

Таким образом, экспериментальные исследования, качественно подтверждая теоретические выводы, дополняют их некоторыми особенностями поведения реагирующих систем в критических условиях.

Поступила в редакцию
15/VIII 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Струнина, Н. И. Ваганова, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1977, 13, 6.
2. А. Г. Струнина, В. И. Ермаков, В. В. Барзыкин. Влияние теплотерь и теплофизических параметров на процесс зажигания безгазовых систем волной горения. Препринт. Черноголовка, 1978.
3. В. И. Ермаков, А. Г. Струнина, В. В. Барзыкин. Экспериментальное исследование влияния теплотерь на процесс зажигания безгазовых систем волной горения. Препринт, Черноголовка, 1978.
4. А. Э. Аверсон, В. И. Розенбанд. ФГВ, 1968, 4, 519.
5. А. Г. Струмилин, Т. М. Мартемьянова и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
6. Вопросы горения ракетных топлив. Сб. переводов. М., 1959.
7. S. H. Jpani, L. McCulley, H. Wise. Comb. and Flame, 1969, 3, 5.
8. W. A. Roseg, N. Fichman, H. Wise. AIAA J., 1966, 4, 9.
9. В. И. Ермаков, А. Г. Струнина, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1976, 12, 2.

САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ КЕРОСИНА В ПОТОКЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

В. Н. Груздев, М. Д. Тавгер, А. В. Талантов

(Казань)

В основе многих аспектов теории горения лежат вопросы, касающиеся механизма самовоспламенения. Особенно важными они становятся в процессах, протекающих в форсажной камере ГТД, где они приобретают самостоятельное значение. Тем не менее многочисленные данные изучения самовоспламенения топлива в потоке продуктов сгорания находятся в сильном противоречии друг с другом [1, 2]. У различных авторов значения температуры самовоспламенения и энергии активации одинаковых углеводородных топлив в сходных физических условиях имеют очень существенные расхождения.

Следует отметить, что многие исследователи, организуя самовоспламенение в продуктах сгорания, считают их инертными, а некоторые совсем не упоминают о способе подогрева газа. При выводе эмпирических закономерностей, описывающих полученные экспериментальные результаты, для большинства авторов химически активные примеси, содержащиеся в продуктах сгорания, служили для качественного объяснения расхождений, предлагаемых теорией и получаемых в эксперименте. Механизм их влияния большинством исследователей не рассматривался. Однако экспериментальные данные [3] свидетельствуют о том, что роль неравновесных частиц, содержащихся в продуктах сгорания, и обменных процессов, приводящих к их гибели, может стать определяющей.

В работе ставилась цель — изучить промотирующее воздействие неравновесных частиц в продуктах сгорания на процесс самовоспламенения керосина. Эксперименты проводились на установке, схема которой изображена на рис. 1. В прямоугольном канале размером $0,12 \times 0,114$ м размещался стабилизатор пламени желобкового типа

с шириной основания 0,04 м и углом при вершине 60°. На расстоянии 0,14 м вверх по потоку от стабилизатора устанавливались две центробежные форсунки. Воспламенение осуществлялось в потоке продуктов сгорания, создаваемом серийной авиационной камерой. Расстояние между генераторной камерой и отсеком стабилизатора с форсунками изменялось от 1,4 до 5 м и с помощью приставок различной длины. Момент самовоспламенения и все соответствующие ему параметры четко фиксировались по вспышке и последующему устойчивому горению, возникающему за стабилизатором. Влияние размера стабилизатора проверено экспериментально и аппроксимировано формулой, дающей поправку к температуре самовоспламенения при любом размере стабилизатора.

В экспериментах изменялось расстояние от стабилизатора до камеры сгорания ($L_2=1,4, 2, 3, 4, \text{ и } 5 \text{ м}$), температура воздуха на входе в генераторную камеру ($T_{\text{вх}}=360, 420, 500 \text{ и } 600 \text{ К}$), скорость продуктов сгорания перед стабилизатором пламени ($w=60 \div 200 \text{ м/с}$). Поле скоростей перед стабилизатором имело характер развитого трубного течения, поле температур было достаточно ровным. Труба тщательно теплоизолировалась; изменение температуры продуктов сгорания на участке между генераторной камерой и стабилизатором пренебрежно мало.

Для оценки концентрации активных центров применялись измерения тока ионизации при помощи зонда Ленгмюра. Считая поток продуктов сгорания электрически нейтральным, принимали концентрацию ионов равной концентрации электронов.

Механизм ионизации в углеводородных пламенах в настоящее время можно считать выясненным. Многими авторами [4, 5] доказано, что образование ионов в основном происходит за счет химионизации. В то же время, учитывая большую реакционную способность ионов и легкость ионно-молекулярных реакций [6], можно предположить, что вклад ионов в промотирование самовоспламенения будет значителен. Поэтому оценка концентрации всех активных центров по току ионизации представляется оправданной. Параллельно измерениям тока ионизации проведены замеры полноты сгорания за генераторной камерой. Температура продуктов сгорания при этом изменялась от 500 до 1300 К.

Результаты экспериментов по определению температуры самовоспламенения представлены на рис. 2, откуда следует, что влияние температуры воздуха на входе в генераторную камеру, скорости потока и расположения стабилизатора и форсунок в трубопроводе от генераторной камеры может на температуру самовоспламенения быть значительным. Температура воспламенения меняется в диапазоне от 600 до 1250 К. Кроме того, на рис. 2 видно, что зависимость T_c от w неодинакова на различных расстояниях от генераторной камеры. Так, при $L_2=1,4, 2 \text{ и } 3 \text{ м}$ эта зависимость очень слабая и самовоспламенение происходит при низких температурах. При большом расстоянии отсека стабилизатора и форсунок от генераторной камеры ($L_2=4 \text{ и } 5 \text{ м}$) T_c имеет более высокие значения и более четко проявляется ее зависимость от скорости потока, а следовательно, и от теплообменных факторов.

Выяснить причину зависимости температуры самовоспламенения от расстояния стабилизатора до генераторной камеры и температуры воздуха на входе в нее стало возможным лишь после получения данных, характеризующих неравновесность продуктов сгорания. Проведение

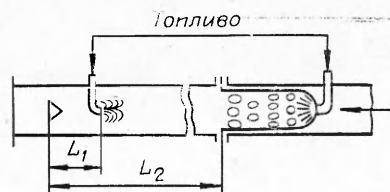


Рис. 1. Схема установки.

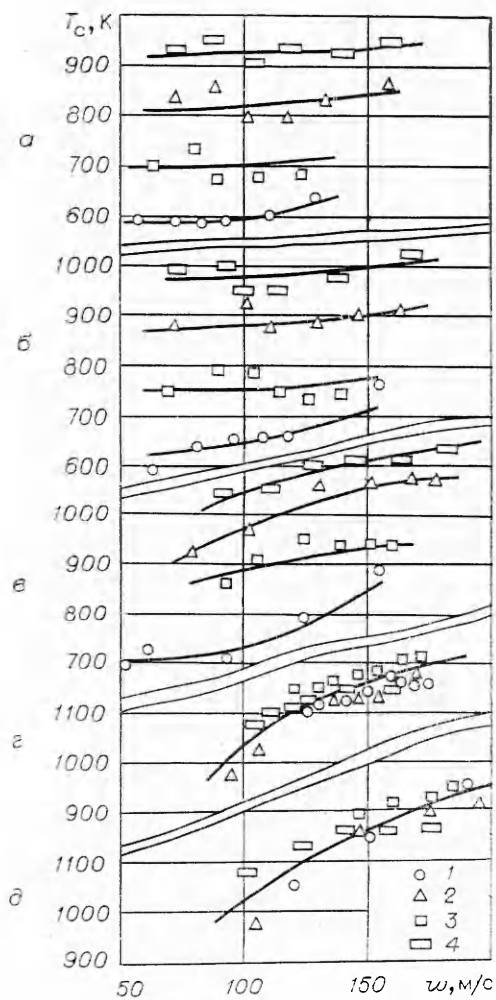


Рис. 2. Изменение температуры самовоспламенения при различных ω , L и $T_{вх}$.
 L , м: а) 1,4, б) 2, в) 3, г) 4, д) 5. $T_{вх}$, К: 1—360, 2—420, 3—500, 4—600.

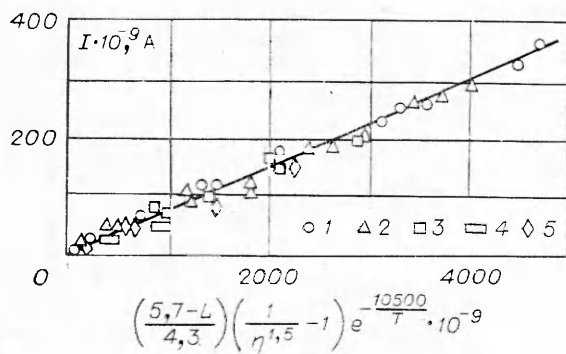


Рис. 3. Зависимость тока ионизации от параметров продуктов сгорания.
 L , м: 1—1,4, 2—2, 3—3, 4—4, 5—5.

ны эксперименты по замеру токов ионизации в широком диапазоне температур сгорания T_{π} , температуры на входе в генераторную камеру $T_{вх}$, расстояния до нее L_2 и скоростей потока w с одновременным измерением полноты сгорания генераторного газа. Обнаружено, что в исследованном диапазоне скорость потока не оказывает влияния на измеряемые ток и полноту сгорания. Этот результат свидетельствует о том, что гибель активных центров происходит преимущественно на стенках трубы. Кроме того, найдена зависимость тока ионизации от полноты сгорания продуктов. Из графика рис. 3, изображающего эту зависимость, следует, что природа тока ионизации заключается в неполноте реакций, протекающих в генераторной камере. Действительно, чем выше полнота сгорания, тем меньше величина тока ионизации. При повышении полноты сгорания в продуктах оказывается меньше неравновесных частиц, радикалов, атомов, являющихся, как следует из теории химионизации, материалом для образования ионов. Вследствие этого величина тока ионизации падает.

Результаты экспериментов, приведенные на рис. 3, аппроксимированы формулой

$$I = A(B - F)(1/\eta^{1.5} - 1) \exp(10\,500/T_{\pi}). \quad (1)$$

Здесь T_{π} — температура продуктов сгорания; η — полнота сгорания газа; F — параметр, характеризующий размер поверхности трубопровода, на стенках которого происходит гибель активных частиц; A , B — экспериментальные константы.

Зависимость тока ионизации от температуры продуктов сгорания можно представить в виде

$$I = I_0 \cdot \exp(-10\,500/T), \quad (2)$$

где I — величина тока ионизации; I_0 — величина тока, характеризующая химионизацию.

Сравнивая формулу (2) с выражением для проводимости низкотемпературной и слабоионизированной плазмы [4], определенным по уравнению Саха, можно прийти к выводу об их идентичности по форме

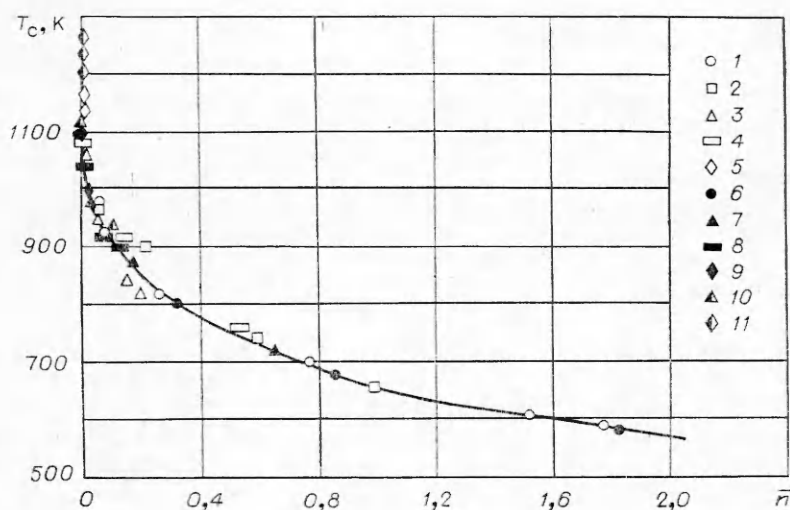


Рис. 4. Зависимость температуры самовоспламенения от безразмерной концентрации активных центров.

L^2 (в м) при $w=180$ м/с: 1 — 1,4, 2 — 2, 3 — 3, 4 — 4, 5 — 5; при $w=100$ м/с: 6 — 1,4, 7 — 3, 8 — 4, 9 — 5; при $w=170$ м/с: 10 — 3, 11 — 5.

и по величине экспоненциального множителя. Следовательно, параметром, характеризующим неравновесную ионизацию, будет

$$\bar{n} \sim I_0 = A(B-F)(1/\eta^{1,5} - 1), \quad (3)$$

где \bar{n} — безразмерная экспериментальная величина, пропорциональная концентрации активных центров. На рис. 4 представлена зависимость температуры самовоспламенения от безразмерной концентрации активных центров \bar{n} . Видно, что температура самовоспламенения независимо от расстояния, скорости потока, температуры на входе обобщается одним параметром \bar{n} , который, по-видимому, и определяет воспламенение.

Поступила в редакцию
27/XI 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. М. Трушин. III Всесоюзное совещание по теории горения. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1960.
2. Н. А. Панова, В. Н. Груздев, А. В. Талантов. — В сб.: Горение в потоке. Вып. 1. Казань, 1976.
3. В. Н. Груздев, М. Д. Тавгер, А. В. Талантов. Семинар по электрофизике горения. Тез. докл. Караганда, 1978.
4. Калькот. Вопросы ракетной техники, 1958, 4 (45).
5. Л. А. Гуссак, Е. С. Семенов. — В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1977.
6. В. Н. Кондратьев, Е. Е. Никитин. Кинетика и механизм газофазных реакций. М., «Наука», 1974.

ОБ УСИЛЕНИИ И МОЩНОСТИ ГДЛ НА СМЕСИ $\text{CO}_2\text{—N}_2\text{—CO—H}_2\text{O—H}_2$

Г. И. Козлов, В. Н. Иванов, И. К. Селезнева
(Москва)

За последнее десятилетие во многих теоретических и экспериментальных работах изучались механизм и кинетика образования инверсной заселенности колебательных уровней молекулы CO_2 в расширяющихся потоках газа. Для рабочих смесей газодинамических лазеров на смесях $\text{CO}_2\text{—N}_2\text{—He}$ и $\text{CO}_2\text{—N}_2\text{—H}_2\text{O}$ проведены подробные исследования зависимостей показателя усиления и мощности генерации от параметров торможения, состава смеси, характерных размеров и формы сопла. Выявлена специфическая роль молекул CO_2 , N_2 , He и H_2O в процессе колебательной релаксации и возникновении инверсной заселенности колебательных уровней CO_2 . В меньшей степени известна роль других примесей, таких, как H_2 , CO и т. д., изучение влияния которых представляет практический интерес в связи с широким использованием в качестве рабочей среды ГДЛ продуктов сгорания углеводородных топлив.

Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию релаксации пятикомпонентной смеси $\text{CO}_2\text{—N}_2\text{—CO—H}_2\text{O—H}_2$ в расширяющихся потоках без учета возможного изменения состава в результате диссоциации и химических реакций. Проведена оптимизация показателя усиления и мощности ГДЛ по составу смеси, начальным условиям торможения, параметрам сопла и резонатора.

1. В области температур $T \approx 2000$ К, которая и представляет интерес при рассмотрении характеристик газодинамических лазеров на продуктах сгорания, заметно возбуждены лишь нижние колебательные уровни молекул CO_2 , N_2 , CO и деформационные колебания H_2O . Возбуждением других типов колебаний H_2O и H_2 можно пренебречь в силу