

## СПИНОВОЕ ГОРЕНИЕ ТИТАНА ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ

Показана возможность существования спинового горения при давлении меньше атмосферного. Определена область спинового горения в координатах давление смеси газов — концентрация азота в смеси. Изучено влияние общего давления смеси и концентрации азота в ней на основные характеристики спинового горения (скорость, частоту, шаг). Получены данные по самоочистке титана при горении от примеси кислорода.

Впервые спиновый режим [1] наблюдался при горении прессованных цилиндрических образцов из порошка гафния, циркония и титана в среде азота, разбавленной аргоном, и давлении газовой смеси несколько десятков атмосфер. В этом случае картина спинового горения состояла в том, что при зажигании образца с торца на боковой поверхности его возникает светящееся пятно небольшого диаметра (очаг горения), которое движется по боковой поверхности несгоревшей части образца от места возникновения до конца горения по спирали, оставляя за собой яркий след догорания, постепенно сливающийся с таким же следом от предыдущего витка.

В зависимости от условий очагов горения может быть несколько, двигающихся друг за другом или навстречу, сливающихся и возникающих вновь. Спиновое горение на аналогичных системах металл — азот возникало также при разбавлении порошка металла продуктом горения нитридом и при горении в жидком азоте [2]. Во всех этих случаях переход стационарного горения в спиновое осуществлялся путем уменьшения удельного тепловыделения во фронте горения или разбавлением реагентов инертными компонентами, или затруднением фильтрации азота через поры, путем уменьшения пористости, или понижением начальной температуры и интенсивным теплоотводом при горении в жидком азоте. Как следует из теории [3], понижение давления реагирующего газа снижает тепловыделение во фронте горения, что так же должно способствовать переходу стационарного горения в спиновое. Это обстоятельство использовалось в данной работе для поиска области существования спинового режима при давлении меньше атмосферного и вблизи него.

**Методика эксперимента.** Горение осуществлялось в бомбе постоянного давления [4] объемом 3 л, снабженной электропроводами для поджигания образцов и прозрачными стеклами для наблюдения за процессом и регистрации скорости горения. Бомба продувалась азотом, откачивалась форвакуумным насосом и имела отдельные входы для впуска газа (азота и аргона). Давление в бомбе измерялось вакуумметром и манометром. Эксперименты в основном проводились в неисследованном ранее диапазоне давлений от 100 мм рт. ст. до  $\approx 5$  атм. Использовался азот ПНГ (объемная доля не менее 99,999%), аргон ВЧ (объемная доля не менее 99,998%), порошок титана ПТС (содержание не менее 98,5%). Образцы (диаметр  $\bar{a} = 10$  мм, высота  $l = 15$  мм) готовились из порошка Ti прессованием на ручном гидравлическом прессе до плотности  $1,85 \div 1,90$  г/см<sup>3</sup>. Вертикально расположенный образец поджигался с верхнего торца раскаленной вольфрамовой спиралью. После сгорания размеры образца оставались прежними.

Основные параметры исследуемого процесса горения: скорость горения  $u = l/t$ , частота спинового горения  $\nu = n/t$  (частота вращения очага горения по образующей поверхности цилиндрического образца), шаг спинового горения  $h = u/\nu$ , по аналогии с шагом резьбы — расстояние по образующей между местами прохождения двух ближайших очагов горения,  $t$  — время горения,  $n$  — количество оборотов очага горения за это время. Величины  $u$  и  $\nu$  измерялись по непрерывной фоторегистрации процесса прибором ФР [4] на движущуюся горизонтально фотопленку.

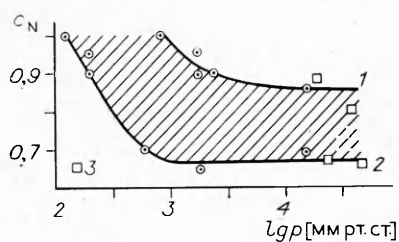


Рис. 1. Область существования спиновое горения.

горения (кривая 2), горение не распространяется и образец гаснет сразу после поджигания. Выше кривой 1 горение идет в стационарном режиме. Следует иметь в виду, что нижний концентрационный предел (рис. 1, 2) определен более четко. Экспериментальное определение границы перехода спиновое горения в стационарное (верхний предел, рис. 1, 1) затруднено тем, что такой переход происходит менее резко и сопровождается увеличением частоты и уменьшением шага спина, в отличие от нижней границы, которая, фактически, определяется тем, горит образец или нет.

Область спиновое горения продолжена в сторону повышенных давлений до 60 атм за счет данных работы [2] (см. рис. 1, 3). Как видно из рис. 1, с повышением давления нижний и верхний пределы спиновое горения сначала снижаются, а затем от него почти не зависят. Это значит, что, например, при  $c_N < 0,65$  образец в рассмотренном диапазоне давлений не горит, а при  $c_N = 0,7 \div 0,8$  если горит, то только в спиновом режиме. Вероятно, это связано с тем, что повышение давления, увеличивающее фильтрационный поток окислителя и его концентрацию [3], не может компенсировать падение скорости тепловыделения в зоне горения из-за ухудшения диффузии азота через прослойку инертного газа и потерь тепла на нагрев этой прослойки. Тем не менее в условиях эксперимента горение наблюдалось при разбавлениях в несколько раз больших, чем описано в работе [5] и оценено в [6]. В чистом азоте ( $c_N = 1$ ) спиновый режим горения наблюдался при  $p = 125 \div 750$  мм рт. ст. При большем давлении реализуется стационарное горение.

Характеристики горения и смена режимов в основном изучались на смесях фиксированного состава при изменении общего давления смеси. На рис. 2 представлены зависимости  $u(p)$  и  $v(p)$  от давления смеси газов при концентрациях азота от 1,0 до 0,7. Начало каждой кривой соответствует условиям возникновения спиновое горения, а конец ограничен давлением, при котором спиновое горение переходит в стационарное. За исключением кривых и при  $c_N = 0,70$ , когда такого перехода так

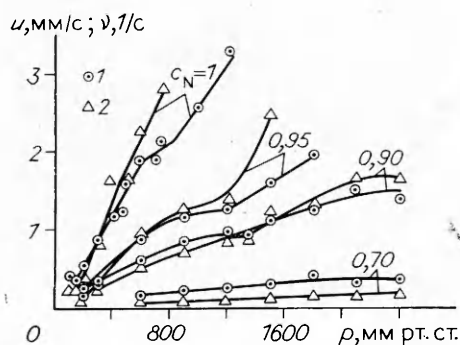


Рис. 2. Зависимость скорости (1) и частоты (2) спиновое горения от давления газовой смеси.

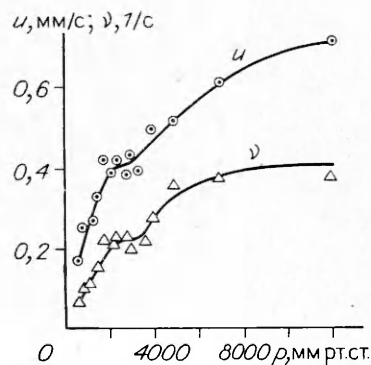


Рис. 3. Зависимости  $u(p)$  и  $v(p)$  при  $c_N = 0,70$ .

Т а б л и ц а 1

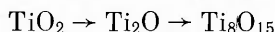
Давление, мм рт. ст.	Массовое содержание кислорода, %	Фазовый состав *	Цвет поверхности образца
150	1,6	Ti <sub>2</sub> O	Темно-серый
300	0,7	Ti <sub>2</sub> O, Ti <sub>8</sub> O <sub>15</sub>	Белый
750	0,7	—	Белый с желтым
1000	0,4	Ti <sub>2</sub> O	Желтый
1220	0,2	Ti <sub>2</sub> O (сл.)	»

\* При всех давлениях фазовый состав содержит помимо окислов титана также TiN и Ti.

и не произошло. Характерная особенность кривых — излом, смещающийся с уменьшением  $c_N$  в сторону более высоких давлений и низких скоростей и частот. Особенно наглядно этот излом виден на рис. 3. Визуально обнаружено, что в месте излома кривых сгоревший образец покрыт белым налетом, который испаряется и при более высоких давлениях исчезает с поверхности.

Рентгенофазовый анализ показал, что в процессе горения происходит превращение примеси TiO<sub>2</sub>, присутствующей в исходном порошке титана, в Ti<sub>2</sub>O, которая при давлениях, соответствующих излому кривых, переходит в Ti<sub>8</sub>O<sub>15</sub>, концентрируясь в наружном слое образца. При большем давлении Ti<sub>8</sub>O<sub>15</sub> испаряется и конденсируется на холодных стенках бомбы. В подтверждение изложенного в табл. 1 приводятся данные рентгенофазового и химического анализа поверхностного слоя толщиной 1—2 мм образцов, сгоревших при различных давлениях. В исходном порошке титана содержится около 1% кислорода в виде TiO<sub>2</sub>, а белый конденсат, осевший после сгорания образца на внутренней поверхности бомбы, состоит из Ti<sub>8</sub>O<sub>15</sub>.

Таким образом в процессе горения происходит преобразование окисла по схеме



на фоне увеличения давления газа, скорости, частоты и температуры горения. В результате испарения последнего окисла с поверхности самоочищается продукт горения от кислорода, а теплопотери, идущие на испарение Ti<sub>8</sub>O<sub>15</sub>, вероятно, замедляют рост параметров горения и образуют ступеньки на зависимостях  $u(p)$ ,  $v(p)$ .

На рис. 4 приводятся данные о влиянии давления газовой смеси и концентрации в ней азота на шаг спигового горения  $h$ , величина которого характеризует не только расстояние между местами прохождения двух ближайших очагов горения, но и отношение средней скорости горения  $u$  к линейной скорости вращения очага горения по поверхности образца  $u_{\text{сп}}$  («спиновой» скорости):

$$u_{\text{сп}} \approx \pi d v, \quad h = u/v \approx \pi d u / u_{\text{сп}} \sim u / u_{\text{сп}}$$

Как видно из рисунка, это отношение уменьшается с ростом  $p$  и  $c_N$ , что

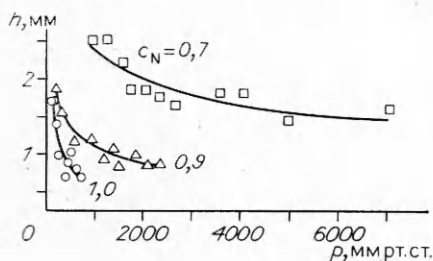
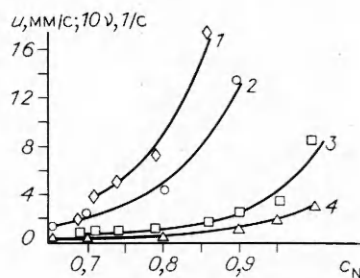
Рис. 4. Зависимость  $h(p)$ .

Рис. 5. Зависимости скорости (3, 4) и частоты спигового горения (1, 2) от концентрации азота в газовой смеси.

$p$ , мм рт. ст.: 1, 3 —  $15,5 \cdot 10^3$ , 2, 4 —  $1,8 \cdot 10^3$ .

Таблица 2

p, мм рт. ст.	Спиновое горение					Стационарное горение				
	c <sub>N</sub>	A	n	B	m	c <sub>N</sub>	A	n	B	m
1,8·10 <sup>3</sup>	0,65—0,9	0,006	6	0,0004	9	0,9—1,0	0,0004	9	—	—
15,5·10 <sup>3</sup>	0,69—0,86	0,01	6	0,0003	10	0,86—1,0	0,0001	11,3	—	—

свидетельствует о том, что эти параметры оказывают более сильное влияние на «спиновую» скорость (или на частоту спинового горения), а не на среднюю скорость горения. Кривые на рис. 4 построены по эмпирическим формулам  $h = k/p^a$ , константы которых  $k$  и  $a$  приведены ниже.

c <sub>N</sub>	k	a
0,7	12,9	0,25
0,9	8,8	0,30
1,0	21,6	0,52

Влияние давления на шаг спинового давления, выражающееся величиной показателя  $a$ , усиливается с ростом c<sub>N</sub>. Как следует из формулы  $u_{сн}/u \approx \pi d/h$ , при подстановке значений  $d$  и  $h$  «спиновая» скорость горения более чем на порядок превышает среднюю.

Характер зависимостей  $v(c_N)$  и  $u(c_N)$  при постоянном ее давлении виден на рис. 5. Полученные данные неплохо описываются эмпирическими формулами

$$u = A \exp(nc_N), \quad v = B \exp(mc_N),$$

константы для которых приводятся в табл. 2. Кривые 3 и 4 рис. 5 состоят из двух участков: стационарного и спинового режимов горения. Согласно таблице, зависимость  $u(c_N)$  в стационарном режиме «сильнее» ( $n = 9 \div 11,3$ ), чем в спиновом ( $n = 6$ ).

Итак, в результате проделанной работы показана возможность существования спинового горения при давлении газовой смеси меньше атмосферного. Определена область спинового горения в координатах давление смеси — концентрация азота. Получены данные по зависимости параметров спинового горения от давления смеси и концентрации азота, а также данные по самоочистке титана при горении при пониженном давлении.

Объяснение полученных результатов затруднено сложностью совокупных процессов, сопровождающих горение: спутная и встречная фильтрация газа, диффузия азота через прослойку инертного газа и нитридную пленку металла, поверхностное распространение горения, сопровождающееся объемным догоранием, неполнота превращения во фронте горения, к которым добавляются сложности, связанные с нестационарностью процесса спинового горения.

Пользуюсь возможностью поблагодарить сотрудников лаборатории рентгеноструктурного анализа и группы экспресс-анализа ИСМАН за помощь в работе и А. П. Алдушина за полезные советы при обсуждении результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г., Филоненко А. К., Боровинская И. П. Новые явления при горении конденсированных систем // Докл. АН СССР.— 1973.— 208, № 4.— С. 892.
2. Филоненко А. К., Вершинников В. И. Закономерности спинового горения титана в азоте // ФГВ.— 1975.— 11, № 3.— С. 353.
3. Алдушин А. П., Мержанов А. Г., Хайкин Б. И. Режимы послонного фильтрационного горения пористых металлов // Докл. АН СССР.— 1974.— 215, № 3.— С. 612.
4. Бахман П. И., Беяев А. Ф. Горение гетерогенных конденсированных систем.— М.: Наука, 1967.— С. 127, 128.

5. Мержаков А. Г., Боровинская И. П., Володин Ю. Е. О механизме горения пористых металлических образцов в азоте // Докл. АН СССР.— 1972.— 206, № 4.— С. 905.
6. Алдушин А. Н. Фильтрационное горение металлов // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах.— Новосибирск: Наука, 1988.— 52 с.

*п. Черноголовка*

*Поступила в редакцию 19/II 1991*

УДК 621.452.034.022.5/7 : 532.517.4

*С. А. Зайцев, В. Р. Кузнецов, Г. М. Кунцев*

## **ВЛИЯНИЕ ПРОГРЕВА И ИСПАРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА НА ГОРЕНИЕ В МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ**

Разработана модель горения распыленного жидкого топлива, исходящая из предположения о том, что горение капли как индивидуального образования невозможно, а капли полностью увлечены средним движением. Модель дает значение длины факела, близкое к наблюдаемому экспериментально. Установлено, что время прогрева капель примерно такое же, как и время их испарения, а изменение температуры воздуха в основном влияет на прогрев капель и слабо влияет на их испарение.

Горение распыленного жидкого топлива в турбулентном потоке воздуха широко используется в различных технических устройствах. Оценки показывают, что в условиях, типичных для камер сгорания, из-за нестационарного характера турбулентных пульсаций и инерционности капель скорость их обтекания оказывается настолько значительной, что горение капель как индивидуальных образований невозможно [1]. Поэтому превращение вещества происходит в едином фронте пламени, который формируется при смешении воздуха и паров топлива, испаренного совокупностью капель.

Экспериментальные данные в целом подтверждают описанный в [1] механизм турбулентного горения смеси капель с воздухом. Однако ряд закономерностей, которые наблюдаются в эксперименте, требует дополнительного теоретического объяснения. В частности, в опытах одного из авторов данной работы установлено, что при подаче распыленного керосина с повышением температуры воздуха  $T_\infty$  коэффициент полноты сгорания топлива в модели камеры сгорания увеличивается. Этот эффект может быть обусловлен несколькими причинами. Во-первых, возможно влияние кинетики химических реакций. Во-вторых, с ростом  $T_\infty$  возможно ускорение прогрева и испарения капель. Наконец, с повышением  $T_\infty$  ослабевают роль газодинамических эффектов (отношение скоростей на входе и выходе из камеры сгорания приближается к единице). При этом растет время пребывания в камере сгорания и характеристики процесса смешения улучшаются.

Исходя из результатов [1], можно было бы сделать вывод о том, что температура воздуха не влияет на фазовые превращения, так как этот процесс идет в наиболее прогретых зонах. Температура в этих зонах определяется адиабатической температурой горения  $T_s$ , которая слабо зависит от  $T_\infty$ . Такой вывод, однако, не верен, так как в другой серии опытов при всех прочих одинаковых условиях сравнивались полноты сгорания предварительно прогретого и непрогретого жидкого топлива. Хотя в обоих случаях газодинамические характеристики одинаковы, полнота сгорания прогретого топлива оказалась выше. Заметим, что величины  $T_s$  для смесей прогретых и непрогретых капель с воздухом различаются крайне мало. Отсюда можно сделать вывод о том, что в рассматриваемых опытах роль химической кинетики малосущественна.

Таким образом, возникает необходимость проанализировать влияние газодинамических эффектов, прогрева и испарения капель на процесс горения распыленного жидкого топлива в камере сгорания. Точное решение такой задачи невозможно. Однако ряд упрощающих факторов