

16. Muzio L.J., Smith D.S., Starkman E.S. Emission-Absorption Temperature Measurements in the Cylinder of Spark Ignition Engine // Comb. and Flame. — 1972. — 18, № 3. — P. 315—319.
17. Соснин Е.И. Изменение параметров газа в процессах наполнения и опорожнения емкостей. — М., 1976. — (Труды ЦАГИ, вып. 1786).

119899, г. Москва,
НИИМ МГУ им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию, 14/III 1994,
после доработки — 1/VIII 1994

УДК 533.92:536.46

Д.А. Ягодников, А.В. Воронцовский

ОСОБЕННОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОПАНОВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ПРОДОЛЬНОГО И ПОПЕРЕЧНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Рассмотрены различные способы организации воздействия внешнего электрического поля на горение пропановоздушной смеси при атмосферном давлении. Исследовано влияние полярности прикладываемого напряжения, места расположения кольцевого электрода (продольное поле) и диаметра цилиндрического электрода (поперечное поле) на величину скорости срыва пламени при различных значениях массового расхода пропана. Показано, что наибольшая устойчивость пламени к срыву реализуется в случае использования цилиндрического сетчатого электрода. Измерены значения ионизационного тока по высоте пламени. Дано объяснение полученных результатов.

В проведенных к настоящему времени экспериментальных исследованиях, посвященных изучению воздействия внешнего электрического поля (ВЭП) на характеристики воспламенения и горения различных топливных композиций, установлены зависимости скорости срыва пламени $v_{ср}$ от величины напряжения ВЭП, химического состава топлива, соотношения компонентов и др. [1—3]. Однако в этих работах не проанализировано влияние методов наложения ВЭП, что ограничивает разработку практических рекомендаций по интенсификации рабочего процесса в энергетических установках. В связи с этим задача данной работы — определение влияния способов наложения ВЭП на $v_{ср}$.

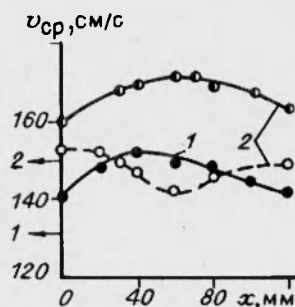
Экспериментальные исследования проводились на бунзеновской горелке, корпус которой выполнен из металлической трубы длиной 265 мм с внутренним диаметром 28 мм. Для уменьшения неоднородности поля скоростей на входе в рабочую зону горелки устанавливается конфузорное сопло с выходным диаметром 10 мм, на котором осуществляется стабилизация пламени. В качестве топлива используется предварительно перемешанная смесь пропана с воздухом, для измерения расходов которых применялись ротаметр РС-3А и дроссельная шайба соответственно. Относительная погрешность измерений расходов составляет 2,5 %.

В первой серии экспериментов реализована схема продольного поля. В этом случае ВЭП создавалось между соплом горелки и расположенным соосно соплу кольцевым электродом с внутренним диаметром 75 мм. В качестве основных варьируемых параметров приняты массовый расход пропана m_p и расстояние между электродом и срезом сопла горелки x . Отметим, что срыв пламени осуществлялся за счет постепенного увеличения массового расхода воздуха при фиксированном расходе пропана. Поэтому в каждом случае срыв пламени реализуется при конкретном значении коэффициента избытка окислителя $\alpha_{ср}$. Обратим внимание, что во всех экспериментах факт интенсифицирующего воздействия ВЭП на процессы горения проверялся следующим образом. Если при наложении поля имела место стабилизация

© Д.А. Ягодников, А.В. Воронцовский, 1995

Рис. 1. Зависимость скорости срыва пламени от положения кольцевого электрода. Сплошные линии — к горелке приложен отрицательный потенциал, штриховая — положительный.

$m_n, \text{г/с: } 1 - 0,008; 2 - 0,011.$



пламени, то в момент размыкания высоковольтной цепи сразу происходил срыв пламени.

Установлено, что в случае приложения к горелке постоянного отрицательного потенциала $U = 0,9$ кВ скорость срыва увеличивается (рис. 1, стрелками обозначены значения $v_{ср}$ при $U = 0$, когда $\alpha_{ср} = 0,81$ (1) и $0,76$ (2) соответственно). Причем с увеличением расхода пропана $v_{ср}$ возрастает. На пределе стабилизации пламени $\alpha_{ср} = 0,87 \div 1$ (зависимость 1) и $0,76 \div 0,89$ (2). Очевидно, что наибольшие значения реализуются, когда расход воздуха и, следовательно, $v_{ср}$, максимальны. Из рисунка видно также, что зависимость $v_{ср}(x)$ имеет максимум при $x = 40 \div 60$ мм, и с удалением кольцевого электрода от среза сопла $v_{ср}$ уменьшается, приближаясь к значению в отсутствии воздействия ВЭП.

В экспериментах, когда на горелку подается положительный потенциал, характер влияния ВЭП на пламя изменяется. Так, если кольцевой электрод расположен в непосредственной близости от сопла горелки ($x = 0 \div 30$ мм), значение $v_{ср}$ увеличивается примерно на 4 см/с при $\alpha_{ср} = 0,78$. Интенсифицирующее воздействие ВЭП подтверждается тем, что при его отключении сразу происходил срыв пламени. Однако при дальнейшем перемещении кольцевого электрода от сопла горелки скорость срыва пламени становится меньше соответствующего значения при $U = 0$, достигая минимума при $x = 60$ мм (уменьшение $v_{ср}$ на 9 см/с при $\alpha_{ср} = 0,72$). Отметим, что в случаях разной полярности ВЭП, но при одинаковом значении m_n абсциссы экстремумов зависимостей $v_{ср}(x)$ практически совпадают. Полученные результаты качественно согласуются с данными [4], где также обнаружено интенсифицирующее воздействие ВЭП при подаче на внешний электрод положительного напряжения и гашение пламени при изменении полярности. Однако в этой работе расстояние между соплом горелки и электродом было постоянно.

Полученные экспериментальные зависимости могут быть объяснены следующим образом. Известно, что воздействие ВЭП на процессы воспламенения и горения осуществляется посредством ионного ветра [5] (совпадающего с направлением движения положительных ионов), либо за счет интенсификации химических реакций в зоне подготовки с обязательным присутствием молекул азота [2, 6]. Поэтому при приложении к горелке положительного потенциала экстремумы определяются соответственно преобладающим влиянием ионного ветра или интенсификацией химических реакций. Когда кольцевой электрод находится вблизи сопла, увеличение $v_{ср}$ может быть объяснено влиянием ВЭП на кинетику химических реакций, поскольку в области внутреннего конуса пламени присутствуют молекулы горючего, кислорода и азота. И хотя ионный ветер направлен от сопла, по всей видимости, превалирует кинетический механизм интенсификации. В процессе перемещения кольцевого электрода в зону продуктов сгорания ($x < 60$ мм) определяющим становится гасящее влияние ионного ветра. При изменении полярности напряжения ионный ветер, перемещающий с собой микрообъемы горячих газов, направлен к соплу, что и обуславливает повышение скорости срыва.

О влиянии ионного ветра свидетельствует изменение формы пламени. При отрицательном потенциале горелки наблюдаются незначительные колебания пламени. В случае обратной полярности ВЭП ионный ветер вызывает гидродинамические возмущения на поверхности пламени. Однако на пре-

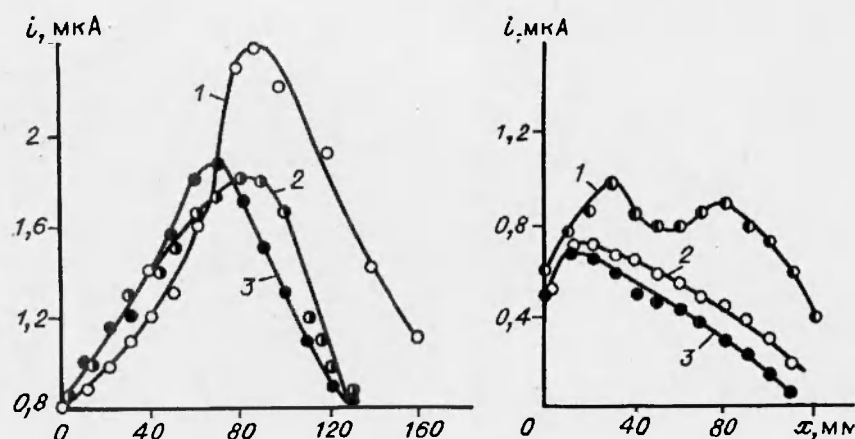


Рис. 2. Профиль ионизационного тока по высоте пламени.
 а — к горелке приложен отрицательный потенциал, б — положительный. а: 1 — 0,37; 2 — 0,46; 3 — 0,53.

дельном режиме стабилизации, когда реализуется гидродинамическая неустойчивость и пламя начинает отрываться от среза сопла горелки, изменение гидродинамической картины процесса за счет ВЭП становится малозаметным.

Обратим внимание на следующее. Поскольку в первом приближении можно считать, что напряженность ВЭП уменьшается обратно пропорционально расстоянию от среза сопла до электрода, то значение $v_{\text{ср}}$ должно было бы монотонно уменьшаться до величины, наблюдаемой в отсутствии внешнего электрического поля. Однако в экспериментах (вне зависимости от полярности приложенного напряжения) ослабление воздействия ВЭП наблюдается при удалении кольцевого электрода от среза сопла горелки на расстояние более 60—70 мм. В связи с этим наличие экстремума при отрицательном потенциале, вероятно, обусловлено тем, что при установке кольцевого электрода на определенном расстоянии от сопла реализуется наибольшее значение потока ионного ветра в сторону свежей топливной смеси. Это может быть в том случае, когда суммарная концентрация положительных ионов наибольшая в области пламени между соплом и внешним электродом. Для подтверждения этого предположения были проведены дополнительные исследования, заключающиеся в регистрации ионизационного тока пламени i (в высоковольтную цепь устанавливался микроамперметр) при различных положениях кольцевого электрода, полярности напряжения и соотношении компонентов.

Измерения показали, что в случае отрицательной полярности напряжения (рис. 2, а) значение i максимально на некотором расстоянии от среза сопла, причем с увеличением расхода пропана (с уменьшением коэффициента избытка окислителя α) положение максимума смещается по направлению от сопла и его значение увеличивается. Это объясняется тем, что при обогащении смеси происходит также увеличение высоты пламени (расстояние между срезом сопла и видимой границей вершины конуса) со 100 до 140 мм. Резкое возрастание значения максимума для $\alpha = 0,37$ связано с появлением в продуктах сгорания частиц сажи (пламя коптит). В данном случае увеличение проводимости продуктов сгорания можно объяснить термической эмиссией электронов с поверхности частиц.

При подаче на горелку положительного потенциала характер зависимости $i(\alpha)$ сохраняется, однако значения ионизационного тока оказываются меньше, чем при обратной полярности ВЭП (рис. 2, б). Кроме того, положение максимума приближается к соплу горелки. Установлено также, что при горении переобогащенной смеси зависимость $i(x)$ имеет два максимума: $x = 30$ и 80 мм. Появление второго максимума, вероятно, обусловлено процессами сажеобразования в пламени.

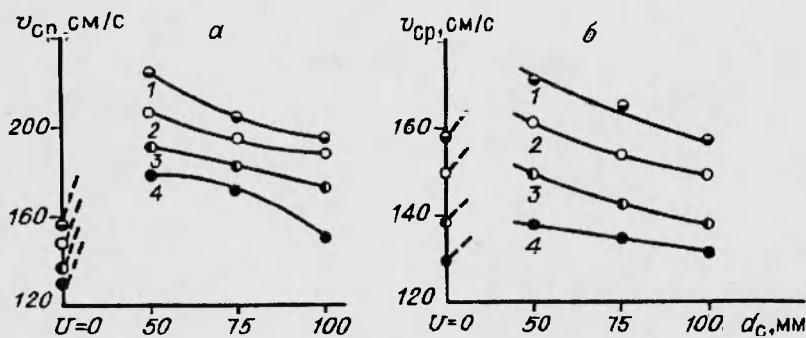


Рис. 3. Зависимость скорости срыва пламени от диаметра электрода.
 m_n , г/с: 1 — 0,013; 2 — 0,011; 3 — 0,01; 4 — 0,008. а — к горелке приложен отрицательный потенциал (0,9 кВ), б — положительный.

Наличие экстремумов на зависимостях $i(x)$ объясняется существованием в пламени зон, где концентрация заряженных частиц, например, положительных ионов, свободных электронов и частиц сажи, наибольшая. Так, в [7] показано, что наибольшая суммарная концентрация положительных ионов находится в хемилюминисцентной зоне, а в области подготовки химических реакций наблюдается повышенная концентрация отрицательных ионов и свободных электронов. Таким образом, при расположении отрицательного электрода в области подготовки возникает направленное движение электронов к положительному зарядному соплу горелки, что инициирует экзотермические и термонейтральные ионно-молекулярные реакции с нулевой энергией активации. Полученные результаты согласуются с данными работы [8], в которой показано, что облучение свежей топливной смеси электронами увеличивает разветвленность химических реакций, снижает энергию активации и, следовательно, приводит к уменьшению периода индукции воспламенения. Поэтому, если установить кольцевой электрод в области наибольшей концентрации заряженных частиц, то интенсифицирующее воздействие ВЭП оказывается наибольшим, а величина $v_{ср}$ максимальной.

Отметим также, что при значении ВЭП $U = 0,9$ кВ и наибольшем ионизационном токе ~ 2 мкА выделяемое джоулево тепло составляет $\sim 1,8 \cdot 10^{-3}$ Вт и не может оказывать интенсифицирующего воздействия на процессы воспламенения и горения.

Перейдем далее к анализу результатов, полученных при наложении на пламя поперечного электрического поля. В данном случае использовались цилиндрические сетчатые электроды, выполненные из нержавеющей проволоки диаметром 0,5 мм, с размером ячейки 1×1 мм. Высота сетчатого электрода составляет 200 мм, чтобы пламя не выходило за его границы. Нижний край сетки размещался на расстоянии ~ 10 мм ниже среза сопла горелки. Методика проведения эксперимента аналогична описанной выше.

Установлено, что с уменьшением диаметра сетчатого электрода d_c значение $v_{ср}$ увеличивается при $U = -0,9$ кВ (рис. 3, а), поскольку возрастает среднее значение напряженности ВЭП и его воздействие на пламя усиливается. При этом сохраняется зависимость $v_{ср}$ от массового расхода пропана. Как отмечалось выше, с ростом расхода воздуха изменяется соотношение компонентов на пределе стабилизации пламени. Так, для $d_c = 50$ и 100 мм и $m_n = 0,011$ г/с значение $\alpha_{ср}$ увеличивается с 0,76 ($U = 0$) до 1,08 и 0,98 соответственно. Интенсифицирующее воздействие может быть объяснено влиянием ионного ветра, направленного к соплу горелки.

В случае изменения полярности ВЭП также зарегистрировано увеличение скорости срыва пламени (рис. 3, б). Однако интенсифицирующее воздействие электрического поля оказалось менее значительным: наибольшее значение $v_{ср} = 14$ м/с (9 %). Кроме того, вне зависимости от расхода

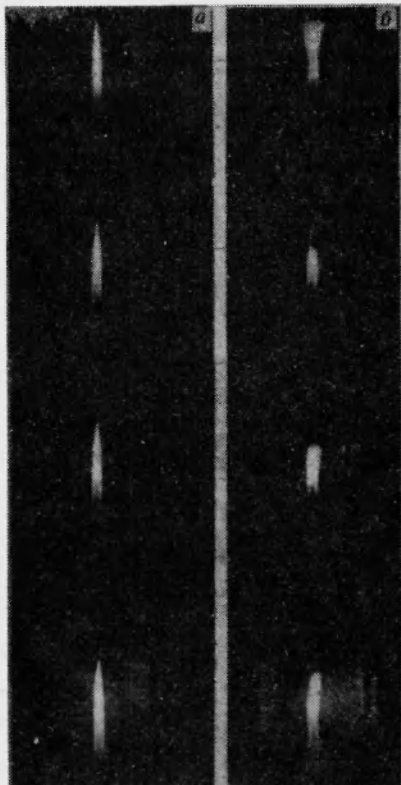


Рис. 4. Кинограммы процесса горения, $\alpha = 0,46$.
 U , кВ: а — 0, б — 0,9. Скорость съемки 16 кадр/с.

пропана для $d_c = 100$ мм значение $v_{ср}$ практически равняется величине, полученной при $U = 0$. Данный результат объясняется тем, что сетчатый электрод позволяет организовать воздействие на зону подготовки химических реакций, и при достаточном уровне напряженности ВЭП повышение реакционной способности свежей топливной смеси превышает ингибирующее воздействие ионного ветра.

Из сравнения значений $v_{ср}$ для двух типов электродов следует, что если на сопло подается отрицательное напряжение, то скорость срыва пламени во втором случае больше на 18—20 % при прочих равных условиях. Это обусловлено более высокой однородностью налагаемого сетчатым электродом ВЭП. Кроме того, если используется кольцевой электрод, то электрическое поле создается между конечными участками пламени, а не во всем пространстве зон воспламенения и горения топливной смеси, как это имеет место при наложении поперечного поля. Это приводит также к более существенному изменению

формы пламени и появлению крупномасштабных возмущений, что иллюстрируется представленными на рис. 4 кинограммами процесса горения при положительном потенциале горелки. Подача на горелку отрицательного потенциала вызывает уменьшение высоты пламени (форма которого практически не меняется), что характеризует увеличение массовой скорости горения топлива.

Таким образом, на основании проведенных экспериментов можно заключить, что уровень интенсифицирующего воздействия ВЭП на характеристики воспламенения и горения газообразных топлив определяется местом расположения электродов, их габаритами, полярностью и пространственной ориентацией прикладываемого напряжения, а также геометрическими и конструктивными особенностями камер сгорания энергетических установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мещеряков Г.Н., Бобков А.С., Харламов О.В. Изменения некоторых характеристик факела при приложении электрического поля // *Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем.* — Черноголовка, 1986. — С. 24—27.
2. Шебеко Ю.Н. Влияние переменного электрического поля на нормальную скорость горения органических веществ в воздухе // *ФГВ.* — 1982. — 18, № 4. — С. 48—50.
3. Ягодников Д.А., Воронцов А.В. Влияние внешнего электрического поля на особенности процессов воспламенения и горения // *Там же.* — 1994. — 30, № 3. — С. 3—12.
4. Гуляев Г.А., Попков Г.А., Шебеко Ю.Н. О влиянии постоянного электрического поля на горение смеси пропан-бутана с воздухом // *Там же.* — 1985. — 21, № 4. — С. 23—25.
5. Лаутон Д., Вейнберг Ф. Электрические аспекты горения. — М.: Энергия, 1976. — 296 с.
6. Гуляев Г.А., Попков Г.А., Шебеко Ю.Н. и др. Исследование совместного действия инертного разбавителя и электрического поля на газофазные пламена // *ФГВ.* — 1988. — 24, № 6. — С. 66—68.

7. Фиалков А.Б., Фиалков Б.С. Ионный состав пламен пропан — бутан — воздух при пониженном давлении // ФГВ. — 1985. — 21, № 3. — С. 32—42.
8. Славинская Н.А., Каменецкая С.А., Пшежецкий С.Я. и др. Влияние ионизирующего излучения на кинетику окисления и воспламенения бутана // ЖФХ. — 1960. — 34, № 6. — С. 1169—1175.

107005, г. Москва,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Поступила в редакцию
26/1 1992,
после доработки — 5/IV 1994

УДК 536.46

А.И. Китаев, С.А. Абриков, Н.И. Кидин

ДИАГНОСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВЫМ ГОРЕНИЕМ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ С ПОМОЩЬЮ МОДУЛИРОВАННОГО ПЛАЗМАТРОНА

Приводятся результаты экспериментальной проверки метода диагностики неустойчивого горения по отклику камеры сгорания на гармонические возмущения, генерируемые модулированным (периодическим) электрическим разрядом в канале плазматрона. Исследовался отклик камеры сгорания, близкой к натурной: без горения при продувке окислителя, при сосредоточенном горении пропановоздушных и распределенном горении бензиновоздушных смесей. Показана возможность определения основных акустических характеристик камеры сгорания (резонансные частоты, декремент затухания) в рабочем режиме по отклику на гармонические возмущения, генерируемые модулированным плазматроном, а также возможность демпфирования резонансных колебаний при неустойчивом горении воздействием высокотемпературной струи плазматрона на зону горения.

Одна из проблем на пути создания высокоэффективных камер сгорания — неустойчивость горения, проявляющаяся в виде интенсивных колебаний давления, скорости, температуры и других параметров продуктов сгорания. Неустойчивость горения наблюдается в авиационных и ракетных двигателях, в промышленных печах и топках тепловых электростанций вне зависимости от типа используемого топлива (жидкое, газообразное, твердое). Наиболее разрушительна высокочастотная (акустическая) неустойчивость, известная также как резонансное горение. Частоты колебаний в этом случае близки к соответствующим частотам акустических резонансных колебаний в камере сгорания.

Для диагностики неустойчивости обычно используют метод искусственного возбуждения акустических колебаний в камерах сгорания и исследование реакции (отклика) процесса горения на возмущения [1]. Колебания возбуждаются кратковременным импульсным возмущением, генерируемым обычно с помощью взрывчатых веществ. Другой подход основан на создании в камере сгорания гармонических колебаний давления большой амплитуды в широком диапазоне частот. Последний метод не нашел широкого применения из-за отсутствия излучателей, способных генерировать гармонические возмущения давления в высокотемпературной и химической агрессивной среде при высоких скоростях потока.

Необходимость в таких излучателях несомненна при разработке новых, более экономичных и эффективных энергетических установок. Незначительные изменения в конструкции форсунок или камеры сгорания могут оказать сильное воздействие на устойчивость работы двигателя. Поэтому, как отмечается в обзоре последних работ по неустойчивому горению [2], основные усилия разработчиков ракетных и авиационных двигателей были направлены на то, чтобы изучить отклик форсунок различного типа на осциллирующие возмущения давления и скорости. Использование излучателей типа сирены, пиропатронов, специальных электропневматических или электродинамических излучателей в энергетических установках ограничено