

Экспериментальное исследование возможности создания электронно-оптического сигнализатора наличия горения в камерах сгорания ГТД

Асланиян Э.В., Берлов И.В.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: aslanyan@yandex.ru

Представлены результаты исследования возможности создания электронно-оптического сигнализатора розжига и горения в камере сгорания газотурбинного двигателя. Подробно описаны структура, обоснование выбора составляющих компонентов сигнализатора и его работа. Приведены результаты испытаний на форсажных камерах сгорания при стендовых испытаниях двигателей.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, камера сгорания, электронно-оптический сигнализатор розжига, датчик поджига ионизационный.

Experimental study on possibility of developing an electro-optical signaling device for detection of combustion in GTE combustion chambers

Aslanyan E.V., Berlov I.V.

CIAM, Moscow

Results of the study on possibility of developing an electro-optical signaling device for ignition and combustion in gas-turbine engine's combustion chamber are presented. Design, rationale for the chosen constituent components of the signaling device and its operation are described in detail. Results of afterburner tests during bench testing of engines are presented.

Keywords : gas turbine engine, combustion chamber, electro-optical ignition signaling device, ionization ignition sensor.

Введение

При создании и эксплуатации камер сгорания (КС) авиационных двигателей с низким уровнем эмиссии вредных компонентов продуктов сгорания необходимо контролировать наличие горения в камерах для обеспечения безопасности их работы вместе с системами автоматического управления розжига.

В настоящее время для контроля розжига и наличия горения в КС применяются различные методы. Для основных камер сгорания главным показателем наличия горения является температура газа, измеряемая термопарами за турбиной; в форсажных камерах сгорания (ФКС) применяются ионизационные сигнализаторы горения с датчиками поджига ионизационными (ДПИ) различных модификаций [1].

Работа ионизационных сигнализаторов основана на использовании эффекта несимметричной проводимости продуктов горения топлива при применении пары электродов с резко отличной площадью рабочих поверхностей.

При создании сигнализаторов горения, основанных на использовании явления электропроводности углеводородного пламени, принимается во внимание изменение расстояния между зоной заряженных частиц и основанием стабилизатора пламени в зависимости от состава топливовоздушной смеси (ТВС), начальной температуры, турбулентности потока и скорости обтекающего потока газа [2].

В современных КС, особенно ФКС, работающих на обедненных горючим ТВС при малых режимах форсирования, пламя может дрейфовать в рабочей

зоне стабилизаторов горения и выйти из рабочей области. Такие ложные сигналы вызывают неустойчивую работу автоматики систем топливоподдачи и розжига КС. Кроме того, имели место случаи прогара части датчика, погружаемого в область горения КС.

Альтернативой ионизационному способу диагностики наличия пламени в КС может служить оптический метод регистрации излучения продуктов горения в пламени при соответствующей организации поля зрения датчика – охвате всех возможных зон горения. Принципиальные решения оптических сигнализаторов рассматривались давно, и проведение исследований подтверждается патентными публикациями [3–5]. В последние годы в работах, проводимых в ЦИАМ, рассматривалась возможность создания электронно-оптической системы регистрации розжига КС на основе современного уровня науки и техники.

Проведенные исследования, учитывая характеристики существующих компонентов оптики, оптических волокон и полупроводниковой электроники, подтвердили возможность создания электронно-оптической системы, регистрирующей факт розжига и процесса горения в КС, и на их основе был разработан и создан экспериментальный образец сигнализатора для испытаний на авиационном двигателе.

Структура электронно-оптического сигнализатора. Основные элементы

Предложенная схема волоконно-оптической системы сигнализатора представлена на рис. 1. Приемный узел датчика (1 и 2) устанавливается на корпусе КС и подвержен воздействию высоких температур. Фотоприемник с соответствующими электронно-преобразующими компонентами вынесен из горячей зоны благодаря использованию моноволоконного кварцевого световода, передающего излучение из зоны горения к фотоприемнику. Входной торец световода защищен от возможного воздействия продуктов сгорания оптическим окном, которое, в зависимости от специфики установки датчика, зон горения и конструкции КС, может быть выполнено в виде оптической линзы с системой защиты чистым воздухом от загрязнения.

Для оптического окна предлагается использовать монокристаллический оксид алюминия Al_2O_3 (сапфир), обладающий рядом положительных свойств, таких как термостойкость, высокая твердость, низкая адгезия при осаждении компонентов продуктов сгорания, вибростойкость, температура плавления $2040^\circ C$. Входная часть датчика может быть апертурной (без линзы), полный угол поля зрения $\sim 30^\circ$ (числовая апертура 0,2), при необходимости он может быть изменен дополнительными компонентами (диафрагмой или линзой).

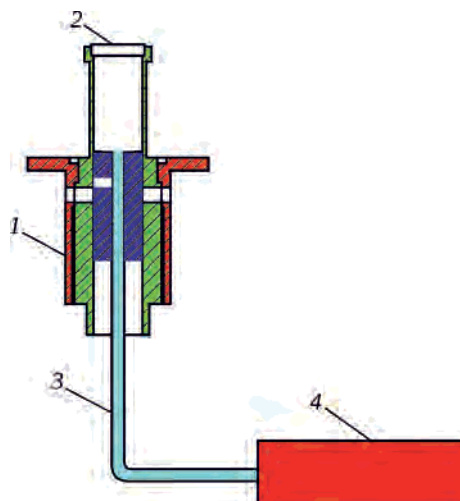


Рис. 1. Схема электронно-оптической системы сигнализатора горения:

1 – корпус датчика; 2 – оптическое окно; 3 – оптическое волокно; 4 – фотоэлектрический преобразователь

Оптическая ориентация датчика производится на зону горения за стабилизатором КС.

Немаловажен оптимальный выбор угла поля зрения датчика и такая его установка на корпусе КС, которая позволяет не только существенно уменьшить влияние отраженного излучения от максимально нагретых элементов КС, но и минимизировать или полностью исключить влияние на полезный сигнал солнечной радиации в условиях полета.

На основе спектрометрии излучения (рис. 2) при горении углеводородно-воздушных смесей определено [6], что регистрируемое свечение пламени, в основном, обусловлено излучением радикалов OH (308...320 нм), CH (431...438 нм) и C_2 (467...470 нм; 513...516 нм; 559...564 нм).

При интерпретации светимостей пламени в этих областях спектра следует помнить, что в продуктах сгорания практически всегда содержатся компоненты, имеющие сплошной спектр излучения (например, частицы сажи, пыль, частицы металла конструкции газозоудного тракта и т.п.), которые могут излучать с интенсивностью, сопоставимой с излучением

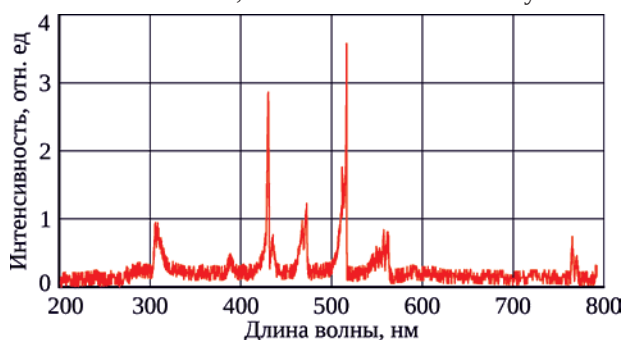


Рис. 2. Спектр излучения углеводородного пламени в условиях, близких к стехиометрии

радикалов СН и ОН, и вуалировать собственно зоны горения. Также надо исключить влияние теплового инфракрасного излучения стенок КС.

Для передачи излучения к фотоприемникам целесообразно использовать кварцевые моноволокна с диаметром внутренней части (ядра) до 1,0 мм с защитной металлизацией Al или Cu, пропускающие ближнее ультрафиолетовое (УФ) излучение. Под действием такого излучения у стандартных кварцевых волокон снижается пропускание в этой области. Для работы в области 300 нм рекомендуется использовать кварцевые жилы с волокнами, стойкими к УФ-излучению. Такие волоконно-оптические кабели высшей категории отличаются прочностью, высоким качеством и дают стабильно воспроизводимые результаты при минимальных вариациях сигнала. Кабели этой категории

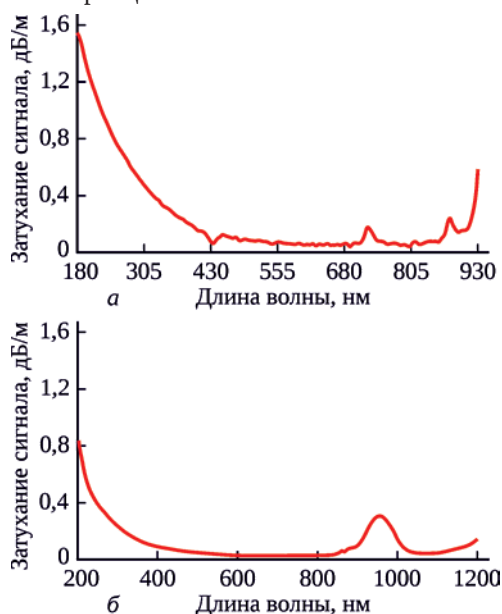


Рис. 3. Спектральное ослабление пропускания оптических волокон, устойчивых к УФ-излучению:
 а – UV-VIS-XSR (особо стойкое к УФ-излучению), диапазон пропускания 180...900 нм;
 б – UV/SR-VIS (стойкое к УФ-излучению), диапазон пропускания 200...1100 нм

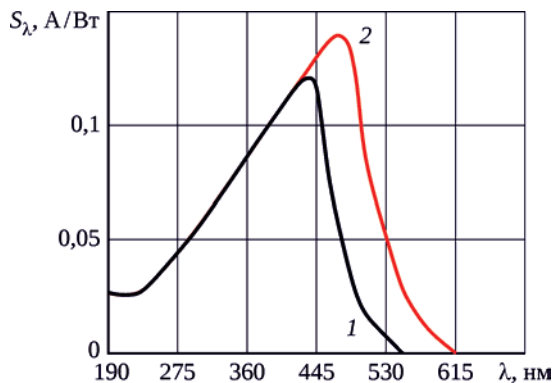


Рис. 4. Спектральная чувствительность фотодиода на основе GaP при температуре 20°C (1) и 250°C (2)

заклучены в оболочку, армированную стальной спиралью, что обеспечивает эффективное снятие напряжений с волокна и работу в условиях сильных вибраций. На рис. 3 представлены графики спектрального ослабления пропускания волокон, предлагаемых для использования при создании электронно-оптического сигнализатора розжига КС.

Для указанного диапазона длины волны (λ) наилучшим образом подходят фотодиоды на основе соединения GaP, монохроматическая спектральная чувствительность которых представлена на рис. 4. Использование таких фотоприемников позволяет не применять специальные оптические фильтры для формирования требуемого спектрального диапазона принимаемого излучения.

Согласно работе [7] такие фотодиоды устойчиво работают при температуре до 300°C. В случае нагрева фотоприемника длинноволновая граница чувствительности сдвигается за область излучения радикалов C₂ (513...516 нм). Таким образом, возможно дополнительное увеличение чувствительности сигнализатора в случае применения активного термостатирования фотодиода при температуре ~250°C.

Качественную диагностику процесса горения можно провести благодаря регистрации светимости в узких зонах спектра, на длине волны в области 307 и 430 нм. Таким образом, аппаратная часть сигнализатора может быть использована для диагностических и исследовательских целей.

Электронные компоненты трансимпедансного усилителя в фотопреобразователе не имеют особенностей и широко представлены современной электронной промышленностью.

Экспериментальный образец электронно-оптического сигнализатора

Для экспериментальной апробации был разработан образец сигнализатора применительно к форсажной камере, приемный зонд которого устанавливается в посадочный люк ДПИ. Конструктивно оптическая часть зонда состоит из защитного сапфирового окна диаметром 25 мм и толщиной 3 мм. Сапфировый диск с медной кольцевой прокладкой завальцован в стальную втулку, установленную во фланец, идентичный посадочному узлу ДПИ (рис. 5). В торце втулки с помощью высокотемпературного клея зафиксирован приемный конец оптического моноволокна с внешним покрытием из алюминия. Для этих условий определен минимальный допустимый радиус изгиба волоконного жгута.

В модифицированной конструкции сигнализатора был применен жгут из семи моноволокон с диаметром ядра каждого 0,6 мм и одного волокна диаметром



Рис. 5. Вид приемной части датчика макета сигнализатора для установки в люк ДПИ

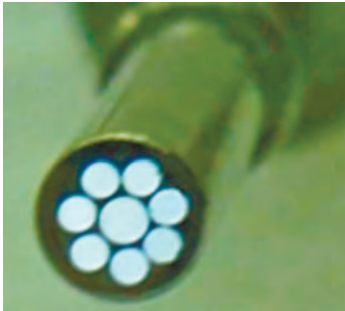
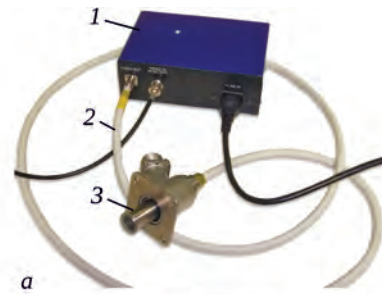


Рис. 6. Модифицированный вариант волоконного жгута

0,8 мм (рис. 6), что повысило чувствительность сигнализатора в три раза, благодаря увеличению оптической площади световода, и обеспечило большую гибкость световода (минимальный допустимый радиус изгиба уменьшился на ~40%).

Примененные моноволокна (пропускающие излучение в ультрафиолетовой области спектра) имеют числовую апертуру ~0,2, что обеспечивает при безлинзовом исполнении приемного зонда полный угол раскрытия конуса наблюдения до 30°. Благодаря использованию волоконного световода фотоприемник отнесен от горячих частей ФКС и установлен в электронном блоке фотопреобразователя.



а



б

Рис. 8. Внешний вид вариантов сигнализаторов: а – первоначальный вариант макета сигнализатора; б – модифицированный вариант сигнализатора; 1 – фотопреобразователь; 2 – волоконный световод; 3 – приемный узел сигнализатора

Электронная часть фотопреобразователя (рис. 7) построена по классической схеме трансимпедансного преобразователя фототока в напряжение на операционном усилителе типа ОРА637 по дифференциальной схеме для синфазного подавления влияния входных токов микросхемы.

Для начальных экспериментальных исследований был изготовлен первоначальный вариант макета сигнализатора с приемной частью, выполненной на основе корпуса от штатного датчика ДПИ, в котором установлены защитное окно и входная часть кремниевого оптического моноволокна диаметром ядра 1,0 мм. Фотоприемник с усилителем расположен в корпусе

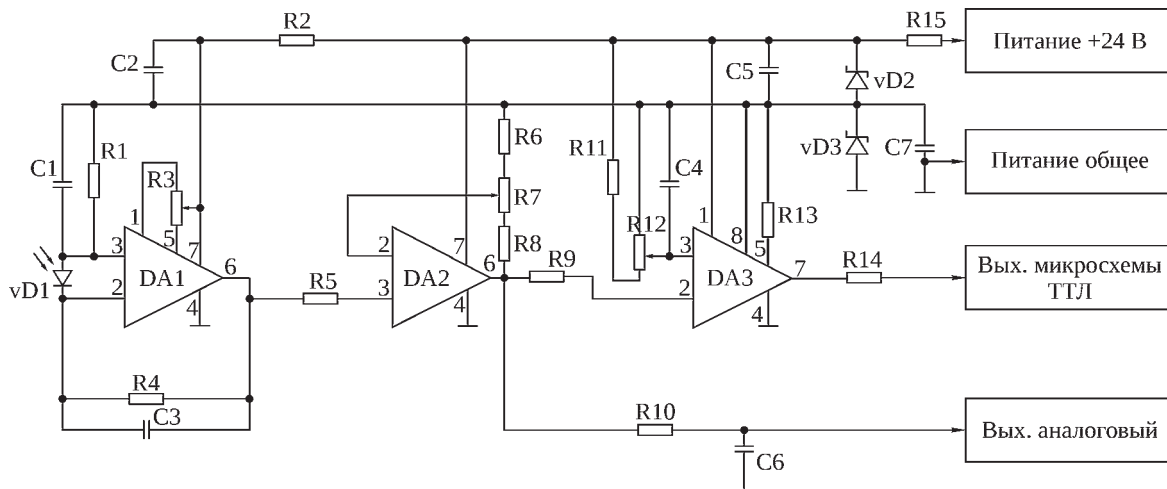


Рис. 7. Принципиальная схема фотопреобразователя сигнализатора: vD1 – фотодиод G1962; DA1, DA2 и DA3 – микросхемы ОРА637, AD797 и AD790 соответственно; vD2 и vD3 – стабилитроны 2С215 и 2С147

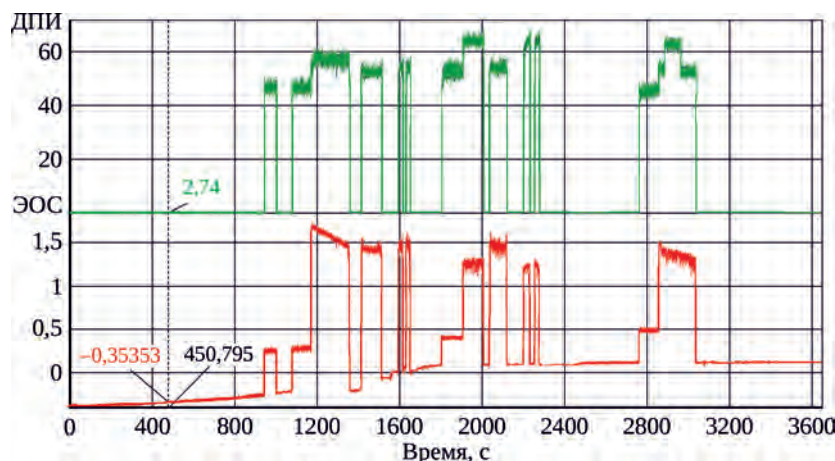


Рис. 9. Сравнительные осциллограммы сигналов ДПИ и ЭОС на ФКС

фотопреобразователя. Внешний вид вариантов сигнализаторов представлен на рис. 8.

Испытания электронно-оптического сигнализатора

Работоспособность первого экспериментального образца сигнализатора была проверена при стендовых испытаниях ФКС. Приемная часть сигнализатора устанавливалась в штатное отверстие вместо ДПИ малого режима горения. Жестко фиксированное положение приемной части сигнализатора (без возможности изменения угловой ориентации конуса визирования относительно оси отверстия) далеко от оптимального. В значительную часть поля зрения попадают трубопроводы, расположенные недалеко от посадочного люка установки ДПИ. Тем не менее проведенные начальные испытания дали полезную информацию о работе оптического сигнализатора.

На всех режимах работы ФКС наблюдалось соответствие регистрации наличия горения ионизационной и оптической системами сигнализации (рис. 9). За время испытаний на ФКС (общая наработка более 1,5 ч) загрязнения защитного окна приемного узла не наблюдалось и характер формы электрического сигнала не изменялся.

Последующие конструктивные доработки созданного макета привели к появлению другого экспериментального образца сигнализатора (рис. 8,б). Для того чтобы не дорабатывать корпус ФКС, оптическая часть сигнализатора была изготовлена для установки в штатное отверстие на корпусе, используемое для свечи зажигания, с возможностью изменения угловой ориентации волоконного жгута относительно оси отверстия с помощью специального узла, расположенного в корпусе датчика. Для обдува входного окна (рис. 10) использовался воздух охлаждения внутреннего корпуса ФКС. Ориентация поля зрения произведена на зону горения за стабилизатором ФКС.

Проведенные сравнительные испытания экспериментального электронно-оптического сигнализатора (ЭОС-э) розжига и горения ФКС и серийного ионизационного датчика (ДПИ-1500) показали работоспособность и высокую информативность оптического сигнализатора (рис. 11). На всех режимах работы ФКС наблюдалось соответствие регистрации наличия горения



Рис. 10. Вид входного окна датчика, установленного в отверстии для свечи зажигания: 1 – корпус ФКС; 2 – корпус ЭОС-э; 3 – семижильный оптический жгут

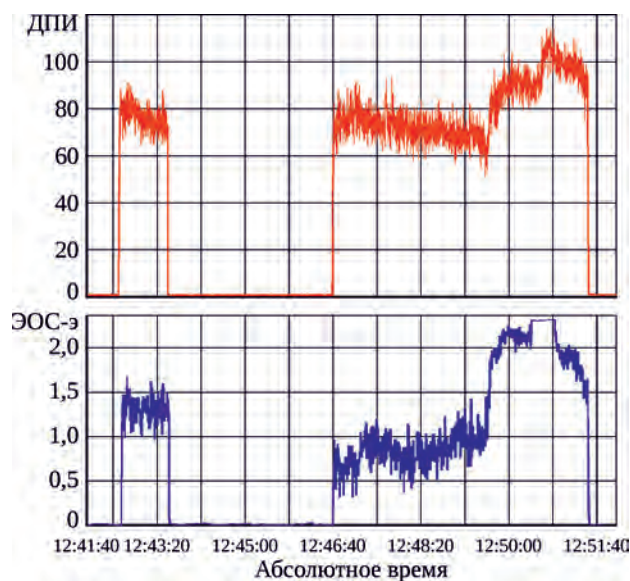


Рис. 11. Сравнительные осциллограммы сигналов ДПИ и ЭОС-э на ФКС

ионизационной и оптической системами сигнализации, и можно предположить, что оптический сигнализатор обладает значительным запасом по регистрации слабых сигналов от зон горения, так как его поле зрения перекрывает большую часть площади камеры сгорания, и даже слабые сигналы зон горения интегрально будут фиксироваться системой и достоверно информировать о наличии горения, что позволит избежать ложных сигналов о погасании КС.

Заключение

В ЦИАМ создан и испытан в стендовых условиях экспериментальный электронно-оптический сигнали-

затор розжига камер сгорания ГТД. Сигнализатор удовлетворяет требованиям, предъявляемым к эксплуатации камер сгорания, и обладает важными преимуществами перед применяемыми в настоящее время ионизационными датчиками:

- работа вне зоны горения, что повышает их надежность и позволяет в некоторых случаях исключить из системы элементы охлаждения и защиты от загрязнения;
- отсутствие зависимости от пространственного дрейфа пламени благодаря оптимальной ориентации поля зрения сигнализатора;
- отсутствие влияния электрических помех при удалении электронной части системы из зоны негативного электромагнитного воздействия.

Литература / Reference

1. Датчики ионизационные: ДПИ1500-5ПР; ДПИ1500-5МПР; ДПИ1500-5Л; ДПИ1500-5ММЛ: руководство по технической эксплуатации: 8ГО.240.006 РЭ. 1989. 16 с.
Datchiki ionizatsionnye [Ionization sensors]. DPI1500-5PR; DPI1500-5MPR; DPI1500-5L; DPI1500-5MML. Rukovodstvo po tekhnicheskoi ekspluatatsii [Technical operation manual]. 8GO.240.006 RE. 1989. 16 p.
2. Использование явления электропроводности пламени неоднородной топливовоздушной смеси при проектировании и доводке камер сгорания / А.П. Шайкин и др. // Вестн. Самар. ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 116–123.
Ispol'zovanie iavleniia elektroprovodnosti plameni neodnorodnoi toplivovozdushnoi smesi pri proektirovanii i dovodke kamer sgoraniia [Using the phenomenon of electrical conduction of flame of non-homogeneous air-fuel mixture in design and development of combustion chamber]. A.P. Shaikin et al. Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaiia tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering]. 2016. Vol. 15, no. 3. P. 116–123.
3. Способ формирования сигнала наличия горения в форсажной камере воздушно-реактивного двигателя: патент SU 523554 A1 / Вьюнов С.А., Эзрохи А.Б., Асланян Э.В. и др. № 1867181/06, заявл. 05.01.1973; опубл. 27.06.2005, Бюл. № 18.
Sposob formirovaniia signala nalichiiia goreniia v forsazhnoi kamere vozdushno-reaktivnogo dvigatel'ia [Method for generating a combustion signal in the afterburner of an air-breathing jet engine]. V'iunov S.A., Ezrokhi A.B., Aslanyan E.V. et al. Patent SU 523554 A1. 2005.
4. Способ контроля наличия факела: авт. свид. 864901 СССР / Асланян Э.В. и др. № 2903722/24-061980; заявл. 01.04.80. 4 с.
Sposob kontroliia nalichiiia fakela [A method for monitoring a presence of a flame]. Aslanyan E.V. et al. Copyright certificate. USSR. 1980.
5. Flame detectors: patent EP 0 157 644 A2 / Ciammaichella Richard Curtis, Youmans Barry J.; applicant The Babcock & Wilcox Company. Priority 03.04.84 US596483; appl. nr 85302349.7; date of filing 03.04.85; date of publ. of appl. 09.10.85, Bulletin 85/41.
6. Борзов С.М., Козик В.И., Шараборин Д.К. Дистанционный контроль устойчивости горения углеводородо-воздушных смесей // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: материалы IX Всерос. конф. с международ. участием, 16–18 ноября 2015 г., Новосибирск. С. 62–68.
Borzov S.M., Kozik V.I., Sharaborin D.K. Distantsionnyi kontrol' ustoichivosti goreniia uglevodorodo-vozdushnykh smesei [Remote control of combustion stability of hydrocarbon-air mixtures]. Fuel combustion: theory, experiment, applications: materials of IX All-Russian Conference with international participation, 16–18 November 2015, Novosibirsk. P. 62–68.
7. Анисимова И.Д., Стафеев В.И. Фотоприемники ультрафиолетового диапазона на основе широкозонных соединений АЗВ5 // Прикладная физика. 1999. № 2.
Anisimova I.D., Stafeev V.I. Fotopriemniki ul'trafiioletovogo diapazona na osnove shirokozonnnykh soedinenii A3B5 [UV photodetectors based on wide bandgap A3B5 compounds]. Prikladnaia fizika [Applied Physics]. 1999. No. 2.

Материалы получены редакцией 20.05.2020