

Рис. 3. Зависимости относительной длины факела от α (сплошные линии) и m (штриховая линия).

1—3 — $m=0, \varphi=0$; 20 и 70° ; 4 — $\varphi=70^\circ, \alpha=0,75$.

лпчению интенсивности тепловыделения и эжекционной способности факела, расширению эффективных границ и уменьшению его длины (рис. 2, а, б).

Наряду с круткой существенное влияние на структуру факела оказывает и коэффициент избытка воздуха α . При возрастании α до 0,89 процесс горения в слабозакрученном факеле интенсифицируется, фронт горения приближается к соплу, сокращается длина начального участка и всего факела (рис. 3), увеличивается скорость затухания полного давления (см. рис. 2, а, б).

Противоположная картина, вследствие обеднения горючей смеси, наблюдается при дальнейшем возрастании α до значений, больших 1. Профили концентрации O_2, CO_2 и CO , измеренные при различных α , полностью согласуются с описанными закономерностями развития факела. На сильнозакрученном факеле, отличающемся устойчивым и высоконапряженным горением, влияние α сказывается значительно слабее (см. рис. 2, а, б).

Эффективное воздействие на структуру закрученного факела оказывает также и параметр спутности m . Как и в прямоточном факеле, с ростом скорости спутного потока воздуха зона интенсивного горения отодвигается от сопла, возрастает длина начального участка и общая длина факела (см. рис. 3), замедляются процессы турбулентного обмена, рассеивание полного давления и темп возрастания температуры вдоль горящей струи заметно падает. Происходит значительное уменьшение интенсивности тепловыделения по длине факела и присоединенной массы. Эта картина наблюдается при всех значениях параметра α и начальной крутки.

Таким образом, изменения начальной крутки струи, доли первичного воздуха в однородной горючей смеси и скорости спутного потока оказывают активное влияние на закономерности развития и структуру газового факела и могут служить эффективными средствами для его управления.

Поступила в редакцию
5/XI 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Червинский. Ракетная техника и космонавтика, 1969, 7, 10, 69.
2. Д. Лилл. Ракетная техника и космонавтика, 1977, 15, 8, 12.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИССОЦИАТИВНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ

Г. С. Драган, Т. Н. Кадыров, А. А. Мальгота,
Ю. В. Соколов, М. Н. Чесноков
(Одесса)

Для проведения расчетов закаленных концентраций заряженных частиц в расширяющихся газовых струях продуктов сгорания углеводородных горючих смесей используются значения коэффициентов электронно-ионной рекомбинации α . Теоретические расчеты коэффициента диссоциативной рекомбинации в зависимости от температуры проведены в [1]. Показано, что значения α лежат в пределах 10^{-6} — 10^{-7} см³/с, однако ввиду сильной зависимости закаленных концентраций от α [2] необходимо его экспериментальное измерение.

В настоящей работе экспериментально определялся коэффициент диссоциативной рекомбинации в продуктах сгорания углеводородной горючей смеси при повышенном давлении окружающей среды. Для проведения экспериментов сконструиро-

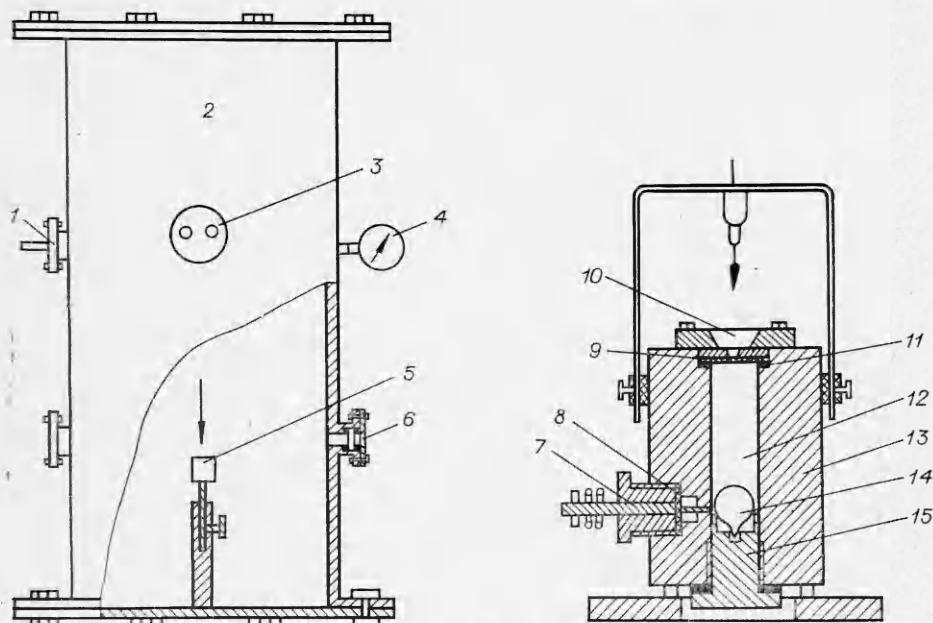


Рис. 1.

вапа и собрана установка. При этом учитывались условия сгорания углеводородных смесей в камере при повышенных давлениях и распространения продуктов сгорания в факеле, расширяющемся в вакуум. Такие условия характеризуются охлаждением газовой фазы продуктов сгорания и «замораживанием» плазменных концентраций в факеле. Изменение концентрации заряженных частиц (ионов и электронов) в факеле со временем вызвано в основном рекомбинационными процессами и амбиполярной диффузией.

Блок-схема установки приведена на рис. 1. В вакуумной камере 2 устанавливается импульсный источник плазмы 5. Корпус источника 13 содержит реакционную камеру 12, в нижнее отверстие которой ввинчена заглушка 15. В верхней части реакционной камеры закрепляется выходное сопло 10. Заглушка изготовлена в виде стаканчика, в который непосредственно заправляется горючее и вкладывается стеклянная ампула 14 с окислителем. Соединение окислителя с горючим происходит при разрушении ампулы ударником 7. Ударное устройство приводится в действие через сильфон в окне 1 с помощью рычага. Для предотвращения испарения горючего в вакуум реакционная камера отделяется от вакуумной пленками 8 и 9 и имеет вакуумное уплотнение 11. Давление в камере измеряется вакуумным манометром 4. В окне 3 вмонтированы разъемы для электрических измерений. Окна 6 предназначены для наблюдений.

При соединении исходных компонентов в реакционной камере происходит их самовоспламенение, в результате чего мгновенно возрастает давление, и продукты горения, пробивая защитную пленку, распространяются в вакуумной камере. Длительность вспышек равна $(5-6) \cdot 10^{-3}$ с. Эксперименты проводились при стехиометрическом составе смеси. Контроль осуществлялся при заправке окислителя в стеклянные ампулы и горючего в реакционную камеру путем взвешивания компонентов. При этом считалось, что при самовоспламенении происходит достаточно хорошее перемешивание окислителя с горючим за счет резкого повышения давления и температуры в камере и последующего испарения компонентов.

Основным методом определения коэффициента рекомбинации является измерение скорости распада плазмы. Метод по существу сводится к измерению концентрации свободных электронов или ионов в различные моменты времени в процессе деионизации газа. В распадающейся плазме изменение концентрации заряженных частиц с течением времени описывается уравнением

$$\frac{dn}{dt} = D\nabla^2 n - \alpha n^2, \quad (1)$$

где D — коэффициент амбиполярной диффузии; n — концентрация положительных ионов; t — время; α — коэффициент рекомбинации.

Поскольку эксперименты проводились при давлении 10 мм рт. ст., то эффект амбиполярной диффузии незначителен и первым членом в уравнении (1) можно пренебречь, т. е.

$$\frac{dn}{dt} = -\alpha n^2, \quad (2)$$

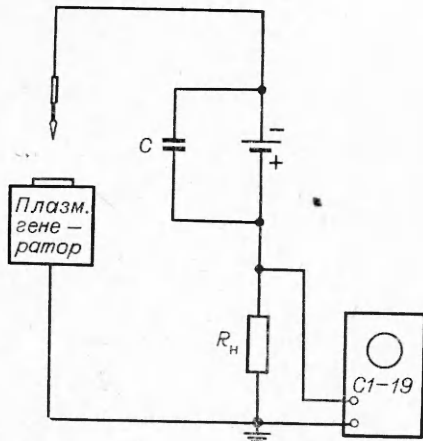


Рис. 2.

бывала создания специального охлаждающего устройства для исключения термоэлектронной эмиссии с зонда. Зондовый ток регистрировался осциллографом C1-19.

Зонд работал в режиме ионного тока насыщения. Для этого на него подавался заведомо большой отрицательный потенциал. Известно [4], что ток насыщения ионов выражается в виде

$$I = 1/4 \cdot e n \bar{v} s, \quad (4)$$

где e — заряд электрона; n — концентрация ионов; $\bar{v} = \sqrt{8kT/\pi m}$ — тепловая скорость ионов; s — эффективная площадь зонда. Из (4) следует, что благодаря слабой зависимости тока насыщения от температуры спад тока со временем в распадающейся плазме соответствует спаду ионной концентрации. В этом случае, выражая уравнение (2) через величину тока, можно записать

$$di/dt = \alpha_1 i,$$

откуда

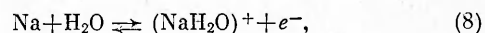
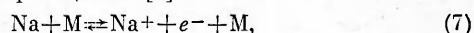
$$\alpha_1 = (1/i - 1/i_0)/(t - t_0). \quad (5)$$

Используя формулы (3) — (5), находим выражение для экспериментального определения коэффициента рекомбинации из кривых спада ионного тока

$$\alpha = 1/4 \cdot \alpha_1 e \bar{v} s. \quad (6)$$

Эксперименты проводились при давлении окружающей среды 10 мм рт. ст. Среднее значение температуры продуктов сгорания составляло 2000 К. Парциальное давление паров воды в продуктах сгорания углеводородных горючих смесей значительно превышает парциальные давления N_2 , CO_2 , CO , OH , O_2 , H_2 [5]. Потенциалы ионизации этих газов довольно высокие (более 10 эВ), поэтому степень их термической ионизации небольшая. Концентрация атомов натрия определялась по интенсивности спектральных линий и не превышала значения $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Образование заряженных частиц в продуктах сгорания, содержащих пары воды и примесь щелочного металла, описывается реакциями [6]



где M — любая частица.

Для установления ведущей роли одной из двух реакций необходимо оценить вклад каждой из них в образование заряженных частиц. С этой целью проводилось экспериментальное определение концентрации электронов n_e в продуктах сгорания исследуемых смесей. Получено $n_e = (2 \div 5) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Рассчитанное значение концентрации электронов, возникающих в результате термической ионизации атомов натрия, не превышает $1,5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений n_e свидетельствует о незначительной роли реакции (7) в образовании и исчезновении заряженных частиц.

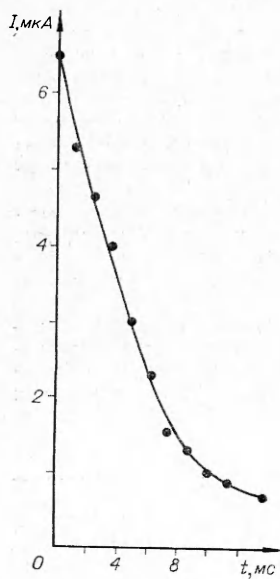


Рис. 3.

Отсюда следует, что в продуктах сгорания углеводородной горючей смеси при $T = 2000 \text{ K}$ и $n_e = 10^{11} \text{ см}^{-3}$ процессы ионизации и рекомбинации протекают по реакции (8).

На рис. 3 приведена типичная зависимость ионного тока насыщения от времени в продуктах сгорания углеводородной горючей смеси с примесью натрия. Значение α , вычисленное по этой кривой, составляет $2,3 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$. Экспериментальные значения коэффициента диссоциативной рекомбинации, соответствующие скорости обратных процессов в реакции (8), равны 3,15; 1,8; 5,2; 1,1; $2,3 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$. Полученные значения α хорошо согласуются с теоретическими расчетами [1]. В работе [7] приведены расчеты коэффициента α с использованием значений энергии связи молекул $(\text{NaN}_2\text{O})^+$ 50, 28 и 10 ккал/моль. Сравнение с полученными в настоящей работе данными показывает, что лучшее совпадение наблюдается, если брать значения энергии связи молекул 28 ккал/моль, рассчитанные Сагденом.

Таким образом, результаты, полученные на экспериментальной установке при сжигании углеводородных смесей с примесью натрия, подтверждают наличие в продуктах сгорания реакции (8) и могут быть использованы для расчетов кинетики электронных процессов.

Поступила в редакцию
21/XI 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Бейтс, А. Далгарно. Атомные и молекулярные процессы. М., Мир, 1964.
2. Г. С. Аравин, Н. М. Кузнецов, Ю. С. Саясов.— В сб.: Низкотемпературная плазма. М., Мир, 1967.
3. М. К. Гладышев, В. А. Горелов. ТВТ, 1976, 4.
4. О. В. Козлов. Электрический зонд в плазме. М., Атомиздат, 1969.
5. Н. Ф. Дубовкин. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. М.—Л., ГЭИ, 1962.
6. P. J. Padley, T. M. Sugden. VIII-th Sump. (Intern.) on Combustion, Baltimore, 1962.
7. Н. И. Ющенкова, В. И. Немченко, С. А. Лыжникова.— В сб.: Низкотемпературная плазма. М., Мир, 1967.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ

В. Е. Абалтусов, А. Р. Баграмян, А. М. Гришин, В. И. Юхвид
(Томск)

В последнее время актуальным становится вопрос о тепловой защите гиперзвуковых аппаратов [1, 2]. С целью выявления наиболее эффективных материалов для систем тепловой защиты таких аппаратов проводилось экспериментальное исследование взаимодействия ряда материалов (графиты марок АРВ, ПГ-50, В-1, вольфрам и карбид хрома) с высокотемпературной средой, содержащей окислитель.

В работе использован литой карбид хрома с массовым содержанием углерода $C_{\text{связ}} = 13,1\%$, полученный методом СВС [3—5]. Суммарное содержание примесей (Al , O_2 , $C_{\text{своб}}$) не превышало 1%. В качестве исходных компонентов для синтеза карбида хрома использован порошок хромового ангидрида CrO_3 (ГОСТ 3776-6), алюминия (АСД1) и сажи (ПМ-15Т).

Сравнительные испытания полусферических моделей, изготовленных из исследуемых материалов, проводились в струе ацетилено-кислородного газогенератора с параметрами $T_e = 3000 \text{ K}$, $u_e = 40 \text{ м/с}$, $C_e = 0,2$, где T_e , u_e — температура и скорость потока на оси струи, C_e — концентрация кислорода соответственно. Необходимый объем информации, получаемой при испытаниях, обеспечивался измерением температуры поверхности T_w в функции от времени t и определением скорости массового уноса с поверхности образцов $(\rho v)_w$ в функции от T_w по методике, описанной в работе [6]. С целью идентификации процессов тепломассообмена, протекающих на поверхности, проводилось обезразмеривание скорости массового уноса: $(\overline{\rho v})_w = \frac{(\rho v)_w^*}{(\rho v)_w}$, где $(\rho v)_w^*$ — скорость уноса массы с поверхности эталонного образца (В-1), $(\rho v)_w$ — скорость уноса массы с поверхности исследуемого образца.