

16. Ковылов Ю.Л., Лукачев С.В., Цыганов А.М. Структура методологии проектирования и доводки камеры сгорания ГТД // Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели: Тезисы докл. X Всероссийск. межвузовск. научн.-техн. конф. – М.: ГПНТБ, 1996. – с. 130...131.
17. Ковылов Ю.Л., Лукачев С.В., Цыганов А.М. Методология проектирования камер сгорания ГТД, ГТУ / Процессы горения и охрана окружающей среды: Сб. трудов. / РГАТА: Под ред. Ш.А. Пиралишвили. – Рыбинск. 1997. – Ч. 2. – с. 28...31.
18. Прегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ: Учебное пособие, – М.: Высшая школа, 1989. – 367 с.
19. Черкез А.Я. Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений. – М.: Машиностроение, 1975. – 379 с.
20. Ковылов Ю.Л., Лукачев С.В., Цыганов А.М. Обобщенная характеристика камеры сгорания ГТД // Наука и техника гражданской авиации на современном этапе: Тезисы докладов. – М.: МГТУ ГА, 1994. – с. 162...163.
21. Лукачев С.В., Крашенинников С.В., Ковылов Ю.Л., Цыганов А.М. Понятие обобщенной характеристики камеры сгорания газотурбинного двигателя (ГТД) // Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе: Тезисы докл. междунар. науч.-техн. конференции. – Самара: СГАУ, 1997. – с. 127...128.
22. Крашенинников С.В., Лукачев С.В. Решение задачи об обобщенной характеристике камеры сгорания ГТД методом теории подобия. (В этом сборнике).'
23. Особенности технологии получения обобщенной характеристики камеры сгорания ГТД: Отчет о НИР / СГАУ. Рук. С.В. Лукачев. Тема 31в-Б021-049. Самара, 1996. – 102 с.
24. Longwell J.P., Frost E.E., Weiss M.A. Flame Stability of Bluff-Body Recirculation Zones. Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 45, p. 1629, 1953.
25. Longwell J.P., Weiss M.A. Heat Release Rates in Hydrocarbon Combustion. I. Mech. E. / ASME Joint Conference on Combustion, pp. 334...340, 1955.
26. С полдинг Д.Б. Горение и массообмен / Пер. с англ. // Под ред. В.Е.Дорошенко. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
27. Ковылов Ю.Л., Пашков Д.Е. Учет потерь энергии в рабочем процессе камер сгорания ГТД (в этом сборнике).
28. Цыганов А.М. Исследование характеристик модульных вихревых горелок / Труды 3-й НТК молодых ученых и специалистов. / КуАИ. – Куйбышев. – Рук. деп. в ВИНТИ. – № 2077-85ДЕП. –10 с.

УДК 621.452.32.068 : 643.272.75.05

УЧЕТ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В РАБОЧЕМ ПРОЦЕССЕ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

Ковылов Ю.Л., Пашков Д.Е.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Весь, достаточно широкий спектр требований, предъявляемых к камерам сгорания (КС) ГТД, можно свести в три характерные группы (ЭНЭ):

1. Требования, связанные с эффективностью (Э) работы КС и двигателя.
2. Требования обеспечения надежности (Н) работы данного узла.
3. Экологические (Э) требования.

Поскольку мероприятия, обеспечивающие выполнение тех или иных требований зачастую противоречат друг другу, процесс создания КС (как, впрочем, и любого другого технического объекта) является процессом поиска компромисса требований ЭНЭ. Область компромиссов удобно отыскивать и отображать в поле обобщенной характеристики КС [1], где для этого должны быть нанесены изолинии обобщенных показателей эффективности, надежности и экологичности.

В данной статье рассматривается возможность использования в качестве обобщенного показателя эффективности работы КС ее коэффициента полезного действия (КПД) – $\eta_{\text{КС}}$. Обращение к этому понятию, которое в настоящее время не применяется в практике исследований и разработки КС, объясняется тем, что КС является узлом-энергопреобразователем. А, как известно, эффективность преобразования одного вида энергии в другой следует оценивать именно величиной КПД.

1. ПОНЯТИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД

Можно показать, что неиспользование КПД специалистами в области КС ГТД связано с неопределенностью многих составляющих, которые входят в уравнение сохранения энергии в КС.

Тепловой баланс от входа (сеч. К) до выхода (сеч. Г) из КС

$$\begin{aligned} (G_{\text{в}} - G_{\text{ут}}) \cdot i_{\text{к}}^* + G_{\text{т}} \cdot (H_{\text{и}} - \Delta Q_{\text{физ}} - \Delta Q_{\text{хим}} - \Delta Q_{\text{NOx}}) - \Delta Q_{\text{т.о}} \cdot G_{\text{в}} = \\ = (G_{\text{в}} + G_{\text{т}} - G_{\text{ут}}) \cdot i_{\text{г}}^* \end{aligned} \quad (1)$$

на основе которого вводят понятие коэффициента полноты тепловыделения в КС:

$$\eta_{\text{КС}} = 1 - \sum_i \frac{\Delta Q_i}{Q_0} \quad (2)$$

включает следующие потери энергии:

$G_{\text{ут}}$ – утечки массы, следовательно, и энергии, через негерметичности фланцевых разъемов;

$\Delta Q_{\text{физ}}$ – энергия, которая не успела выделиться в КС из-за физического недожега горючих веществ – жидких углеводородов C_nH_m и сажи C ;

$\Delta Q_{\text{хим}}$ – учитывает недожег продуктов неполного сгорания – CO , H_2 и газообразных углеводородов;

ΔQ_{NOx} – учитывает поглощение тепла в эндотермических реакциях образования окислов азота. Впервые оценка величины ΔQ_{NOx} выполнена в работе [2]. Для ГТД, имеющих современные параметры цикла, потери энергии, связанные с образованием окислов азота, составляют в среднем около 0,1%;

$\Delta Q_{\text{то}}$ – потери тепла через корпус КС за счет теплообмена с окружающей средой.

Уже в первом члене уравнения (1) обе величины: G_B – расход воздуха через КС (точнее через ее жаровую трубу) и G_{YT} при испытании этого узла в составе двигателя не могут быть измерены. Величина G_{YT} не измеряется и при автономном испытании КС. Правая часть уравнения состоит из двух неопределенностей:

- 1) расход продуктов сгорания через сечение Γ – $(G_B + G_T - G_{\text{YT}})$;
- 2) энтальпия рабочего тела в этом сечении

$$i_{\Gamma}^* = \int_{T_0}^{T_{\Gamma \text{ ср.м}}^*} C_p(\alpha, T_{\Gamma \text{ ср.м}}^*) dT \quad (3)$$

Неопределенность величины i_{Γ}^* состоит в том, что точность вычисления среднemasсовой температуры $T_{\Gamma \text{ ср.м}}^*$ зависит от правильности применяемого способа осреднения параметров в сечении Γ . Помимо этого величина теплоемкости C_p зависит от состава газа, т.е. α и недожега, а состав газа зависит от $T_{\Gamma \text{ ср.м}}^*$.

Из сказанного видно, что даже тепловой баланс для КС ГТД точно составить пока не удастся. Кроме того, необходимо отметить еще одну особенность введения понятия КПД КС. Если бы даже удалось вычислить точное значение правой или левой части уравнения (1), а затем отнести эту величину к энергии, внесенной в КС с топливо-воздушной смесью, то полученное таким образом значение КПД оказалось бы завышенным. Дело в том, что в уравнение теплового баланса не могут быть включены еще некоторые составляющие, которые учитывают снижение работоспособности газа, протекающего через КС.

Если бы газ на выходе из КС предназначался для выполнения роли теплоносителя, то энтальпия в правой части уравнения (1) служила бы мерой полезной энергии, полученной как результат рабочего процесса КС. Но от продуктов сгорания на выходе из этого узла требуется совершение механической работы, которую невозможно получить, если газ не обладает запасом потенциальной механической энергии – давлением. Как известно, при протекании газа через тракт КС этот потенциал снижается ($P_{\Gamma}^* < P_{\kappa}^*$), т.е. снижается его работоспособность. При формировании понятия КПД КС это снижение требуется учесть.

Известно также, что в выходном сечении КС параметры газа (p, T, w) имеют, как правило, существенную неравномерность. Будем считать, что $\eta_{\text{КС}}=1$, если кроме отсутствия всех прочих потерь поле параметров рабочего тела в сечении Г-Г совершенно однородно и уровень температуры T_{Γ}^* соответствует заданной по ТЗ величине. На самом деле КС в силу многих причин имеет поле T_{Γ}^* со значительной неравномерностью (до 20% и более у мало-размерных ГТД). Техническому заданию в таком случае соответствует лишь некоторая величина среднemasсовой температуры $(T_{\Gamma}^*)_{\text{ср.м.}}$. Проводя некоторую математическую операцию осреднения T_{Γ}^* , мы должны учитывать, что действительное осреднение (выравнивание) параметров потока будет происходить за пределами КС в тракте турбины и сопла. При этом на сам процесс выравнивания также необходимо затратить некоторую энергию, которая не

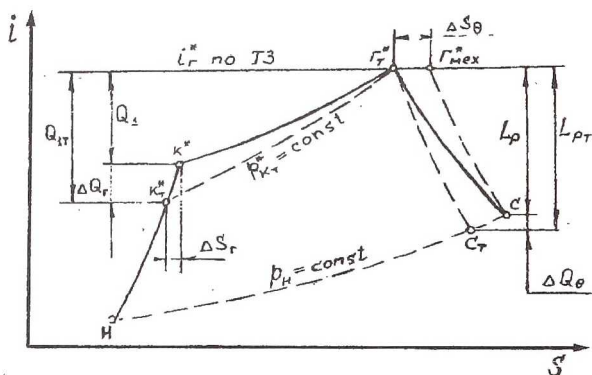


Рис. 1. Потери работоспособности газа при реализации термодинамического процесса в камере сгорания

будет реализована в виде работы процесса расширения. Известно [3], что при осреднении параметров неравномерного потока его энтропия возрастает. В i - S диаграмме (рис. 1) это можно представить как сдвиг теоретического процесса расширения $\Gamma^* - C_{\Gamma}$ на величину ΔS_{Θ} – прирост энтропии в условном изотермическом процессе $(T_{\Gamma}^*)_{\text{ср.м.}} = \text{const}$ выравнивания температуры

по массе рабочего тела. В этом случае недоиспользуется энергия в процессе расширения $\Delta Q_{\ominus} = L_{\text{пр}} - L_{\text{р}}$.

Таким образом, уравнение теплового баланса не отражает в полной мере всех особенностей преобразования энергии в КС, которые необходимо учитывать при формировании понятия КПД:

$$\eta_{\text{КС}} = I_{\text{г мех}}^* / Q_0 \quad (4)$$

Здесь $I_{\text{г мех}}^*$ – часть полной энтальпии продуктов сгорания $I_{\text{г}}^*$, которая может быть превращена в механическую энергию. Q_0 – энергия, внесенная в КС с топливо-воздушной смесью:

$$Q_0 = G_{\text{т}} \cdot H_{\text{u}} + G_{\text{в}} \cdot i_{\text{к}}^* = I_{\text{твс}}^*$$

Причем теплотворная способность топлива в соответствии с [4]

$$H_{\text{u}} = H_{\text{u0}} + \Delta H_{\text{т}} + \delta \quad (5)$$

Здесь H_{u0} – табличное значение теплотворной способности; $\Delta H_{\text{т}}$ – тепло, подведенное к топливу на его пути из бака до форсунки (обычно $\Delta H_{\text{т}} = 60 \dots 80$ кДж/кг); δ – поправка, учитывающая температуру, при которой реализуется теплотворная способность

$$\delta = L_0 \cdot (i_{\text{в}}^*(\text{к}) - i_{\text{в}}^*(0)) - (1 + L_0) \cdot (i_{\text{г}}^*(\text{к}) - i_{\text{г}}^*(0))_{\alpha=1}$$

Индекс "к" – соответствует $T_{\text{к}}^*$, а индекс "0" – температуре, при которой была определена величина H_{u0} (обычно $T_0^* = 293$ К).

Следовательно, в самом общем случае выражение для КПД КС

$$\eta_{\text{КС}} = 1 - \sum_i \frac{\Delta Q_i}{Q_0} - \sum_k \frac{\Delta Q_k}{Q_0} \quad (6)$$

должно включать в себя величины: $\Delta Q_{\text{в}}$ – потери энергии, которые входят в уравнение теплового баланса; $\Delta Q_{\text{к}}$ – потери работоспособности газа после его «участия» в рабочем процессе КС.

Задача сводится к разработке способа расчета или суммарного учета всех составляющих ΔQ_i и ΔQ_k .

На основе изложенных выше соображений

$$I_{\text{г мех}}^* = Q_0 - \sum_i \Delta Q_i - \Delta Q_{\text{гидр}} - \Delta Q_{\ominus} \quad (7)$$

В (7) $\Delta Q_{\text{гидр}}$ – снижение работоспособности газа из-за неизобаричности КС; $\Delta Q_{\text{е}}$ – снижение работоспособности газа из-за неравномерности поля температур в выходном сечении.

Поскольку $Q_0 = I_{\text{твс}}^*$, то

$$Q_0 - \sum_i \Delta Q_i = I_{\text{г}}^*$$

полная энтальпия газа в выходном сечении КС, которая может быть достаточно точно рассчитана по формуле (3) при выполнении следующих условий:

1. $T_{\text{г ср.м}}^*$ – результат компьютерной обработки и осреднения представительного поля температур [5].
2. Энтальпия продуктов сгорания рассчитывается как энтальпия смеси индивидуальных веществ при заданной температуре

$$(i_{\text{г}}^*)_{\text{см}} = \frac{1}{\mu_{\text{см}}} \cdot \sum_j (i_{\text{г.м}}^*)_j \cdot \Gamma_{j,\text{г}}, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}, \quad (8)$$

где $\mu_{\text{см}}$ – молекулярная масса смеси

$$\mu_{\text{см}} = \sum_j \mu_j \cdot \Gamma_{j,\text{г}},$$

а $\Gamma_{j,\text{г}}$ – объемная доля j -го индивидуального вещества в смеси. Один из возможных способов расчета величин $\Gamma_{j,\text{г}}$ с учетом продуктов неполного сгорания при $\alpha_{\text{КС}} > 1$ изложен в данной статье.

Величина $\Delta Q_{\text{гидр}}$ учитывает те потери работоспособности газа, которые обычно фиксируются с помощью коэффициента сохранения полного давления

$$\sigma_{\text{КС}} = \frac{P_{\text{г}}^*}{P_{\text{к}}^*} = \frac{P_{\text{к}}^* - \Delta P_{\text{КС}}^*}{P_{\text{к}}^*} = 1 - \frac{\Delta P_{\text{КС}}^*}{P_{\text{к}}^*}$$

Суть их в том, что при отсутствии гидравлического сопротивления в КС (идеализированная схема) $\sigma_{\text{КС}} = 1$ и термодинамический процесс в этом узле протекает по изобаре $K_{\text{г}}^* - \Gamma_{\text{г}}^*$ (рис. 1, пунктир). При этом в КС к рабочему телу подводится тепло $Q_{1\text{г}}$. Поскольку в реальной КС $\sigma_{\text{КС}} < 1$, для достижения в конце камеры параметров, соответствующих той же точке Γ^* , в ее входном сечении приходится обеспечивать повышенное давление

$$P_{\text{к}}^* = \frac{P_{\text{г}}^*}{\sigma_{\text{КС}}} = \frac{P_{\text{к.т}}^*}{\sigma_{\text{КС}}}$$

На дополнительное повышение давления затрачивается дополнительная работа компрессора в процессе сжатия $\Delta L_{сж}$, которую и можно считать гидравлическими потерями энергии в КС — $\Delta Q_{гидр}$ (рис. 1), поскольку именно на эту величину снижается количество энергии, подведенной к рабочему телу в КС:

$$Q_1 = Q_{1T} - \Delta Q_{гидр}$$

Таким образом, неизобарность КС приводит к увеличению энтропии ΔS_T в процессе сжатия.

Величина $\Delta Q_{гидр}$ при испытании двигателя может быть рассчитана следующим образом:

$$\Delta Q_{гидр} = \Delta L_{сж} = L_{сж} - (L_{сж})_T = \frac{i_v^*}{\eta_{сж}} \cdot \left(\pi_{сж}^{\frac{k-1}{k}} - \pi_{сж,T}^{\frac{k-1}{k}} \right),$$

где $\pi_{сж} = P_K^*/P_h$, а $\pi_{сж,T} = P_{KT}^*/P_h = \frac{P_K^* \cdot \sigma_{КС}}{P_h}$. В результате

$$\Delta Q_{гидр} = \frac{i_v^*}{\eta_{сж}} \cdot \pi_{сж}^{\frac{k-1}{k}} \cdot (1 - \sigma_{КС}^{\frac{k-1}{k}}) \quad (9)$$

Задача вычисления величины ΔQ_{\ominus} сводится к разработке способа осреднения поля температур газа с учетом роста энтропии потока продуктов сгорания при реальном осреднении его параметров в каналах турбины и сопла ГТД. Возможный способ решения этой задачи с использованием понятия эксергии изложен в работе [5]. Конечный результат ($I_{поля}$)_{экс} операции осреднения поля T_T^* с учетом потерь эксергии ΔQ_{\ominus} при подстановке в (7) дает искомую величину

$$I_{T^*}^{*мех} = (I_{поля})_{экс} - \Delta Q_{гидр},$$

по которой может быть вычислен КПД КС (4).

2. РАСЧЕТ ЭНТАЛЬПИИ I_{T^*} С УЧЕТОМ НЕПОЛНОГО СГОРАНИЯ ТОПЛИВА ПРИ $\alpha_{КС} \geq 1$

Степень завершенности химических реакций окисления углеводородов интегрально оценивается в (1) двумя составляющими — $\Delta Q_{физ}$ и $\Delta Q_{хим}$. Остальные величины ($\Delta Q_{то}$, $\Delta Q_{нож}$, $\Delta Q_{утеч}$) к появлению продуктов недожега топлива на выходе из КС напрямую отношения не имеют. Принимая эту пред-

посылку за основу, можно теоретически представить следующую схему, связывающую полноту тепловыделения в КС (2), недожег топлива и условия его возникновения.

Предположим, что на основе измерений при испытании КС и с использованием некоторых разработанных методов есть возможность рассчитать все составляющие ΔQ_i в уравнении (2). Если допустить, что процесс «замораживания» равновесного состава продуктов сгорания происходит мгновенно в некотором сечении $X_{зм}$ по длине ЖТ, то при наличии кривой выгорания для данной КС величину α_i , соответствующую тому количеству воздуха, которое было введено в ЖТ до сечения $X_{зм}$, можно определить так, как это показано на рис. 2 (линия А). Для этой операции кривую выгорания следует строить не

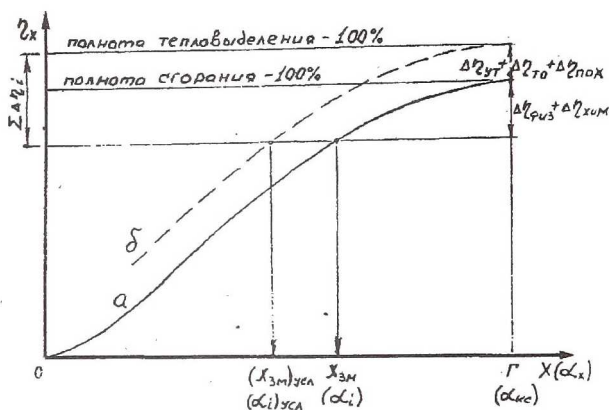


Рис. 2. Выгорание топлива и выделение тепла в зависимости от изменения величины α вдоль жаровой трубы

по длине ЖТ, а по нарастанию в ней коэффициента α , как это сделано в работе [6]. Здесь употреблен термин «кривая выгорания», а не обычно применяемый «закон тепловыделения по длине ЖТ», поскольку такого рода экспериментальные

кривые обычно получают газовым анализом продуктов сгорания, отбираемых в разных точках по длине ЖТ. Очевидно, что в таких условиях измеряется именно «полнота сгорания», точнее — $\Delta Q_{хим}$, а иногда и $\Delta Q_{физ}$.

Численно $\Delta Q_{хим}$ и $\Delta Q_{физ}$ представляют собой энергию, которая не выделилась из-за того, что процесс горения был прерван (химические реакции «заморожены» при $\alpha = \alpha_{зм}$), т.е. не завершилось полностью расходование воздуха от $\alpha = 0$ до $\alpha = 1$. Если знать состав газа в сечении $X_{зм}$, то по тепловым эффектам химических реакций доокисления продуктов неполного сгорания можно вычислить $\Delta Q_{хим}$ и $\Delta Q_{физ}$. И наоборот, зная величину $\Delta Q_{хим} +$

$+\Delta Q_{\text{физ}}$, можно подобрать состав газа, который при доокислении выделит эту энергию.

Будем считать, что сумма всех видов потерь энергии ΔQ_i в уравнении (1) имеет своей причиной только химический недожег топлива, т.е. незавершенность химических реакций. Тем самым по физическому смыслу уравниваются два понятия: «полнота тепловыделения» и «полнота сгорания». Уравниваются они и количественно, при этом уровень отсчета 100% полноты сгорания повышается до уровня 100% η_r (рис. 2 линия Б). В этом случае недобор η_r ($\Sigma \Delta \eta_i$) имеет своей причиной только недовыделение тепла продуктами неполного сгорания, «замороженными» в некотором сечении $(X_{\text{зм}})_{\text{усл}}$.

Поскольку предполагается, что в этом сечении топливо и воздух не успели прореагировать полностью, то количество воздуха, израсходованного в химических реакциях, соответствует коэффициенту $\alpha_{\text{зм}} < 1$. При этом количество воздуха, поступившего в ЖТ до этого сечения, соответствует $(\alpha_i)_{\text{усл}} > (\alpha_{\text{зм}})_{\text{усл}}$. В произвольном случае $(\alpha_i)_{\text{усл}}$ может быть и больше 1. Следовательно, в сечении "Г" состав газа будет представлять собой сумму веществ, полученных в химических реакциях при $\alpha_{\text{зм}} < 1$ и воздуха, соответствующего разнице $\alpha_{\text{кв}} - \alpha_{\text{зм}}$. Таким образом, задача состоит в том, чтобы отыскать величину коэффициента избытка воздуха $\alpha_{\text{зм}}$ и соответствующий ему состав газа в сечении "Г", теплофизические параметры которого при расчетах η_r дадут величину $1 - \Sigma \Delta \eta_i$.

Быстрые химические реакции (пламя) протекают в ЖТ в микрообъемах с $\alpha \approx 1$. В этих условиях развивается температура, достаточная для возникновения реакций диссоциации. Следовательно, равновесный состав смеси газов, реагирующей в КС ГТД, должен рассчитываться с учетом изменяющихся условий (температуры и концентрации реагентов), наличия процессов диссоциации и рекомбинации, а также наличия определенного закона подвода воздуха в ЖТ. Такого рода расчеты выполняются при проектировании КС жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) [7, 8]. Отличие для КС ГТД заключается в том, что воздух вводится в зону горения с определенной закономерностью вдоль оси ЖТ, в то время как в КС ЖРД реагенты поступают, как правило, полным расходом в нулевом (начальном) сечении. Будем считать, что разработка метода расчета, совмещающего в себе разделы из теории ЖРД и особенности организации рабочего процесса в КС ГТД, представляет некоторую перспективную задачу.

В данной работе для компоновки всей схемы расчета величин $\eta_{кс}$, $T_г^*$, $\alpha_{кс}$ принято промежуточное решение, т.е. принят как рабочий вариант приближенный метод определения состава продуктов сгорания углеводородного топлива при $\alpha < 1$, предложенный в свое время сотрудником Ленинградской военно-воздушной академии Плешановым И.А. [9]. Метод, даже без учета диссоциации, обеспечивает удовлетворительную для расчета теплофизических свойств точность. В нем принято, что в состав газа при неполном сгорании входят следующие составляющие: CO_2 , H_2O , CO , H_2 и N_2 . На основе балансовых уравнений получены выражения для расчета количества компонентов смеси газа:

оксида углерода (кмоль CO /кг топл)

$$M(CO) = 2 \cdot \frac{1-\alpha}{1+k} \cdot 0,209 \cdot L_0 ; \quad (10)$$

углекислого газа (кмоль CO_2 /кг топл)

$$M(CO_2) = \frac{C}{12} - M(CO) ; \quad (11)$$

- водорода (кмоль H_2 /кг топл)

$$M(H_2) = k \cdot M(CO) ; \quad (12)$$

- водяного пара (кмоль H_2O /кг топл)

$$M(H_2O) = \frac{H}{2} - M(H_2) ; \quad (13)$$

азота (кмоль N_2 /кг топл)

$$M(N_2) = 0,791 \cdot \alpha \cdot L_0 . \quad (14)$$

Здесь k – коэффициент, связанный с водородным числом топлива и равный отношению $M(CO)/M(H_2)$. В расчетах поршневых двигателей обычно считается, что k – приблизительно постоянная величина, однако проверка этого предположения по справочнику [10] для сочетания «керосин – воздух» показала, что существует зависимость $k = f(\alpha)$, которую можно аппроксимировать выражением

$$k = 1,9993 \cdot \alpha^2 - 4,148 \cdot \alpha + 2,3352 . \quad (15)$$

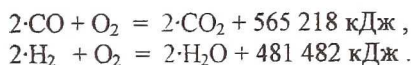
L_0 – теоретически необходимое количество молей воздуха для полного сгорания единицы массы топлива :

$$L_0 = \frac{1}{0,209} \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right),$$

где С, Н и О – массовые доли углерода, водорода и кислорода в 1 кг топлива.

Поскольку во всех вариантах расчета предполагается метод последовательных приближений, то в любой постановке задачи величина η_r в процессе расчета будет присутствовать, либо как заданная, либо как некоторое промежуточное значение для текущего приближения. Исходя из этого, а также используя выражения (10) и (12) для продуктов неполного сгорания и понятие $k(\alpha)$, можно найти связь между η_r , $\alpha_{зм}$ и соответствующим ему составом газа.

Выше было принято допущение, что в выражении (2) величина $\Sigma \Delta \eta_i = \Delta Q_i / Q_0$ зависит только от количества продуктов недожога топлива, «замороженных» в сечении $X_{зм}$. Следовательно, ΔQ – это количество энергии, невыделенной из-за недогорания СО и Н₂. Тепловые эффекты соответствующих химических реакций известны:



Таким образом, в расчете на 1 кмоль $(\Delta Q)_{\text{CO}} = 282\,609$ кДж/кмоль и $(\Delta Q)_{\text{H}_2} = 240\,741$ кДж/кмоль, а на 1 кг топлива

$$\Delta Q = [(\Delta Q)_{\text{CO}} \cdot M(\text{CO})_{зм} + (\Delta Q)_{\text{H}_2} \cdot M(\text{H}_2)], \text{ кДж/кг-топл.}$$

Используя коэффициент $k(\alpha)$, это выражение можно преобразовать

$$\Delta Q = M(\text{CO}) \cdot [(\Delta Q)_{\text{CO}} + k(\alpha) \cdot (\Delta Q)_{\text{H}_2}], \text{ кДж/кг-топл.} \quad (16)$$

Величина Q_0 [кДж/кг топл] представляет собой количество энергии, которое может выделиться в случае полного сгорания единицы массы топлива, т.е. $Q_0 = H_u$, поскольку расчет состава газа проводится, исходя из сгорания 1 кг топлива. Подстановка Q_0 и (16) в формулу (2) дает

$$\eta_u = 1 - M(\text{CO})_{зм} \cdot \frac{(\Delta Q)_{\text{CO}} + k(\alpha) \cdot (\Delta Q)_{\text{H}_2}}{H_u}$$

откуда

$$M(\text{CO})_{зм} = \frac{(1 - \eta_r) \cdot H_u}{282609 + 240741 \cdot k(\alpha)} \quad (17)$$

Из (10) при $\alpha = \alpha_{зм}$ получается

$$M(\text{CO})_{\text{ЗМ}} = 0,418 \cdot L_0 \cdot \frac{1 - \alpha_{\text{ЗМ}}}{k(\alpha_{\text{ЗМ}}) + 1},$$

откуда

$$\alpha_{\text{ЗМ}} = 1 - \frac{k(\alpha_{\text{ЗМ}}) + 1}{0,418 \cdot L_0} \cdot M(\text{CO})_{\text{ЗМ}}. \quad (18)$$

В выражениях (17) и (18) согласование между $M(\text{CO})_{\text{ЗМ}}$, $k(\alpha_{\text{ЗМ}})$ и $\alpha_{\text{ЗМ}}$ достигается на основе полинома (15) методом последовательных приближений. Причем в первом приближении можно для простоты принять $\alpha_{\text{ЗМ}} = 1$.

После определения $M(\text{CO})_{\text{ЗМ}}$, состав газа, соответствующий $\alpha_{\text{ЗМ}}$ рассчитывается по формулам:

$$\left. \begin{aligned} M(\text{CO}_2)_{\text{ЗМ}} &= \frac{C}{12} - M(\text{CO})_{\text{ЗМ}}; & M(\text{H}_2)_{\text{ЗМ}} &= k(\alpha_{\text{ЗМ}}) \cdot M(\text{CO})_{\text{ЗМ}}; \\ M(\text{H}_2\text{O})_{\text{ЗМ}} &= \frac{H}{2} - M(\text{H}_2)_{\text{ЗМ}}; & M(\text{N}_2)_{\text{ЗМ}} &= 0,791 \cdot \alpha_{\text{ЗМ}} \cdot L_0. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Суммарное количество молей продуктов сгорания в сечении "X_{ЗМ}":

$$M_{\text{ЗМ}} = M(\text{CO}_2)_{\text{ЗМ}} + M(\text{H}_2\text{O})_{\text{ЗМ}} + M(\text{H}_2)_{\text{ЗМ}} + M(\text{CO})_{\text{ЗМ}} + M(\text{O}_2)_{\text{ЗМ}} + M(\text{N}_2)_{\text{ЗМ}}$$

или

$$M_{\text{ЗМ}} = \frac{(\alpha_{\text{ЗМ}} \cdot L_0 + 1)}{\mu_{\text{ЗМ}}}, \quad \frac{\text{КМОЛЬ}}{\text{КГ - ТОПЛ.}}, \quad (20)$$

где $\mu_{\text{ЗМ}}$ — средняя молекулярная масса продуктов сгорания в этом сечении.

После того, как состав продуктов сгорания в некотором условном сечении "X_{ЗМ}" определен, дальнейший расчет сводится к учету разбавления этого состава дополнительным расходом воздуха, соответствующим разнице $\alpha_{\text{КС}} - \alpha_{\text{ЗМ}}$. Количество воздуха, добавленное от сечения "X_{ЗМ}" до сечения "Г",

$$\Delta G_{\text{в}} = (\alpha_{\text{КС}} - \alpha_{\text{ЗМ}}) \cdot L_0 \cdot G_{\text{Т}},$$

или в расчете на расход топлива $G_{\text{Т}} = 1$ кг/с

$$\Delta G_{\text{в},\mu} = \frac{(\alpha_{\text{КС}} - \alpha_{\text{ЗМ}}) \cdot L_0}{\mu_{\text{в}}}, \quad \frac{\text{КМОЛЬ}}{\text{КГ - ТОПЛ.}}$$

Количество молей кислорода и азота в $\Delta G_{\text{в}}$

$$M(\text{O}_2) = 0,209 \cdot \Delta G_{\text{в},\mu} \quad \text{и} \quad M(\text{N}_2) = 0,791 \cdot \Delta G_{\text{в},\mu} \quad (21)$$

Таким образом, общее количество молей смеси газов в сечении "Г"

$$M_{см} = M_{зм} + M(O_2) + M(N_2), \quad (22)$$

а мольная доля j -го вещества в этой смеси

$$\Gamma_{jr} = \frac{M_j}{M_{см}} \quad (23)$$

После расчета величин Γ_{jr} состав продуктов сгорания в сечении "Г" известен и можно переходить к расчету энтальпии i_r^* .

На определенных этапах развития термодинамических расчетов ГТД (ГТУ) применялся метод средних теплоемкостей, а затем метод расчета теплоемкости C_p продуктов сгорания при некотором фиксированном значении $\alpha_{кс}$ с внесением последующих поправок. Выше отмечалось, что в смеси газов в выходном сечении КС на некоторых режимах работы ГТД могут продолжаться химические реакции окисления и рекомбинации ранее диссоциировавших веществ. В этих условиях i_r^* следует рассчитывать по равновесному составу. Разработка такого метода расчета для КС ГТД в данной работе уже отнесена к разряду перспективных задач, а пока для завершения общей схемы расчета $\eta_{кс}$, T_r^* , $\alpha_{кс}$ выбрано промежуточное решение: расчет «замороженной» теплоемкости $C_{p,r}$, но не средней в некотором интервале температур, а так называемой истинной. Для этого использованы аппроксимации зависимостей энтальпий индивидуальных веществ от температуры, приведенных таблично в справочнике [11]. Расчетные формулы представляют собой полиномы:

$$(i_r^*)_i = A + \sum_i B_i \cdot (T - 0,001)^i, \quad (24)$$

коэффициенты которых представлены в следующей таблице:

Таблица 1. Коэффициенты полиномов расчета энтальпий

	A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆
H ₂	82.914	246.11	-390.4	400.56	-238.93	75.644	-9.8023
H ₂ O	131.61	300.57	-502.91	547.58	-340.32	110.77	-14.631
N ₂	141.4	265.3	-448.11	485.49	-300.91	97.754	-12.892
CO	147.54	264.56	-446.63	485.6	-302.11	98.444	-13.013
CO ₂	160.31	251.04	-320.94	313.3	-186.04	59.234	-7.73
O ₂	155.71	257.32	-423.74	460.36	-288.25	94.647	-12.599

Таким образом, зная состав воздуха и продуктов сгорания $\Gamma_j \Gamma$, можно вычислить их энтальпию по формуле (8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукачев С.В., Ковылов Ю.Л., Цыганов А.М. Элементы теории, расчета и выбора параметров камер сгорания ГТД (в этом выпуске Вестника).
2. Ивлиев А.В. Влияние образования окислов азота на экономичность двигателя. В сб. "Проблемы и перспективы развития двигателестроения в поволжском регионе". Тезисы докл. международной науч. техн. конф., сентябрь 1997. – Самара: СГАУ, 1997. – С.82.
3. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1991 – 597 с.
4. Дорофеев В.М. и др. Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок. – М.: Машиностроение, 1973. – 144 с.
5. Ковылов Ю.Л., Пашков Д.Е., Абрашкин В.Ю., Диденко А.А. Способ осреднения и оценки неравномерности поля температур газа на выходе из камеры сгорания ГТД (в этом сборнике).
6. Безменов В.Я., Тумановский А.Г. Основные рекомендации по методике гидравлического расчета высокофорсированных камер сгорания ГТУ / Теплоэнергетика, 1978. – № 7. – С. 62...64.
7. Теория ракетных двигателей: учебник для студентов высших технических учебных заведений / Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П.; Под ред. В.П. Глушко – М.: Машиностроение, 1989. – 464 с.
8. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Справочник, т. I / Под ред. В.П. Глушко – М.: ВИНТИ АН СССР, 1971. – 266 с.
9. Кулагин И.И. Теория авиационных двигателей легкого топлива. Ч. 1. Л.: Изд. Лен. Краснознам. воен. - возд. инж. акад., 1946. – 287 с.
10. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Справочник, т. III / Под ред. В.П. Глушко. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1973. – 624 с.
11. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник в 2-х томах / Под ред. В.П. Глушко. – М.: Изд. АН СССР, 1962.

УДК 621.45.022 : 621.43.056

СПОСОБ ОСРЕДНЕНИЯ И ОЦЕНКИ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР ГАЗА НА ВЫХОДЕ ИЗ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД

Ковылов Ю.Л., Пашков Д.Е., Диденко А.А., Абрашкин В.Ю.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Величины температуры T_r^* и энтальпии i_r^* являются основным результатом работы камеры сгорания (КС) на каждом режиме. Их значения используются в термогазодинамических расчетах турбины и двигателя в целом, а