

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗОНА ФРОНТА  
УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПЛАМЕН.

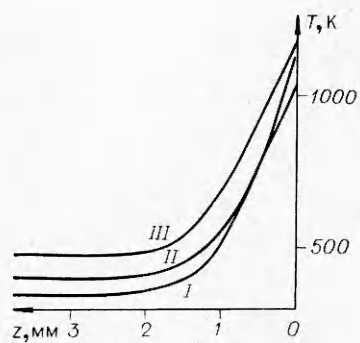
VI. ОКИСЛЕНИЕ ГЕКСАНА ВБЛИЗИ ФРОНТА ПЛАМЕНИ

*Г. И. Ксандопуло, Б. Я. Колесников, В. В. Дубинин, Д. С. Однорог*

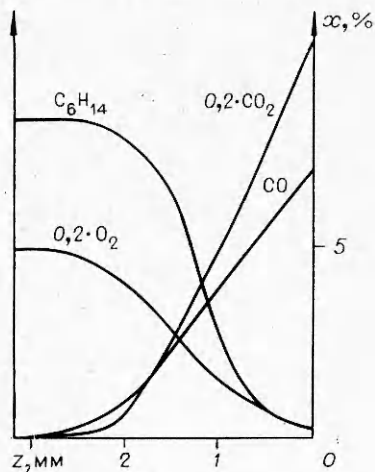
В работе [1] при обсуждении данных [2—5] предположено, что низкотемпературная зона фронта пламени представляет собой незавершенное холодное пламя. Если зарождение углеводородных радикалов не лимитировано, то при наличии в реагирующей смеси кислорода с такой же интенсивностью будут зарождаться перекисные и другие на-кислороженные радикалы [6]. Если на следующих этапах превращения топлива имеет место вырожденное разветвление, то существование холоднопламенного этапа в пламенах углеводородов представляется реальным. Такую структуру фронта следует искать при горении углеводородов с достаточно длинной цепью, для которых можно ожидать увеличения времени превращения до мелких осколков в предпламенной области.

Авторам известна лишь одна попытка исследования диффузионного пламени гексана в воздухе [7], где измерены профили концентраций  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2O$ ,  $C_6H_{14}$ ,  $H_2$ ,  $C_2H_2$ ,  $(C_2H_4 + C_2H_6)$ ,  $C_3H_6$ ,  $C_6H_6$ . В таком пламени кислород расходуется начиная с низкой температуры. Продуктов, характерных для холодного пламени, не обнаружено. Это понятно, поскольку в диффузионном пламени зона реакции разделяет встречные потоки топлива и окислителя. Диффузия активных центров в обе стороны приводит к актам зарождения, а продолжение цепи происходит при встрече топлива с радикалами в зоне высокой температуры. Здесь механизм подготовки топлива к быстрой реакции, видимо, иной, так как, кроме зоны диффузии атомов водорода в горючую смесь и в окислитель, имеется зона высокой температуры шириной в расстояние диффузии окислителя в топливо. Время жизни перекисного радикала в диффузионных пламенах, видимо, меньше, и потому вероятность холодного пламени в этих условиях мала.

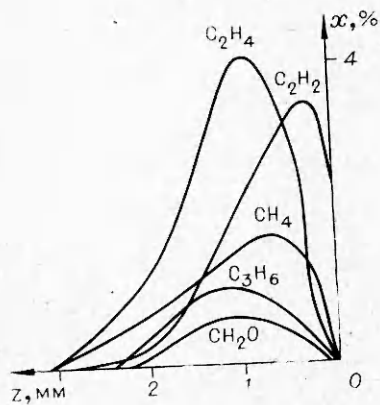
Исследовалось богатое пламя гексана (объемный состав смеси (%):  $C_6H_{14}$  — 8,5;  $O_2$  — 28;  $Ar$  — 63,5). Аргоно-кислородная смесь взята вместо воздуха для того, чтобы избежать при масс-спектрометрическом анализе наложения пиков  $CO$  и  $N_2$ . Методика измерений и обработки результатов описана и обсуждена в [2]. В качестве одного из критериев наличия холодного пламени служила отрицательная температурная зависимость скорости реакции. Для обнаружения такой зависимости горение смеси указанного выше состава анализировалось при различных начальных температурах: 344 (пламя I), 404 (пламя II) и 480 К (пламя III). Необходимая для расчетов нормальная скорость горения исследуемой смеси вычислена по фотографии пламени и находится в хорошем соответствии с данными работы [8].



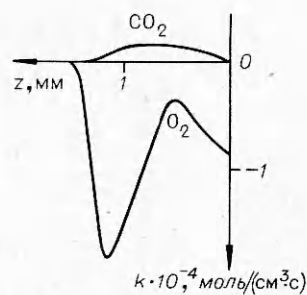
Puc. 1.



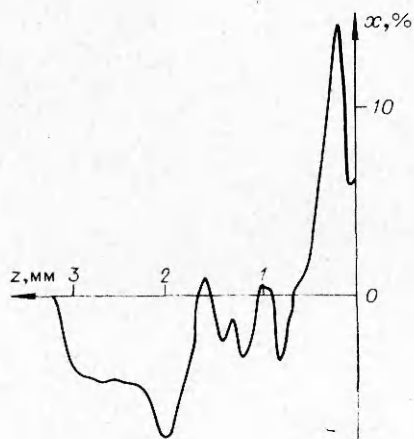
Puc. 2.



Puc. 3.



Puc. 4.



Puc. 5.

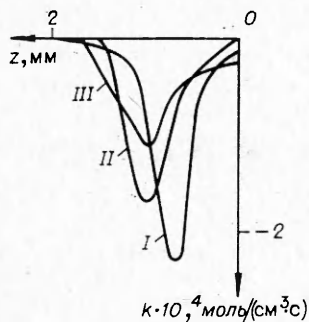


Рис. 6.

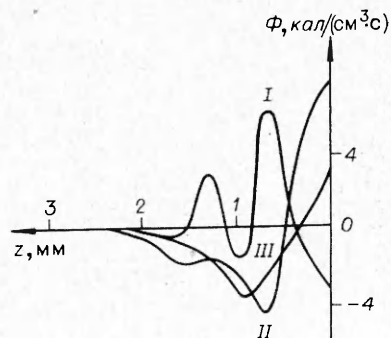


Рис. 7.

На рис. 1 представлены профили температуры исследованных пламен, а на рис. 2, 3 — профили концентраций начальных, конечных, а также некоторых промежуточных продуктов в мольных долях для пламени III. Рис. 4 дает суммарные скорости реакции важнейших реагентов. Как видно из рисунков, в пламени гексана обнаруживаются все характерные особенности, отмеченные для горения пропана [2]: примерно половинная убыль топлива наблюдается в точке  $z = -1,2$  мм, где подъем температуры составляет около  $140^\circ$ . Образование  $\text{CO}_2$  также начинается при низких температурах. С целью проверки достоверности расчетов проведена проверка сохранения количества атомов С в пламени [2]. Результат такой проверки приведен на рис. 5. Видно, что максимальное отклонение  $+15\%$  наблюдается в точке  $z = -0,2$  мм. В целом полученное схождение баланса по С удовлетворительно. Зондирование пламен II и III привело к аналогичным зависимостям.

Из рис. 6 отчетливо видна отрицательная зависимость скорости убыли гексана от температуры в рассмотренном интервале: максимумы этой скорости уменьшаются с увеличением начальной температуры.

Рассмотрение энергетики пламени гексана дает ряд интересных особенностей, отмеченных и для пламени пропана [5]. Эти особенности сглаживаются по мере увеличения начальной температуры. Из рис. 7 видно, что перед зоной свечения имеется область, по общему виду кривой тепловыделения сходная с холодными пламенами: имеется нарастающая амплитуда скорости тепловыделения до достижения смеси стадии горячего пламени. Кроме того, наблюдается зависимость пика скорости тепловыделения перед фронтом от исходной температуры. Такое поведение профиля скорости тепловыделения, видимо, объясняется маскирующим действием горячего пламени, стадия которого достигается раньше при повышении  $T_0$ .

Продукты, характерные для холодных пламен, не обнаружены. Возможно, это связано с их малой концентрацией в пламени. В таком случае сильная адсорбция на стенках напускной системы, которую можно ожидать для таких веществ, как спирты, альдегиды и гидроперекиси, приведет к уменьшению их концентрации в пробе до величины ниже порога чувствительности масс-спектрометра. Справедливость такого предположения подтверждается обнаружением ацетальдегида и пропионового альдегида в пламени пропана полярографическим методом [9], не обнаруженные при масс-спектроскопическом зондировании.

Таким образом, полученные результаты подтверждают выводы, сделанные по результатам зондирования пропано-воздушного пламени, и не противоречат предположению о наличии холоднотемпературной стадии при окислении углеводородов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Г. И. Ксандопуло. Докт. дис. Алма-Ата, 1974.
2. Г. И. Ксандопуло, Б. Я. Колесников, Д. С. Однорог. ФГВ, 1974, 10, 6, 841.
3. Г. И. Ксандопуло, Б. Я. Колесников, Д. С. Однорог. ФГВ, 1975, 11, 1, 60.
4. Г. И. Ксандопуло, Б. Я. Колесников, Д. С. Однорог. ФГВ, 1975, 11, 1, 131.
5. Г. И. Ксандопуло, Б. Я. Колесников и др. ФГВ, 1975, 11, 3, 412.
6. Г. И. Ксандопуло. XI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Реф. докл. М., «Наука», 1975.
7. G. Sprengler, J. Kern. Brennstoff — Chemie, 1969, 50, 11, 321.
8. Е. С. Головина, Г. Г. Федоров. — В сб.: Исследование процесса горения. М., Изд-во АН СССР, 1959.
9. Г. И. Ксандопуло, А. А. Сагиндыков и др. IV Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Тез. докл. Черногловка, 1974.

### О ВЛИЯНИИ ВЯЗКОСТИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЛАМИНАРНОГО ФРОНТА ПЛАМЕНИ

П. П. Лазарев, А. С. Плешанов

Из всех явлений переноса (вязкость, теплопроводность, диффузия), влияющих на устойчивость ламинарного фронта пламени в несжимаемой среде, первым исследовано влияние именно вязкости [1, 2] (см. также [3, 4]). Результаты оказались противоречивыми: в [1] учет вязкости приводил к дестабилизации пламени, а в [2] — к стабилизации. В [3] справедливо отмечается, что эта разница объясняется различием в виде дополнительного (к постановке [5, 6]) граничного условия. Необходимость в таком условии обусловлена появлением вихревого возмущения перед разрывом из-за диффузии вихрей вследствие вязкости в свежую смесь.

В данном сообщении рассматривается частная ситуация, когда вязкость продуктов сгорания значительно превосходит вязкость свежей смеси, так что диффузией вихрей в свежую смесь можно пренебречь, и вопрос о виде дополнительного граничного условия не возникает. При горении газов, для которых коэффициент вязкости является растущей функцией температуры, меняющейся почти на порядок, такое рассмотрение представляется оправданным.

Учет только вязкости следует понимать так, что исследование ведется фактически при достаточно больших тепловом и диффузионном числах Прандтля.

Считаем течение плоским со стационарной скоростью  $\vec{v}$  ( $u, 0, 0$ ). Наличие скорости, касательной к разрыву, привело бы лишь к переопределению частоты возмущений  $\omega$ . Возмущенные уравнения непрерывности и Навье — Стокса имеют вид

$$\frac{\partial u'_\alpha}{\partial x} + \frac{\partial v'_\alpha}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\rho_\alpha \left( \frac{\partial}{\partial t} + u_\alpha \frac{\partial}{\partial x} - \nu_\alpha \Delta \right) \left\{ \begin{matrix} u'_\alpha \\ v'_\alpha \end{matrix} + \frac{\partial}{\partial x} \right\} p'_\alpha = 0, \quad (2)$$

где штрих означает возмущение, индексы  $\alpha=1,2$  относятся к средам до и после разрыва соответственно, остальные обозначения обычны.