

5. L. Povinelly, R. Rosenstein. AIAA J., 1962, 2, 10.
6. J. Ito. 3-th Symposium (International) on Rocket and Astronautics, 1962.
7. G. Inami, H. Shanfield. AIAA J., 1967, 7, 1314.
8. Р. Ф. Чейкин, В. Х. Андерсен. Сб. «Исследование ракетных двигателей на твердом топливе». М., 1963.
9. А. Ф. Беляев, Ю. А. Кондрашков и др. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 1.
10. Н. Н. Бахман, Д. П. Поликарпов. Изв. АН СССР, «Энергетика и автоматика», 1961, 4.

УДК 536.46

## ГОРЕНИЕ ОДИНОЧНЫХ ЧАСТИЦ БОРА

М. А. Гуревич, И. М. Кирьянов, Е. С. Озеров

(Ленинград)

1. В струю горячего газа (смесь окислителя с аргоном и азотом) вводились частицы кристаллического бора. Наблюдение за горящими частицами велось визуально или при помощи киносъемки.

Струя горячего газа получалась при помощи дуговой плазменной горелки 1 (рис. 1), в которой дуга постоянного тока силой 150–300 а горела в кольцевом зазоре между вольфрамовым катодом 2 и медным анодом 3. Температура аргона на выходе из горелки по расчетной оценке изменялась в пределах 4000–6000°С.

На выходном срезе горелки был дополнительно смонтирован смеситель 4. Здесь в струю аргона тонкими радиальными струйками подмешивался окислитель (водяной пар или кислород) или смесь окислителя с азотом. Из смесителя газ поступал через шамотную трубку-насадку 5 — в металлическую камеру 6, диаметр которой (150 мм) в 15 раз превышал внутренний диаметр насадки 5. Камера предназначалась для уменьшения подсоса атмосферного воздуха. По всей ее длине имелось слюдяное окно для наблюдения за частицами.

Температура потока газовой смеси могла измеряться в любой его точке вольфрам-рениевой термопарой (диаметр электродов 0,3 мм), а вне насадки 5, кроме того, методом обращения Д-дуплета натрия. В последнем случае в горелку вместе с аргоном подавалось небольшое количество паров натрия.

Содержание компонент в газовой смеси рассчитывалось по их расходам, измеряемым реометрами. По суммарному расходу газов в средней температуре рассчитывалась и средняя скорость потока в канале насадки 5. Эта скорость изменялась в пределах 10–20 м/сек.

Частицы металла вводились в поток через отверстие в насадке 5. Для этого использовались два типа питателя. Первый мало отличается от описанного в [1]. Испытуемый порошок засыпался в небольшую камеру, дно которой вибрировало с частотой 50 гц. Из полученного в

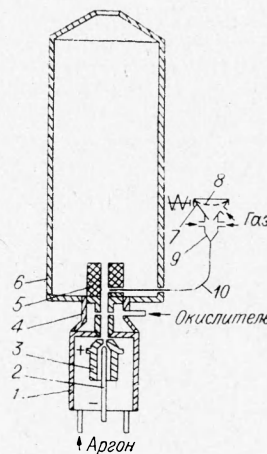


Рис. 1.

результате вибрации облака частиц некоторые частицы подхватывались слабым током азота и по трубке 10 выносились в поток горячего газа.

Конструкция второго питателя заимствована из работ Одесского государственного университета и схематично показана на рис. 1, 7. В сито 8 засыпалась проба порошка. Питатель встряхивался электро-вibratorом с частотой 50 *гц*. Конгломераты частиц бора через отверстия в сите и дне бункера попадали в камеру 9, где дробились на отдельные частицы двумя встречными струями азота и тем же током азота выносились по трубке 10 в струю горячего газа.

Треки горящих частиц бора фотографировались фотоаппаратом (время открытия затворов 0,5—1,0 *сек*) или киноаппаратом (частота кадров 6—8 *сек*<sup>-1</sup>, ширина пленки 35 *мм*). Линейное увеличение съемки изменялось в пределах 0,5—0,005 в зависимости от скорости газового потока, размеров испытуемых частиц и цели съемки (измерение времени горения, измерение времени индукции, качественные наблюдения).

2. Почти во всех опытах использовался порошок, получаемый измельчением крупных кристаллов бора (чистота 0,9999). Просеивая кристаллы на стандартных ситах, выделили пять фракций. Самая мелкая из них 0—56 *мк* дополнительно рассеивалась осаждением частиц из потока воздуха в горизонтальной трубе, с целью ограничить минимальный размер фракции.

Каждая из полученных пяти фракций изучалась под микроскопом. Оказалось, что частицы по форме близки к параллелепипедам. За размер частиц принималось среднее арифметическое двух ее размеров, видимых под микроскопом (табл. 1).

Распределение частиц по размерам для каждой фракции определялось как на пробе, взятой на стекло из пробирки, так и на частицах,

выделенных из питателя и уловленных на стекло, смазанное вазелином.

Для фракции 4 был вычислен средний размер равновеликого шара по удельному весу бора и весу пробы, содержащей примерно 10<sup>3</sup> произвольно выбранных частиц (считаны под микроскопом). Такой размер оказался равным 135 *мк*, что меньше среднего квадратичного для данной фракции. Это говорит о том, что «высота» частиц, не наблюдаемая в микроскоп, была заметно меньше наблюдаемых размеров.

3. Частица кристаллического бора размером 1—3 *мм*, укрепленная в петле из вольфрам-рениевой проволоки, вносилась в поток газа

(20% водяного пара и 80% аргона по объему), имеющий температуру 1700° С. Через 3—4 *сек* частица раскалялась до яркого свечения, расплавлялась и принимала форму, близкую к сферической.

На установке, описанной выше, сжигались частицы фракции 4 (см. табл. 1). Яркие треки горящих частиц улавливались на холодные стекла, вносимые в струи газа. Эти частицы, изученные под микроскопом, во всех случаях представляли собой сферические капли металлического бора. Диаметр их был меньше размеров исходных частиц в

Таблица 1  
Пределы изменения размеров частиц бора

Фракция	Минимальный, <i>мк</i>		Максимальный, <i>мк</i>		Средний квадратичный, <i>мк</i>
	сито	микроскоп $I_d = 0,05^*$	сито	микроскоп $I_d = 0,95^*$	
1	—	20	56	75	—
2	56	50	75	100	73
3	75	80	105	140	105
4	105	100	150	180	145
5	150	150	200	260	200

\*  $I_d$  — интегральная функция частичного распределения по размерам частиц.

2-:-20 раз. Описанные наблюдения позволяют предположить, что значительную часть времени горения частица бора представляет собой жидкую каплю.

На сферических каплях недогоревшего бора слой окисла микроскопическим анализом обнаружить не удалось. В той области потока, где, судя по трекам, горение заканчивалось, продукты горения не были обнаружены совсем, если частицы горели в водяном паре. Если окисли-

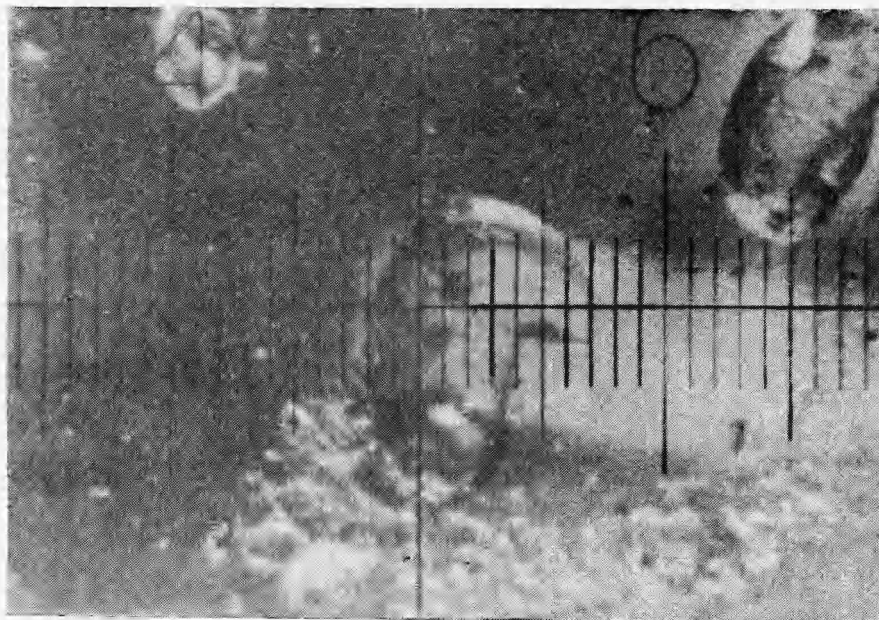


Рис. 2.

телем служил кислород, то удавалось улавливать продукты горения, представлявшие собой (рис. 2) оплавленные прозрачные частицы размерами от совпадающих по порядку величины с размерами исходных частиц бора до гораздо более мелких. Часто встречались крупные образования из большого числа частиц размером 10-:-20 мк.

Форма треков, как правило, была криволинейной, прямолинейные треки встречались гораздо реже. Чаще всего начало трека представляло собой тонкую четкую линию (рис. 3), толщина которой примерно соответствовала размеру исходной частицы бора. Иногда фотография трека имела такой вид на всей его длине. Чаще трек постепенно утолщался, границы его становились размытыми, на резких снимках отчетливо просматривалась четкая, яркая средняя линия — «трек в треке». Иногда «утолщающиеся» треки частиц, горящих в водяном паре, заканчивались «звездами», соответствующими, очевидно, дроблению частиц (рис. 4).

Обычно считается, что четкий тонкий трек соответствует гетерогенному горению частицы, а широкий размытый — горению в парах. По крайней мере, последнее неубедительно, так как свечение вблизи частицы (в том числе и горячей гетерогенно) может быть вызвано горячими мелкими частицами окисла, первоначально образованного на поверхности частицы. Переход от тонкого трека к широкому можно объяснить постепенным накоплением окисла вблизи частицы. Против такой

траектории говорят два факта. Во-первых, наблюдались сильно искривленные широкие треки. Едва ли возможно, чтобы в условиях резкого изменения траектории движения мелкие частицы окисла «сопровождали» крупную частицу. Во-вторых, в одной и той же области потока наблюдались тонкие и широкие треки.

Нужно полагать, что наблюдавшееся в наших опытах расширение треков связано с переходом горения с поверхности в паровую фазу.

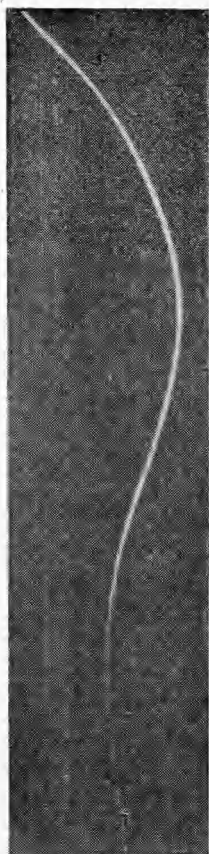


Рис. 3.

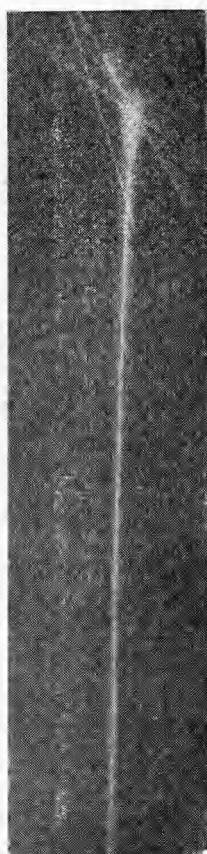


Рис. 4.

Что такой переход в принципе возможен, было показано расчетом в работе [2]. Но, в частности, для бора такое наблюдение несколько неожиданно, так как не согласуется с местом бора в классификациях Гордона [3] и Глассмена — Бржустовского [4].

4. Частицы каждой из описанных фракций порошка вводились в поток горячего газа. Температура и состав газа подбирались так, чтобы наблюдалось устойчивое горение частиц. При непрерывной подаче частиц температура газа медленно понижалась до тех пор, пока не прекращалось видимое горение. Затем температура вновь повышалась до появления горящих частиц. Изменение температуры газового потока достигалось регулировкой рабочего тока горелки или изменением расхода азота, подаваемого в поток вместе с окислителем. В режиме, соответствующем прекращению (возникновению) горения, температура газа измерялась в «среднем месте воспламенения», а состав его вычислялся по расходам компонентов. Этот режим считался предельным режимом самовоспламенения частиц. Длина шамотной насадки и общий расход газа подбирались так, чтобы воспламенение частиц проис-

ходило вблизи выходного среза насадки, где состав газа мало отличается от вычисленного по расходам.

Во всех случаях предел воспламенения оказывался тем ниже, чем крупнее были частицы испытываемой фракции. Поэтому найденные пределы воспламенения приписывались наиболее крупным размерам каждой фракции. Для определенности принимался размер, полученный измерением под микроскопом и соответствующий значению интегральной функции распределения — 0,95.

На рис. 5 показаны предельные температуры воспламенения (температуры газа) в зависимости от диаметра частиц при разном содержании водяного пара (по объему) (сплошные линии) и кислорода (пунктирные линии) в смеси с аргоном и азотом. Предельная температура воспламенения в водяном паре превосходит такую же в кислороде на величину до 250°С в зависимости от размера частицы и содержания

окислителя. Эта разница представляется удивительно малой, если учесть, что теплота реагирования до  $V_2O_5$ , рассчитанная на единицу массы окислителя для водяного пара, почти на порядок ниже, чем для кислорода. Возможно, в случае водяного пара окись не является конечным продуктом реакции. Вспомним, что продукты горения в водяном паре не удавалось улавливать там, где легко улавливались продукты горения в кислородсодержащих смесях. Другое возможное объяснение состоит в предположении о меньшем тормозящем влиянии пленки окисла в атмосфере водяного пара.

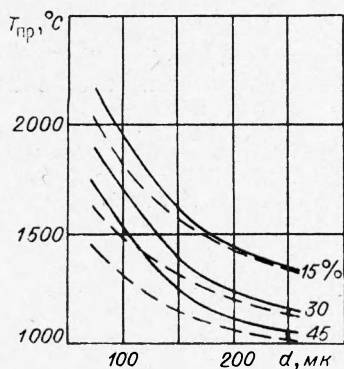


Рис. 5.

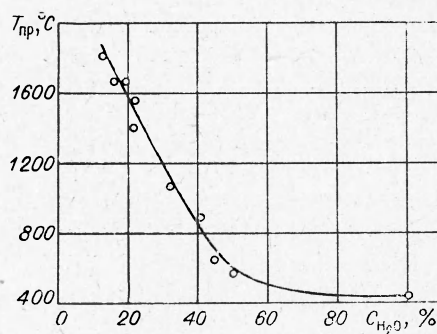


Рис. 6.

Интересно, что конгломераты мелких (порядка сотен Å) частиц аморфного бора воспламеняются гораздо легче, чем сплошные частицы кристаллического бора того же размера. Описанные выше питатели заправлялись мелким порошком аморфного бора. Они выдавали не отдельные частицы, а конгломераты различного размера. Улавливанием на стекло и последующим изучением под микроскопом было установлено, что в распределении ярко выражены две группы конгломератов: размером  $\sim 25$  и  $\sim 150$  мк. Пределы воспламенения для них в 100%-ном водяном паре составили: для 25 мк —  $800^\circ\text{C}$ , для 150 мк —  $430^\circ\text{C}$ . (Опыты при температурах  $900^\circ\text{C}$  и ниже проводились на установке с горизонтальным потоком газа, нагреваемого в силитовой печи, при скорости потока около 5 м/сек.) Нельзя отнести разницу в пределах воспламенения только за счет содержания водяного пара в среде. На рис. 6 показана зависимость предела воспламенения конгломератов размером около 150 мк от содержания водяного пара в смеси с азотом ( $T \leq 900^\circ\text{C}$ ) и азотом и аргоном ( $T > 900^\circ\text{C}$ ).

5. В смеси водяного пара с аргоном определялись время индукции и время горения. Для этого треки горящих частиц фотографировались через диск-обтюратор с отверстиями, вращаемый синхронным электродвигателем, на фотографии треков наносились метки времени через 2,5 мсек. Время горения определялось по числу меток в пределах трека.

Время индукции вычислялось

Таблица 2

Времена индукции и горения для частиц разных фракций

Фракция	$d, \text{ мк}$	$T, ^\circ\text{C}$	$C_{H_2O}, \%$	$\tau_{\text{инд.}}, \text{ мсек}$	$\tau_{\text{гор.}}, \text{ мсек}$
2	73	2100	36	14	40
3	105	2100	47	—	34
3	105	2100	36	—	62
3	105	2100	25	—	82
4	145	1800	36	19	—
4	145	2100	36	17	97
4	145	2500	36	11	—
5	200	2100	36	28	—

по расстоянию от места ввода частицы до места воспламенения и скорости частицы, которая считалась меняющейся от нуля в месте выдачи до скорости горячей частицы в месте воспламенения. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Указанные в таблице значения объемной концентрации водяного пара в среде оставались практически постоянными в течение всего времени жизни частицы. Температура менялась сравнительно мало, только в течение периода задержки воспламенения. Процесс горения проходил при переменной температуре среды. Последняя менялась от значений, указанных в таблице, до 800-1000°С. Нет оснований ожидать, что время горения существенно зависит от температуры среды.

Интересно, что время индукции заметно меньше времени горения. Зависимость того и другого времени от начального диаметра слабее квадратичной.

*Поступила в редакцию  
12/VIII 1968*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. Friedman, A. Масек. Combustion and Flame. 1962, 6.
2. М. А. Гуревич, Б. И. Сотниченко. Тр. ЛПИ, вып. 280, 1967.
3. Д. А. Гордон. Сб. «Исследование ракетных двигателей на твердом топливе», М., 1963.
4. Т. Бржустовский, И. Глассмен. Сб. «Гетерогенное горение». М., «Мир», 1967.

УДК 536.46+532.517.2

### НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ЛАМИНАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ ГОРЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТИ ОБТЕКАЕМОГО ТЕЛА

*Л. Ю. Артюх, Л. А. Вулис, В. П. Кашкарлов*

*(Алма-Ата)*

1. При гетерогенном горении, каталитических реакциях, взаимодействии высокоскоростных потоков с твердыми телами значения температуры и концентрации на поверхности устанавливаются в результате сложного взаимодействия процессов переноса импульса энергии и вещества. Использование уравнений теплового режима горения [1] в качестве граничных условий для уравнений пограничного слоя не только позволяет найти значения температуры и концентрации на поверхности, где протекает с конечной скоростью химическая реакция, но и установить пределы устойчивого режима гетерогенного горения [2, 3] при изменении параметров потока. Сочетание уравнений теплового режима с аналитическим решением уравнений пограничного слоя оказывается весьма полезным и в том отношении, что дает возможность получения обзримых результатов во всей области изменения этих параметров. В исследованиях по гетерогенному горению [4, 5] не рассматривается