

УДК 536.8

Методологические аспекты экспериментальных исследований процесса горения в камерах сгорания газотурбинных двигателей

Исаев А.И.*, Скоробогатов С.В.**

*Иркутский филиал Московского государственного технического университета
гражданской авиации,*

ул. Коммунаров, 3, Иркутск, 664047, Россия

**e-mail: isaew_alexandr@mail.ru*

***e-mail: maestro.ru@mail.ru*

Аннотация

Горение топливо-воздушной смеси - это сложный физико-химический процесс, который можно условно рассматривать как совокупность процессов распыливания топлива, его испарения, смешения паров топлива с воздухом, воспламенения образовавшейся смеси и ее горения. Причем все эти процессы протекают, в значительной мере, одновременно и до сих пор нет чёткой, универсальной методики, позволяющей учитывать все тонкости исследуемых явлений при моделировании их математически. Кроме того, помимо физико-химических процессов, крайне важны для анализа явления, связанные с газовой динамикой потоков. В ходе распыливания жидкое топливо дробится на мелкие капли, средний диаметр которых обуславливает поверхностную площадь, влияя тем самым, на прогрев жидкости и последующее ее испарение и смешение с воздухом. Полнота сгорания топлива, в свою очередь, определяется составом топливо-воздушной смеси, а так же организацией процессов воспламенения и горения этой

смеси в камере сгорания. Принимая во внимание всю сложность этих процессов и их взаимодействие между собой, натурный эксперимент по-прежнему остаётся неотъемлемым этапом проектирования камер сгорания.

Целью данной работы является изучение методологических аспектов отдельного моделирования процессов, которые в реальной камере сгорания протекают в один и тот же промежуток времени. На этапе проведения натуральных экспериментов по исследованию процесса горения, возникает ряд трудностей, которые связаны с природой исследуемых явлений. Так, при сжигании топливно-воздушной смеси в камере сгорания, граница между зоной горения и зоной смешения носит весьма условный характер. Из-за чего невозможно рассматривать процессы, протекающие в этих зонах, отдельно друг от друга.

Авторами статьи предлагается конструкция экспериментального стенда, позволяющего разделить зону горения и зону смешения. Так же рассматривается способ преодоления температурных ограничений измерительной аппаратуры при достижении топливно-воздушной смеси стехиометрического состава.

Ключевые слова: камерный стенд, экспериментальные исследования, камера сгорания, эмиссия вредных веществ.

Введение

На сегодняшний день газотурбинные двигатели (ГТД) являются основным типом силовых установок, размещаемых на воздушные суда. Один из самых высоконагруженных элементов газотурбинного двигателя это камера сгорания (КС) – устройство, в котором в результате сгорания топлива осуществляется повышение температуры поступающего в него воздуха [1]. Температура газов на выходе из КС зависит от коэффициента избытка воздуха (α), который для реальных КС таков, что горение необходимо организовывать и поддерживать, применяя дополнительные устройства в КС и создавая зоны обратных токов. Кроме того, на входе в жаровую трубу осуществляется разделение потоков воздуха на первичный и вторичный.

Изучению процесса распространения пламени в газочапельных средах посвящено большое количество работ, в которых приводятся результаты исследований [2-10]. В случае неполного сгорания, часть топливо-воздушной смеси (ТВС), не отреагировав, попадает в зону смешения, образуя при этом вредные вещества, подлежащие нормированию (HC , CO) [11-13]. В то же время, часть вторичного воздуха может вовлекаться обратными токами в зону горения, образуя окислы азота в зонах повышенных температур. При данной организации процесса горения в камерах сгорания трудно выделить долю вредных компонентов, приходящихся на зону горения и долю компонентов, приходящихся на зону смешения. Ввиду трудностей, возникающих в процессе математического моделирования физико-химических процессов в КС, весьма распространенной практикой является создание испытательных стендов для проведения натурных исследований в лабораторных условиях [14,15].

Основной задачей данной работы являлось раздельное моделирование процессов, которые в реальной КС протекают в один и тот же промежуток времени. Кроме того, имеет место проблема замера высоких температур, связанная с ограничениями измерительной аппаратуры. Так, при стехиометрическом горении керосина, температура факела может достигать значений в 2700К, что делает невозможным проведение измерений непосредственно в зоне горения. Поэтому крайне важной задачей являлось определение параметров, которые косвенным путём позволяют рассчитать температуру газов в камере сгорания по температуре в зоне смешения. Это возможно благодаря следующей зависимости: [16-18]:

$$T_{см} = \frac{G_x \cdot c_{p_x} \cdot T_x + G_{г} \cdot c_{p_{г}} \cdot T_{г}}{G_{см} \cdot c_{p_{см}}}, \quad (1)$$

где G_x , $G_{г}$, $G_{см}$ - секундо-массовые расходы воздуха и газов, поступающих в камеру смешения, а также смеси;

c_{p_x} , $c_{p_{г}}$ – удельная теплоёмкость воздуха и газов;

T_x , $T_{г}$, $T_{см}$ – температуры воздуха, газа и смеси, соответственно.

В свою очередь,

$$T_{г} = \frac{G_{см} \cdot c_{p_{см}} \cdot T_{см} - G_x \cdot c_{p_x} \cdot T_x}{G_{г} \cdot c_{p_{г}}}. \quad (2)$$

Особенности этапа проектирования камерного стенда

Для возможности проведения всесторонних исследований процесса горения в лабораторных условиях, был выполнен камерный стенд (Рис. 1), у которого зона горения конструктивно отделена от зоны смешения.



Рис. 1. Камерный стенд для экспериментальных исследований

Стенд имеет две магистрали подвода воздуха от турбовоздуходувки. Первичный воздух поступает непосредственно в КС, вторичный – в камеру смешения, располагающуюся за КС. В данных условиях представляется возможным проведение анализа продуктов сгорания на выходе из КС и на выходе из камеры смешения в зависимости от α и температуры горения ТВС.

Для определения значения и регулировки температуры в КС и камере смешения, следует производить учет расхода топлива G_T , а так же первичного воздуха G_{B1} , поступающего непосредственно через фронтное устройство к месту

расположения факела распыла топливной форсунки и вторичного воздуха G_{B2} , поступающего в зону смешения [19]. Для этого в воздушных магистралях необходимы устройства замера расхода воздуха (5, 6, 7), а для регулировки – перекрывающие краны (2, 3) (Рис. 2). В топливной магистрали камерного стенда также должна быть предусмотрена возможность регулировки подачи и учет расхода топлива.

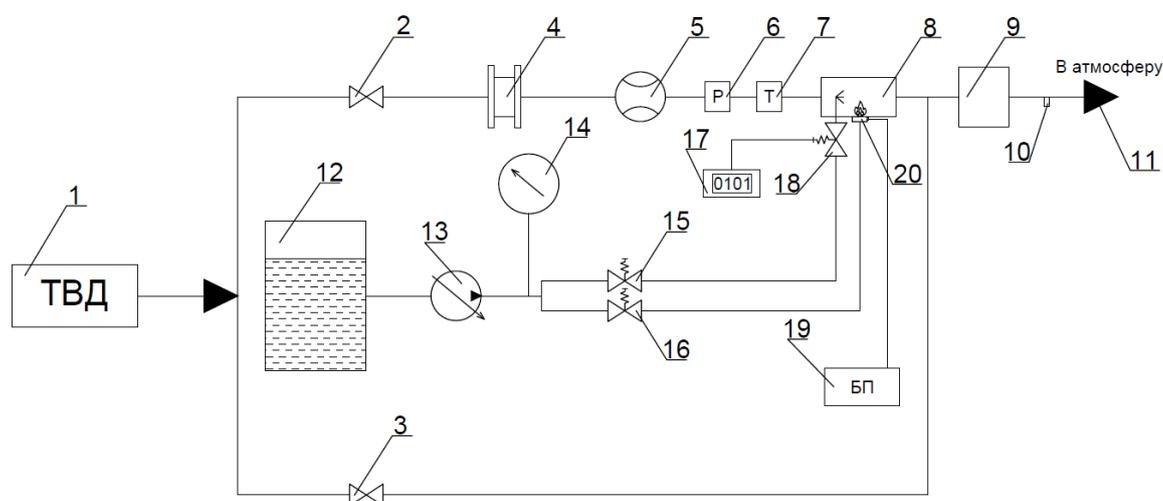


Рис. 2. Схема камерного стенда

С учетом сделанных замечаний, магистраль первичного воздуха стенда включает в себя: перекрывающий кран (2), вихревой расходомер (5) со спрямляющим устройством для выпрямления потока (4), камеру сгорания и трубопроводы соединения (8).

Магистраль вторичного воздуха включает в себя: перекрывающий кран (3) и трубопровод к камере смешения.

Топливная магистраль состоит из топливного бака (12), перекрывающих электромагнитных кранов (15, 16), манометра (14), шестеренного насоса (13) и магистрали подачи топлива с форсункой и пусковым воспламенителем (20).

Конструкция стенда предусматривает возможность исследования процесса горения в импульсных камерах сгорания. Для данной задачи на стенде используется автомат отсечки топлива, включающий в себя управляющий электронный блок (17) и электромагнитный клапан (18) в топливной магистрали. Питание элементов стенда электроэнергией осуществляется с помощью блока питания (19).

Расход воздуха определяется при помощи вихревого расходомера, однако электронные преобразователи расхода обеспечивают заявленную точность только в случае должного выполнения всех условий по монтажу и подключению. В частности, при монтаже должны быть обеспечены требуемые длины входных и выходных прямолинейных участков трубопровода. Для снижения этих длин, в канале размещается выпрямитель потока (4), позволяющий сократить длину входного участка до 8 диаметров устройства (Рис. 3).

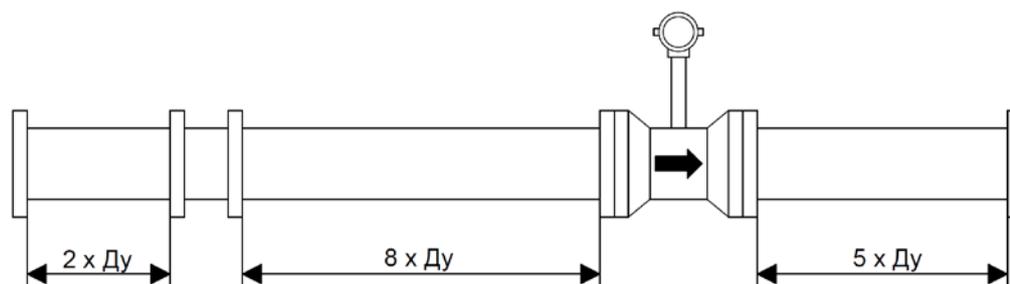


Рис. 3. Схема размещения преобразователя расхода

Для определения массового расхода газа, кроме всего прочего, в магистралях установлены термометры и электронные датчики полного и избыточного давления.

При этом измерение параметров, их хранение и обработка осуществляется сертифицированной измерительной системой «Мера», которая позволяет в режиме

реального времени отображать показатели давления в виде числовых значений с последующим экспортированием их в различных вариантах (Рис. 4).

Исходя из максимально возможного расхода воздуха турбовоздуходувки, для соединения элементов камерного стенда выбраны стандартные металлические трубы диаметром 90 мм. Это также позволяет унифицировать конструкцию стенда и использовать в его составе стандартные узлы и агрегаты, имеющиеся в свободном доступе и не требующие отдельного проектирования.

Камера смешения также выполняется на основе металлической трубы, диаметр которой выбирается с учетом скорости течения газовой смеси G_{B1} и G_{B2} . В камере предусмотрен штуцер для забора пробы на газоанализатор. Выходная часть камеры стыкуется с магистралью отвода газов в атмосферу.

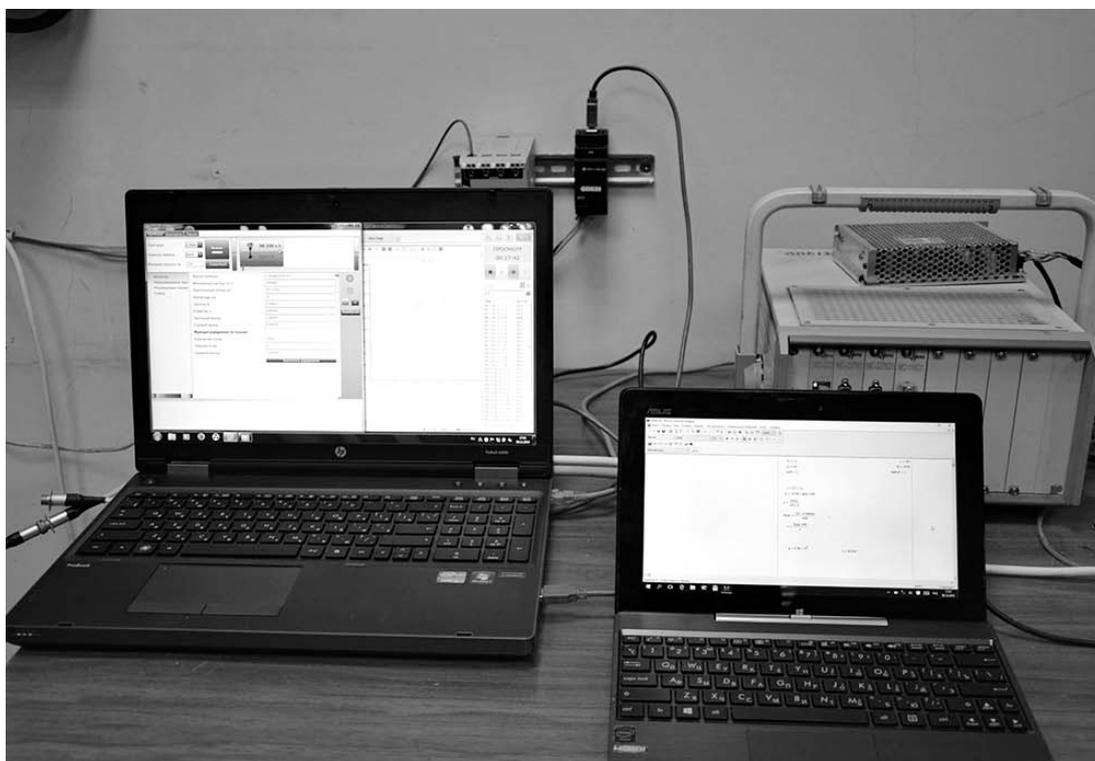


Рис. 4. Измерительная система «Мера»

При выборе элементов топливной системы и системы воспламенения топлива, преимущественно использовались авиационные и автомобильные компоненты, по причине их доступности.

Методика проведения экспериментальных исследований

Перекрытым краном задаётся расход воздуха, который определяется с помощью вихревого расходомера. В преобразователе расхода реализован метод, основанный на измерении частоты вихрей [20]. В цилиндре проточной части установлено тело обтекания, которое вызывает образование вихрей в набегающем потоке измеряемой среды. Вихри распространяются попеременно вдоль и сзади каждой из сторон тела обтекания. Частота срыва вихрей с тела обтекания пропорциональна скорости потока среды, а, следовательно, пропорциональна и объемному расходу среды.

По коэффициенту избытка воздуха α , в свою очередь, определяется потребный расход топлива. Учитывая то обстоятельство, что при малых расходах топлива жидкостные расходомеры имеют низкую точность измерения, определение расхода топлива осуществляется с использованием расходной характеристики форсунки (Рис. 5). Данная расходная характеристика была получена путем взвешивания истекшего топлива при фиксированном давлении за определённый промежуток времени. Давление в топливной магистрали изменяется с помощью редукционного клапана топливного насоса.

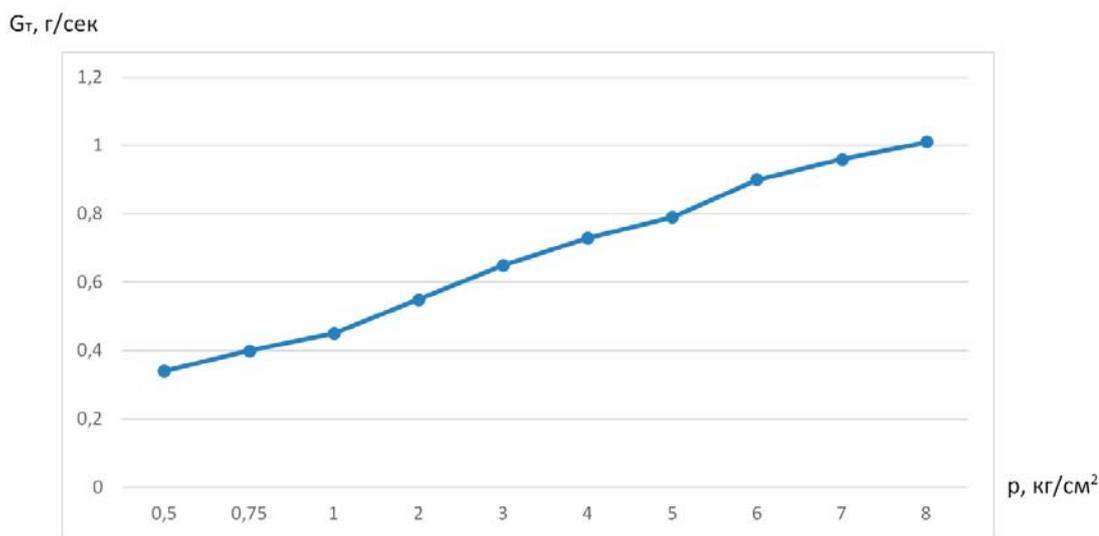


Рис. 5. Расходная характеристика

Проведение экспериментальных исследований на камерном стенде осуществляется следующим образом. Воздух от турбовоздуходувки поступает в разделительный патрубок, где происходит разделение потока. После открытия перекрывных кранов, воздух поступает в первичную и вторичную воздушные магистрали. Первичный воздух, проходя через выпрямитель потока, поступает в вихревой преобразователь расхода, где определяется его объёмный расход. Далее, на участке перед камерой сгорания, определяется температура и давления воздуха в магистрали. В совокупности эти данные позволяют определить массовый расход воздуха.

Затем воздух поступает в КС, где происходит образование ТВС и организация процесса горения. После чего, отработавший газ поступает в камеру смешения, где смешивается с воздухом из магистрали вторичного воздуха и далее выходит в атмосферу через выхлопную трубу.

Определение эмиссии вредных веществ

Для анализа продуктов сгорания в камере смешения предусмотрен отбор газа на газоанализатор KANE 940, позволяющий определять массовую долю O_2 , CO , CO_2 , NO_x . Забор пробы осуществляется через штуцер забора газа (10) путём помещения зонда в проточную часть выхлопной трубы.

Заключение

Основной задачей натурального эксперимента является формирование истинных представлений об исследуемых явлениях и их взаимосвязях. Изменение тех или иных условий проводимого эксперимента, снятие показаний измерительных приборов, интерпретация результатов, всё это правомочно при условии отсутствия ошибок на этапе проектирования экспериментальной технической базы, предотвратить которые возможно лишь подвергая анализу ход планируемых исследований.

Данный камерный стенд позволяет исследовать процесс горения жидких углеводородных топлив, получив при этом данные о температуре, давлении, массовом расходе топлива и газа, эмиссии вредных веществ. Конструктивное разделение зоны горения и зоны смешения обеспечивает широкий температурный диапазон проводимых исследований, а также позволяет выделить долю вредных компонентов, приходящихся на зону горения и долю компонентов, приходящихся на зону смешения.

Библиографический список

1. Установки газотурбинные. Термины и определения. ГОСТ Р51852. - М.: Изд-во стандартов, 2001. - 15с.
2. Roy G.D., Frolov S.M., Netzer D.W., Borisov A.A. High-Speed Deflagration and Detonation: Fundamentals and Control, Moscow, ELEX-KM Publishers, 2001, 384 p.
3. Митрофанов В.В. Детонация гомогенных и гетерогенных систем. - Новосибирск, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2003. – 200 с.
4. Фролов С.М., Басевич В.Я. Законы горения / Под ред. Ю.В.Полежаева. - М.: Энергомаш, 2006. С. 130 - 159.
5. Herweg R.A., Maly R.R. Fundamental model for flame kernel formation in S. I. Engines // SAE Technical Paper Series, 1992, 84 p. DOI: 10.4271 /922243
6. Исаев А.И., Майрович Ю.И., Сафарбаков А.М., Ходацкий С.А. Исследование процесса образования топливовоздушной смеси в импульсной камере сгорания и термодинамический расчет импульсного горения // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75583>
7. Сполдинг Д.Б. Основы теории горения. - М.: Госэнергоиздат, 1959. – 320 с.
8. Дрегалин А.Ф., Зенуков И.А., Крюков В.Г., Наумов В.И. Математическое моделирование высокотемпературных процессов в энергоустановках. – Казань, Изд-во Казанского университета, 1985. - 263 с.
9. Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas turbine combustion. New York, CRC Press, 2010, 538 p.
10. Taylor S.C. Burning velocity and the influence of flame stretch. Ph.D. Thesis. University of Leeds, 1991, available at: <http://theses.whiterose.ac.uk/2099/>

11. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Том II. Эмиссия авиационных двигателей. ИКАО, 2008. – 118 с.
12. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. - М.: Физматлит, 2003. – 352 с.
13. Метечко Л.Б. Экология для инженерно-экономических и технических вузов. - Саарбрюкен, Германия, Lap Lambert Academic Publishing, 2013. – 520 с.
14. Болховитин М.С., Боровиков Д.А., Ионов А.В., Селиверстов С.Д. Разработка испытательного стенда для малоразмерных газотурбинных двигателей // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75612>
15. Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Испытательные стенды для исследования процессов и доводки низкоэмиссионных камер сгорания ГТД // Вестник Самарского университета. 2013. № 41. С. 131 - 138.
16. Исаев А.И., Молокова С.В. Термодинамика и теплопередача. - Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. – 156 с.
17. Кобельков В.Н., Улас В.Д., Федоров Р.М. Термодинамика и теплопередача. - М: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2004. – 322 с.
18. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. - М.: Мир, 1972. – 381 с.
19. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. Теория авиационных двигателей. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. Ч. 1. – 365 с.
20. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Диафрагмы, сопла ИСА 1932 и трубы Вентури, установленные в

заполненных трубопроводах круглого сечения. ГОСТ 8.563.1-97 ГСИ. - М.: Изд-во стандартов, 1999. – 56 с.