

А. Р. АБУЛЬХАНОВ, В. В. БЕЛЫЙ, В. Б. ЛИБРОВИЧ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ РЕЛАКСАЦИИ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПЛАМЕНИ ПРИ ГОРЕНИИ
САМОВОСПЛАМЕНЯЮЩЕГОСЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА
В ПРОТОЧНОЙ КАМЕРЕ**

(Представлено академиком А. Ю. Ишлинским 19 IV 1973)

Распространенные методы исследования пламени в теплонапряженных камерах сгорания типа ЖРД (в первую очередь — пьезометрические и оптические) позволяют получать информацию о развитом вибрационном горении ⁽¹⁾ и лишь в минимальной степени применительно к устойчивому горению. При помощи датчиков давления нельзя обнаружить изменения структуры пламени с инфранизкими частотами (~1 Гц) ⁽²⁾; непрозрачность внутрикамерной среды при горении многих жидких топлив ограничивает применимость оптических и спектрально-оптических методов ⁽³⁾.

Об обнаружении инфранизкочастотных изменений в пространственной структуре пламени при устойчивом горении в модельной камере типа ЖРД сообщалось в статье одного из авторов ⁽²⁾. Эти наблюдения были сделаны спектрально-оптическим методом; прозрачность внутрикамерной среды обеспечивалась использованием специальной топливной композиции «газообразный кислород — жидкий аммиак».

Чтобы подобные эксперименты провести в иных условиях, в том числе при работе на топливах, содержащих углерод и окислы азота, решено было прибегнуть к методу СВЧ-диагностики низкотемпературной плазмы ⁽⁴⁾. Метод позволяет следить за неравновесной электронной концентрацией в зоне химической реакции в пламени ⁽⁵⁻⁷⁾. Эксперименты проводились на модели ЖРД, работающей на самовоспламеняющейся топливной композиции «четыреохись азота — несимметричный диметилгидразин» (оба компонента жидкие). Для измерений концентрации электронов в зоне химической реакции применялся микроволновый интерферометр, работающий на фиксированной частоте 10 ГГц и представляющий собой фазоизмерительный волноводный мост, в который входят измерительный и опорный каналы. Тракт измерительного канала включает в себя камеру сгорания, помещенную между передающей и приемной антеннами. Разность между фазами сигналов, прошедших измерительный и опорный каналы, может быть связана с концентрацией свободных электронов в исследуемой среде ⁽⁴⁾.

Приемная и передающая антенны измерительного канала устанавливались на подвижной платформе, перемещающейся вдоль камеры сгорания с частотой 5 Гц.

В качестве распылительного устройства была использована форсуночная головка, содержащая шесть форсунок горючего, расположенных на окружности $\varnothing=34$ мм, одну двухкомпонентную центробежную форсунку в центре. Специальная камера сгорания прямоугольного сечения 40×40 мм² была снабжена радиопрозрачными окнами из асбоцемента. Камера заканчивалась сверхзвуковым соплом. Стойкость окон к воздействию внутрикамерной среды оказалась достаточной для выполнения длительных экспериментов (до 100 сек.). Схема подачи топлива в камеру — вытеснительная;

для поддержания стабильных условий впрыска топлива параллельно бакам горючего и окислителя были включены значительные по объему ресиверные емкости. Характеристическое время камеры составляло 2,3 мсек.

Эксперименты выполнялись в два этапа. На первом изучалось распределение степени ионизации вдоль камеры сгорания при различных постоянных условиях впрыска топлива. Соответствующие кривые распределения получались по всей длине камеры; это обеспечивалось возвратно-поступательным движением платформы с антеннами. Показания СВЧ-интерферометра и датчика координаты платформы одновременно регистрирова-

Рис. 1. Распределение концентрации свободных электронов вдоль камеры сгорания при различных соотношениях между компонентами топлива: $a - P_K = 7,7$ ат, $\alpha = 0,43$; $b - P_K = 7,5$ ат, $\alpha = 0,69$; $c - P_K = 6,5$ ат, $\alpha = 0,29$; $d - P_K = 2,5$ ат, $\alpha = 0,96$

Рис. 2. Зависимость давления (1) и концентрации свободных электронов (2) в камере сгорания от времени при резком изменении подачи окислителя

Рис. 3. Самопроизвольные изменения структуры зоны горения при постоянном режиме работы камеры

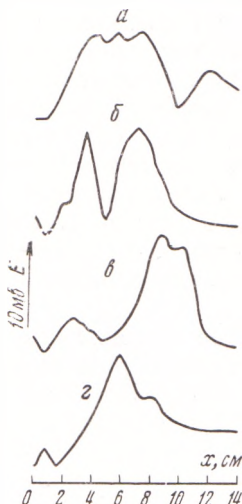


Рис. 1



Рис. 3

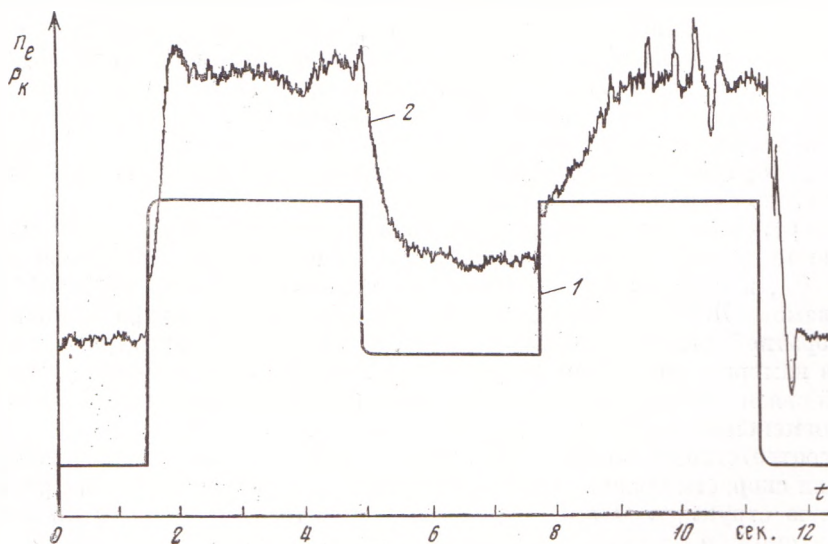


Рис. 2

лись на магнитный регистратор и затем воспроизводились на двухкоординатный самописец (рис. 1). Несмотря на постоянство давления в камере во всех этих опытах, кривые распределения во многих случаях подвержены значительному статистическому разбросу от кадра к кадру. Иногда кривые имеют более одного максимума. Одно из возможных объяснений состоит в том, что в камере сгорания образуется два или более торoidalных вихрей, в которых и сосредоточено химическое превращение.

Сравнительно слабое влияние на максимальные значения регистрируемой концентрации электронов состава горючей смеси, определяющего термодинамическую температуру горения, свидетельствует о том, что преобладающую роль играет хемоионизация. Оценка по показаниям СВЧ-интерферометра максимальных абсолютных значений концентраций электронов в камере дает величину порядка 10^{12} см^{-3} .

Вторым этапом работы была оценка времени релаксации зон химических реакций при переходных процессах. Для быстрого изменения расхода окислителя в линию окислителя включалась расходная шайба, шунтированная быстродействующим электромагнитным клапаном. Антенная система интерферометра устанавливалась в положение, при котором обычно наблюдался наибольший подъем концентрации электронов для каждого исследуемого режима работы камеры (см. рис. 1). Одновременно регистрировались давление в камере (с помощью малоинерционного датчика индуктивного типа) и показания СВЧ-интерферометра. Первичные магнитogramмы воспроизводились затем на перьевой самописец в замедленном темпе (рис. 2). При каждом включении или выключении электромагнитного клапана в «гидравлическом шунте» давление в камере сгорания испытывало быстрые изменения. Напротив, показания СВЧ-интерферометра изменялись относительно медленно, по закону, близкому к экспоненциальному.

Эффективные времена установления нового уровня ионизации в пределах выполненной серии экспериментов составляют 0,2–3 сек., они подвержены значительному статистическому разбросу. Нередко существенное различие во временах установления наблюдается в пределах одного опыта для «прямого» и «обратного» переходных процессов.

Были проанализированы возможные источники методических погрешностей, которые могли бы в принципе привести к завышению времени установления показаний СВЧ-интерферометра. Дополнительные эксперименты показали, что измерительный и регистрационный тракт обладает пренебрежимо малой инерционностью; его виброустойчивость также была дополнительно проверена огневыми экспериментами, в которых оба СВЧ-луча проходили вне внутрикамерной среды. Была выяснена причина, из-за которой показания интерферометра не возвращаются на нулевой уровень сразу же после выключения подачи топлива в камеру (см. рис. 2): это связано с догоранием остатков топлива, которое происходит на протяжении нескольких секунд после отсечки подачи.

Обнаружение большого времени перестройки структуры пламени при изменении подачи топлива согласуется с прогнозом, содержащимся в статье (2), в которой была предложена модель механизма автостабилизации пламени ЖРД, базирующаяся на существовании контура положительной обратной связи: локальная скорость горения — структура вихревого поля в камере — локальная скорость горения. Наличие положительной обратной связи, как обычно, оказывает дестабилизирующее влияние и приводит к изменению характерного времени задачи.

В соответствии с идеей, высказанной в работе (2), при ступенчатом изменении скорости подачи топлива функция X , характеризующая пространственную структуру пламени, должна изменяться во времени по закону, описываемому в линейном приближении уравнениями

$$\begin{aligned} X(t) &= x(t) + \tilde{x}(t), \\ \frac{dx}{dt} + \frac{(1-k)}{\theta_r} x &= \frac{k}{\theta_r} \tilde{x}(t), \quad \tilde{x}(t) \approx \beta H(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где θ_r и k — характерное время и коэффициент передачи возмущений по названному выше контуру; $H(t)$ — единичная функция Хевисайда.

$$X(t) \approx \beta \left[H(t) + \frac{k}{1-k} \exp \left(-\frac{1-k}{\theta_r} t \right) \right]. \quad (2)$$

Если $1-k \ll 1$, причем $k < 1$, то наблюдаемое время релаксации $\theta_r/(1-k) \gg \theta_r$, т. е. происходит «растяжение» характерного времени процесса. В этом и состоит объяснение полученных экспериментальных результатов. С физической точки зрения это можно интерпретировать, например, как длительное самоподдержание вихревых зон в камере, в которых протекают основные химические реакции горения. Другие объяснения этого явления, основанные на предположении об определяющей роли тепловой инерции элементов конструкции камеры, трудно согласовать, в частности, со значительным статистическим разбросом измеренных значений времени релаксации.

Медленные случайные изменения структуры зон горения в камере наблюдались во многих экспериментах и при постоянной скорости подачи топлива (рис. 3). Они, по-видимому, связаны с аналогичными эффектами и могут быть описаны уравнениями типа (1) при подстановке в них вместо возмущения в виде «ступеньки» широкополосного шума, порождаемого турбулентностью течения ⁽²⁾.

Институт проблем механики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
23 III 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Исследование ракетных двигателей на жидком топливе, Сб. пер., М., 1964.
² В. В. Белый, ДАН, т. 201, № 6 (1971). ³ Н. Н. Соболев, ЖТФ, т. 29, № 1 (1959).
⁴ А. В. Чернетский и др., Аппаратура и методы плазменных исследований, М., 1965.
⁵ В. Н. Кондрагьев, Кинетика химических газовых реакций, М., 1958. ⁶ H. T. Cal-
cote, Y. R. King, V Intern. Symp. on Combustion, 1955, p. 406. ⁷ Y. A. Green, T. M.
Sugden, Some Observations on the Mechanism of Ionization in Flames Containing Hyd-
rocarbons, IX Intern. Symp. on Combustion, 1963.