

стабилизации горения диффузионного факела водорода имеет существенное значение и не определяется однозначно образованием присоединенного скачка уплотнения в месте подачи водородной струи.

Разброс экспериментальных точек эпюры давлений вдоль канала при многократном выходе на один и тот же режим составлял $\pm 6\%$, а соответствующий разброс в расчете степени выгорания $\pm 13\%$.

Обработка всех указанных опытов в координатах степень выгорания φ , на определенной длине — начальная температура t_0 показывает зависимость φ , от температуры (рис. 5). При этом имеется довольно значительный разброс точек, определяемый изменением других параметров (соотношением водорода и окислителя, различными скоростями ввода водорода и т. д.), однако точность используемого метода расчета выгорания не позволяет в настоящее время определить эти функциональные связи.

Авторы выражают благодарность В. Ф. Соколенко, С. А. Осипову, В. И. Тарарину и П. Ф. Екимову, принимавшим участие в экспериментах.

Поступила в редакцию
7/X 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Ferri. AIAA Paper, № 66—826, 1966.
2. В. К. Баев, Р. С. Тюльпанов. ФГВ, 1969, 5, 3.
3. Е. С. Щетинков. Третий Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Черно-головка, 1971.
4. R. A. Cookson, P. Flangan, G. S. Penney. XII Symposium (International) on combustion, 1969.
5. I. C. Bellet, J. Soustre. a. o. Entropie, 1970, 32.
6. В. Н. Строкин. Третий Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Черно-головка, 1971.
7. В. К. Баев, П. К. Третьяков, В. А. Ясаков. Третий Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Черноголовка, 1971.
8. Г. Шлихтинг. Теория пограничного слоя, 1956.
9. В. Е. Алемасов. Теория ракетных двигателей, 1962.

УДК 536.46

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПРЕДЕЛОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В. А. Бунев
(Новосибирск)

Влияние температуры на концентрационный предел распространения пламени представляет значительный интерес с точки зрения техники взрывобезопасности, поскольку многие технологические процессы проводятся при повышенных температурах. Этим объясняется наличие в литературе большого количества экспериментальных данных, на основании которых можно говорить о расширении области распространения пламени при увеличении температуры смеси [1, 2]. В ряде работ наблюдается линейная зависимость как нижнего, так и верхнего концентрационных пределов от T [2]. Согласно другим исследованиям, эта зависимость может быть более сложной, например, гиперболического типа [3]. Однако теоретическое обоснование нелинейности и ее экспери-

ментальное подтверждение, приведенные в работе [3], нельзя считать удовлетворительными, поскольку в работе не дается оценка влияния предварительного окисления исходной горючей смеси на измеряемую величину предела. На важную роль этого фактора при повышенных температурах указывается в работах [4, 5].

Целью настоящей работы было выяснение характера влияния предварительного окисления исходной горючей смеси на концентрационный предел.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Концентрационные пределы распространения пламени определялись в условиях сферического реактора ($V=3$ л) с центральным поджиганием. Принципиальная схема установки представлена в [6]. Горючая смесь, приготовленная в смесителе при низкой температуре, перепускалась в нагретый реактор с помощью электромагнитного перепускного клапана. Время перепуска составляло менее 0,5 сек. После перепуска смесь автоматически поджигалась через фиксированные промежутки времени τ конденсированной искрой (энергия 1—2 дж, разрядный промежуток 3 мм). Поверхность реактора, изготовленного из нержавеющей стали, обрабатывалась сжиганием метанол-воздушных смесей. Изменение давления, обусловленное распространением пламени по смеси, регистрировалось емкостным датчиком, позволяющим отмечать повышение давления в реакторе на величину менее 0,1 ата. За предел распространения пламени принималось значение концентрации топлива в смеси, соответствующее составу, находящемуся между составом, для которого зарегистрировано минимальное повышение давления 0,1 ата, и составом, для которого оно не зарегистрировано. Для комнатной температуры принята в данной работе методика определения пределов распространения пламени дает результаты, мало отличающиеся от литературных значений, полученных в стандартных условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследовались смеси метанол—воздух и водород—воздух. Все опыты проводились при начальном давлении 1,2 ата. На рис. 1 пред-

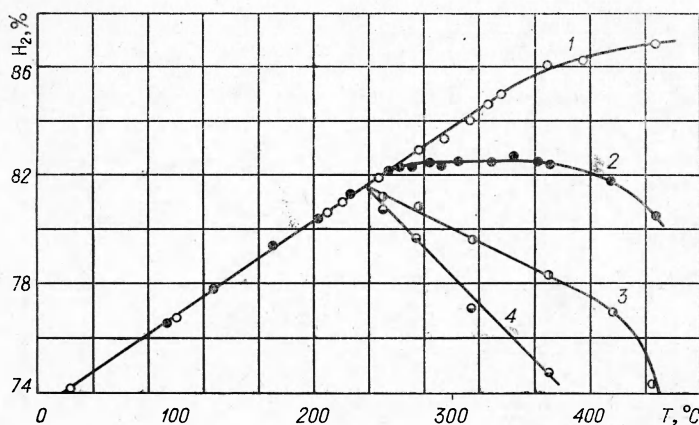


Рис. 1. Зависимость верхнего концентрационного предела от температуры.

τ , сек; 1 — 1; 2 — 4; 3 — 7; 4 — 10.

ставлены зависимости верхнего концентрационного предела от температуры для смесей водород — воздух. Из рисунка видно, что для $T > 240^\circ \text{C}$ предел существенным образом зависит от времени τ , причем при увеличении τ предельная концентрация уменьшается. В области температур меньших 240°C реакция окисления водорода играет значительно меньшую роль. Вероятно, это соответствует области, в которой скорость реакции определяется стадией иницирования.

При рассмотрении зависимости верхнего концентрационного предела для водородо-воздушных смесей при постоянной температуре от времени τ (рис. 2) обнаружено, что значение предела уменьшается с увеличением τ по линейному закону. Коэффициент пропорциональности

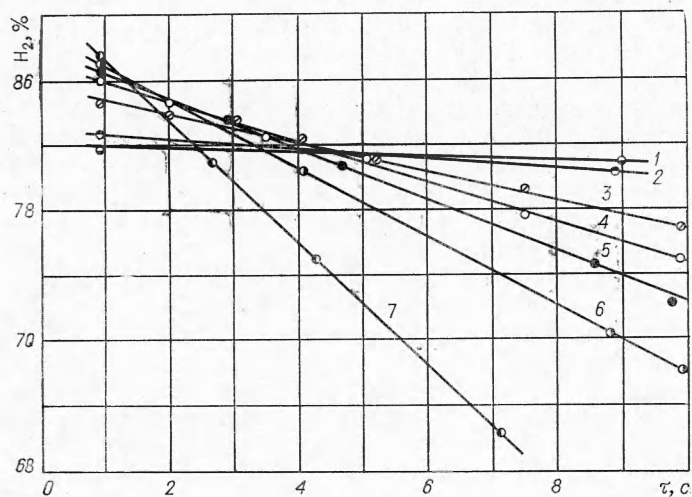


Рис. 2. Зависимость верхнего концентрационного предела от τ .
 $T, ^\circ \text{C}$: 1 — 230; 2 — 275; 3 — 320; 4 — 370; 5 — 417; 6 — 448; 7 — 490.

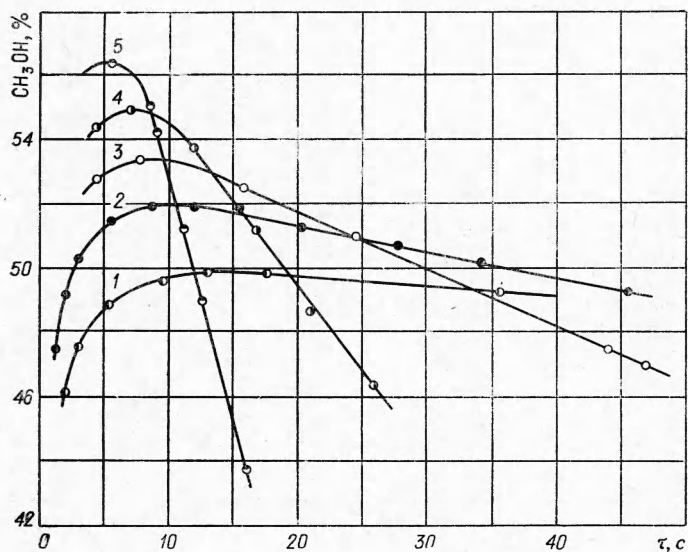


Рис. 3. Зависимость верхнего концентрационного предела от τ .
 $T, ^\circ \text{C}$: 1 — 235; 2 — 260; 3 — 290; 4 — 325; 5 — 360.

по абсолютной величине увеличивается с ростом температуры. Эти данные указывают на то, что скорость реакции медленного окисления водорода воздухом в течение 10 сек после напуска смеси в реактор постоянна.

Для верхнего концентрационного предела распространения пламени в метанол-воздушных смесях была получена более сложная зависимость от времени τ (рис. 3). При увеличении параметра τ вначале происходит рост предела, а затем уменьшение по линейному закону. Следовательно, для данного реактора и фиксированной температуры существует максимальное значение предельной концентрации метанола, зависимость которого от температуры приведена на рис. 4.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. Согласно теории теплового взрыва [7], в смеси, находящейся в реакторе с температурой стенок T_0 , достигается стационарная температура T_1 , определяемая равенством теплоотдачи на стенку и тепловыделением за счет экзотермических реакций. После напуска холодной смеси в реактор происходит нагревание смеси до температуры стенок T_0 за время порядка 0,1 сек. Затем смесь разогревается за счет реакции медленного окисления. Время перехода от T_0 до стационарной температуры T_1 , как известно, зависит от T_0 , состава смеси, состояния поверхности реактора, его размеров и формы [8].

Таким образом, если смесь поджигается через различные промежутки времени, то пламя будет распространяться при различных значениях температуры смеси. Росту температуры соответствует расширение области воспламенения, что наблюдается для метанол-воздушных смесей в течение 4—12 сек. Для низких температур $T < 235^\circ \text{C}$ это расширение через некоторое время прекращается и при дальнейшем увеличении времени значение концентрационного предела остается постоянным.

Поскольку температура T_1 практически не меняется, то скорость реакции окисления постоянна и, следовательно, верхний предел распространения пламени должен уменьшаться по линейному закону вследствие изменения состава. Такой характер зависимости наблюдается как для водородо-воздушных, так и для метанол-воздушных смесей.

Результаты, представленные на рис. 4, позволяют оценить разогрев смеси $\Delta T = T_1 - T_0$. Для малых значений параметра τ температура смеси незначительно отличается от температуры стенки реактора. Если T' — температура стенки, для которой концентрационный предел при $\tau = 1$ сек равен максимальному значению предела, соответствующему температуре T_0 , то $\Delta T = T' - T_0$. Для метанол-воздушных смесей оценка дает $\Delta T \approx 45-60^\circ \text{C}$. Большое значение ΔT указывает на достаточно низкую эффективную энергию активации окисления метанола воздухом. Для бедных смесей влияние параметра τ проявляется в меньшей степени. В исследованном диапазоне температур и времен нижний концентрационный предел практически не зависит от времени пребывания смеси в реакторе. Вероятно, это связано с тем, что эффективная энергия активации реакции окисления существенно больше для бедных смесей, чем для богатых.

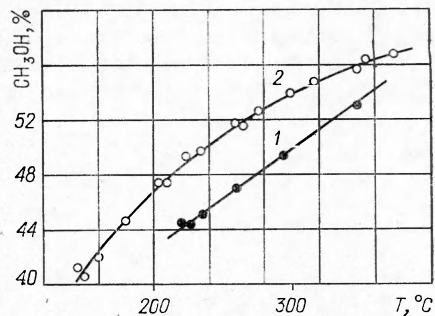


Рис. 4. Зависимость верхнего концентрационного предела от температуры при различных значениях τ .
1 — $\tau = 1$ сек; 2 — максимальные значения предела.

Из результатов настоящей работы следует, что при определении пределов в области повышенных температур, когда начинает играть роль предварительное окисление, целесообразно ввести параметр τ — промежуток времени между поджиганием смеси и ее приготовлением. Хотя этот параметр и не раскрывает природу предпламенных процессов, его введение является полезным с точки зрения учета изменения температуры и состава исходной смеси вследствие протекания низкотемпературных реакций, а также учета влияния стенки сосуда (отношения поверхности к объему, обработки поверхности) на эту реакцию. Он позволяет также сделать наиболее рациональные и правильные оценки условий взрывобезопасной работы промышленных установок. Очевидно, введение параметра τ требует соответствующей методики исследования концентрационных пределов.

Поступила в редакцию
6/VII 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Н. Хитрин. Физика горения и взрыва. М., Изд-во Московского университета, 1957.
2. H. F. Coward, G. W. Jones. Bulletin 503 Bureau of Mines. United States Government office, Washington, 1962.
3. А. Н. Баратов. ЖФХ, 1959, XXXIII, 6, 1184—88.
4. Н. Н. Иноземцев. ИФЖ, 1959, 2, 10, 52.
5. G. Dugger. Ind. Eng. Chem., 1955, 47, 114.
6. В. А. Бунев, Р. С. Тюльпанов. ФГВ, 1966, 2, 4, 136.
7. В. Н. Кондратьев. Кинетика химических газовых реакций. М., Изд-во АН СССР, 1958.
8. В. В. Воеводский. Физика и химия элементарных химических процессов. М., «Наука», 1969.

УДК 536.46+534

К ВОПРОСУ О САМОВОЗБУЖДЕНИИ КОЛЕБАНИЙ ВСЛЕДСТВИЕ ЗАВИСИМОСТИ НОРМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ПЛАМЕНИ ОТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗА

В. И. Фурлетов

(Москва)

Распространение пламен в трубах и бомбах постоянного объема часто сопровождается акустическими колебаниями газа [1—3]. Возбуждение колебаний может быть связано, например, с периодическим изменением площади поверхности пламени [1], изменением скорости химической реакции при так называемом релаксационном взаимодействии волны с пламенем [4], влиянием давления и температуры на скорость распространения пламени [5]. В последнем случае предполагается, что малые возмущения, последовательно отражаясь от концов трубы, вследствие многократного взаимодействия с плоским фронтом пламени, могут развиться до значительной амплитуды. В настоящей работе анализируется возможность такого механизма самовозбуждения акустических колебаний при горении углеводородо-воздушных смесей с учетом