

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ СМЕСЕЙ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ С ПАРАМИ ХЛАДОНОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПЛАМЕНИ СВЕРХУ ВНИЗ

Ю. Н. Шебеко, В. Н. Цап, А. Я. Корольченко,
А. В. Иванов, А. С. Бобков

(Балашиха)

Исследование предельных условий горения в парогазовых смесях органических веществ с хладонами интересно как с теоретической, так и с практической стороны. Это обусловлено возрастанием внимания исследователей к изучению механизмов ингибирования процессов горения галогенсодержащими соединениями.

Изучение концентрационных пределов распространения пламени в парогазовых смесях указанного выше вида проводилось в работах [1—5]. В результате этих исследований подтверждена гипотеза [6] о том, что экстремальным («пиковым») точкам (точкам флегматизации) областей воспламенения соответствуют смеси, стехиометрические относительно сгорания до CO и H_2O . В работе [7] сделана попытка интерпретировать эту закономерность на основе представлений о двухстадийном характере горения органических веществ в воздухе.

Известно, что наличие концентрационных пределов распространения пламени обусловлено теплопотерями из фронта пламени [8]. Одним из наиболее важных источников теплопотерь для пламен, горящих в поле тяжести, является естественная конвекция. Механизмы ее влияния для пламен, движущихся сверху вниз и снизу вверх, вероятно, различны [9]. Эксперименты в работах [1—5], где изучали воздействие хладонов на пределы распространения пламени, проводились при прохождении пламени снизу вверх. В связи с этим представляет интерес выяснить, будет ли наблюдаться отмеченная выше закономерность для предельных составов смесей в экстремальной точке области воспламенения при распространении пламени сверху вниз, что, по-видимому, полезно для развития и уточнения конвективной теории пределов.

Важным параметром, характеризующим условия движения пламени, является нормальная скорость горения. Согласно теоретическим положениям [10], нормальная скорость горения предельных по концентрации смесей постоянна и не зависит от вида горючего и от наличия в смеси негорючих разбавителей. В работах [11, 12] проведено исследование изменения нормальной скорости горения S_u предельных смесей $\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2$ при распространении пламени сверху вниз в зависимости от содержания азота. Найдено, что величина S_u для предельных смесей относительно слабо меняется с концентрацией азота и составляет $\sim 10\text{--}20$ см/с. В [13, 14] измерены нормальные скорости горения предельных смесей метана, пропана, аммиака и водорода с воздухом при распространении пламени сверху вниз. Величины этих скоростей при атмосферном давлении составили $\sim 7\text{--}10$ см/с.

Представляет интерес проверка данной закономерности для более широкого круга горючих веществ и флегматизаторов, обладающих ингибирующим действием. В связи с этим в настоящей работе ставятся две задачи:

- 1) проверить, являются ли смеси в экстремальных точках областей воспламенения стехиометрическими при сгорании до CO и H_2O в случае распространения пламени сверху вниз;
- 2) исследовать зависимости нормальной скорости горения предельных смесей от содержания в них хладонов, в том числе и обладающих ингибирующим действием.

Методика эксперимента. Изучение зависимости пределов воспламенения от содержания разбавителя в смеси проводилось на приборе КП, подробное описание которого дано в работе [15]. Реакционный сосуд со-

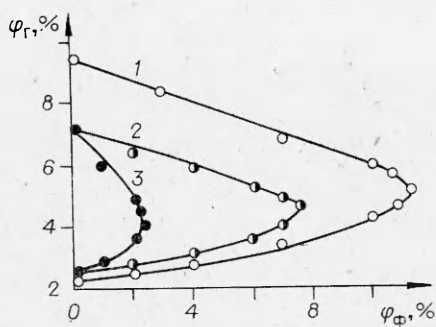


Рис. 1. Влияние хладонов на пределы воспламенения пропана в воздухе ($\varphi_{г}$, $\varphi_{ф}$ — объемные концентрации горючего и флегматизатора). 1, 2 — 1, 1, 2-трифтортрихлорэтан при распространении пламени снизу вверх и сверху вниз; 3 — 1, 2-дибромтетрафторэтан при распространении пламени сверху вниз.

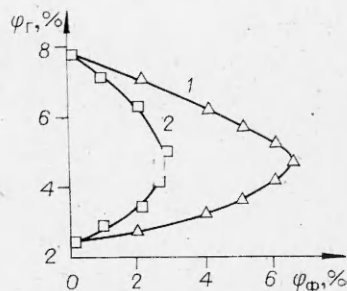


Рис. 2. Влияние хладонов на пределы воспламенения пропилена в воздухе при распространении пламени сверху вниз. 1 — 1, 1, 2-трифтортрихлорэтан; 2 — 1, 2-дибромтетрафторэтан.

стоял из вертикальной стеклянной трубы с внутренним диаметром 0,05 и длиной 1,5 м. Смесь зажигали электрической искрой в верхней части трубы. При распространении пламени в трубе сверху вниз фронт пламени в достаточной степени плоский, что позволяет отождествить видимую скорость горения с нормальной [11, 12].

Нормальная скорость горения измерялась тремя фотодиодами, размещенными на расстоянии $1/3$, $1/2$ и $2/3$ высоты трубы. Сигналы с фотодиодов поступали на шлейфовый осциллограф К115 и записывались на светочувствительной ленте. Величина нормальной скорости горения вычислялась путем обработки осциллограмм. Необходимо, однако, отметить, что при распространении пламени в трубе сверху вниз форма его фронта не всегда стабильна, что вызвано газодинамическими возмущениями, генерируемыми самим пламенем. Для уменьшения влияния этих возмущений в работе [16] предложено установить в верхней части трубы (выше электродов зажигания) звукопоглощающий экран, положение которого подбирается экспериментально для достижения наибольшей стабильности пламени. Данное усовершенствование использовано и в настоящей работе. В качестве экрана применена металлическая сетка из проволоки с размером ячейки 1×1 мм. Таким способом удалось практически полностью устранить искажения плоского фронта пламени при горении предельных смесей. В случае смесей, отличных по составу от предельных, нестабильность фронта пламени была довольно велика, что приводило к турбулизации смеси в реакционном сосуде и резкому увеличению видимой скорости пламени (приблизительно с середины трубы).

В экспериментах исследованы предельные смеси пропана и пропилена с 1, 1, 2-трифтортрихлорэтаном $C_2F_3Cl_3$ и 1, 2-дибромтетрафторэтаном $C_2F_4Br_2$. Используются вещества высокой степени чистоты с массовым содержанием примесей не более 0,2%.

Обсуждение результатов эксперимента. На рис. 1 приведены экспериментальные данные по флегматизации пропана и пропилена 1, 1, 2-трифтортрихлорэтаном и 1, 2-дибромтетрафторэтаном, полученные по методике настоящей работы. Область воспламенения при распространении пламени сверху вниз оказывается значительно уже, чем при распространении снизу вверх. Заметно меньшими оказываются также концентрации разбавителя в экстремальных (по содержанию флегматизатора) точках областей воспламенения. Эти результаты находятся в согласии с данными экспериментов [11, 12, 17, 18]. Различие состоит в том, что если в настоящей работе и работах [17, 18] нижний и верхний пределы воспламенения изменяются приблизительно в одинаковой степени, то в работах [11, 12], где изучалось горение смесей $H_2 + O_2 + N_2$, существенным образом изменялся только нижний предел. Вероятно, эти расхождения обус-

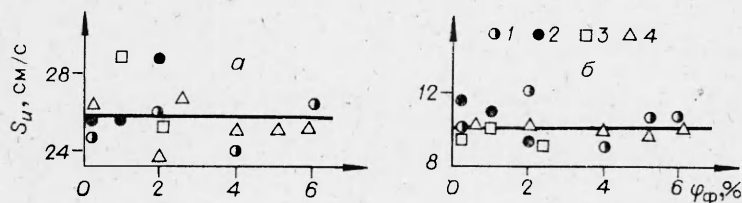


Рис. 3. Зависимость нормальной скорости горения пропана и пропилена для верхне- (а) и нижнепредельных (б) смесей от содержания флегматизатора.
 1 — пропан — 1, 1, 2-трифтортрихлорэтан; 2 — пропан — 1, 2-дибромтетрафторэтан; 3 — пропилен — 1, 1, 2-дибромтетрафторэтан; 4 — пропилен 1, 1, 2-трифтортрихлорэтан.

ловлены особенностями горения водорода по сравнению с органическими веществами.

При анализе составов предельных смесей, соответствующих точкам флегматизации, найдено, что, хотя смеси в этих точках и приближаются к богатым, концентрации горючего в них близки к стехиометрическим. Наиболее близки к стехиометрическим составы, содержащие 1, 2-дибромтетрафторэтан, обладающий ингибирующим действием. Следует отметить, что предельные смеси углеводородов с хладонами в экстремальных точках областей воспламенения при распространении пламени снизу вверх являются богатыми (стехиометричными относительно сгорания до CO и H_2O) [7].

На рис. 3 приведены зависимости нормальной скорости горения предельных смесей от концентрации флегматизатора. Величина S_u для нижней ветви кривой флегматизации остается практически постоянной при изменении концентрации разбавителя и составляет ~ 10 см/с. Данный результат находится в соответствии с экспериментом [13]. Нормальная скорость горения верхнепредельных смесей также слабо меняется с концентрацией разбавителя, однако ее величина составляет уже ~ 25 см/с. Более высокие величины S_u для этих составов обнаружены также в работе [11], однако детального объяснения этого эффекта в настоящее время, по-видимому, не имеется.

Измерений нормальных скоростей горения для предельных смесей, близких к точке флегматизации, не приводилось, поэтому нельзя предсказать поведение нижней и верхней ветвей кривой на рис. 3 при дальнейшем увеличении концентрации разбавителя.

Описанные выше экспериментальные данные находятся в качественном, а в ряде случаев (величины нормальных скоростей горения нижнепредельных смесей) и количественном согласии с имеющимися экспериментальными работами, посвященными изучению роли естественной конвекции в процессе гашения пламени [13, 14, 17, 18].

Различие в составах смесей в экстремальных точках при распространении пламени сверху вниз и снизу вверх свидетельствует о том, что механизмы гашения пламени в этих случаях, вероятно, различны. В настоящее время имеется несколько теоретических трактовок роли естественной конвекции [9, 11, 19, 20], но полной ясности в этом вопросе, по-видимому, нет. В связи с этим представляется целесообразной постановка новых экспериментальных и теоретических исследований по изучению механизмов гашения пламени.

Поступила в редакцию 25/VIII 1981,
 после доработки — 9 /IV 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. H. F. Coward, G. W. Jones. Bulletin 503. Bureau of Mines. Washington, 1952.
2. M. G. Zabetakis. Bulletin 627. Bureau of Mines. Washington, 1965.
3. А. Я. Корольченко, В. Н. Цап и др. ЖФХ, 1981, 55, 4.
4. В. Н. Цап, А. Я. Корольченко и др. ЖПХ. 1981, 54, 6.
5. А. Я. Корольченко, В. Н. Цап. — В сб.: Пожаро- и взрывоопасность веществ и материалов. Вып. 4. М.: ВНИИПО, 1981.

6. A. Masek. Comb. Sci. Techn., 1979, 21, 1/2.
7. Ю. Н. Шебеко, А. Я. Корольченко, А. В. Нванов. ФГВ, 1981, 17, 6.
8. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1941, 11, 159.
9. M. Herzberg. Bureau of Mines. RI-8127. Washington, 1976.
10. Ф. А. Вильямс. Теория горения. М.: Наука, 1971.
11. V. Bregeon, A. S. Gordon, F. A. Williams. Comb. Flame, 1978, 33, 1.
12. T. Mutani, F. A. Williams. Comb. Flame, 1980, 39, 2.
13. В. Н. Кривулин, Е. Н. Кудрявцев и др. ФГВ, 1981, 17, 1.
14. А. М. Бадалян, В. С. Бабкин и др. ФГВ, 1981, 17, 3.
15. В. Т. Монахов. Методы исследования пожарной опасности веществ. М.: Химия, 1979.
16. D. J. Parks. Fire Safety J., 1980, 2, 4.
17. В. Н. Кривулин, Е. А. Кудрявцев и др. ФГВ, 1978, 14, 6.
18. В. Н. Кривулин, Л. А. Ловачев и др. ФГВ, 1975, 11, 6.
19. В. С. Бабкин, А. М. Бадалян, В. В. Никулин.— В сб.: Горение гетерогенных и газовых систем. Черноголовка, 1977.
20. Э. А. Штессель. ФГВ, 1979, 15, 3.

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗОНА ФРОНТА УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПЛАМЕН.

VII. СТРУКТУРА ФРОНТА ПЛАМЕНИ ГЕКСАНА С АЭРОЗОЛЬНЫМ СПОСОБОМ ВВЕДЕНИЯ ТОПЛИВА

*В. К. Манжос, Б. Я. Колесников, А. К. Мурзагалиев
Г. И. Ксандопуло*

(Алма-Ата)

В большинстве исследований структуры фронта пламен горючую смесь получают введением топлива в виде газа или пара. Для легких углеводородов этот способ единственный. При изучении пламен тяжелых углеводородов удобнее использовать метод впрыска (как в двигателе внутреннего сгорания) либо постоянного ввода топлива в виде аэрозоля в газовую смесь (например, форсунки). Наличие мелких капель вместо пара, естественно, влияет на процесс горения. Однако, согласно [1], механизм распространения пламени для аэрозолей углеводородов с размером капель менее 0,01 мм аналогичен механизму распространения пламени, когда эти же углеводороды находятся в горючей смеси в паробразном состоянии. В литературе структура фронта пламени при различных методах введения топлива не анализировалась.

Цель данной работы — исследование структуры богатых пламен гексана: 1) при введении паров гексана в газовую смесь $O_2 + Ar$ ($\alpha = 1,42$), 2) при введении гексана в виде аэрозоля в ту же газовую смесь ($\alpha = 1,26$).

На рис. 1 приведены схемы экспериментальных установок для получения горючей смеси. В случае пламени с вводом топлива в виде пара (см. рис. 1, а) гексан из термостатированной ячейки уносится током аргона и затем смешивается с кислородом и дополнительным количеством аргона. Для поддержания постоянных условий испарения гексана в ячейке предусмотрена мешалка, вращающаяся со скоростью 1 об/с, ось которой уплотнена ртутным затвором. Уровень гексана в ячейке поддерживается постоянным с помощью переливного устройства. Принцип его действия заключается в следующем: при снижении уровня жидкости в ячейке за счет испарения по закону сообщающихся сосудов гексан переливается из переливного устройства в ячейку. В этом случае в переливном устройстве создается некоторое дополнительное разрежение, которое компенсируется пробулькиванием газа через конец капилляра в жидкости. В результате уровень в ячейке восстанавливается на заданной отметке, а в переливном устройстве новое положение столба жидкости уравнивается установившимся разрежением в газовой фазе. Во избежание непосредственного влияния меняющегося атмосферного давле-