

8. Теплопроводность твердых тел: Справочник/Под ред. А. С. Охотина.— М.: Энергоатомиздат, 1984.
9. Афанасьева Л. Ф., Черненко Е. В., Розенбанд В. И. // Проблемы технологического горения/Под ред. А. Г. Мержанова // Химия, технология, свойства и применение продуктов горения.— Черноголовка, 1981.— Т. II.
10. Физико-химические свойства окислов/Под ред. Г. В. Самсонова.— М.: Metallургия, 1978.

п. Черноголовка

Поступила в редакцию 16/VI 1989

УДК 662.629.536.46

С. Н. ЧЕРЕПНИН, В. П. ДАШЕВСКИЙ

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ ГОРЕНИЯ И ЭЛЕКТРИЗАЦИЮ СОПЛА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Эксперименты проводились на модельной установке, имитирующей реальную камеру сгорания энергетического агрегата и состоящей из металлической трубы диаметром $d = 40$, толщиной стенки 5 и длиной 300 мм. С одного конца в трубу запрессовано коническое сопло с диаметром критического сечения 10 мм, а с другого находится блок стабилизации факела: несколько керамических дисков с отверстиями диаметром 1,5 мм по четырем радиусам. Вдоль оси камеры со стороны переднего днища, выполненного из асбеста, введена керамическая трубка ($d = 8$ мм), внутри которой располагается стальной электрод с $d = 3$ мм с отполированным шариком на конце ($d = 6$ мм). Вторым электродом служил корпус камеры.

Поперечное электрическое поле накладывалось на область подготовки (3—12 мм от форсуночного блока). Центральный электрод через керамическую трубку обдувался потоком вторичного воздуха, чтобы предотвратить чрезмерный разогрев последней и исключить утечку заряда с нее на заземленный корпус. Расход вторичного воздуха подбирался так, чтобы суммарный коэффициент избытка окислителя $\alpha = 0,5 \div 1,3$. В промежутке между передним днищем и стабилизатором пламени (смеситель) в корпусе камеры располагались штуцера для ввода горючего (пропан-бутан) и воздуха. Принципиальная схема приготовления и подачи горючей смеси в камеру приведена в [1].

Расстояние между фронтом пламени и центральным электродом изменялось посредством перемещения последнего по оси камеры внутри керамической трубки. Между центральным электродом и заземленным корпусом камеры горения создавалось электрическое поле путем подачи на центральный электрод постоянного напряжения от высоковольтной установки УВ-50-50.

Измерялись температуры в камере сгорания и на выходе из сопла, ток в высоковольтной цепи, фиксировалось изменение цвета, формы и других параметров факела догорания в зависимости от напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке. Максимальный эффект воздействия электрического поля на горение в камере достигался в случае, когда электрод находился в области подготовки вблизи фронта пламени. Отмечено увеличение температуры в камере при различных α (в некоторых случаях на 200 °С), что свидетельствует о более полном сжигании топлива. Косвенно этот вывод подтверждает поведение факела догорания на сопле камеры при наложении электрического поля, когда

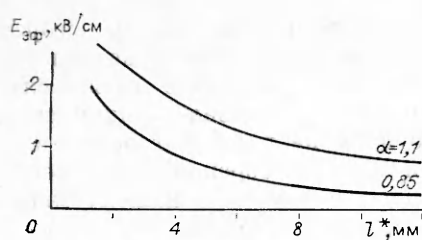


Рис. 1. Зависимость напряженности $E_{эф}$ от расстояния между центральным электродом и фронтом пламени.

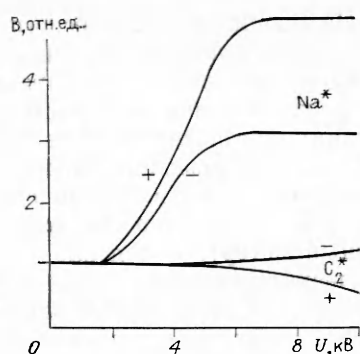


Рис. 2. Зависимость интенсивности V линий излучения Na^* и C_2^* от прикладываемого напряжения.

при росте напряженности поля E в межэлектродном промежутке факел укорачивался и полностью исчезал — процесс горения заканчивался в камере.

При дальнейшем повышении напряжения до близкого к пробойному (последнее зависит от α) в ряде случаев факел срывался, причем попытки вновь поджечь топливовоздушную смесь при сохранении поля в камере оказывались безуспешными — происходила вспышка и пламя вновь гасло. Измерения тока в высоковольтной цепи показали, что он зависит от расположения центрального электрода относительно фронта пламени, а также от коэффициента избытка окислителя. Чем ближе был электрод к фронту, тем меньше напряжение прикладывалось к нему, однако ток в высоковольтной цепи возрастал.

Необходимо указать, что отмеченный выше эффект увеличения скорости горения в электрическом поле относится к случаю, когда электрод находился в области подготовки и имел положительную полярность. Изменение направления поля (на центральном электроде — минус) приводило к исчезновению эффекта. Ток в этом случае с ростом E быстро повышался и пробой наступал при $U \approx 4 \div 4,5$ кВ.

Выявлена сильная зависимость $E_{эф}$ (напряженность поля, при которой достигается максимальный эффект воздействия на горение) от расположения центрального электрода относительно фронта пламени (рис. 1, где $E_{эф} = U/r$ ($r = 0,02$ с); l^* — расстояние от форсуночного блока до конца электрода).

Одновременно рассматривалось изменение светимости факела догорания при наложении поперечного электрического поля на область продуктов сгорания пламени пропан-бутан — воздух. Изменение относительной интенсивности характерных спектральных линий регистрировалось фотографически монохроматором УМ-1 и фотоэлектрически спектрографом ИСП-51, оснащенный фотоэлектрической приставкой ФЭП-1, с последующей записью на самописце Endim 620.01. Выявлено, что наложение электрического поля на область продуктов сгорания значительно увеличивает интегральную светимость факела догорания независимо от направления поля, причем в широком интервале напряжений наблюдается прямо пропорциональная зависимость светимости от напряженности приложенного поля. Цвет факела смещался от фиолетово-голубой области в желтую.

Исследования спектра факела показали, что основной вклад в изменение светимости вносит не количество сажистых частиц на выходе, как предполагалось ранее, а резкий рост доли возбужденных атомов Na^* . В то же время яркость линий радикала C_2^* с повышением напряжения уменьшается, что свидетельствует о более полном сгорании смеси в камере (рис. 2).

Наложение электрического поля на области подготовки и догорания с целью повышения степени сгорания топливоздушнoй смеси по приведенной методике (предотвращение коронного разряда в первом случае и его сознательная инициация во втором) обусловлено различными механизмами воздействия электрического поля на процесс горения в этих областях. Неоднозначность воздействия поля на горение при изменении направления поля в первом случае свидетельствует, по нашему мнению, о том, что рост скорости горения имеет не газодинамическую природу (ионный ветер), а связано с прямым воздействием поля на кинетику химических реакций. После наложения электрического поля на область подготовки (центральный электрод +) электроны, генерируемые фронтом, под действием поля начинают двигаться против потока газа по направлению к началу области подготовки, где вызывают иницирование свежей смеси и более полное ее сгорание при прохождении через фронт. Определенную роль в активации горючей смеси перед сгоранием играет, вероятно, также поляризация молекул топлива в электрическом поле, что повышает их химическую активность.

При наложении электрического поля на область продуктов сгорания, где доля непрореагировавших молекул топлива и окислителя весьма низка и степень ионизации ниже, чем во фронте, малые напряженности поля (такие, как в первом случае) не способны заметно изменить скорость горения (точнее, догорания). Рост напряженности поля приводит к зажиганию коронного разряда на центральном электроде, и степень ионизации в продуктах горения увеличивается. При этом повышается скорость догорания и тем больше, чем выше напряженность поля. Об этом свидетельствует снижение интенсивности линий радикала C_2^* , зафиксированное в эксперименте (см. рис. 2).

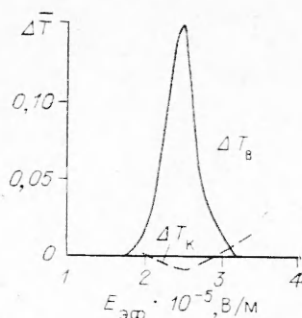
Рост светимости пламени за счет резкого повышения концентрации возбужденных атомов натрия также является следствием возникновения коронного разряда на электроде. В этих условиях облегчается автоэмиссия легкоионизируемых атомов натрия с поверхности электродов, на которых они имеются, как загрязняющая примесь, причем на центральном электроде этот процесс идет существенно активнее за счет более высокой напряженности поля вблизи него. Вследствие этого эффект роста светимости факела выражен отчетливее, когда на центральный электрод подан отрицательный потенциал.

Ионы натрия на выходе из камеры, где температура падает, рекомбинируют с электронами, частично превращаясь в возбужденные атомы Na^* . Последние излучают избыточную энергию и вновь превращаются в нейтральные атомы, вследствие чего яркость линии $\lambda = 590$ нм резко увеличивается.

В эксперименте регистрировалась температура продуктов горения в камере ΔT_k и на выходе из сопла ΔT_v при изменении напряженности поля, наложенного на область подготовки (центральный электрод находился непосредственно у фронта). На рис. 3 видно, что зависимости $\Delta T(E_{эф})$ имеют экстремальный характер. Объяснить это можно, по-видимому, следующим образом. По мере повышения U растет полнота сгорания топлива — вследствие этого температура на выходе из сопла увеличивается и при $U = 6,5$ кВ становится максимальной. При дальнейшем повышении напряжения факел начинает укорачиваться, т. е. максимум температуры смещается внутрь камеры сгорания, из-за чего температура за соплом установки уменьшается.

В работах [2, 3], посвященных электризации реактивных энергоустановок, отмечалась зависимость тока зарядки двигателя от его режима работы. Известно, что варьирование расходных характеристик реактивного двигателя приводит к изменению газодинамических параметров, что определяющим образом влияет на процесс электризации устройств. Интерес представляет процесс электризации устройств при постоянных скоростях потока и различных расходах. Скорость v зависит в основном от объема продуктов сгорания V и температуры продуктов T . Рас-

Рис. 3. Изменения температуры продуктов горения в камере и на выходе сопла в зависимости от напряженности поля.



ход продуктов сгорания G зависит от коэффициента объемного расширения ($a = 1/273$). Тогда

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{G_1}{G_2} = \frac{V_1}{V_2}, \quad G_1 = G_0(at_1 + 1), \quad G_2 = G_0(at_2 + 1), \quad G_3 = G_0(at_3 + 1),$$

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{1 + at_1}{1 + at_2}, \quad \frac{G_2}{G_3} = \frac{1 + at_2}{1 + at_3}.$$

Здесь t_1, t_2, t_3 — температура в критическом сечении сопла для $\alpha = 1; 0,5$ и $1,5$ соответственно.

Отсюда можно найти суммарные расходы топливоздушной смеси для коэффициентов расхода окислителя, при которых скорости потока будут постоянны. Можно прийти к этому же результату и другим путем, рассчитав объем продуктов сгорания по формуле

$$V = \frac{(m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{N}_2} + \dots) 22,4}{m_{\text{гор}} M}, \quad (1)$$

где $m_{\text{CO}_2}, m_{\text{H}_2\text{O}} \dots$ — число киломолей компонента; $m_{\text{гор}}$ — число киломолей горючих компонентов; M — масса горючего вещества, равная молярной массе. Рассчитав объемы продуктов сгорания по (1), получим, что их изменение в зависимости от коэффициента расхода окислителя имеет экстремальный характер, причем минимальное значение V соответствует $\alpha = 1$.

Поскольку формирование электрического поля внутри камеры, по нашему мнению, обусловлено в основном процессом химиионизации (степень последней зависит от числа молекул топлива и окислителя, вступивших в реакцию, а это в свою очередь влияет на распределение заряженных частиц в различных областях пламени), изменение электрофизических, теплофизических и других характеристик горения может проходить при неизменных газодинамических параметрах потока.

Эксперименты проводились на установке, описанной в работе [1]. Сопло камеры сгорания электрически изолировано от корпуса. Для увеличения количества ионизированных частиц при горении в камеру вводился раствор NaCl различной концентрации. Одновременно исследовались изменения заряда сопла при наложении внешнего электрического поля на различные области горения. Опыты проводились при постоянных скоростях потока и расхода, причем коэффициент избытка окислителя варьировался.

Поперечное электрическое поле накладывалось по схемам, описанным выше, пока заряд сопла не становился равным нулю (можно было даже изменить значение последнего вплоть до перемены полярности). В этом случае значения прикладываемого напряжения не превышают 1 кВ. Получены зависимости потенциала сопла и прикладываемого напряжения от коэффициента избытка окислителя (рис. 4).

Сопло приобретает потенциал как при постоянных общих расходах, так и при постоянных скоростях потока, что наводит на мысль о том, что степень электризации сопла обусловлена не только газодинамически-

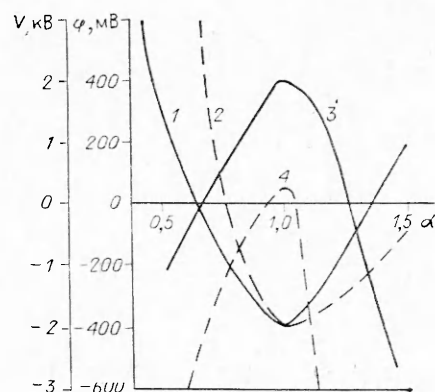


Рис. 4. Зависимость потенциала сопла φ и прикладываемого напряжения U от коэффициента избытка окислителя. 1 — электрический потенциал сопла при постоянной скорости потока; 2 — то же, при постоянном общем расходе; 3 — электрическое поле наложено на область подготовки; 4 — на область догорания.

ми параметрами, как считалось ранее [2], но и другими процессами, которые нужно учитывать вкуче со специфической электризацией [4]. Механизм воздействия внешнего электрического поля можно описать, основываясь на приведенном объяснении влияния поля на процесс горения. Считаем, что электризация сопла идет при участии по крайней мере двух механизмов (специфической электризации поверхности сопла при его нагреве и взаимодействии заряженных частиц, генерируемых пламенем, с заряженной поверхностью). В этом случае можно предположить, что наложение поперечного электрического поля на область подготовки (заставляющее ориентироваться полярные молекулы, а заряженные частицы двигаться по направлению силовых линий) в первом случае (центральный электрод положительный) способствует рекомбинации заряженных частиц на сопле, уменьшая его заряд, или препятствует ей во втором случае (на центральном электроде минус) и тогда заряд сопла, обусловленный специфической электризацией металла, растет.

Показательно, что при повышении степени ионизации продуктов горения путем введения в камеру раствора NaCl потенциал сопла уменьшался, что подтверждает сказанное выше (рост числа ионов Na^+ и Cl^- в потоке ускоряет рекомбинацию последних с зарядами на поверхности сопла, возникшими в результате специфической электризации). Обнаруженные эффекты могут быть использованы для увеличения степени сгорания топлива в энергетических агрегатах, снятия заряда с сопловых поверхностей и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черепнин С. Н. // Тезисы докладов семинара по электрофизике горения.— Караганда, 1986.
2. Электрогазодинамика течения/Под ред. А. Б. Ватажина.— М.: Наука, 1983.
3. Потанов Г. П., Ившин В. П. // Тепловые процессы и свойства рабочих тел двигателей летательных аппаратов.— Казань, 1973.— Вып. 158.
4. Филалков Б. С. // Горение органического топлива // Материалы V Всесоюз. конф.— Новосибирск, 1985.

г. Караганда

Поступила в редакцию 9/1 1990

УДК 622.126

Г. Т. ЦЫГАНКОВ

СТРУКТУРА, ФОРМА И РАЗМЕРЫ ЖЕСТКОГО ЛАМИНАРНОГО ФАКЕЛА

Жесткий ламинарный факел (ЖЛФ) развивается и существует в определенных условиях и имеет ясно видимые контуры (рис. 1, коэффициент избытка воздуха $n = 0,6$). Под ЖЛФ подразумевается такой

© 1990 Цыганков Г. Т.

78