

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПЛАМЕНИ НЕОДНОРОДНОЙ ТОПЛИВОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ДОВОДКЕ КАМЕР СГОРАНИЯ

© 2016

- А. П. Шайкин** доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления», Тольяттинский государственный университет, td@tltsu.ru
- П. В. Ивашин** кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические машины и системы управления», Тольяттинский государственный университет, td@tltsu.ru
- И. Р. Галиев** кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей», Тольяттинский государственный университет, sbs777@yandex.ru
- А. Д. Дерячев** кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Тольяттинский государственный университет, proscripts@mail.ru
- А. Я. Твердохлёбов** младший научный сотрудник, Тольяттинский государственный университет, sarc@bk.ru

В статье обосновано применение ионизационных датчиков для исследования и диагностики процесса сгорания топлива в газотурбинных энергетических установках. На основе анализа литературных данных и собственных исследований выявлено, что определяющая роль в механизме ионизации пламени распылённого в потоке жидкого углеводородного топлива принадлежит термоэмиссии электронов с раскалённых частиц углерода. Показано, что при подаче жидкого топлива в зону циркуляции за плохообтекаемым телом область максимальной концентрации электронов, определяющих ток проводимости, находится в зоне циркуляции. При впрыске жидкого топлива на стабилизатор пламени зона максимальной концентрации электронов располагается в зоне смешивания между зоной обратных токов и обтекающим потоком газа. Экспериментально обнаружено, что расстояние между областью максимальной концентрации электронов и основанием стабилизатора определяется количеством распылённого топлива, начальной температурой, турбулентностью потока и скоростью потока газа. Результаты работы могут быть использованы для прогнозирования и мониторинга ионизационным датчиком характеристик турбулентного пламени в камерах сгорания энергетических установок, а также позволяют создать систему непрерывного контроля и управления процессами воспламенения и сгорания топлива, обеспечивающую минимальную концентрацию токсичных выделений в уходящих продуктах сгорания.

Электропроводность; турбулентность; ионный ток; пламя; форсажная камера сгорания; термоэмиссия.

Цитирование: Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р., Дерячев А.Д., Твердохлёбов А.Я. Использование явления электропроводности пламени неоднородной топливовоздушной смеси при проектировании и доводке камер сгорания // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 116-123. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-116-123

Проектирование и доводка камер сгорания, особенно многозонных, требует знаний о месте и характере воспламенения топливно-воздушной смеси (ТВС), распространении пламени в объёме камеры сгорания, местоположении и размерах зоны химических реакций горения и интенсивности их протекания. В настоящее время получение подобной информации возможно лишь экспериментальным путём, который достигается проведением значительного объёма испытаний. Наиболее распространены исследования на моделях камер сгорания (КС). В этом случае нередко возникают вопросы о воспроизводимости характеристик распространения пламени, полученных на модели, в условиях КС полноразмерного двигателя. Многолетний опыт экспериментальных ис-

следований на моделях КС и в составе газотурбинных двигателей (ГТД) и поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) показал, что наиболее тождественные результаты получаются при регистрации характеристик распространения пламени с помощью использования явления электропроводности пламени. При сгорании углеводородных топлив зона химических реакций горения является зоной ионизации, которая состоит из положительно и отрицательно заряженных ионов и электронов, образующихся в процессе протекания цепных реакций горения.

Созданные и находящиеся в эксплуатации системы, использующие явление электропроводности пламени, регистрируют воспламенение ТВС, контролируют наличие устойчивого процесса горения и, в лучшем случае, отключают подачу топлива при погасании пламени в камере сгорания. При этом данные системы надёжно работают только в стационарных энергетических установках, камеры сгорания которых эксплуатируются в узком диапазоне режима работы по составу смеси и скорости потока. В то же время разработка и применение форсажных камер сгорания (ФК) с несколькими зонами сгорания требует обеспечения полной устойчивости работы двигателя на переходных (включение форсажа, дросселирование, выключение форсажа) и стационарных режимах.

Опыт доводки двигателя НК-144 показал, что при задержках воспламенения смеси в одной из зон, превышающих допустимое время, происходило одновременное воспламенение ТВС после восстановления давления газа в камере, понижаемого искусственно при розжиге ФК, и отмечались случаи неустойчивой работы компрессора. В некоторых случаях применение постоянно работающих запальных устройств при срыве пламени со стабилизаторов, восстанавливая процесс горения, приводило к появлению волн давления с уровнем, вызывающим помпаж компрессора. Избежать перечисленных ситуаций возможно при включении в систему управления двигателем и форсажной камерой специальных устройств – датчиков, контролирующих процесс воспламенения и горения ТВС в различных зонах ФК и выдающих сигналы на порядок подачи топлива по зонам или на отключение подачи топлива в случае появления сигнала о погасании в какой-либо зоне КС. Использование ионизационных датчиков (ИД) в системах регулирования выдвигает ряд специфических задач – в первую очередь обеспечение стабильного уровня тока проводимости во всем диапазоне регулирования расходов топлива, исключая «провалы» тока на переходных режимах. Кроме того, процесс горения в зоне установки ИД должен отражать общую картину зоны горения, топливоподача в которую контролируется этим датчиком.

Так как ИД регистрируют непосредственно процесс горения в месте установки их электродов, то существует возможность создания системы контроля и управления процессом сжигания топлива, основанной на измерении и сравнении величин ионного тока в характерных зонах факела пламени, которая обеспечит образование минимальной концентрации токсичных выделений в продуктах сгорания.

Эксперименты проводились на моделях и полноразмерных прямоточных КС ГТД в факелах пламени неоднородной и однородной ТВС, за плохообтекаемыми телами и вихревыми горелками, в форкамерах и за плохообтекаемыми телами, соединёнными с форкамерой, и в КС ДВС с искровым зажиганием. ИД содержали изолированные от корпуса КС металлические электроды, вторым электродом служили элементы конструкции КС. В факеле пламени при впрыске топлива в зону циркуляции (ЗЦ) область ионизации занимала часть зоны обратных токов (ЗОТ). При сгорании бедной смеси ионный ток регистрировался вблизи кромок плохообтекаемого тока (ПОТ) или вихревой горелки, с обогащением смеси зона ионизации удалялась от кромок стабилизирующих устройств. Для всех составов смеси ионный ток в пламени начинал регистрироваться при достижении средней температуры факела 800°C.

Влияние заглубления электрода в след за стабилизатором на ионный ток от состава смеси (α) при впрыске топлива в зону циркуляции представлено на рис. 1.

На рис. 1 видно, что по мере погружения ИД в ЗЦ происходит рост ионного тока. Известно, что ток в цепи ИД зависит от площади электрода, находящегося в зоне образования заряженных частиц. Так как подвижность электронов на три порядка больше подвижности ионов, то ток ионизации определяется в основном потоком электронов к положительному электроду датчика.

На рис. 2 показано влияние расстояния между стабилизатором и электродом на ионный ток в зависимости от состава смеси.

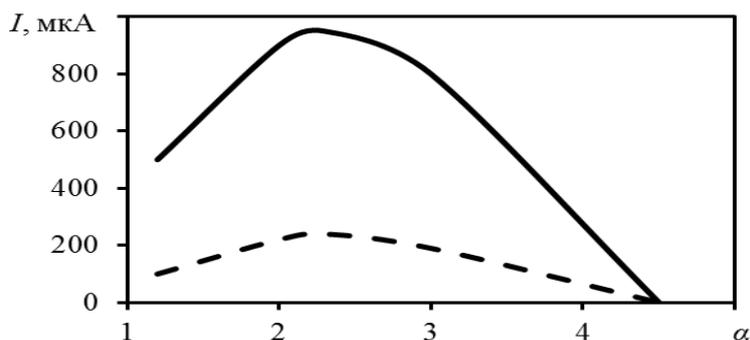


Рис. 1. Влияние заглубления электрода вслед за стабилизатором на ионный ток:
 ---- - 10 мм, ——— - 30 мм

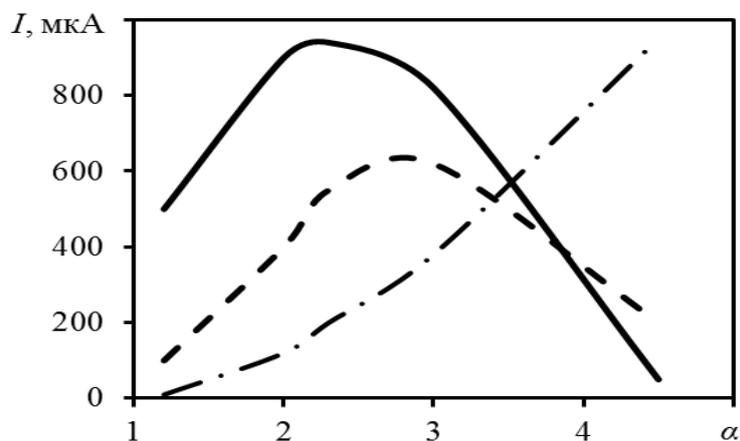


Рис. 2. Влияние расстояния между стабилизатором и электродом на ионный ток:
 -·-·- 35 мм, ---- 65 мм, ——— 95 мм

При изменении расстояния между электродом ИД и стабилизатором получены различные зависимости тока по составу смеси. Для бедных смесей максимальный ток получен при установке электрода вблизи стабилизатора. Для богатых смесей наблюдается обратная картина. Следовательно с увеличением расхода топлива, впрыскиваемого в зону циркуляции за стабилизатором, область заряженных частиц удаляется от его основания.

Исследование влияния параметров набегающего потока на величину и характер изменения тока показало, что снижение температуры воздуха с 923 до 523 К приводит к уменьшению тока в области бедных смесей (режим розжига ФК) и смещению максимальных значений тока в область богатых смесей. Аналогичное влияние, но в меньшей степени, оказывает увеличение скорости набегающего потока.

В процессе экспериментов выполнялись измерения температуры поперёк зоны циркуляции на расстоянии $x = 35$ и 95 мм (табл. 1).

Таблица 1. Значение температуры поперёк зоны циркуляции на расстоянии $x = 35$ и 95 мм

y	$\alpha=4,95$		$\alpha=3,75$		$\alpha=2,57$	
	$x=35$ мм	$x=95$ мм	$x=35$ мм	$x=95$ мм	$x=35$ мм	$x=95$ мм
-2	1050	540	620	600	550	685
-12	1190	740	920	870	740	985
-21	1215	955	1150	1095	880	1165
-30	1315	1255	1250	1320	1025	1378

На режиме минимального расхода топлива более высокие температуры получены на расстоянии $x = 35$ мм. Уменьшение температуры к сечению при $x = 95$ мм обусловлено подмешиванием холодного газа, так как процесс выгорания этого количества топлива происходит на небольшой длине зоны циркуляции. По мере увеличения количества топлива температура вблизи стабилизаторов уменьшается и растёт в сечении $x = 95$ мм.

Наиболее полно объяснить рассмотренные экспериментальные данные можно с позиции предложенной модели воспламенения неоднородной смеси при впрыске жидкого топлива в зону циркуляции за плохообтекаемым телом. В зоне подготовки смеси, где температура меньше 1073 К, ионный ток близок к нулю. В зоне горения рост ионного тока происходит с увеличением площади электрода, находящегося в зоне горения, или при увеличении температуры в зоне горения в области установки электрода. Увеличение количества распыливаемого в зоне циркуляции топлива или скорости набегающего потока газа, или уменьшение начальной температуры газа приводит к возрастанию протяжённости зоны подготовки и увеличению расстояния между основанием стабилизатора и зоной горения. В соответствии с этим увеличивается расстояние между основанием стабилизатора и областью заряженных частиц, как это можно видеть из данных, приведённых на рис. 2.

Исследование электропроводности факела пламени за V-образным стабилизатором, когда топливо распыливалось навстречу потоку центробежной форсункой, установленной перед стабилизатором, выявило существование зоны заряженных частиц в слое смешения между ЗОТ и обтекающим потоком. На рис. 3 приведены зависимости ионного тока от величины погружения L-образного электрода, часть которого направлена вдоль потока, вслед за стабилизатором.

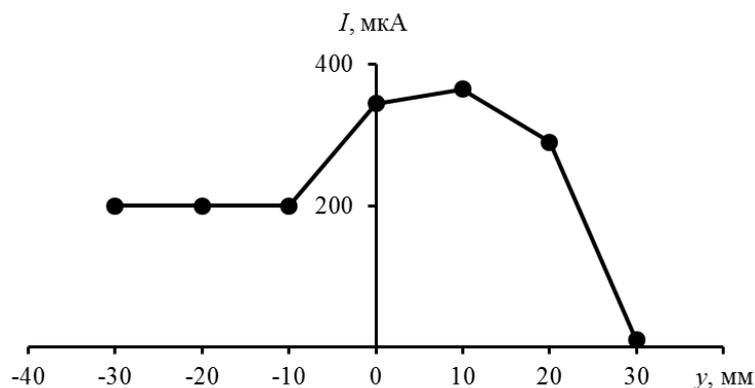


Рис. 3. Ток проводимости в зависимости от погружения (y) L-образного электрода относительно кромки основания стабилизатора

При постоянном составе ТВС существует положение электрода относительно стабилизатора пламени, когда ток проводимости достигает максимальной величины. Максимум тока проводимости в исследуемом случае соответствует установке продольной части L-образного электрода над кромкой основания стабилизатора, $y = 11$ мм. При увеличении y ток быстро падает до нуля. С уменьшением y относительно кромки стабилизатора ток постепенно падает до минимальной величины, после чего остаётся постоянным. В данном случае ионный ток определяется поверхностью части L-образного электрода, перпендикулярного к потоку, находящегося в слое смешения между ЗОТ и обтекающим потоком. При этом продольная часть L-образного электрода находится вне зоны электропроводности пламени. Следовательно при такой схеме впрыска жидкого углеводородного топлива в поток газа зона максимальной концентрации электронов находится в слое смешения между ЗОТ и обтекающим потоком. Эксперименты показали, что и в этом случае увеличение количества распыливаемого топлива, скорости газового потока или уменьшение начальной температуры газа приводит к увеличению расстояния между зоной заряженных частиц и основанием стабилизатора пламени.

Полученные экспериментальные данные по электропроводности факела пламени неоднородной смеси углеводородного топлива находятся в хорошем соответствии с гипотезой, в которой одной из основных причин образования заряженных частиц в углеводородном пламени считается термоэмиссия электронов с раскалённых частиц углерода. Равновесная концентрация электронов в этом случае является функцией от температуры, размеров, концентрации частиц углерода и начальной работы выхода электронов:

$$N_e = \frac{R(2\pi m_e kT)^{1.5}}{h^3} \exp\left[-\frac{\varphi}{kT}\right], \quad (1)$$

где N_e – равновесная концентрация электронов; m_e – масса электронов; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура частицы; h – постоянная Планка; φ – работа выхода электрона с поверхности частицы; R – радиус частицы.

В (1) работа выхода электрона изменяется вследствие увеличения положительного заряда частицы с потерей очередного электрона. Для частиц сферической формы показатель экспоненты в (1) имеет вид $[\varphi + f(R)]/[-kT]$. С учётом поправки на увеличение работы выхода электрона равновесная концентрация электронов (N_e^*) выражается следующим равенством:

$$N_e^* = N_e \exp\left[-\frac{e^2 m_0}{RkT}\right], \quad (2)$$

где e – заряд электрона; m_0 – масса частицы.

Для больших коэффициентов избытка воздуха (рис. 2) ток в цепи электрода, установленного на расстоянии 95 мм от кромок основания стабилизатора, на порядок меньше, чем в цепи электрода при $x = 35$ мм. Этот эффект объясняется выгоранием частиц углерода на расстоянии менее 95 мм от стабилизатора. При этом в плоскости при $x = 35$ мм в зоне горения зафиксированы более высокие температуры и большая поверхность электрода находится в этой зоне.

Таким образом, при создании сигнализаторов горения, основанных на электропроводности углеводородного пламени, необходимо принимать во внимание изменение расстояния между зоной заряженных частиц и основанием стабилизатора пламени в зависимости от состава ТВС, начальной температуры, турбулентности потока и скорости обтекающего потока газа. В широком диапазоне изменения этих параметров ионизационный сигнализатор горения, в котором одним из электродов является стабилизатор пламени, а вторым – изолированный от металла КС электрод в виде прямого

стержня, не в состоянии обеспечить получение высокого уровня тока проводимости в факеле пламени за стабилизатором в многорежимной форсажной камере.

Для уменьшения влияния перемещения зоны заряженных частиц вдоль факела пламени была предложена новая модель одноэлектродного датчика с двумя контактами. В то время, когда ток в цепи ИД с электродом в виде простого стержня при $x = 35$ мм изменяется от 900 до 20 мкА и при $x = 95$ мм от 900 до 0 мкА, в цепи двухконтактного датчика в этом же диапазоне по составу смеси изменяется от 720 до 950 мкА. Характеристики двухконтактного ИД в меньшей степени зависят от изменения физических параметров набегающего потока.

Вблизи оси ЗЦ величина ионного тока несколько снижалась, несмотря на существование в этих зонах максимальной температуры пламени. При впрыске топлива на плохообтекаемое тело область ионизации располагается в прямом потоке ЗЦ, над кромками стабилизатора пламени, и при перемещении ИД в ЗОТ ионный ток резко падает. В форкамерах, где сгорание ТВС предполагается проводить при постоянном составе смеси, зона ионизации располагается в ЗОТ и величина ионного тока показывает изменение процесса горения при изменении режима работы многозонной камеры сгорания. Так, при увеличении нагрузки по зонам КС происходит уменьшение ионного тока из-за увеличения скорости потока воздуха в форкамере, вызванного перетеканием воздуха из зон, где происходит обогащение ТВС. При этом уменьшение ионного тока до величины, близкой к нулю, сопровождается местным погасанием пламени в зоне установки ИД.

Установка ИД, соединёнными с форкамерой, за ПОТ позволяет получать данные о процессе сгорания в форкамере и за ПОТ, на которые осуществляется впрыск топлива. Так как форкамера работает при коэффициенте избытка воздуха значительно меньше единицы, то пламя из форкамеры распространяется в зоны за ПОТ, где регистрируется достаточно высокий уровень ионного тока. При впрыске топлива на ПОТ после его воспламенения отмечается скачок ионного тока, величина которого определяется количеством впрыскиваемого тока, при котором осуществляется воспламенение ТВС.

Исследования электропроводности пламени в условиях ГТД показали отсутствие влияния давления на величину ионного тока, что свидетельствует о том, что в процессе ионизации наряду с химионизацией большую роль играет термоэмиссия электронов с раскалённых частиц сажи, присутствующих в пламени неоднородных и переобогащённых смесей.

Полученные экспериментальные данные показывают, что с помощью измерения ионного тока пламени можно определять размеры, расположение зоны химических реакций горения и интенсивность их протекания.

Таким образом, анализ результатов исследования электропроводности факела пламени неоднородной смеси углеводородного топлива с воздухом позволяет сделать следующие выводы:

1. Определяющая роль в механизме ионизации пламени распылённого в потоке жидкого углеводородного топлива принадлежит термоэмиссии электронов с раскалённых частиц углерода.
2. При подаче жидкого топлива в зону циркуляции за плохообтекаемым телом область максимальной концентрации электронов, определяющих ток проводимости, находится в зоне циркуляции.
3. При впрыске жидкого топлива на стабилизатор пламени зона максимальной концентрации электронов располагается в зоне смешивания между зоной обратных токов и обтекающим потоком газа.

4. Расстояние между областью максимальной концентрации электронов и основанием стабилизатора определяется количеством распыленного топлива, начальной температурой топлива, турбулентностью потока и скоростью потока газа.

Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания, проект №394.

Библиографический список

1. Резник В.Е., Токарев В.В., Шайкин А.П. Электропроводность факела пламени неоднородной смеси при впрыске жидкого топлива в зону циркуляции за плохообтекаемым телом // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 1977. № 3. С. 93-97.

USING THE PHENOMENON OF ELECTRICAL CONDUCTION OF FLAME OF NON-HOMOGENEOUS AIR-FUEL MIXTURE IN DESIGN AND DEVELOPMENT OF COMBUSTION CHAMBER

© 2016

A. P. Shajkin Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Energy-Converting Machinery and Control Systems, Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation, td@tltsu.ru

P. V. Ivashin Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Energy-Converting Machinery and Control Systems, Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation, td@tltsu.ru

I. R. Galiev Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Design and Operation of Vehicles, Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation, sbs777@yandex.ru

A. D. Derjachev Candidate of Science (Engineering), junior researcher, Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation, proscripts@mail.ru

A. J. Tverdohljobov junior researcher, Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation, sarc@bk.ru

The use of ionization sensors for the study and diagnosis of the combustion process in gas-turbine power plants is substantiated in the paper. The review of literature data and in-house research show that thermionic emission of electrons from incandescent carbon particles plays a decisive role in the mechanism of ionization of flame sprayed in a stream of liquid hydrocarbon fuels. It is shown that as liquid fuel is injected into the circulation area of a bluff body the area of maximum concentration of electrons that determine the conduction current is located in the circulation area. When liquid fuel is injected in the flame holder the zone of maximum electron density is located in the zone between the recirculation mixing zone and the slipstream. It was found experimentally that the distance between the region of maximum electron density and the stabilizer base is determined by the quantity of the fuel sprayed, the initial temperature, the flow turbulence and the gas flow rate. The results can be used to predict and monitor the characteristics of turbulent flame in combustion chambers of power plants with the help of ionization sensors. They also make it possible to create a system of continuous monitoring and control of ignition and combustion processes ensuring minimum concentration of toxic emissions in the exhaust combustion products.

Electrical conductivity; turbulence; ion current; flame; afterburner combustion chamber; thermal emission.

Citation: Shajkin A.P., Ivashin P.V., Galiev I.R., Derjachev A.D., Tverdohljobov A.J. Using the phenomenon of electrical conduction of flame of non-homogeneous air-fuel mixture in design and development of combustion chamber. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 116-123.
DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-116-123

References

1. Reznik V.E., Tokarev V.V., Shaikin A.P. Electroconductivity of nonuniform-mixture flame plume with liquid fuel injection into circulation zone behind a bluff body. *Soviet Aeronautics (English translation of Izvestiya VUZ, Aviatsionnaya Tekhnika)*. 1977. V. 20, Iss. 3. P. 70-73.