

МЕТОДИКА РАСЧЁТА КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ФОРСАЖНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДВУХТОПЛИВНОЙ СИСТЕМОЙ ПИТАНИЯ

© 2025

А. В. Жук адъюнкт;
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж;
zhuck.aleks.n@yandex.ru

Т. В. Грасько кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника факультета
летательных аппаратов – начальник учебной части;
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж;
grasko83@mail.ru

А. С. Колесников кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры
авиационных двигателей;
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж;
sanekkolesnikov1987@rambler.ru

В. В. Разносчиков доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник;
Центральный институт авиационного моторостроения
им. П.И. Баранова, г. Москва;
raznoschikov@mail.ru

Рассматривается задача снижения эмиссии несгоревших углеводородов и монооксида углерода, влияющих на величину коэффициента полноты сгорания топлива в форсажной камере сгорания газотурбинного двигателя. Проведён анализ причин образования несгоревших углеводородов и монооксида углерода и определены пути их снижения. Рассмотрен химико-физический процесс горения углеводородного топлива при добавлении в его состав газообразного водорода с оценкой эмиссии несгоревших углеводородов и монооксида углерода. Предлагается методика расчёта коэффициента полноты сгорания топлива в форсажной камере сгорания газотурбинного двигателя с двухтопливной системой питания. Показано, что применение разработанной методики позволяет оценить величину коэффициента полноты сгорания и поддерживать её заданное значение путём коррекции процентного соотношения водорода к керосину. Методика опробована при проведении экспериментального исследования горения керосино-водородно-воздушной смеси в модельном отсеке форсажной камеры сгорания серийного газотурбинного двигателя.

Авиационное топливо; удельный расход топлива; форсажная камера сгорания; газообразный водород; испарённый керосин; индексы эмиссии

Цитирование: Жук А.В., Грасько Т.В., Колесников А.С., Разносчиков В.В. Методика расчёта коэффициента полноты сгорания топлива в форсажной камере сгорания газотурбинного двигателя с двухтопливной системой питания // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24, № 2. С. 136-150. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-136-150

Введение

В настоящее время ведущими специалистами авиационной промышленности ведётся активная работа над созданием двигателя для сверхзвукового делового пассажирского самолёта. Уже сформировано техническое предложение по проекту перспективного сверхзвукового гражданского самолёта «Стриж» [1]. Как известно, для выполнения полётного задания на сверхзвуковой скорости полёта, потребуется работа двигателя на форсированном режиме, составляющим 30...50% от всей продолжитель-

ности полёта, для этого двигатель должен иметь минимальное значение удельного расхода топлива ($C_{удф}$) на данном режиме. Представленная работа посвящена данной тематике.

В качестве объекта исследования рассматривается турбореактивный двухконтурный двигатель с форсажной камерой сгорания (ФКС) типа АЛ-31Ф.

Анализ параметров рабочего процесса ФКС, представленных в табл. 1, свидетельствует о том, что высокий удельный расход топлива на форсированном режиме работы обусловлен низким значением коэффициента полноты сгорания топлива ($\eta_{гф}$).

Таблица 1. Основные параметры рабочего процесса форсажной камеры сгорания двигателя АЛ-31Ф на режиме «Полный форсированный»

Параметр	Значение
Температура газа в ФКС, $T_{гф}^*$, К	2080
Коэффициент избытка воздуха, α	1,1
Коэффициент полноты сгорания, $\eta_{гф}$	0,91
Расход топлива, $G_{гф}$, кг/ч	36000
Удельный расход топлива, $C_{удф}$, кг/кгс·ч	1,92

При этом известно, что на величину $\eta_{гф}$ оказывают влияние следующие факторы:

- режимные (состав топливовоздушной смеси в зоне горения, параметры топливного факела, параметры воздуха на входе в ФКС, степень испарения жидкого топлива, распределение топлива по сечению ФКС);
- конструктивные (тип стабилизаторов пламени и расстояние между ними, тип топливных форсунок);
- эксплуатационные (тепловые возмущения на входе в двигатель, тип применяемого топлива).

Анализ работ в данной предметной области показал, что наибольший вклад в разработку методик расчёта полноты сгорания топлива внесли учёные следующих организаций:

Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева – работы, проводимые А.В. Баклановым, Б.Г. Мингазовым и его учениками [2];

Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва – работы, проводимые С.В. Лукачёвым, С.Г. Матвеевым, М.Ю. Орловым, И.А. Зубрилиным, И.В. Чечетом, А.С. Семенихиным, А.А. Диденко и другими [3];

Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьёва – работы под руководством Ш.А. Пиралишвили [4];

Уфимского государственного авиационного технического университета – работы под руководством В.Ф. Харитонов, Д.В. Скибы, Д.А. Максимова, Р.С. Кашапова. [5];

Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова – работы А.В. Кудрявцева, В.В. Медведева, С.А. Волкова, В.В. Разносчикова;

АО «ОДК – Климов» – работы Н.Ф. Дубовкина, В.А. Митрофанова, О.А. Рудакова, А.В. Григорьева [7];

Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е. Жуковского – работы Е.С. Щетинкова [8];

Исследования зарубежных компаний – «General Electric» (США); Siemens (ФРГ); Electricite de France (Франция) и других организаций.

Одним из основных последствий снижения полноты сгорания топлива является наличие несгоревших углеводородов (НС) и монооксида углерода (СО) в продуктах сгорания [7; 9 – 11]. Одним из способов снижения количества этих веществ при горении керосино-воздушной смеси является организация и стимулирование процесса горения в двигателе водородом [12 – 14]. Для этого предлагается организация двухтопливной системы питания ФКС, под которой понимается система, реализующая смешение основного и дополнительного топлива, дальнейшую подачу подготовленной топливной смеси к форсункам ФКС, где основным топливом является испарённый керосин, а в качестве дополнительного – газообразный водород.

Однако, известные методики рассматривают процесс образования загрязняющих веществ, а именно несгоревших углеводородов НС и монооксида углерода СО в отдельности друг от друга и разработаны для одно топливной (керосиновой) основной камеры сгорания газотурбинного двигателя (ГТД). Данные работы направлены на решение экологических проблем и, соответственно, не рассматривают изменение коэффициента полноты сгорания топлива.

Организация рабочего процесса и кинетика процесса горения в основной камере сгорания отличается от форсажной камеры сгорания, поэтому разработка методики расчёта коэффициента полноты сгорания топлива в форсажной камере сгорания газотурбинного двигателя с двухтопливной системой питания представляется новой актуальной научной задачей.

Целью данной работы является комплексный анализ процессов горения топливной смеси «керосин-водород» в форсажной камере ГТД с построением математической модели для поиска рационального соотношения компонентов с компромиссным учётом экологических и энергетических факторов.

Материалы и методы

Для решения поставленной задачи определим факторы, влияющие на образование загрязняющих веществ.

Оценка влияния добавления водорода в топливную смесь

Основными факторами, влияющими на образование несгоревших углеводородов, являются:

- время нахождения смеси в зоне горения;
- температура и турбулентность газового потока.

Так как увеличение времени нахождения смеси в зоне горения невозможно из-за высокой скорости течения газового потока, а его торможение приведёт к загромождению тракта ФКС, то необходимо увеличение реакционной способности топлива при прочих неизменных условиях. При добавлении водорода изменяется состав реагирующей смеси. Равновесный процесс горения ускоряется появлением атомарного водорода $H_2 \Leftrightarrow 2H$. Это одна из причин увеличения реакционной способности керосино-водородно-воздушной смеси и повышения полноты сгорания [15].

Таким образом, уменьшение удельного расхода топлива на форсированном режиме работы двигателя возможно добиться снижением относительного расхода форсажного топлива, путём увеличения коэффициента полноты сгорания топлива в ФКС, посредством применения двухтопливной системы питания. Это приведёт к снижению индексов эмиссии несгоревших углеводородов НС и монооксида углерода СО.

Так как индексы эмиссии НС и СО являются размерными величинами, для приведения к общей размерности всех членов представленных ниже зависимостей, индексы эмиссии, а также коэффициент полноты сгорания представляются в процентах от массы всего топлива, использованного за полётный цикл на форсированном режиме работы, при этом полное сгорание топлива принимается равным 100%. В такой интерпретации целесообразно ввести понятие относительного индекса эмиссии $\overline{EI}_{\text{НС(СО)}}$:

$$\overline{EI}_{\text{НС(СО)}} = \frac{E_{\text{НС(СО)}}}{m_{\text{т}}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{НС(СО)}}$ – эмиссия несгоревших углеводородов и монооксида углерода соответственно, кг; $m_{\text{т}}$ – масса топлива, кг.

$$\downarrow C_{\text{удф}} = \frac{3600 \downarrow q_{\text{тф}}}{P_{\text{уд}}} \Rightarrow \downarrow q_{\text{тф}} = \frac{c_{\text{пф}} (T_{\text{ф}}^* - T_{\text{т}}^*)}{\uparrow \eta_{\text{ГФ}} \uparrow H_{\text{у}}} \Rightarrow \uparrow \eta_{\text{ГФ}} = 100 - (\downarrow \overline{EI}_{\text{НС}} + \downarrow \overline{EI}_{\text{СО}}) \cdot 10, \quad (2)$$

где $q_{\text{тф}}$ – относительный расход топлива в ФКС; $P_{\text{уд}}$ – удельная тяга двигателя, Н·с/кг; $c_{\text{пф}}$ – условная теплоёмкость продуктов сгорания, кДж/кг; $T_{\text{ф}}^*$ – температура газа в ФКС, К; $T_{\text{т}}^*$ – температура газа за турбиной, К; $\eta_{\text{ГФ}}$ – коэффициент полноты сгорания в ФКС; $H_{\text{у}}$ – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг; $\overline{EI}_{\text{НС}}, \overline{EI}_{\text{СО}}$ – индексы эмиссии несгоревших углеводородов и монооксида углерода соответственно.

В результате добавления водорода происходят следующие химико-физические изменения в рабочем процессе ФКС:

– увеличение скорости горения – водород ускоряет скорость реакции горения за счёт своей высокой реакционной активности, что способствует более полному сгоранию топливной смеси;

– увеличение температуры в ядре пламени, в результате чего улучшается прогрев периферийной топливовоздушной смеси за счёт большего теплового потока, что способствует снижению уровня образования несгоревших углеводородов НС в пристеночных областях ФКС.

Механизм протекания химических реакций в ФКС при добавлении водорода в керосин происходит следующим образом [15]:

1. Инициация. Молекулы керосина начинают реагировать с радикалами Н, образуя нестабильные радикалы $\text{C}_{12}\text{H}_{25}$ и $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$.

2. Термический крекинг керосина. Под воздействием высоких температур молекулы керосина подвергаются термическому крекингу, разлагаясь на более лёгкие углеводороды, такие как C_3H_6 и C_2H_5 .

3. Термический крекинг водорода. Водород также претерпевает термический крекинг, разлагаясь на активные радикалы Н, которые вовлечены в дальнейшие химические реакции горения с выделением большого количества тепла, инициируя разложение молекул керосина.

4. Окисление. Образовавшиеся углеводородные радикалы, такие как CH_2 и CH_3 , реагируют с кислородом, образуя оксиды углерода (CO и CO_2) и воду (H_2O).

5. Взаимодействие с водородом. Угледородные радикалы, образующиеся в результате крекинга керосина и водорода, могут реагировать с водородными радикалами, образуя метанол (CH_3OH) и другие продукты.

6. Реакция сгорания водорода. Водородные радикалы могут также реагировать с кислородом, образуя гидроксильные радикалы (HO), которые могут быть вовлечены в дальнейшие химические реакции.

7. Реакция образования воды. Образовавшиеся гидроксильные радикалы могут конденсироваться, образуя молекулы воды (H_2O), что является одним из конечных продуктов реакции.

Методика расчёта коэффициента полноты сгорания

Предлагаемая методика расчёта коэффициента полноты сгорания топлива в форсажной камере сгорания газотурбинного двигателя с двухтопливной системой питания базируется на экспериментальном анализе проб газа из тракта ФКС, математическом моделировании рабочего процесса в ФКС для определения возможности горения водорода [8]. Методика позволяет также производить расчёт коэффициента полноты сгорания топлива и его поддержание на заданном уровне путём коррекции подаваемого водорода.

Блок-схема методики представлена на рис. 1.

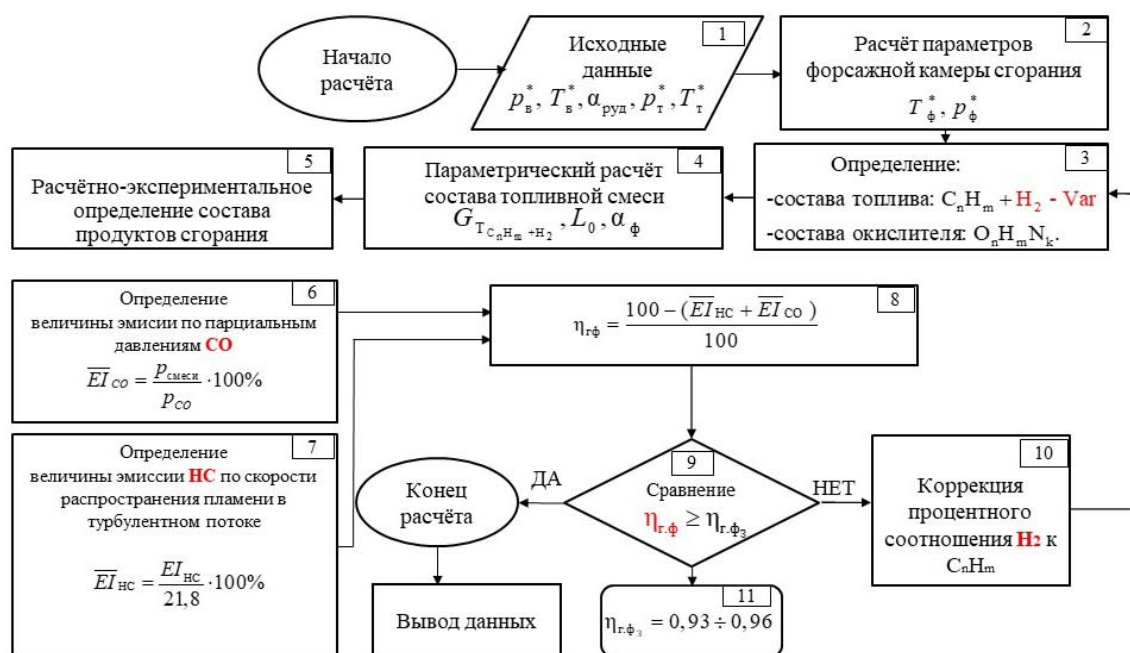


Рис. 1. Блок-схема методики расчёта коэффициента полноты сгорания топлива в форсажной камере сгорания газотурбинного двигателя с двухтопливной системой питания

Методика включает следующие этапы:

1. Выбор исходных данных. Задаются параметры на входе в двигатель (давление p_v^* и температура T_v^* воздуха), режим работы двигателя $\alpha_{руд}$, а также давление p_t^* и температура T_t^* газового потока за турбиной, для дальнейшего расчёта параметров рабочего процесса в камере смешения в зависимости от условий полёта (высоты и скорости).

2. Производится расчёт давления $p_{см}^*$ и температуры $T_{см}^*$ в ФКС для определения возможности воспламенения и устойчивого горения предварительно подготовленной топливной смеси испарённого керосина с газообразным водородом, так как данные параметры оказывают непосредственное влияние на возможность воспламенения, устойчивого горения, а также характер протекания реакции горения водорода:

$$p_{см}^* = \frac{p_H^* \pi_{вх}^* \pi_T^* \sigma_{вх} \sigma_{окс}}{\pi_T^*}, \quad (3)$$

$$T_{см}^* = \frac{c_{рг} T_T^* + c_{рв} m T_{вп}^*}{(1+m) c_{р см}}, \quad (4)$$

где p_H^* – полное давление на входе в двигатель, Па; $\pi_{вх}^*$ – полная степень повышения давления во входном устройстве; π_T^* – полная степень понижения давления в турбине; $\sigma_{вх}$ – коэффициент сохранения полного давления во входном устройстве; $\sigma_{окс}$ – коэффициент сохранения полного давления в камере сгорания; $c_{рг}$ – условная теплоёмкость газа; T_T^* – температура газа за турбиной, К; $c_{рв}$ – условная теплоёмкость воздуха, равная 1,005 кДж/кг·град; m – степень двухконтурности двигателя; $T_{вп}^*$ – температура воздуха во втором контуре, К; $c_{р см} = 1,105$ кДж/кг·град – теплоёмкость газа, поступающего в форсажную камеру сгорания после смешения продуктов сгорания основной камеры сгорания и воздуха второго контура двигателя.

На основе методики, разработанной Е.С. Щетинковым [8], в данной работе построена диаграмма воспламенения водородно-воздушной смеси (рис. 2).

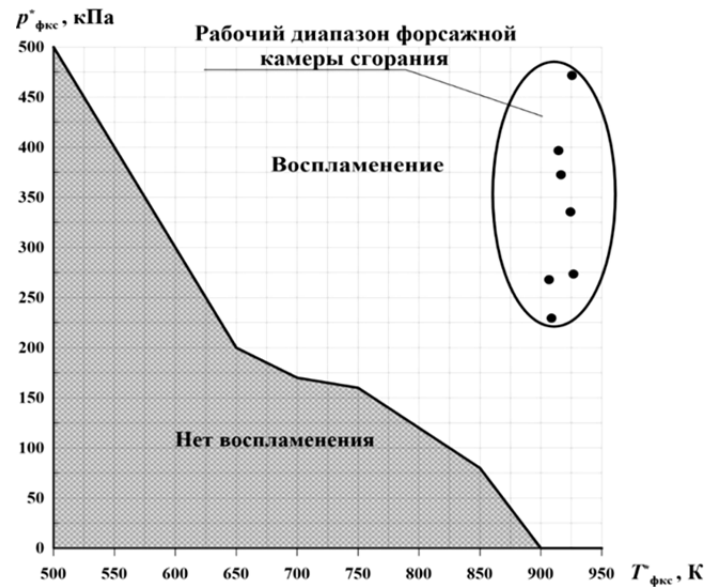


Рис. 2. Диаграмма воспламенения водородно-воздушной смеси

На диаграмме воспламенения водородно-воздушной смеси отображён рабочий диапазон давлений и температур в ФКС ГТД типа АЛ-31Ф, который находится в области воспламенения и устойчивого горения водородно-воздушной смеси.

3. По полученным данным производится определение состава топлива $C_n H_m + N_2$, а состав окислителя $O_n H_m N_k$ остаётся неизменным, так как с увеличением высоты полёта состав воздуха остаётся неизменным.

4. Так как применяется двухтопливная система питания, по известным молекулярным весам компонентов топлива производится расчёт стехиометрического коэффициента L_0 :

$$L_0 = \frac{\frac{8}{3}C_T + 8H_T}{\frac{8}{3}O_o + 8N_o}, \quad (5)$$

где C_T, H_T – молекулярный вес углерода и водорода в топливе, O_o, N_o – молекулярный вес окислителя в воздухе, для чего задаётся коэффициент избытка воздуха в ФКС α_ϕ .

5. Определение состава продуктов сгорания расчётно-экспериментальным путём. Определение состава продуктов сгорания при горении предварительно подготовленной топливной смеси проводится экспериментально. Суть эксперимента заключается в определении коэффициента полноты сгорания топлива по уровню эмиссии несгоревших углеводородов HC и монооксида углерода CO.

В качестве исходных данных задаются геометрические параметры ФКС и фронтального устройства, состав топлива, окислителя, параметры рабочего процесса в ФКС (давление и температура газа).

Эксперимент ставился на модельном отсеке ФКС двигателя АЛ-31Ф в составе экспериментальной установки (рис. 3) с установленной в нём 1/12 частью стабилизатора пламени с карбюраторной трубкой, в которую подаётся предварительно подготовленная смесь, а именно испарённый керосин с добавлением газообразного водорода.

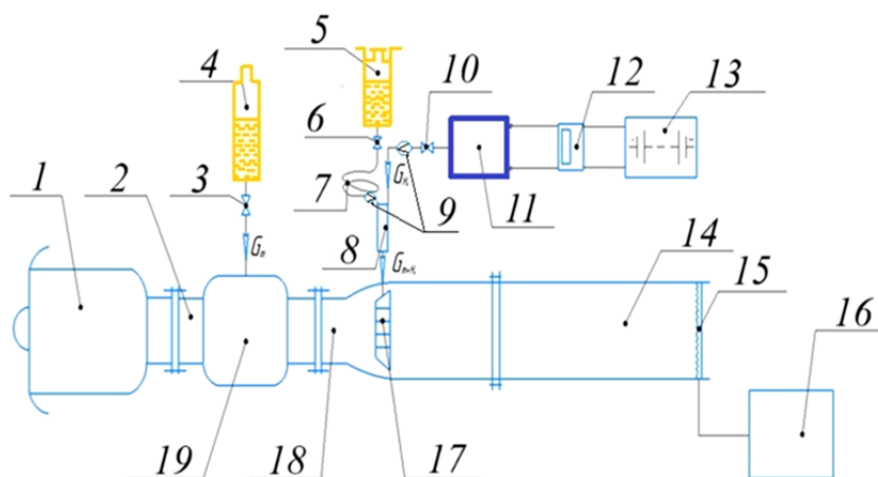


Рис. 3. Пневмогидросхема экспериментальной установки:

1 – осевой компрессор; 2 – переходный корпус; 3 – шаровый кран; 4 – топливный бак системы питания камеры подогрева $V = 5$ л; 5 – бак вытеснительной системы подачи топлива $V = 3$ л; 6 – кран регулирования расхода керосина; 7 – испаритель с нихромовой проволокой $R = 15$ Ом; 8 – смеситель; 9 – расходомеры объёмные; 10 – кран регулирования расхода водорода; 11 – электрический тризер системы водородного питания ЕСО-S; 12 – регулятор напряжения; 13 – аккумуляторная батарея 12 В; 14 – выхлопной насадок; 15 – газовый заборник; 16 – газоанализатор АСКОН-02; 17 – 1/12 часть стабилизатора пламени с карбюраторной трубкой; 18 – переходный корпус; 19 – камера подогрева

Процесс испарения керосина и его смешение с водородом происходит в испарителе-смесителе жидкостно-газовом, установленном в магистрали топливной системы ФКС (рис. 4) [16].

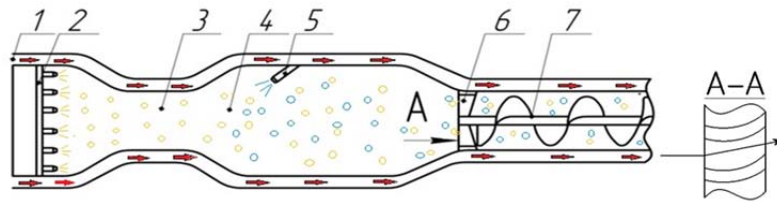


Рис. 4. Испаритель-смеситель жидкостно-газовый:

1 – контур подвода горячего газа; 2 – коллектор подачи жидкого топлива; 3 – испарительная камера; 4 – камера смешения; 5 – форсунка ввода газообразного топлива; 6 – лопаточный завихритель; 7 – шнек

Исследования проводились в три этапа. На первом этапе в модельный отсек ФКС подаётся жидкий керосин, с помощью газоанализатора происходит замер уровня выброса HC и CO , их перевод из ppm в процентные отношения и расчёт коэффициента полноты сгорания по методике, представленной в [7]. На втором этапе в модельный отсек подаётся испарённый керосин, замеряется уровень выброса HC и CO и также по методике [7] рассчитывается коэффициент полноты сгорания. На третьем этапе подаётся испарённый керосин с добавлением водорода. Анализ литературы [17] показывает, что наибольший эффект при использовании водорода, как добавки к углеводородному топливу, проявляется при величине его фракции от 5 до 15% от массового расхода керосина (рис. 5). Дальнейшее увеличение процентного соотношения водорода приводит к срывным явлениям и неустойчивому горению смеси.

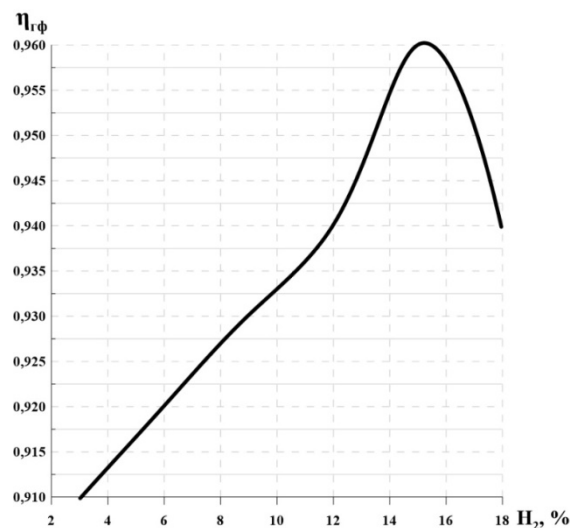


Рис. 5. Зависимость коэффициента полноты сгорания в форсажной камере сгорания от процентного соотношения водорода к расходу керосина

Важно отметить, что так как природа образования HC и CO отличается друг от друга, то определение HC производится с учётом скорости распространения пламени в турбулентном потоке.

6. Определение парциальных давлений СО при добавлении водорода в керосин происходит посредством расчёта парциальных давлений p горючих компонентов. Для этого устанавливаются причины увеличения выбросов СО, к которым относятся:

- уменьшение времени пребывания смеси в камере сгорания, что влияет на скорость распространения реакции разложения и пиролиза;
- из-за большей реакционной способности водорода на доокисление СО остаётся меньше кислорода при стехиометрических и богатых смесях [18].

Таким образом, выбросы СО определяются их парциальными давлениями, зависящими от парциальных давлений CO_2 , участвующих в горении [12]:

$$p_{\text{CO}_2} = \frac{\sqrt{p_{\text{N}_2}^2 k + 4ab}}{2p_{\text{H}}}, \quad (6)$$

$$p_{\text{CO}} = 2Q \cdot p_{\text{N}_2} - p_{\text{CO}_2}, \quad (7)$$

где Q – теплота химической реакции, кДж/кг; p_{N_2} – парциальное давление азота, k, a, b – табличные коэффициенты; p_{H} – атмосферное давление, Па; p_{CO_2} – парциальное давление углекислого газа.

Валидация результатов расчёта полноты сгорания по разработанной методике выполнена по экспериментальным данным, полученным на пятом этапе. В качестве допущения, расчёт значения давления и температуры, а также процентное отношение водорода к керосину выбирались одинаковыми. Зависимость выбросов монооксида углерода СО, от процентного содержания водорода H_2 в топливе представлена на рис. 6.

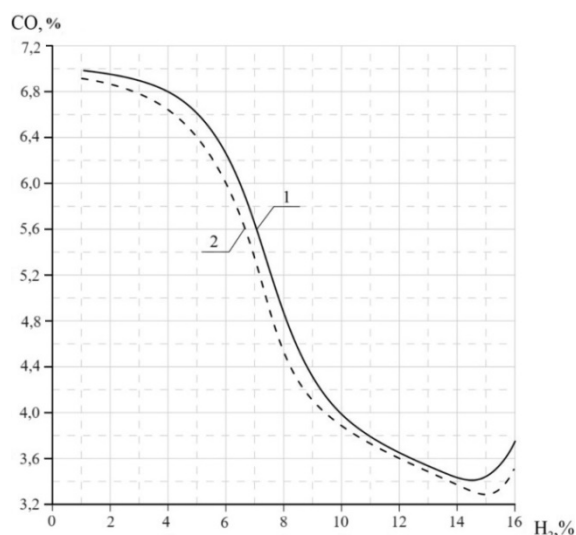


Рис. 6. Зависимость выбросов монооксида углерода СО от процентного содержания водорода в топливе:
1 – разработанная методика; 2 – экспериментальные данные

Расхождение экспериментальных и расчётных данных составляет 5%, что свидетельствует о достоверности результатов, полученных авторами, при этом коэффициент

корреляции составляет $r = 0,78$, что свидетельствует об устойчивой связи экспериментальных и расчётных данных.

7. Несгоревшие углеводороды являются следствием локального погасания пламени. Существует два эффекта: погасания (или рассеяние) пламени за счёт деформации и растяжения фронта пламени и его тушение на стенках. Существенное влияние на данный процесс оказывает скорость распространения пламени в турбулентном потоке, которая зависит от геометрии форсажной камеры сгорания. Определение выбросов НС производится с её учётом, а также с учётом скорости распространения пламени топливной смеси в турбулентном потоке:

$$U_{\text{т смеси}} = U_{\text{н смеси}} \sqrt{1 + A \left(\frac{W'}{U_{\text{н смеси}}} \right)^2}, \quad (8)$$

$$\overline{EI}_{\text{НС}} = p_{\text{в}} \frac{G_{\text{в}}}{V_{\text{фкс}}} \left(\frac{N_{\text{ф}}}{F_{\text{фкс}}} \frac{\pi \delta^2 l_1}{U_{\text{т смеси}}} \tau \right) (T_{\text{ф}}^*)^{-1} \exp \left[-\frac{T_{\text{см}}^*}{288} \right] (G_{\text{тф}})^{-1}, \quad (9)$$

где $U_{\text{н смеси}}$ – нормальная скорость распространения пламени смеси, м/с.; $A = 4,1$ – коэффициент, зависящий от α [6]; W' – пульсационная скорость, м/с; $p_{\text{в}}$ – парциальное давление воздуха на входе в ФКС, кг/м²; $G_{\text{в}}$ – расход воздуха через ФКС, кг/с; $V_{\text{фкс}}$ – объем ФКС, м³; δ^2 – ширина зоны горения, м; l_1 – длина первичной зоны ФКС, м; $U_{\text{т смеси}}$ – скорость распространения турбулентного пламени смеси, м/с; τ – время задержки воспламенения смеси, с; $N_{\text{ф}}$ – количество форсунок; $F_{\text{фкс}}$ – площадь ФКС, м²; $T_{\text{ф}}^*$ – температура в ФКС, К; $T_{\text{см}}^*$ – температура в камере смешения, К; $G_{\text{тф}}$ – расход топлива форсажного, кг/с.

Зависимость выбросов несгоревших углеводородов НС от процентного содержания водорода H_2 в топливе представлена на рис. 7.

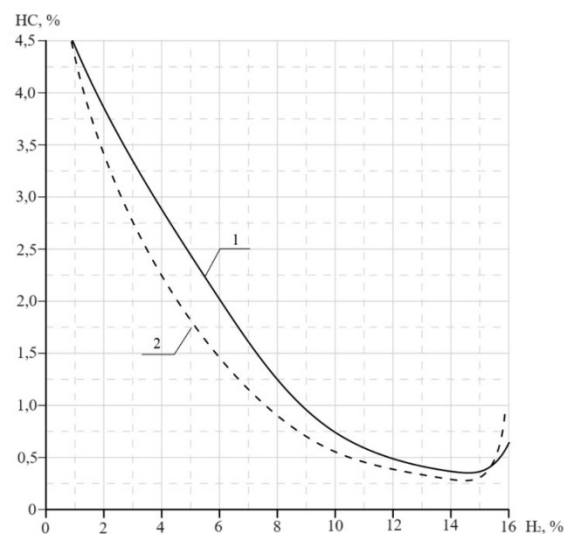


Рис. 7. Зависимость выбросов несгоревших углеводородов НС от процентного содержания водорода в топливе:
1 – разработанная методика; 2 – экспериментальные данные

Средняя погрешность результатов расчёта и эксперимента составляет 5%, что свидетельствует о достоверности результатов, полученных авторами, при этом коэффициент корреляции составляет $r = 0,72$, что подтверждает устойчивость связи экспериментальных и расчётных данных.

8. Далее производится расчёт коэффициента полноты сгорания по зависимости [7]:

$$\eta_{\text{гф}} = \frac{100 - (\overline{EI}_{\text{HC}} + \overline{EI}_{\text{CO}})}{100}, \quad (10)$$

где $\overline{EI}_{\text{HC}}$ – относительный индекс эмиссии несгоревших углеводородов, %; $\overline{EI}_{\text{CO}}$ – относительный индекс эмиссии монооксидов углерода, %.

Полученные расчётным и экспериментальным путём зависимости полноты сгорания от процентного содержания водорода в керосине представлены на рис. 8, при этом коэффициент корреляции составляет $r = 0,75$, что свидетельствует об устойчивой связи экспериментальных и расчётных данных.

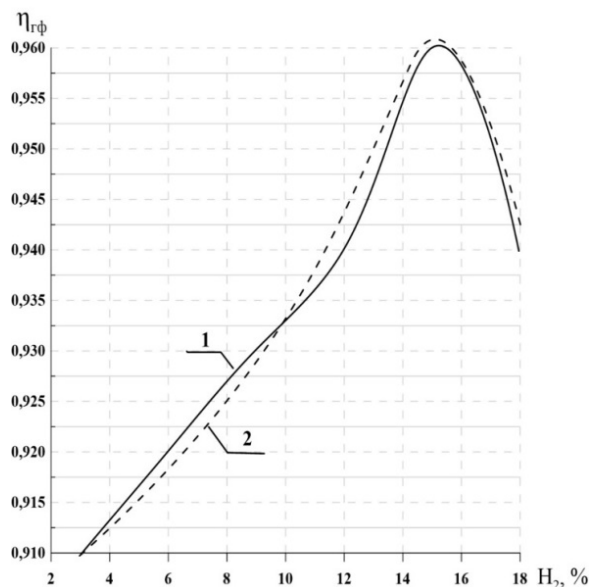


Рис. 8. Зависимость коэффициента полноты сгорания топлива от процентного содержания водорода в топливе:
 1 – разработанная методика; 2 – экспериментальные данные

9. Происходит сравнение заданного $\eta_{\text{гф},\text{з}}$ и рассчитанного $\eta_{\text{гф}}$ коэффициентов полноты сгорания топлива $\eta_{\text{гф}} \geq \eta_{\text{гф},\text{з}}$.

10. Если условие $\eta_{\text{гф}} \geq \eta_{\text{гф},\text{з}}$ не выполняется, то необходима коррекция процентного соотношения количества подаваемого водорода H_2 к испарённому керосину C_nH_m , согласно зависимости изменения коэффициента полноты сгорания от процентного содержания водорода в топливе (рис. 8), требуется проведение нового расчёта.

Заключение

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработана и валидирована методика расчёта коэффициента полноты сгорания топлива в форсажной камере сгорания газотурбинного двигателя с двухтопливной системой питания.

Методика основана на учёте особенностей химико-физических процессов горения керосина с добавлением водорода. Методика позволила определить оптимальную массовую концентрацию водорода в смеси, соответствующую $15_{-2}^{+10}\%$ от секундного массового расхода керосина в форсажной камере сгорания, при которой наблюдается минимальное значение эмиссии несгоревших углеводородов и монооксида углерода, позволяющих повысить коэффициент полноты сгорания.

В результате применения разработанной методики определено, что коэффициент полноты сгорания топлива в форсажной камере сгорания с двухтопливной (керосин – водород) системой питания составляет $0,96_{-0,02}^{+0,01}$, что подтверждено при экспериментальных исследованиях на модельном отсеке форсажной камеры сгорания серийного газотурбинного двигателя.

Библиографический список

1. Заквасин А.С., Комарова Е.А. Наследник Ту-144: как развивается проект российского гражданского сверхзвукового самолёта. <https://ru.rt.com/fzhu>
2. Мингазов Б.Г. Внутрикамерные процессы и автоматизированная доводка камер сгорания ГТД. Казань: Из-во Казан. гос. техн. ун-та, 2000. 168 с.
3. Зубрилин И.А. Методика определения границы бедного срыва пламени в камерах сгорания газотурбинных установок. Дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2016. 169 с.
4. Гурьянов А.И. Исследование эмиссионных характеристик горения в противоточных закрученных течениях // Сборник трудов Шестой Всероссийской конференции по теплообмену (27-31 октября 2014 г., Москва). М.: Издательский дом МЭИ, 2014. С. 430-433.
5. Коновалова А.В., Кожин В.Ф., Харитонов В.Ф. Метод предварительного проектирования камер сгорания ГТД // Сб. трудов «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Вып. 3, ч. 2. Самара: СГАУ, 1999. С. 184-189.
6. Кудрявцев А.В., Медведев В.В. Форсажные камеры и камеры сгорания ПВРД. Инженерные методики расчёта характеристик. М.: ЦИАМ, 2013. 137 с.
7. Теория камеры сгорания / под ред. О.А. Рудакова. СПб: Наука, 2010. 228 с.
8. Щетинков Е.С. Физика горения газов. М.: Наука, 1965. 739 с.
9. Дорошенко В.Е. О процессе горения в камере газотурбинного двигателя // Сб. докладов «Третье Всесоюзное совещание по теории горения». Т. 2. М.: АН СССР, 1960. С. 262-269.
10. Диденко А.А. Теория и расчёт камер сгорания ВРД. Часть II. Оценка экологических показателей камер сгорания ГТД: учеб. пособие для курсового и дипломного проектирования. Самара: Изд-во СГАУ, 2012. 54 с.
11. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. М.: Мир, 1986. 566 с.
12. Козлов В.Е., Титова Н.С., Торохов С.А. Численное исследование влияния добавки водорода или синтез-газа к н-декану на эмиссию вредных веществ из камеры сгорания с гомогенным режимом горения // Химическая физика. 2020. Т. 39, № 5. С. 3-15. DOI: 10.31857/S0207401X20050088

13. Шайкин А.П., Галиев И.Р. Влияние скорости распространения и ширины зоны турбулентного пламени на концентрацию несгоревших углеводородов и полноту сгорания топлива в двигателе с искровым зажиганием // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2019. № 4. С. 111-123. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-4-111-123

14. Коротаева Т.А., Турчинович А.О. Особенности формирования загрязняющих веществ при полном и неполном сгорании авиатоплива // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2015. № 2 (19). С. 45-59.

15. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. М.: Физматлит, 2003. 352 с.

16. Жук А.В., Грасько Т.В., Колесников А.С., Усарчук С.С., Ярославцев С.В., Головнева Т.И. Испаритель-смеситель жидкостно-газовый: патент РФ № 2829998; опубл. 11.11.2024; бюл. № 32.

17. Орлов М.Ю., Лукачев С.В., Матвеев С.Г. Моделирование процессов в камере сгорания: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. 292 с.

18. Дубовкин Н.Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. 288 с.

METHOD OF CALCULATING THE FUEL COMBUSTION EFFICIENCY IN THE AFTERBURNER COMBUSTION CHAMBER OF A GAS TURBINE DUAL FUEL ENGINE

© 2025

A. V. Zhuk Associate Professor of the Department of Aircraft Engines;
Military Educational and Scientific Center of the Air Force Academy
named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin,
Voronezh, Russian Federation;
zhuck.aleks.n@yandex.ru

T. V. Grasko Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Deputy Head
of the Faculty of Aircraft;
Military Educational and Scientific Center of the Air Force Academy
named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin,
Voronezh, Russian Federation;
grasko83@mail.ru

A. S. Kolesnikov Candidate of Science (Engineering), Senior Lecturer at the Department
of Aircraft Engines;
Military Educational and Scientific Center of the Air Force Academy
named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin,
Voronezh, Russian Federation;
sanekkolesnikov1987@rambler.ru

V. V. Raznoschikov Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher
Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation;
raznoschikov@mail.ru

The problem of reducing the emission of unburned hydrocarbons and carbon monoxide that affect the value of fuel combustion efficiency in the afterburner combustion chamber of a gas turbine engine is considered. An analysis of the causes of hydrocarbon and carbon monoxide formation were carried out and ways to reduce them were identified. The chemical and physical process of the combustion of hydrocarbon fuel with the addition of gaseous hydrogen to its composition is considered with an assessment of the emission of unburned hydrocarbons and carbon monoxide. A method for calculating the fuel combustion efficiency in the afterburner combustion chamber of a gas turbine engine with a dual-fuel power supply system is proposed. It is shown that the application of the developed technique

makes it possible to estimate the value of the combustion efficiency and maintain its set value by correcting the percentage ratio of hydrogen to kerosene. The technique was tested during an experimental study of the hydrogen-air mixture combustion in the model compartment of the afterburner combustion chamber of a commercial gas turbine engine.

Aviation fuel; specific fuel consumption; afterburner; hydrogen gas; vaporized kerosene; emission indices

Citation: Zhuk A.V., Grasko T.V., Kolesnikov A.S., Raznoschikov V.V. Method of calculating the fuel combustion efficiency in the afterburner combustion chamber of a gas turbine dual fuel engine. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2025. V. 24, no. 2. P. 136-150. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-136-150

References

1. Zakvasin A.S., Komarova E.A. *Naslednik Tu-144: kak razvivaetsya proekt rossiyskogo grazhdanskogo sverkhzvukovogo samoleta* [Successor of the Tu-144: how the project of the Russian civil supersonic aircraft is developing]. Available at: <https://ru.rt.com/fzhu>
2. Mingazov B.G. *Vnutrikamernye protsessy i avtomatizirovannaya dovodka kamer sgoraniya GTD* [Intrachamber processes and automated refinement of combustion chambers of gas turbine engines]. Kazan: Kazan State Technical University Publ., 2000. 168 p.
3. Zubrilin I.A. *Metodika opredeleniya granitsy bednogo sryva plameni v kamerakh sgoraniya gazoturbinnyykh ustanovok. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Methodology for determining the boundary of lean flameout in the combustion chambers of gas turbine power plants. Thesis for a Candidate Degree in Science (Engineering)]. Samara, 2016. 169 p.
4. Gur'yanov A.I. Issledovanie emissionnykh kharakteristik goreniya v protivotochnykh zakruchennykh techeniyakh. *Sbornik Trudov Shestoy Vserossiyskoy Konferentsii po Teploobmenu (October, 27-31, 2014, Moscow)*. Moscow: Izdatel'skiy Dom MEI Publ., 2014. P. 430-433. (In Russ.)
5. Konovalova A.V., Kozhinov V.F., Kharitonov V.F. Metod predvaritel'nogo proektirovaniya kamer sgoraniya GTD. *Sb. Trudov «Problemy i Perspektivy Razvitiya Dvigatelistroeniya»*. Iss. 3, part 2. Samara: Samara State University of Aerospace Publ., 1999. P. 184-189. (In Russ.)
6. Kudryavtsev A.V., Medvedev V.V. *Forsazhnye kamery i kamery sgoraniya PVRD. Inzhenernye metodiki rascheta kharakteristik* [Afterburners and combustion chambers of ramjet engines. Engineering methods for calculating characteristics]. Moscow: CIAM Publ., 2013. 137 p.
7. *Teoriya kamery sgoraniya* [Combustion chamber theory / ed. by O.A. Rudakov]. St. Petersburg: Nauka Publ., 2010. 228 p.
8. Shchetnikov E.S. *Fizika goreniya gazov* [Physics of gas combustion]. Moscow: Nauka Publ., 1965. 739 p.
9. Doroshenko V.E. O protsesse goreniya v kamere gazoturbinnogo dvigatelya. *Sb. Dokladov «Tret'e Vsesoyuznoe Soveshchanie po Teorii Goreniya»*. V. 2. Moscow: AN SSSR Publ., 1960. P. 262-269. (In Russ.)
10. Didenko A.A. *Teoriya i raschet kamer sgoraniya VRD. Chast' II. Otsenka ekologicheskikh pokazateley kamer sgoraniya GTD: ucheb. posobie dlya kursovogo i diplomnogo proektirovaniya* [Theory and calculation of combustion chambers of air-breathing jet engines. Part II. Assessment of the environmental performance of the combustion chambers of a gas turbine engine: study guide for preparing course and diploma papers]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2012. 54 p.
11. Lefebvre A.H. Gas turbine combustion. Hemisphere Pub. Corp., 1983. 531 p.
12. Kozlov V.E., Titova N.S., Torokhov S.A. Numerical study of the effect of hydrogen or syngas additions to n-decane on the harmful substance emission from a homogeneous

combustion chamber. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2020. V. 14, Iss. 3. P. 395-406. DOI: 10.1134/S1990793120030082

13. Shaykin A.P., Galiev I.R. Effect of turbulent flame propagation velocity and zone width on the unburnt hydrocarbon concentration and combustion efficiency in a spark-ignition engine. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*. 2019. No. 4. P. 111-123. (In Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2019-4-111-123

14. Korotaeva T.A., Turchinovich A.O. Peculiarities of pollutant forming at complete and incomplete combustion of aviation fuel. *Vestnik Priamurskogo Gosudarstvennogo Universiteta im. Sholom-Aleykhema*. 2015. No. 2 (19). P. 45-59. (In Russ.)

15. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. Combustion. Physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation. Berlin: Springer, 2001. 299 p.

16. Zhuk A.V., Grasko T.V., Kolesnikov A.S., Usarchuk S.S., Yaroslavtsev S.V., Golovneva T.I. *Isparitel'-smesitel' zhidkostno-gazovyy* [Liquid-gas evaporator-mixer]. Patent RF, no. 2829998, 2024. (Publ. 11.11.2024, bull. no. 32)

17. Orlov M.Yu., Lukachev S.V., Matveev S.G. *Modelirovanie protsessov v kamere sgoraniya: ucheb. posobie* [Modeling processes in the combustion chamber: a textbook]. Samara: Samara University Publ., 2017. 292 p.

18. Dubovkin N.F. *Spravochnik po uglevodorodnym toplivam i ikh produktam sgoraniya* [Handbook of hydrocarbon fuels and their combustion products]. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1962. 288 p.