

Рис. 6. Поле относительных температур на выходе противоточной камеры сгорания

распределением параметров по высоте. Эпюры радиальной и максимальной неравномерности укладываются в заданные пределы. Таким образом противоточная камера сгорания имеет высокую полноту сгорания, удовлетворительные показатели по неравномерности полей температур, а также эмиссии вредных выбросов: число дымности $D = 5$, окислы азота $NO = 20,5$ г/кг-топл., окислы углерода $CO = 20$ г/кг-топл., углеводороды $CH = 3,5$ г/кг-топл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. - М.: 1986.
2. Грабовский В.И., Жестков Г.Б. Расчет ламинарного течения сжимаемого газа при наличии теплообмена в плоских криволинейных каналах. // Изв. АН СССР, МЖГ. - 1983. - №2.
3. Грабовский В.И. Расчетное исследование теплообмена в условиях ламинарного течения газа в плоском криволинейном канале при отсосе и вдуве. // ИФЖ. - 1985. - Т.48, №4.

УДК 621.43.056

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ ОБОБЩЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД МЕТОДОМ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ

Крашенинников С.В., Лукачев С.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Список обозначений*

α - коэффициент температуропроводности, m^2/s ; C - концентрация, kg/m^3 ; C_p - изобарная теплоемкость, D - коэффициент диффузии, m^2/s ; d - характер-

ный размер, м; E – энергия активации, Дж/моль; G – расход массовый, кг/с; H_u – низшая теплотворная способность топлива, Дж/кг; K_0 – константа скорости химической реакции; L_0 – стехиометрический коэффициент; n – порядок химической реакции; P – давление, Па; Q – теплота реакции, Дж/(м³·с); q – удельная теплота, Дж/кг; q_r – относительный расход топлива, кг/кг; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); T – температура, К; t – время, с; U – скорость, м/с; x – относительная концентрация, кг/кг; V – характерный объем, м³; W – скорость химической реакции, кг/м³·с.

α – коэффициент избытка воздуха; γ – удельный вес, кг/м³; η_r – коэффициент полноты сгорания топлива; λ – коэффициент теплопроводности, Дж/(м·К); θ – степень подогрева газа; ρ – плотность, кг/м³; $\sigma_{кс}$ – коэффициент восстановления полного давления.

Из-за ограниченности топливных ресурсов и неблагоприятной экологической обстановки к камерам сгорания (КС) ГТД предъявляются повышенные требования по экономичности и экологичности их работы. Большинство из них носит противоречивый характер, что делает оптимизацию работы КС сложной и многовариантной.

Решение такого рода задачи существенно облегчается, если вся интересующая информация размещается в пространстве одних и тех же координат. Применительно к любому узлу двигателя, поле, где можно разместить линии постоянных уровней эффективности работы и указать его рабочие режимы, представляет собой обобщенную характеристику (ОХ) этого узла.

Определиться с координатами поля ОХКС можно, имея математическую модель КС, описывающую рабочий процесс системой дифференциальных уравнений. Однако физическая картина процесса горения в КС настолько сложна, что не удастся составить замкнутую систему уравнений с четким определением граничных условий или при наличии такой системы ее не удастся проинтегрировать без грубых упрощений, не отвечающих истинному ходу процесса.

Эти же сложности делают весьма трудным всякое достаточно четкое экспериментальное исследование этого процесса, а тем более и всякую попытку широкого обобщения получаемых результатов.

Выход из этой ситуации возможен в применении теории подобия, которая, не требуя полного математического решения, позволяет создавать обоснованные эмпирические обобщения, представляющие собой зависимости между особыми безразмерными характеристиками (критериями подобия), применимые в пределах соблюдения правил моделирования однородных физических явлений.

В такой постановке решение оптимизационной задачи сводится к отысканию и описанию функциональной зависимости одной совокупности критериев от другой, что является основой обобщения экспериментальных данных, которые представляются в виде критериальных (безразмерных) уравнений. Преимуществом данного метода является возможность распространения найденной частной эмпирической зависимости на множество других частных случаев.

При различных требованиях к КС и разных условиях ее работы могут отличаться и цели, достигаемые моделированием. Обычно проводят исследования в двух направлениях:

1. Определяют на модели характер протекания рабочего процесса – полноту сгорания топлива, поля α и T по объему КС, гидравлические и тепловые потери, пределы горения по срыву пламени и т.д.
2. Определяют условия работы и температурные режимы стенок, соплового аппарата, теплообмен между элементами конструкции и пр.

В настоящей работе рассматривается первая задача. При этом пренебрегается влиянием теплообмена между различными частями и зонами КС на аэродинамику потока и процесс горения. Это допущение возможно для форсированных КС ГТД, где отвод тепла из зоны горения составляет небольшую часть от выделившегося в результате реакции [3].

Для упрощения решения этой задачи и уменьшения числа используемых критериев можно пренебречь процессами распыливания и испарения жидкого топлива. Учет фазового состояния топлива планируется при разработке математической модели более высокого уровня.

В данных условиях можно предположить, что процесс горения в КС близок к горению гомогенной топливовоздушной смеси. Тогда для соблюдения полного подобия необходимо обеспечить гидродинамическое подобие, подобие процессов горения и теплообмена внутри газового потока. При такой постановке задачи для описания изучаемого процесса необходимо применение следующей системы уравнений [1,5]:

- неразрывности;
- движения (Навье-Стокса);

- материального баланса (диффузии);
- теплового баланса (энергии).

В анализе предполагается не рассматривать уравнения движения и неразрывности, поскольку влияние критериев (Re , Eu , Ar), получаемых из этих уравнений на характеристики рабочего процесса в КС незначительно, что подтверждается результатами работы [3].

Рассмотрим совместное решение уравнений диффузии и энергии:

$$\rho \cdot \frac{dC}{dt} = \text{div}(\rho \cdot D \cdot \text{grad}C) - W,$$

$$C_p \cdot \rho \cdot \frac{dT}{dt} - \frac{dP}{dt} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) + Q$$

В частных производных

$$\rho \cdot \frac{\partial C}{\partial t} + \rho \cdot \bar{U} \cdot \text{grad}C = \text{div}(\rho \cdot D \cdot \text{grad}C) - W,$$

$$C_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + C_p \cdot \rho \cdot \bar{U} \cdot \text{grad}T - \frac{\partial P}{\partial t} - \bar{U} \cdot \text{grad}P = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) + qW.$$

Введем масштабные коэффициенты

$$\rho' = \frac{\rho}{\rho_0}, U' = \frac{U}{U_0}, T' = \frac{T}{T_0}, W' = \frac{W}{W_0}, d' = \frac{d}{d_0}, \lambda' = \frac{\lambda}{\lambda_0}, t' = \frac{t}{t_0}, P' = \frac{P}{P_0}.$$

Тогда

$$\frac{\rho'}{t'} \rho \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho' U'}{d'} \rho \bar{U} \cdot \text{grad}C = \frac{D' \rho'}{d'^2} \cdot \text{div}(\rho \cdot D \cdot \text{grad}C) - W' W,$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho' T'}{t'} C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{U' T'}{d'} C_p \rho \bar{U} \cdot \text{grad}T - \frac{P'}{t'} \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{P' U'}{d'} \bar{U} \cdot \text{grad}P = \\ = \frac{\lambda' T'}{d'^2} \cdot \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) + qW' W. \end{aligned}$$

Разделив уравнение диффузии на комплекс $\frac{U' \rho'}{d'}$, уравнение энергии на

комплекс $\frac{U' T' \rho' C_p}{d'}$, получим

$$\frac{d'}{t' U'} \rho \frac{\partial C}{\partial t} + \rho \bar{U} \cdot \text{grad}C = \frac{D'}{d' U'} \cdot \text{div}(\rho \cdot D \cdot \text{grad}C) - \frac{W' d'}{U' \rho'} W,$$

$$\begin{aligned} \frac{d'}{t'U'} \rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \bar{U} \cdot \text{grad} T - \frac{P'}{t'U'T'\rho'C_p} \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{P'}{T'\rho'C_p} \bar{U} \cdot \text{grad} P = \\ = \frac{\lambda'}{d'U'C_p\rho} \cdot \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} T) + \frac{d'W'}{U'T'\rho'C_p} qW. \end{aligned}$$

Переходя от масштабов к параметрам [2, 4] и учитывая, что $t = \frac{d}{U}$,

$P' = \rho' \cdot U'^2$, упростим уравнения

$$\begin{aligned} \rho \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{U} \cdot \text{grad} C \right) = \frac{D_0}{d_0 U_0} \cdot \text{div}(\rho \cdot D \cdot \text{grad} C) - \frac{W_0 d_0}{U_0 \rho_0} W, \\ \rho \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{U} \cdot \text{grad} T \right) - \frac{U_0^2}{C_p T_0} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + \bar{U} \cdot \text{grad} P \right) = \\ = \frac{\lambda_0}{d_0 U_0 C_p \rho_0} \cdot \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} T) + \frac{d_0 W_0}{U_0 T_0 \rho_0 C_p} qW. \end{aligned}$$

Опуская индекс "0" и преобразуя, получаем уравнение, описывающее рабочий процесс в КС системой комплексов (критериев подобия):

$$f \left(\frac{D}{Ud}, \frac{Wd}{\rho U}, \frac{\lambda}{Ud\rho C_p}, \frac{U^2}{C_p T}, \frac{q}{C_p T} \right) = 0$$

Считая, что $D \approx a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$ [9], можно ограничиться вместо 1-го и 3-

го комплексов одним: $K_1 = \frac{D}{Ud} = \frac{1}{Pe}$, тогда общий интеграл системы уравнений можно записать в виде функции

$$f_1 \left(Pe; \frac{Wd}{\rho U}, \frac{U^2}{C_p T}, \frac{q}{C_p T} \right) = 0.$$

Известно, что $Pe = Pr \cdot Re$. Для большинства режимов работы КС $Re = \text{const}$, для газов (пренебрегая участием жидкой фазы в процессе горения) $Pr = \text{const}$, что позволяет исключить критерий Pe из-под знака функции.

Критерий $\frac{U^2}{C_p T}$ выражает влияние динамического подогрева и существенной роли в рассматриваемых процессах не играет.

Отсюда следует, что любая безразмерная величина F , характеризующая рабочий процесс в КС (степень подогрева рабочего тела θ , коэффициент полноты сгорания топлива η_r , коэффициент потерь полного давления $\sigma_{кв}$ и т.д.), может быть выражена в виде зависимости от двух комплексов, являющихся критериями подобия для режимов работы КС:

$$F = F\left(\frac{Wd}{\rho U}; \frac{q}{C_p T}\right)$$

Такую зависимость можно представить в удобной графической форме. Остановимся на физической природе полученных критериев.

Критерий $\frac{q}{C_p T}$ выражает энергетические характеристики топливовоздушной смеси вносимой в КС. Связь со степенью подогрева рабочего тела $\theta = \frac{T_r^*}{T_k^*}$ можно представить в виде

$$q = C_p (T_r^* - T_k^*) = H_u q_r \eta_r,$$

$$\theta = 1 + \frac{q}{C_p T_k^*} = 1 + \frac{H_u \cdot q_r}{C_p T_k^*} \eta_r.$$

Критерий $\frac{Wd}{\rho U}$ представляет собой отношение двух времен $\frac{\tau_n}{\tau_r}$. Здесь

$\frac{d}{U} = \tau_n$ — характерное время пребывания топливовоздушной смеси (ТВС) в камере сгорания, $\frac{\rho}{W} = \tau_r$ — время горения. Таким образом, критерий $\frac{Wd}{\rho U}$ характеризует напряженность процессов и определяет эффективность реализации энергии ТВС, поскольку $\eta_r = f\left(\frac{\tau_n}{\tau_r}\right)$ [11].

Тогда связь между степенью подогрева и критериями подобия процессов может быть представлена в виде

$$\theta = F\left(\frac{Wd}{\rho U}; \frac{q}{C_p T_k^*}\right) = 1 + \frac{H_u q_r}{C_p T_k^*} \cdot f\left(\frac{Wd}{\rho U}\right)$$

Рассмотрим подробнее критерий $\frac{Wd}{\rho U}$. Считая газовую смесь в зоне горения стехиометрической, можно записать скорость химической реакции в виде [8, 9]

$$W = K_0 \cdot e^{-\frac{E}{R_\mu T}} \cdot C^n$$

В данной формуле энергия активации E имеет постоянное значение (~ 80 МДж/моль), величина K_0 может слабо зависеть от температуры T . Для всех реакций в пределах ошибок эксперимента можно пользоваться приближенной формулой [8]

$$K_0 = K T^a,$$

где $K = \text{const}$, $a = \text{const}$ и $0 \leq a \leq 1$.

Тогда $W = K \cdot T^a \cdot e^{-\frac{E}{R_\mu T}} \cdot C^n$

Поскольку $C = \rho \cdot x$ и $\rho = \frac{P}{RT}$, записываем

$$\begin{aligned} \frac{Wd}{\rho U} &= \frac{K \cdot T^a \cdot e^{-\frac{E}{R_\mu T}} \cdot (\rho \cdot x)^n \cdot d}{\rho \cdot U} = \frac{K \cdot T^a \cdot e^{-\frac{E}{R_\mu T}} \cdot \rho^{n-1} \cdot x^n \cdot d}{U} = \\ &= \frac{K \cdot T^a \cdot e^{-\frac{E}{R_\mu T}} \cdot P^{n-1} \cdot x^n \cdot d}{R^{n-1} \cdot T^{n-a-1} \cdot U} = \frac{K \cdot x^n}{R^{n-1}} \cdot \frac{e^{-\frac{E}{R_\mu T}} \cdot P^{n-1} \cdot d}{T^{n-a-1} \cdot U} \end{aligned}$$

В случае применения одного топлива ($K, R, x = \text{idem}$) получаем:

$$\frac{Wd}{\rho U} \sim e^{-\frac{E}{R_\mu T}} \cdot \frac{P^{n-1} \cdot d}{T^{n-a-1} \cdot U},$$

причем было установлено [7, 9], что экспериментальные данные лучше всего обобщаются при значении $n = 1,8$, $a = 0,5$.

Критерий имеет размерную форму, т.к. параметры, дополняющие его до безразмерной величины, остаются одинаковыми. В дальнейшем возможна разработка вида константы делающей критерий безразмерным.

Как отмечается [10] рассмотрение задачи с точки зрения распространения пламени привело бы к идентичной зависимости.

В окончательном виде:

$$\theta = F\left(\frac{e^{-\frac{E}{R_u T}}}{T^{n-2-1}} \cdot \frac{P^{n-1} \cdot d}{U}, \frac{q}{C_p \cdot T_k^*}\right) = 1 + \frac{H_u \cdot q_r}{C_p \cdot T_k^*} \cdot f\left(\frac{e^{-\frac{E}{R_u T}}}{T^{n-2-1}} \cdot \frac{P^{n-1} \cdot d}{U}\right)$$

Имеется целый ряд исследований [8, 7, 11, 13, 14], посвященных вопросу выбора критериев моделирования процессов, происходящих в камерах сгорания ГТД. Можно отметить следующие критерии отечественных и зарубежных авторов:

$$\begin{aligned} \text{Вудворд} & - \frac{G}{P^{1,65} \cdot d^3}; & \text{Дорошенко} & - \frac{G}{P^2 \cdot T^{1,55} \cdot d^3}; \\ \text{Сторожук} & - \frac{G}{P \cdot T \cdot (U\gamma)^{0,75} \cdot d^3}; & \text{Лефевр} & - \frac{G}{P^2 \cdot V \cdot e^{\frac{T}{300}}}; \\ \text{Сполдинг} & - \frac{G(T_a - T)}{P^{1,8} \cdot T^{1,6} \cdot V}. \end{aligned}$$

Все эти комплексы можно свести к виду $\frac{U}{P^{n-1} \cdot T^m \cdot d}$, который является частным случаем полученного критерия $\frac{Wd}{\rho U}$.

Так, в работе [11] показано, что $K_v = f\left(\frac{\tau_u}{\tau_r}\right) = \frac{G}{P^2 \cdot T^{1,55} \cdot d^3}$. Учитывая, что $G = \rho U \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ и $\rho = \frac{P}{RT}$, параметр форсирования может быть сведен к виду: $K_v = \text{const} \frac{U}{P \cdot T^{2,55} \cdot d}$.

Для бимолекулярной реакции, характерной для горения углеводородных топлив, порядок реакции $n \approx 2$. Для процессов, идущих при одинаковых температурных условиях ($T = \text{idem}$) имеем:

$$K_v = \text{const}_1 \cdot \frac{U}{P \cdot d} \sim \text{const}_2 \cdot \frac{P^{n-1} \cdot d}{U} \quad (\text{при } n = 2).$$

Следовательно, указанные критерии одинаково отражают процессы, описываемые соотношением характеристических времен.

Необходимо заметить, что перечисленные критерии имеют эмпирический характер, поскольку получены в результате обобщения экспериментальных результатов. В силу этого обстоятельства указанные критерии имеют пределы применения, ограниченные конструкцией и режимом работы КС.

Данные критерии рассматриваются во взаимосвязи с безразмерными параметрами (симплексами): при исследовании процессов выгорания – с коэффициентом полноты сгорания топлива, стабилизации пламени – с коэффициентом избытка воздуха и т.д., что не позволяет провести анализ совместной работы узлов турбокомпрессора.

Критерии, предлагаемые авторами, лишены указанных недостатков, т.к. получены физически строгим методом. Установленная авторами взаимосвязь между параметрами подобия подразумевает более общий случай и большую глубину изучения явления.

Введенное авторами понятие ОХКС требует дополнительных пояснений. Очевидно, что ОХКС является ее паспортом. При соответствующем наборе статистики вид ОХКС, ее характерные признаки, будут четко связываться специалистами с типом КС (высоко- или низкотемпературная, кольцевая или трубчатая, одно или двухзонная, малоразмерная или большой размерности и т.д.). Более того, можно предположить, что для КС одного и того же типа ОХ будут существенно различаться при изменении важнейших структурных элементов конструкции КС: фронтального устройства, задающего качество подготовки ТВС, закона подвода воздуха вдоль ЖТ и ее объема. Естественно, что набор статистики подразумевает прежде всего испытания КС, т.е. эксперимент.

Но введение понятия ОХКС намечает пути и более строгого математического моделирования ее рабочего процесса, следовательно, и более точного расчета ее показателей, например, наиболее актуальных в настоящее время показателей экологичности работы КС на том или ином режиме.

Выбросы вредных веществ из КС формируются в ее зоне горения. Даже имея матмодель этой зоны достаточно высокого уровня, можно потерять эффект от ее применения, задавая неверные начальные и граничные условия. А эти условия определяются работой фронтального устройства, интенсивностью холодных слоев газа у стенок ЖТ, струй в зоне балластирования (в газосборнике) и т.д. Те или иные результаты работы зоны горения, например выбросы окислов азота, должны рассчитываться в поле параметров, точно определяющих режим работы КС. Тогда можно задать режимные параметры для ее узлов и, учитывая их совместную работу, точнее задавать граничные и начальные условия для координации параметров режима работы каждого из этих узлов.

И, наконец, задача оптимизации режима работы КС и в целом ГТД. Как бы ни были важны экологические показатели, требование их выполнения не снимает с разработчиков КС обязанность обеспечивать необходимые уровни эффективности и надежности. Очевидно, что наличие ОХКС существенно упрощает поиск оптимального конструктивного решения, либо регулирования работы КС.

Результаты экспериментальных исследований на модели КС по обработке внешнего вида ОХКС представлены на рисунке. Эксперимент проводился при условии постоянной температуры на входе в камеру

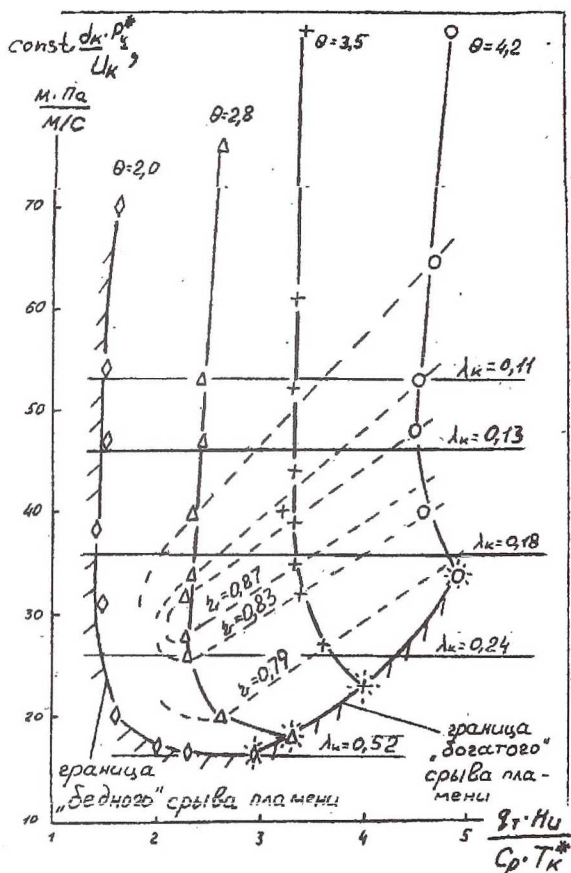


Рис. Обобщенная характеристика модели камеры сгорания ГТД

$$\left(\frac{E}{R_{\mu} T} \right) \cdot \frac{e}{T^{n-1}} = \text{const}$$

Полученная ОХ в отличие от частных, позволяет выявить некоторые особенности протекания рабочих процессов в модели КС. Очевидно, что данные особенности являются общими и могут быть перенесены на натурные объекты.

Поле ОХКС образовано границами срыва пламени (устойчивого горения). Следует рассмотреть подробнее характер расположения границ «богатого» и «бедного» срыва

ва пламени. Граница «богатого» срыва пламени расположена параллельно изолиниям η_r и находится на изолинии $\min \eta_r$. Можно утверждать, что «богатый» срыв пламени наступает при таком уровне η_r , при котором выделяющегося тепла становится недостаточно для подогрева вновь поступающей в зону горения свежей ТВС. В отличие от «богатого» граница «бедного» срыва пламени проходит по изолинии \min степени подогрева газа θ_{\min} . В этом случае срыв пламени наступает также вследствие недостаточности выделившегося тепла, но не вследствие низкой полноты сгорания, а по причине низкой температуры химической реакции.

Рассмотрение характера расположения изолиний θ и η_r показывает следующее: \max уровень η_r наблюдается в точке перегиба изолинии θ (вертикальная касательная), что видно из графика и легко подтверждается теоретически. Запишем уравнение сохранения энергии потока от сечения «к» (вход в КС) до сечения «г» (выход из КС):

$$G_b \cdot C_{pb} \cdot T_k^* + G_r \cdot H_u \cdot \eta_r = (G_b + G_r) \cdot C_{pr} \cdot T_r^*$$

разделим уравнение на $G_b \cdot C_{pb} \cdot T_k^*$:

$$1 + \frac{G_r \cdot H_u}{G_b \cdot C_{pb} \cdot T_k^*} \cdot \eta_r = \frac{G_b + G_r}{G_b} \cdot \frac{C_{pr} \cdot T_r^*}{C_{pb} \cdot T_k^*}$$

или

$$\frac{q_r \cdot H_u}{C_{pb} \cdot T_k^*} \cdot \eta_r = (1 + q_r) \cdot \frac{C_{pr}}{C_{pb}} \cdot \theta - 1$$

Считая $1 + q_r \approx 1$, можно записать: $\text{const} \cdot \theta = \frac{q_r \cdot H_u}{C_{pb} \cdot T_k^*} \cdot \eta_r$, что означает — чем выше η_r , тем меньше необходимо подводить относительной энергии $\frac{q_r \cdot H_u}{C_{pb} \cdot T_k^*}$ к рабочему телу для достижения одной и той же θ и наоборот.

Отсюда следует, что на каждом режиме $\theta = \text{const}$ существует оптимальный режим по $\frac{\tau_n}{\tau_r}$, при котором достигается $\max \eta_r$, т.е. $\min \frac{q_r \cdot H_u}{C_{pb} \cdot T_k^*}$. В обе стороны от этой точки η_r уменьшится — в случае больших значений τ_n ($\tau_n \gg \tau_r$) из-за вялого массопереноса вследствие низких скоростей потока; в случае малых значений τ_n ($\tau_n = \tau_r$) из-за плохой стабилизации пламени, вследствие чрезмерной турбулентности, вызванной высокой скоростью потока [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Г.Н. Прикладная гидрогазодинамика. М.: Наука, 1976 – 888 с.
2. Михеев М.А. Основы теплопередачи. М.: ГЭИ, 1956 – 392 с.
3. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива. Л.: Недра, 1980 – 272 с.
4. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. М.: Высшая школа, 1967. – 304 с.
5. Вулис Л.А. Тепловой режим горения. М.: ГЭИ, 1954 – 287 с.
6. Вильямс Ф.А. Теория горения. М.: Наука, 1971 – 616 с.
7. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. М.: Машиностроение, 1984 – 228 с.
8. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания ГТД. М.: Машиностроение, 1984 – 228 с.
9. Кнорре Г.Ф. Топочные процессы. М.: ГЭИ, 1951 – 328 с.
10. Эккерт Э.Р., Дрейк Д.И. Теория тепло- и массообмена. М.: ГЭИ, 1961.
11. Дорошенко В.Е. О процессе горения в камере ГТД. Научные труды ЦИАМ, 1959 – сб. 354, 26 с.
12. Холщевников К.В. и др. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
13. Вудворд. Исследование идеализированных камер сгорания на основе теории подобия. Сб. Вопросы горения, М.: Металлургиздат, 1963.
14. Сторожук Я.П. Исследование работы камер сгорания ГТУ на жидком топливе. М.: Энергомашиностроение, 1962, №3.

УДК 621.43-224.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Ланский А.М.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Применение авиационных двигателей в качестве наземных энергосиловых установок является перспективным направлением решения топливно-энергетических проблем страны. Они, по сравнению со стационарными газотурбинными установками той же мощности, имеют значительные преимущества, такие как компактность, блочность, надежность, автономность, сокращение сроков ремонтных работ и экономию природных ресурсов. В связи с этим ведутся работы по переводу отработавших летный ресурс ГТД в на-