были из медной фольги толщиной 45 мкм и шириной $w = 4$ см и из алюминиевой фольги толщиной 115 мкм и

$w = 3.8$ см. Использовали цилиндры диаметром 66 мм из алюминиевой и из стальной фольги толщиной 115 мкм. На цилиндр пленку топлива наносили с внешней стороны, а на полосу – с двух сторон. Толщина пленки топлива 7–9 мкм. В качестве топлив использовали *n*-бутиловый спирт и предельные углеводороды.

Пламя инициировалось в верхней части вертикально расположенных образцов импульсно нагреваемой спиралью или открытым пламенем. С помощью фотодиодов и осциллографа фиксировалась интенсивность свечения фронта пламени, что позволяло определять частоту вращения и количество голов спина. Проводилась видеосъемка процесса. Частота кадров 25 с^{-1} , время экспозиции кадра $1/50$ с. Перед объективом камеры устанавливался механический затвор, позволяющий за время экспозиции одного кадра получать одно или несколько наложенных изображений с временем экспозиции каждого значительно меньше $1/50$ с. По данным видеосъемки вычисляли скорости спинового горения и частоту вращения очага.

Послойное распространение пламени – испарительно-диффузионный режим горения, при котором пламя распространяется нормально к кромке топлива [6, 7]. Фронт горения имеет протяженную линию, соразмерную поперечным размерам образца. В этом случае фронт симметричен относительно линии симметрии образца. Характерная скорость такого процесса распространения пламени $1.5\text{--}5$ см/с.

Спиновый режим – кинетический режим горения, при котором очаг распространяется вдоль кромки топлива. Он имеет узкую серповидную, выпуклую в сторону несгоревшей смеси форму и локализован в сравнительно небольшой области. Его характерная скорость движения вдоль кромки топлива порядка 100 см/с, а перпендикулярно ей – порядка 1 см/с. Спиновый режим горения был реализован в нескольких разновидностях на всех описанных выше подложках вблизи пределов распространения послойного режима горения.

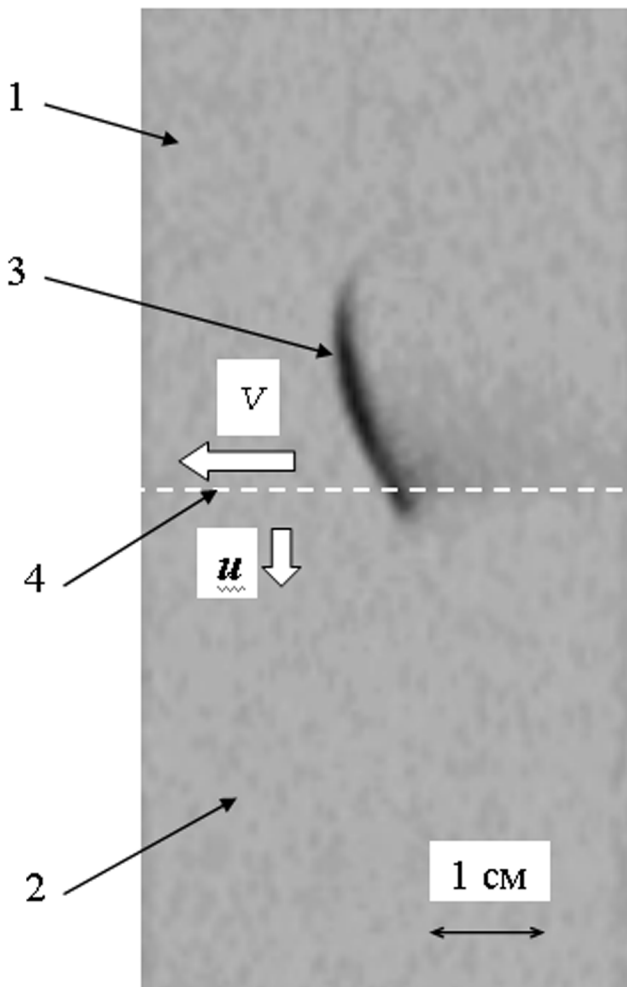


Рис. 1. Видеоизображение (негатив) распространения очага пламени в спиновом режиме над пленкой *n*-гексадекана на медной фольге. Время экспозиции 1/2000 с. 1 – фольга, 2 – пленка топлива, 3 – очаг пламени, 4 – кромка пленки топлива (реконструкция).

Спиновый режим горения на цилиндре. После зажигания паров *n*-нонана на поверхности алюминиевого цилиндра очаг горения распространяется в общем случае по эллиптической винтовой спирали со скоростью $v = 120$ см/с. Средняя скорость тепловой волны по фольге в направлении вдоль образующей цилиндра (скорость продвижения кромки топлива) $u = 1$ см/с. Частота вращения очага равна 5.5 Гц и является стабильной в пределах точности измерений, несмотря на то, что после инициирования спина, в процессе горения, его траектория эволюционирует от эллиптической к круговой винтовой спирали. Аналогичные данные на этом же цилиндре получены при горении пленки *n*-декана. Частота сигналов фотодиода разная: 5.2 Гц для одноголового спина и 8.2 Гц для двухголового. Скорость движения спина вдоль кромки топлива слабо за-

висит от вида топлива, но сильно – от числа голов. Так, например, одноголовый спин движется вдоль своей траектории со скоростью $v = 120$ см/с, а двухголовый – со скоростью $v = 90$ см/с. Соответствующие им поперечные скорости для одноголового спина равны $u = 0.7$ см/с, а для двухголового – $u = 1.9$ см/с. Спиновый режим горения был также реализован на стальном цилиндре с пленкой *n*-бутанола на внешней поверхности. Характерные скорости в этом случае равны $v = 100$ см/с, $u = 1$ см/с. Наблюдалось как правостороннее, так и левостороннее вращение очага. Поскольку длина и кривизна эллиптической траектории очага пламени после его инициирования изменяются во времени при ее эволюции к круговой, то процесс распространения очага горения на этом этапе является нестационарным, а процесс распространения по круговой винтовой траектории – стационарным.

Возможность реализации спинового горения на одной и той же подложке (алюминиевый цилиндр) для топлив с различными характеристиками испаряемости (*n*-нонан, *n*-декан) указывает на то, что этот вид горения может реализовываться в довольно широком диапазоне начальных параметров за пределами испарительно-диффузионного режима горения.

Спиновый режим горения на полосе фольги. Оказалось, что спиновый режим может осуществляться и в системе без цилиндрической симметрии, на плоской полосе фольги, если пленка топлива есть на ее обеих поверхностях. Экспериментально наблюдали, что при начальных условиях $p = 749$ мм рт. ст. и $T = 291.5$ К на вертикальной медной фольге с пленкой *n*-гексадекана при зажигании сверху реализуются два режима. Один – двухстороннее послойное распространение пламени со скоростью $u = 2.2$ см/с, другой – спиновое распространение пламени по газовой фазе вдоль кромки пленки топлива – одноголовый спин (рис. 1). При этом спиновый режим горения может возникнуть как самопроизвольно из стационарного послойного режима горения, так и при зажигании пленки топлива открытым пламенем. Частота вращения очага $f = 11.2$ Гц, т.е. очаг газофазного пламени движется со средней скоростью $v = 2\omega f \sim 90$ см/с. Поперечная скорость $u = 1.6$ см/с. Время, требующееся на подготовку новой порции горючей газовой смеси, $t = 1/f \sim 0.09$ с. Стабильность частоты наблюдалась в течение 100–120 оборотов, за которые пламя пробегает вдоль своей траектории расстояние порядка 10 м.

Аналогичные результаты по спиновому режиму горения получены при распространении пламени над пленкой *n*-тридекана на полосе алюминиевой фольги. Скорости в этом случае равны $u = 1.2$ см/с, $v = 2\omega f \sim 80$ см/с, а частота $f = 10.6$ Гц.

Различие между процессами в цилиндрической и плоской системах состоит в том, что в плоской системе имеются две особые точки, в которых фронт пламени переходит с одной поверхности фольги на другую. Кроме того, различие между процессами в этих системах состоит в том, что тепловые условия на траектории движения на плоской фольге, в отличие от условий на цилиндрической поверхности, не являются равноценными. Неравноценность возникает в связи с тем, что система термически тонкая и пламя, находящееся на одной поверхности, изменяет тепловую обстановку на другой. Эти обстоятельства создают нестационарные условия для распространения пламени вдоль кромки топлива. Однако средняя скорость u постоянна, что указывает на воспроизводимость условий вдоль кромки топлива на каждом витке.

Самое яркое различие двух наблюдаемых режимов горения – испарительно-диффузионного и спинового – состоит в различии векторов скоростей пламени. Векторы скоростей u и v ортогональны, а их величины отличаются на два порядка. Причина этого лежит в механизме распространения. При послойном распространении пламя имеет диффузионную структуру, при спиновом – структуру, как в перемешанной смеси. Соответственно, во втором случае скорость v лежит в пределах от S_u до $S_u E_i$, где S_u – нормальная скорость пламени, E_i – коэффициент расширения продуктов горения.

Поскольку в спиновом режиме условия запрещены для испарительно-диффузионного режима, то необходимы пути повышения реакцион-

ной способности или улучшения локальных условий горения. В спиновом режиме это, по-видимому, достигается за счет более эффективного использования тепла продуктов ранее сгоревшего топлива. Очаг пламени при спиновом горении использует тепло, аккумулированное в подложке от очагов горения на предыдущих витках.

Реализация спинового режима на различных подложках и с различными веществами указывает на то, что этот режим может иметь широкое распространение.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 00–03–32417) и INTAS (грант 96–1173).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Щелкин К.И., Трошин Я.К.* Газодинамика горения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 255 с.
2. *Мержанов А.Г., Филоненко А.К., Боровинская И.П.* // ДАН. 1973. Т. 208. № 4. С. 892–894.
3. *Филоненко А.К., Вершинников В.И.* // ФГВ. 1975. Т. 11. № 3. С. 353–362.
4. *Филоненко А.К.* // ФГВ. 1991. Т. 27. № 6. С. 41–45.
5. *Новожилов Б.В.* // ДАН. 1992. Т. 326. № 3. С. 485–488.
6. *Коржавин А.А., Бунев В.А., Гордиенко Д.М., Бабкин В.С.* // ФГВ. 1998. Т. 34. № 3. С. 15–18.
7. *Коржавин А.А., Бунев В.А., Намятов И.Г., Бабкин В.С.* // ФГВ. 2000. Т. 36. № 3. С. 25–30.
8. *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.