

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
НА РАЗМЕРЫ И ТЕМПЕРАТУРУ ГОРЯЧЕГО ФАКЕЛА**

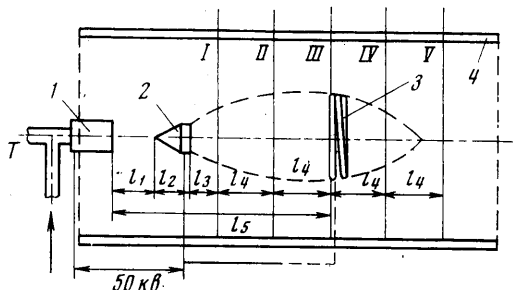
В. М. БОРИСЕНКО, Е. А. КЕЛЬШМАН, Г. М. МЕЩЕРЯКОВ

(Москва)

Известные в настоящее время эксперименты [1-8] по исследованию влияния электрических и электромагнитных полей на пламена были проведены на малоразмерных горелках, в основном использующих природный газ (расход газа 0.16-0.51 кг/час). Такие расходы не соответствуют расходам топлива в современных силовых установках. Поэтому представлялось целесообразным рассмотреть влияние электрических полей на некоторые характеристики пламени (размеры и поля температур) в условиях, приближающихся к рабочим режимам реальных объектов, т. е. с большими расходами топлива через горелку, работающих на жидком топливе.

Экспериментальные исследования проводились на установке, принципиальная схема которой представлена на фиг. 1. Установка содержала блок топливоснабжения, состоящий из насосного агрегата, подводящей магистрали (А - топливо, В - воздух) и струйной форсунки 1, которая одновременно служила одним из высоковольтных электродов для создания электрического поля; высоковольтные электроды - стабилизатор 2 и кольцевой электрод 3; открытую камеру сгорания 4. Кольцевой электрод 3 был выполнен из стальной трубки (внутренний диаметр трубки 6 мм) диаметром 216 мм. Стабилизатор 2 был выполнен из дюраля в виде конуса с углом при вершине 60°.

Температура пламени измерялась пятью хромель-алюмелиевыми термопарами, расположенными в горизонтальной плоскости, проходящей через ось камеры сгорания. Термопары могли перемещаться в направлениях, перпендикулярных оси камеры сгорания. Принципиальная схема расположения термопар представлена на фиг. 1. Соответствующие сечения, в которых измерялись температуры, помечены цифрами I-V.



Фиг. 1

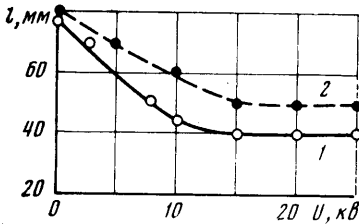
Чтобы исключить влияние электрического поля на показания термопар, производились предварительные тарировки их в электрическом поле при отсутствии горения.

В качестве топлива использовался керосин Т-6. Расходы топлива и воздуха через форсунку определялись по замерам статического давления в соответствующих каналах; при этом использовались данные предварительных тарировочных испытаний. Максимальные расходы топлива и воздуха в описываемых опытах были соответственно равны $G_T=20-25$ кг/час, $G_B=200-250$ кг/час.

Изменение расстояний между форсункой, стабилизатором и кольцевым электродом производилось дистанционно при помощи гидросистемы. Осевое расположение форсунки, стабилизатора и кольцевого электрода позволяло создавать продольные электрические поля различных напряженностей. При экспериментах расстояния между форсункой и стабилизатором были равны $l_1=0.05, 0.875, 0.125$ м, что соответствовало значениям напряженностей полей при соответствующих потенциалах, равным $E=10^6, 3.2 \cdot 10^5, 1.6 \cdot 10^5$ в/м. Максимальное значение напряжения на электродах было равно 50 кВ. Указанные значения напряженностей полей приближенные, так как в действительности электрическое поле не однородно. Однако данные значения могут быть использованы для сравнительной оценки результатов опытов.

Остальные расстояния, показанные на фиг. 1, были соответственно равны $l_2=0.027$ м, $l_3=0.035$ м, $l_4=0.1$ м, $l_5=0.4$ м в экспериментах по исследованию влияния электрического поля на размеры горячего факела (без температурных замеров).

Методически эксперименты проводились следующим образом: вначале устанавливались заданные расстояния между форсункой, стабилизатором и кольцевым электродом без включения высокого напряжения. Затем производился запуск камеры и фотографирование факела; при этом измерялась температура пламени по сечениям. Далее все эти операции и замеры повторялись при включенном напряжении. При этом измерялись сила тока и напряжение между электродами системы.



Фиг. 2

Были проведены три серии экспериментов, отличавшихся (помимо величины напряженности электрического поля и значения коэффициента избытка воздуха) характером электрического поля.

В первой серии опытов электрическое поле было направлено по потоку топливо-воздушной смеси — положительный потен-

циал был приложен к форсунке, а отрицательный потенциал — к стабилизатору; на кольцевой электрод потенциал не подавался.

Результаты этих экспериментов представлены в таблице, где E — напряженности электрических полей, α — коэффициенты избытка воздуха (под α понимается отношение весового расхода воздуха к произведению весового расхода топлива на количество воздуха, необходимого для полного сгорания 1 кг топлива), L — относительные осевые размеры факела ($L=l_E/l$; l_E — длина факела при приложенном продольном электрическом поле, l — длина факела без поля), D — относительные поперечные размеры факела (D — отношение максимального диаметра d_E факела при наличии электрического поля к максимальному диаметру d факела без поля).

Из таблицы следует, что приложение продольного электрического поля, направленного по потоку, способствует сокращению осевых размеров факела приблизительно пропорционально величине напряженности электрического поля. Наибольшее сокращение факела соответствует максимальным значениям напряженности $E=10^8$ в/м ($L=0.66-0.80$), наименьшее — минимальным напряженностям $E=1.6 \cdot 10^5$ в/м ($L=0.80-1.00$). Поперечные размеры факела при данном расположении потенциалов с увеличением напряженности поля возрастают. Наибольшее возрастание диаметра факела соответствует максимальным значениям напряженности $E=10^6$ в/м ($D=1.12-1.33$).

На фиг. 2 представлены графики, показывающие уменьшение высоты l пламени городского газа при повышении потенциала U на горелке.

Кривая 1 соответствует данным, приведенным в работе [1]; кривая 2 — результатам, полученным авторами. В обоих случаях на горелку подавался отрицательный потенциал. Из сравнения данных таблицы и кривых, приведенных на фиг. 2, следует качественное совпадение результатов, т. е. при применении электрического поля происходит сокращение длины факела.

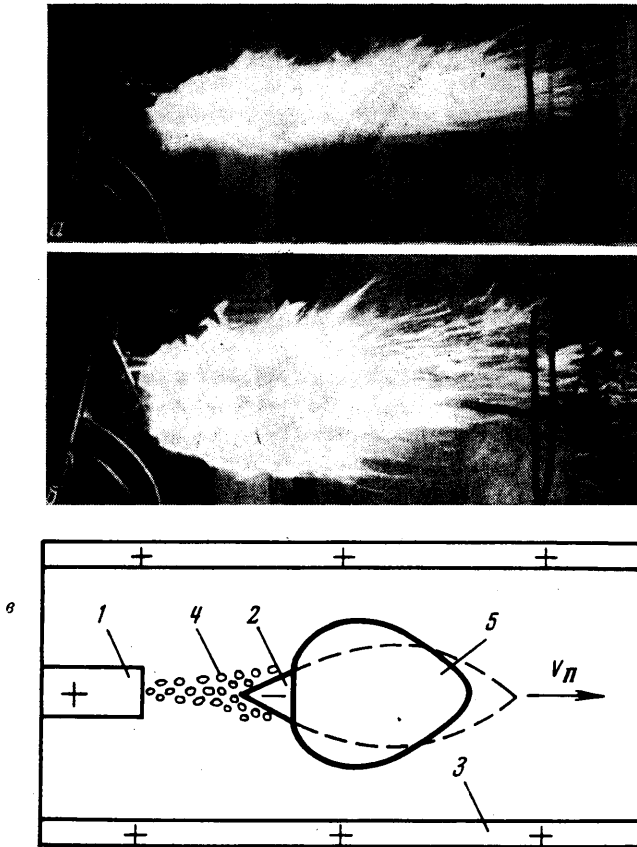
Фотография факела при $\alpha=0.8$ в отсутствие электрического поля представлена на фиг. 3, а, а на фиг. 3, б представлена фотография того же факела при $E=10^6$ в/м. Из сравнения фотографий следует, что приложение электрического поля по потоку приводит к сокращению длины факела на ~30%, при увеличении диаметра — на 35%.

E , в/м	α	L	D
$1.6 \cdot 10^5$	1	1	1
$1.6 \cdot 10^5$	1	0.8	1
$1.6 \cdot 10^5$	1.2	0.9	1.06
$3.2 \cdot 10^5$	1.2	0.94	1
$3.2 \cdot 10^5$	1	0.85	1.1
$3.2 \cdot 10^5$	1	0.75	1.1
10^6	1	0.8	1.27
10^6	0.8	0.74	1.33
10^6	1.2	0.66	1.12

Из таблицы следует, что изменение коэффициента избытка воздуха α в диапазоне 0.8—1.2 практически не оказывает влияния на геометрические соотношения факела.

Вторая серия опытов производилась при положительном потенциале на стабилизаторе и отрицательном на форсунке. Эти исследования велись при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1.2$. На кольцевой электрод потенциал не подавался.

На фиг. 4, а представлен факел в отсутствие электрического поля, а на фиг. 4, б — тот же факел с электрическим полем, направленным против



Фиг. 3

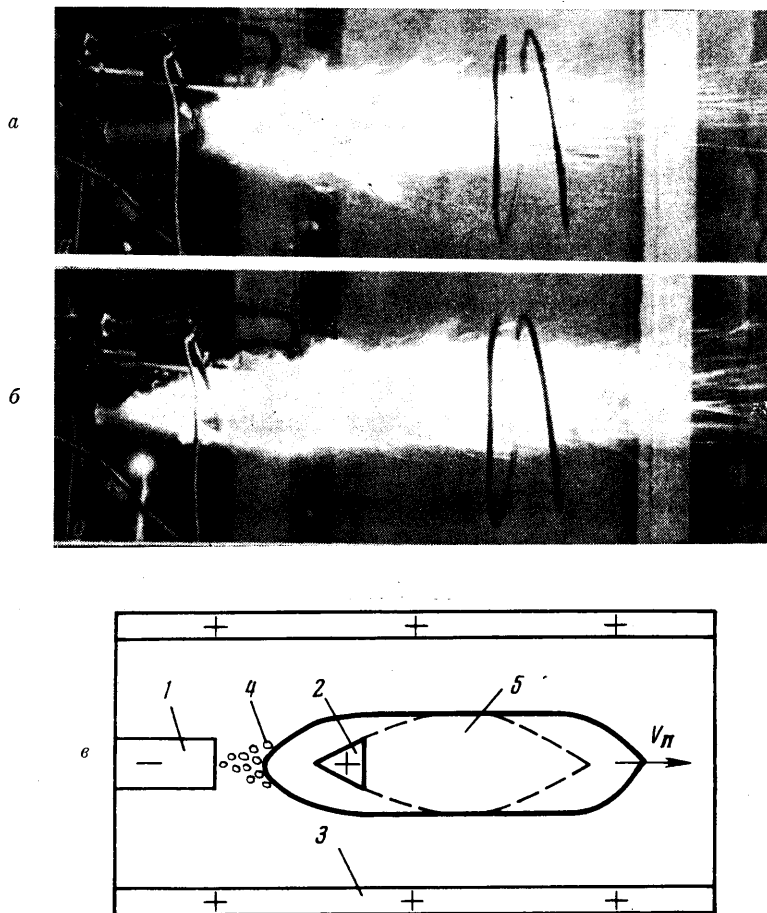
потока при $E=10^6$ в/м. Из сравнения факелов следует, что при приложении электрического поля происходит возрастание осевых размеров факела ($L=1.25$). В данных опытах существенного изменения диаметров факелов не было замечено, однако в случаях приложения электрических полей факел из конусообразного превращался в цилиндрический.

В третьей серии экспериментов положительный потенциал подавался на кольцевой электрод, т. е. под одинаковыми положительными потенциалами находились стабилизатор и кольцевой электрод, а форсунка находилась под отрицательным потенциалом (в этих опытах $\alpha=1.2$).

В этом случае также получено увеличение длины факела (до $L=1.1$ при $E=10^6$ в/м). Однако это увеличение было менее интенсивным, чем во второй серии опытов, в которых при аналогичных условиях увеличение составляло $L=1.25$.

Все эксперименты (с полем и без поля) проводились при атмосферном давлении и температуре окружающего воздуха.

Снятие температурного поля по всем пяти сечениям горячего факела произведено при коэффициентах избытка воздуха $\alpha=0.5$ и напряжениях электрического поля между форсункой и стабилизатором $E=0$ и 10^6 в/м. На диаграмме, представленной на фиг. 5, а, показана температура в точках соответствующих сечений (I—V) факела, отстоящих на различных расстояниях R от оси факела без приложения электрического поля.

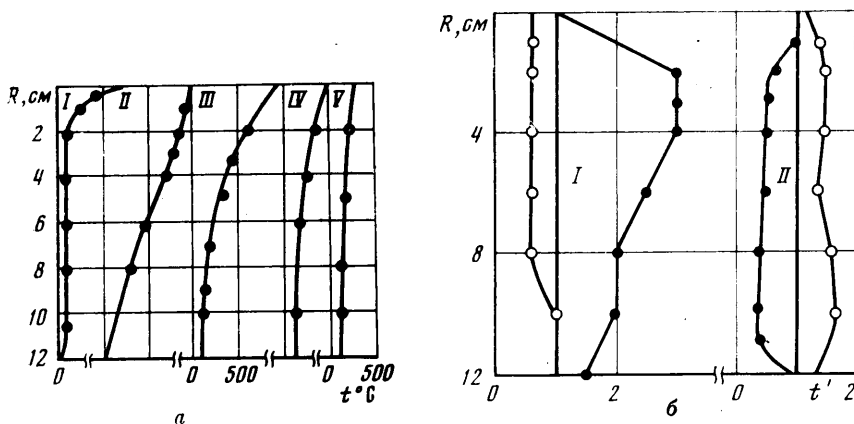


Фиг. 4

На фиг. 5, б показано относительное изменение температуры в соответствующих точках первых двух сечений (I, II) факела при наличии электрического поля в первой (I) и во второй (2) сериях экспериментов. Данные по остальным трем сечениям (III, IV, V) качественно совпадают с изменениями температуры для сечения II, поэтому они не приведены на диаграмме. Относительное изменение температуры t' в этих случаях представлено отношением температуры в точке при наличии электрического поля к температуре в этой же точке без поля $t'=t_E/t$.

Как следует из фигуры для сечения I при приложении отрицательного потенциала к стабилизатору, а положительного — к форсунке (первая се-

рия экспериментов), температура в отдельных точках этого сечения возрастает в 3 раза. В остальных четырех сечениях (II–V) температура уменьшается. (Так, для второго сечения, показанного на фиг. 5, б, наибольшее снижение составляет $\bar{t}=0.4$, для третьего — 0.8, для четвертого — 0.7, для пятого — 0.7.) Когда на стабилизатор подавался положительный потенциал, а на форсунку — отрицательный (вторая серия экспериментов), температура в области первого сечения уменьшалась до $\bar{t}=0.6$, а в областях остальных сечений (II–V) происходило повышение температуры максимально до $\bar{t}=1.6, 1.5, 1.3, 1.5$ соответственно.



Фиг. 5

Таким образом, электрическое поле, направленное по потоку, способствует смещению высокотемпературной области факела в сторону первого сечения, находящегося сразу же за стабилизатором, а поле, направленное против потока, способствует удалению высокотемпературной области факела от первого сечения в сторону последних сечений.

При проведении экспериментов первой и второй серий обнаружено влияние электрического поля на устойчивость горения. Электрическое поле, направленное по потоку, стабилизировало пламя (фиг. 3, а, б), а при изменении направления поля пламя прорывалось за стабилизатор по направлению к форсунке (против потока), что сопровождалось низкочастотными пульсациями факела (фиг. 4, а, б).

Максимальная тепловая мощность, выделяемая при сгорании керосина при данных экспериментах, была равна 156 кВт, в то время как максимальная электрическая мощность высоковольтного выпрямителя — 20 вт, из которых непосредственно на создание и поддержание электрического поля расходовалась десятая часть (2 вт).

Наибольшим сдвигом температуры пламени соответствовал максимальный ток в системе. Учитывая, что мощность тока во всех опытах незначительна (~ 1 вт), эффектом превращения энергии электрического поля в тепловую можно пренебречь [6].

Максимальная напряженность электрического поля в описанных экспериментах ($E=10^9$ в/м) при $Pl_1=38 \cdot 10^3$ мм рт. ст. мм была ниже пробойной [9]. Токи в системе были незначительными (~ 20 мка), поэтому электрические поля, создаваемые в данных опытах, можно считать электростатическими.

Полученные результаты по влиянию электрических полей на процесс горения можно объяснить следующим образом. При приложении потенциалов к форсунке 1 и стабилизатору 2, находящимся в жаровой трубе 3

(фиг. 3, *е*), возникающее электрическое поле воздействует как холодный факел (топливовоздушную смесь на участке от форсунки до зоны горения 4), так и на горячий факел (зона горения топливовоздушной смеси 5). При действии электрического поля на холодный факел происходит уменьшение поверхностного натяжения капель, что способствует распаду крупных капель. Сопутствующая электризация капель приводит к их взаимному отталкиванию и увеличению угла конуса распыления. Увеличение же угла распыления, в свою очередь, интенсифицирует распыление за счет аэродинамических сил.

При воздействии внешнего поля на заряженные капли в зависимости от направления поля угол распыления может как увеличиваться, так и уменьшаться. В частности, при положительном потенциале на форсунке, отрицательном потенциале на стабилизаторе и положительном на жаровой трубе (фиг. 3, *б*, *в*) положительно заряженные капли будут отталкиваться от стенок жаровой трубы и притягиваться к отрицательно заряженному стабилизатору, несколько уменьшая эффективный угол распыления.

Суммарное воздействие возникающих электрических полей в камере сгорания, как показывают эксперименты, приводит к расширению холодного факела за счет преобладания сил взаимного отталкивания над силовым воздействием внешнего поля.

Исследованиями, изложенными в ряде работ [10-13], показано, что в горячем факеле за счет хемоионизации и термической ионизации содержатся ионы, электроны и заряженные частицы и ассоциации молекул. В отсутствие внешних электрических полей стационарное гомогенное пламя имеет неравномерное распределение зарядов по объему. Так, зона реакций и наружный конус имеют положительный заряд, а внутренний конус характеризуется отрицательным зарядом, носителями которого являются в основном отрицательные ионы. Такое распределение зарядов вызвано различной подвижностью ионов и электронов. Подвижность электронов значительно выше подвижности ионов, поэтому при наличии поля электроны покидают наружный слой горячего факела, который заряжается положительно.

Положительно заряженный наружный слой горячего факела тормозится, притягиваясь к отрицательно заряженному стабилизатору. Внутренний же объем зоны горения непрерывно заряжается отрицательным зарядом, стекающим со стабилизатора, в результате чего этот объем отталкивается от стабилизатора к периферии.

Эти процессы обеспечивают наличие встречных потоков отрицательных и положительных ионов, что увеличивает вероятность столкновения частиц и, соответственно, скорость протекания реакций. Расширение площади горячего факела за счет притяжения положительных ионов к стабилизатору способствует обогащению зоны горения кислородом воздуха, что также сказывается на интенсификации горения. Длина пламени уменьшается (фиг. 3, *в*), а зона высоких температур сдвигается к стабилизатору (фиг. 5, *б* — первая серия экспериментов).

При изменении полярности (положительный потенциал — на стабилизаторе и жаровой трубе, а отрицательный — на форсунке (фиг. 4, *б*, *в*)) картина воздействия электрического поля на холодный и горячий факелы несколько изменяется. Холодный факел, заряженный отрицательно, будет интенсивно расширяться за счет взаимодействия с положительным зарядом жаровой трубы. В возникшем за стабилизатором горячем факеле в отличие от предыдущего случая будут положительно заряженными не только наружный слой за счет высокой подвижности электронов, но также и внутренний объем за счет отвода из него отрицательных ионов на положительно заряженный стабилизатор.

Это приводит к тому, что передняя часть положительно заряженного факела притягивается к отрицательно заряженной форсунке, практически не изменяя своей ширины, фронт пламени располагается между форсункой и стабилизатором; часть горячего факела, расположенная по потоку за стабилизатором, несколько удлиняется за счет взаимного отталкивания положительных частиц факела и положительного заряда стабилизатора. Совместное действие этих факторов приводит к увеличению общей длины горячего факела (фиг. 4, в), а зона высоких температур несколько удаляется от стабилизатора по потоку (фиг. 5, б — вторая серия экспериментов).

При наличии дополнительного положительно заряженного кольцевого электрода за стабилизатором длина пламени уменьшается за счет отталкивания положительно заряженного факела от кольцевого электрода.

Из приведенных экспериментов следует, что изменения размеров факела при действии электростатических полей, направленных по потоку, для натуральных и модельных условий качественно совпадают.

Величина коэффициента избытка воздуха в диапазоне от 0.8 до 1.2 практически не оказывает влияния на относительные геометрические характеристики факела.

При электрическом поле, направленном по потоку, происходит смещение высокотемпературной области факела против потока; при поле, направленном против потока, происходит смещение высокотемпературной области факела по потоку.

Поступила 22 XI 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Асакава Т. Физические методы интенсификации процессов горения. В сб. «Вопросы горения». (Материалы 6-го и 7-го Международных симпозиумов по горению.) М., Metallurgizdat, 1963.
2. Heinsohn R. J., Lay J. E. Studies of a flat flame under impressed electric and magnetic fields. ASME Preprint, N64-WA-ENER-2, 1964. Index Aeronaut., 1965, No. 6.
3. Chen D. C., Lawton J., Weinberg F. J. Augmenting flames with electric discharges. Tenth Sympos. (Internat.) on Combustion, Cambridge, 1964; Pittsburg, 1965.
4. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. М., «Мир», 1968.
5. Салимов А. У., Балабеков М. Т., Багдасаров А. М. Вопросы теории электростатического распыливания и интенсификация процессов сгорания жидких топлив. Ташкент, Изд-во «Фан», 1968.
6. Степанов Е. М., Дьячков В. Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. М., «Металлургия», 1968.
7. Саламандра Г. Д. Распространение пламени в электрическом поле. Физика горения и взрыва, 1969, т. 5, № 2, стр. 189.
8. Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения. М., «Наука», 1965.
9. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
10. Гейдон А. Г., Вольфгард Х. Г. Пламя, его структура, излучение и температура. М., Metallurgizdat, 1959.
11. Иост В. Взрывы и горение в газах. М., Изд-во иностр. лит., 1952.
12. Хитрин Д. Н. Физика горения и взрыва. М., Изд-во МГУ, 1952.
13. Кондратьев В. Н. Кинетика химических газовых реакций. М., Изд-во АН СССР, 1958.