

возрастания энтропии при уменьшении плотности на кривой Гюгоню, что доказывается с помощью неравенств (21). По-видимому, такое аномальное горение может наблюдаться в «холодных» пламенах [8].

Поступила в редакцию  
18/1 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Плешанов. ФГВ, 1975, 11, 4, 665.
2. С. П. Дьяков. ЖЭТФ, 1974, 27, 288.
3. А. С. Плешанов. ФГВ, 1976, 12, 3, 474.
4. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М., Гостехиздат, 1954.
5. А. С. Плешанов. ПМТФ, 1964, 4, 130.
6. П. П. Лазарев, А. С. Плешанов. ФГВ, 1976, 12, 4, 615.
7. Л. Д. Ландау. ЖЭТФ, 1944, 14, 240.
8. А. С. Соколик. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М., Изд-во АН СССР, 1960.
9. Е. С. Щетинков. Физика горения газов. М., «Наука», 1965.
10. В. С. Бабкин. Канд. дис. Новосибирск, ИХКиГ, 1965.
11. А. В. Вьюн. Канд. дис. Новосибирск, ИХКиГ, 1975.

---

### ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ

*Л. К. Парфенов*

*(Томск)*

Процессам горения и распространения пламени в горючих смесях в нормальных условиях посвящено много работ. В то же время практически отсутствуют исследования, рассматривающие вопросы горения и распространения пламени в горючих смесях в условиях невесомости. Распространено мнение, что конвекция благоприятствует распространению пламени снизу вверх, вследствие чего пределы распространения пламени при движении его вверх шире [1]. С другой стороны, авторы работ [2—4] считают, что конвекция играет отрицательную роль при распространении пламени, т. е. уменьшение конвекции должно приводить к расширению области воспламенения. Обнаруженный верхний предел по давлению, по мнению авторов [5], есть результат воздействия конвекции на процесс распространения пламени.

С целью изучения роли конвекции разработана экспериментальная установка (рис. 1), состоявшая из следующих элементов: генератор импульсов зажигания, внешняя капсула 3, внутренняя капсула 4, камера сжигания 2, жестко закрепленная во внутренней капсуле, кинокамера 5, электромагнитный зацеп 1.

Экспериментальная установка позволяла получить состояние невесомости в течение  $1 \div 1,5$  с. Необходимую информацию о влиянии невесомости на пределы распространения пламени ожидалось получить из экспериментов по измерению видимой скорости распространения пламени в нормальных условиях и в условиях невесомости. Скорость измерялась с помощью двух 50-микронных термопар, установленных в камере сжигания. Первая термопара была удалена от разрядного промежутка на 0,05 м, вторая — на 0,1 м. Абсолютная погрешность изме-

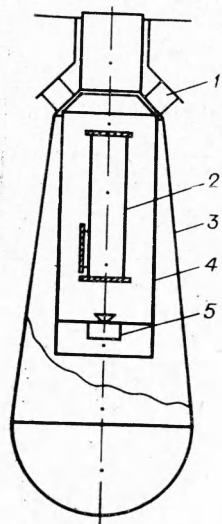


Рис. 1.

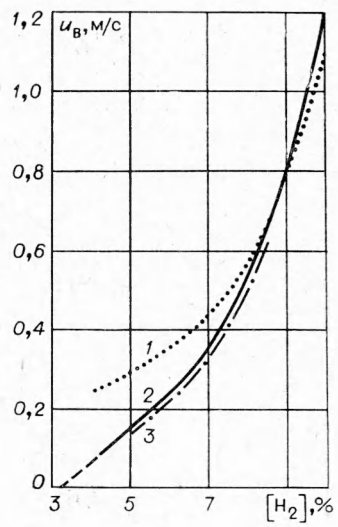


Рис. 2.

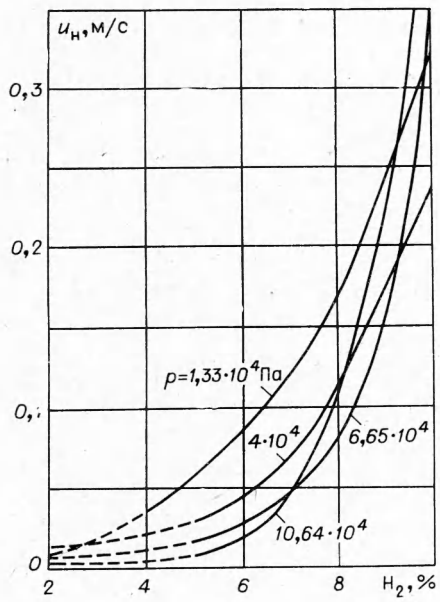


Рис. 3.

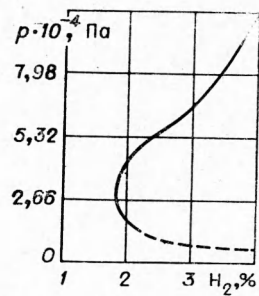


Рис. 4.

рения расстояния между термопарами составила 0,0001 м. Время распространения пламени от первой термопары до второй определялось по осциллографу. Абсолютная погрешность времени составила 0,01 с. Предельная относительная погрешность полученных данных не превышает 3%.

Результаты измерений при давлении  $1,33 \cdot 10^4$  Па представлены на рис. 2. Из полученных данных следует, что в условиях невесомости видимые скорости распространения пламени ( $u_v$ ) вниз и вверх (рис. 2, 2, 3) практически одинаковы и при изменении объемной концентрации водорода от 5 до 10% увеличиваются от 0,15 до 1,2 м/с. Этот экспериментальный факт лишней раз убеждает в том, что при исчезновении конвекции условия распространения пламени во всех направлениях одинаковы. Включение конвекции, т. е. проведение опыта при нормальных условиях, приводит к существенному возрастанию скорости распространения бедных пламен (рис. 2, 1). При увеличении содержания водорода влияние конвекции на распространение пламени ослабевает. Видно, что при  $[H_2] > 8,5\%$  пределы распространения пламени одинаковы как в нормальных условиях, так и в невесомости.

Для малых концентраций водорода ( $< 4,5\%$ ) измерить видимую скорость распространения пламени в невесомости описанными выше термопарными датчиками невозможно, так как за время падения капсулы пламя не успевало пройти мимо термопар.

Была предпринята попытка оценить пределы распространения пламени в водородно-кислородной смеси в условиях невесомости в расширенном интервале давлений. Для этого измерены скорости распространения пламени при давлении  $4 \cdot 10^4$ ;  $6,65 \cdot 10^4$ ;  $10,64 \cdot 10^4$  Па. Зависимость видимой скорости от давления и концентрации имеет сложный характер: при повышенном содержании водорода ( $\sim 10\%$ ) рост давления ведет сначала к уменьшению видимой скорости, а затем скорость резко возрастает; при  $[H_2] \leq 5\%$   $u_v$  монотонно убывает с ростом  $p$ . Аналогичен и характер зависимости нормальной скорости от давления и содержания водорода (рис. 3).

Нормальную скорость распространения пламени по результатам проведенных измерений можно вычислить по методу бомбы постоянного давления. В этом случае  $u_n = u_v \cdot \rho_r / \rho_0$ , где  $u_v$  — видимая скорость распространения пламени, м/с;  $u_n$  — нормальная скорость горения, м/с;  $\rho_r$  — плотность среды за фронтом пламени;  $\rho_0$  — плотность свежей смеси. Результаты расчетов приведены в табл. 1. Графики зависимости  $u_n$  от содержания водорода приведены на рис. 3, откуда можно приближенно оценить величины  $u_n$  при очень малых содержаниях водорода-

Т а б л и ц а 1

[H <sub>2</sub> ], %	$p=10,64 \times 10^4$ Па		$p=6,65 \times 10^4$ Па		$p=4 \cdot 10^4$ Па		$p=1,33 \times 10^4$ Па	
	$u_v$	$u_n$	$u_v$	$u_n$	$u_v$	$u_n$	$u_v$	$u_n$
4,5	—	—	—	—	—	—	0,12	0,05
5,0	0,03	0,01	0,04	0,02	0,08	0,03	0,15	0,06
6,0	0,05	0,02	0,08	0,03	0,12	0,04	0,23	0,09
7,0	0,14	0,05	0,13	0,04	0,20	0,07	0,34	0,12
8,0	0,40	0,12	0,25	0,08	0,38	0,12	0,50	0,16
9,0	0,87	0,24	0,61	0,17	0,60	0,17	0,84	0,25
10,0	1,75	0,47	0,35	0,36	0,90	0,24	1,17	0,32

да: при  $[H_2] = 2\%$   $u_n \leq 0,02$  м/с. Ход графиков не исключает того, что при  $p = 4 \cdot 10^4$  Па (для концентраций водорода, меньших 2,5%) величины нормальных скоростей больше, чем при всех других давлениях.

На рис. 4 приведена зависимость предельных концентраций водорода от давлений, построенная на основе экстраполяции графиков рис. 3 в предположении, что предельная скорость горения составляет 0,02 м/с. Тенденция изменения скорости распространения пламени при возрастании давления в области малых концентраций водорода не исключает возможности существования второго предела по давлению [6] и в условиях невесомости.

Разумеется, экстраполяция полученных экспериментальных кривых в область малых содержаний водорода, оценка нормальных скоростей горения в этой области и пределов распространения пламени носят сугубо ориентировочный характер. Окончательные количественные характеристики распространения пламени в области малых содержаний водорода в условиях невесомости могут быть получены при экспериментах с длительными временами действия условий невесомости, например, в условиях космических полетов.

Тем не менее установленные тенденции изменения нормальной скорости пламени совершенно четко указывают на то, что в условиях невесомости пламя может распространяться при меньших концентрациях, нежели в нормальных условиях, т. е. пределы в невесомости должны быть шире. На это указывали авторы работ [2—4]. Дальнейшее изучение распространения пламени в бедных горючих смесях в условиях невесомости может дать ответ на вопрос о существовании истинного предела распространения пламени.

Другим результатом проведенных исследований является установление того обстоятельства, что сами величины скоростей распространения пламени в околопредельных смесях в условиях невесомости достигают весьма малых значений. Это означает, что для формирования самораспространяющихся пламен с такими скоростями нужны большие объемы, соответствующие гасящим расстояниям (размеры объемов должны быть не меньшими гасящих расстояний). Оценка этих размеров (в литрах) представлена в табл. 2, откуда следует, что размеры объемов, в которых пламя может свободно развиваться до режима само-

распространения, весьма велики: при  $[H_2] = 3\%$  они достигают 0,53 м, а при  $[H_2] = 2\%$  — 1,11 м ( $p = 1,33 \cdot 10^4$  Па). В объеме с меньшими размерами скажется гасящее влияние стенок объема, и пламя погаснет.

Следовательно, в замкнутых объемах пламя распространится на весь объем смеси лишь в том случае, если до выхода на стационарный режим оно не будет ограничено гасящим влиянием поверхно-

стей. Но даже при выполнении условия достаточности размеров свободного пространства для формирования пламени требуется выполнение других немаловажных условий: достаточной длительности импульса зажигания и значительного его энергосодержания. Как следует из данных табл. 2 и из результатов измерения скорости распространения пламени в невесомости времена формирования пламени составляют примерно  $6 \div 28$  с при  $[H_2] = 3\%$  и примерно  $11 \div 55$  с при  $[H_2] = 2\%$ .

Таблица 2

$p \cdot 10^{-4}$ Па	[H <sub>2</sub> ], %			
	2	3	4	5
1,33	0,11	0,53	0,28	0,18
4,00	0,29	0,22	0,16	0,12
6,65	0,31	0,25	0,20	0,14
10,64	0,35	0,28	0,20	0,14

Поступила в редакцию  
11/IV 1977.  
после доработки — 9/XI 1977

## ЛИТЕРАТУРА

1. H. F. Coward, G. W. Jones. US. Bur. Mines Bull., 1952, 503.
2. A. Levy. Proc. Roy. Soc., Ser. A., 1965, 283, 134.
3. А. А. Ловачев. Докл. АН СССР, 1970, 193, 634.
4. В. Н. Кривулин, А. А. Ловачев и др.—В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
5. В. С. Бабкин, А. В. Вьюн.—В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
6. В. Ф. Панин, Л. К. Парфенов, Ю. А. Захаров.—В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.

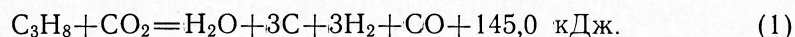
## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ПРОНИЦАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*В. Л. Батиевский, Г. Т. Сергеев*

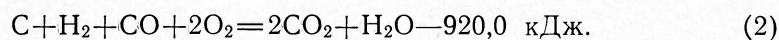
*(Минск)*

Имеющиеся в настоящее время зависимости для расчета тепло- и массообмена в реагирующих средах в известной степени неполны. Нет общепринятой методики определения лучистой составляющей теплового потока в реагирующем пограничном слое многокомпонентного газа. Недостаточно исследован случай многостадийных химических реакций горения.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию локального тепло- и массопереноса в реагирующем ламинарном и турбулентном пограничном слое при фильтрации пропана через проницаемую поверхность, обтекаемую потоком воздуха. Для обобщения процесса горения в пограничном слое многокомпонентного газа обобщается двухстадийность химического реагирования. Первая стадия — реакции разложения и конверсии пропана с образованием промежуточных продуктов — может быть записана в следующем виде [1]:



Вторая стадия — это реакции окисления углерода, водорода и окиси углерода, т. е.



Особенность второй стадии процесса состоит в том, что все реакции экзотермические, зона, в которой они протекают, характеризуется максимальной температурой  $T^*$ . Реакции (1), (2) являются результирующими и действительный их механизм значительно более сложный [2]. Однако принятие двухслойной схемы реагирования, как показали исследования [3], соответствуют экспериментальным данным.

Эксперименты проводились в низкоскоростной аэродинамической трубе постоянного действия с закрытой рабочей частью, имеющей прямоугольное сечение  $280 \times 340$  мм. Параметры набегающего воздушного потока изменялись в следующих пределах:  $T_\infty = 290 \div 470$  К,  $u_\infty = 1 \div 15$  м/с,  $Re_\infty = (1,5 \div 7,5) \cdot 10^4$ , степень турбулентности  $\varepsilon = 0,5\%$ , давление  $p = 10^5$  Н/м<sup>2</sup>.

Процессы переноса тепла и массы вещества в реагирующем пограничном слое изучались на продольно-обтекаемом многосекционном цилиндрическом теле с внешним диаметром 0,03 м, состоящим из предвключенного участка в торцевой части для гидродинамического форми-