

УДК 621.438

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА КОМПОНЕНТОВ В СОСТАВЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА ЭНТАЛЬПИИ ГАЗА, ТЕПЛООВОГО ЭФФЕКТА И ТЕМПЕРАТУРЫ РЕАКЦИИ ГОРЕНИЯ

Лукачѐв С.В., Диденко А.А.

Самарский государственный аэрокосмический университет

В методике эскизного теплогидравлического расчета камер сгорания (КС) ГТД, которая в настоящее время дорабатывается и планируется к использованию в учебном процессе для студенческого курсового и дипломного проектирования, предусматривается расчет температуры газа в поперечном сечении по длине жаровой трубы $T_{жк}$ с учетом испарения жидкого топлива и подмешивания воздуха. В процессе тестирования методики такой расчет нами был выполнен, и неожиданно оказалось, что температура в выходном сечении жаровой трубы не совпадает с заложенной в проекте температурой газа перед турбиной T_T^* и меньше последней на 100...250 К. Анализ возможных причин такой нестыковки привел авторов работы к необходимости проверки точности расчета энтальпии газа $i(T, \alpha)$ с учетом ее зависимости от коэффициента избытка воздуха и, соответственно, состава продуктов сгорания, а также к необходимости проверки выражений и получаемых с их помощью величин теплового эффекта горения $H_u(T_k)$, по которым, в частности, оценивается химическая полнота тепловыделения:

$$\eta = H_u(T_k) / H_{u298} .$$

В настоящее время при проведении термогазодинамических расчетов ГТД широко используются таблицы или номограммы, так называемых, $\pi - i - T$ -функций для воздуха и продуктов сгорания [1] или аппроксимирующие их полиномы. Кроме того, при определении суммарного коэффициента избытка воздуха α_k в камере сгорания под заданную в проекте T_T^* широко используются формулы (18)-(20) из той же работы [1], которые имеют вид:

$$q_T = \frac{\Delta i_B^* \Big|_{T_K^*}^{T_T^*}}{Hu(T_K^*) \cdot \eta_T - (1 + L_0) \cdot \Delta i_{np.cz, \alpha=1}^* \Big|_{T_K^*}^{T_T^*} + L_0 \cdot \Delta i_B^* \Big|_{T_K^*}^{T_T^*}}, \quad (1)$$

$$Hu(T_K^*) = Hu_0 - (1 + L_0) \cdot \Delta i_{np.cz, \alpha=1}^* \Big|_{T_0^*}^{T_K^*} + L_0 \cdot \Delta i_B^* \Big|_{T_0^*}^{T_K^*} + \Delta H_T, \quad (2)$$

где: q_T - относительный расход топлива; L_0 - стехиометрический коэффициент; $\Delta i_{np.cz, \alpha=1}^*$, Δi_B^* - изменения энтальпий соответственно «чистых» продуктов сгорания (при $\alpha=1$) и воздуха в диапазоне температур T_T^* , T_K^* , T_0^* ; T_K^* - температура воздуха на входе в камеру сгорания; T_0^* - температура тех стандартных термодимических условий, при которых определялась низшая теплота сгорания Hu_0 ; ΔH_T - изменение энтальпий топлива от T_0^* до температуры T_T^* - температуры поступления в камеру сгорания. В составе «чистых» продуктов сгорания присутствуют лишь CO_2 , H_2O и атмосферный азот N_{2am} . Конкретное их содержание определяется по точному термодимическому уравнению и зависит, в основном, от относительного содержания углерода C и водорода H в топливе и от состава воздуха. Небольшое содержание одноатомных инертных газов включается в N_{2am} .

Существенно важно также напомнить то, что формула типа (1) получена в предположении, что горение протекает при местных $\alpha_i = 1$, а затем к образовавшимся «чистым» продуктам сгорания подмешивается находящийся по соседству балластный воздух, и образуются конечные продукты сгорания с $\alpha > 1$. Очевидно, что данная схема и, соответственно, формула (1) неприменимы для зон горения с местными $\alpha_i < 1$, что является существенным их недостатком.

Анализ точности расчета энтальпий, воздуха и продуктов сгорания. Так как воздух и продукты сгорания представляют собой смесь, по сути дела, одних и тех же веществ, но в разном процентном содержании, то потребовалось определиться, в первую очередь, с составом газов.

Изучение литературы позволило вполне обосновано принять к рассмотрению следующие составы воздуха и продуктов сгорания (в объемных долях):

Таблица 1. Состав газов воздуха и продуктов сгорания (объемные доли).

№ п/п	Вещество	Воздух, стандартный состав	«Чистые» продукты сгорания [1] ($z=3$)	Стехиометрич. уравнение ($z=5$)	Воздух [2]
1	2	3	4	5	6
1.	O_2	0,2099	-	-	0,21
2.	H_2	0,00014	-	-	0,00014
3.	H_2O	-	0,1313	0,12908	-
4.	N_2	0,78026	0,7389	0,73	0,78026
5.	CO_2	0,0003	0,1298	0,13212	0,0003
6.	Ar	0,0094	-	0,0088	0,0093

Для дальнейших расчетов был принят состав воздуха, соответствующий столбцу 3 табл.1 (он незначительно отличается от состава в [2], столбец 6 табл.1) и состав «чистых» продуктов сгорания, соответствующий столбцу 5. В анализ формул был включен также и вариант, когда состав продуктов сгорания определялся, исходя из достижения равновесных условий по программе из [3]; в этом случае число веществ в продуктах сгорания было $z=36$.

В итоге, было получено, что для практического диапазона температур $T = 0 \dots 2800$ К рассчитанные значения энтальпии воздуха $\Delta i_B^* \Big|_{T_0}^{T^*}$ отличались от значений из [1] на $0,1 \dots 0,16\%$. А рассчитанные энтальпии продуктов сгорания $\Delta i_{пр.сж}^* \Big|_{T_0}^{T^*}$ отличались от значений из [1], соответственно, для случая $z=5$ на $-0,014 \dots -0,15\%$, и для случая $z=36$ – на $0,07 \dots 1,5\%$. Заметно большее различие в $1,5\%$ для последнего случая соответствовало диапазону температур $T^* < 800$ К. Необходимо отметить, что состав продуктов сгорания для $z=36$ определялся для случая

$T_K^* = 800$ К и $p_K^* = 1$ ат, для которых температура равновесных продуктов сгорания получалась равной $T_\Gamma^* = 2462,3$ К. При расчете $\Delta i_{np.cz}^* \Big|_{T_0}^{T^*}$ при снижении температуры $T^* < T_\Gamma^*$ состав принимался как «замороженный».

Исследование значений тепловых эффектов реакции горения.

а) Нами были взяты из литературы и выведены самостоятельно следующие формулы для тепловых эффектов реакций горения в пересчете на горючее:

$$Hu_{298}^\Gamma = (1 + L_0) \cdot (nI_{298}^{z.cm} - nI_{298}^{np.cz}) , \quad (3)$$

$$Hu_{298}^\Gamma = (1 + L_0) \cdot \Delta i_{np.cz}^* \Big|_{298}^{T_{z,f,K}^*} - \Delta i_\Gamma^* \Big|_{298}^{Tf} - \Delta i_B^* \Big|_{298}^{T_\Gamma^*} + \Delta H_{ucn}^{ж.з} , \quad (4)$$

$$Hu^\Gamma(T_{z,f,K}^*) = Hu_{298}^\Gamma - (1 + L_0) \cdot \Delta i_{np.cz,\alpha=1}^* \Big|_{298}^{T_K^*} + \Delta i_\Gamma^* \Big|_{298}^{Tf} + L_0 \cdot \Delta i_B^* \Big|_{T_0}^{T_K^*} + \Delta H_T , \quad (5)$$

$$Hu^\Gamma(T_{z,f,K}^*) = (1 + L_0) \cdot \Delta i_{np.cz,\alpha=1}^* \Big|_{298}^{T_{z,f,K}^*} + \Delta H_{ucn}^{ж.з} , \quad (6)$$

где: $nI_{298}^{z.cm}$, $nI_{298}^{np.cz}$ - полные энтальпии горючей смеси и, соответственно, продуктов сгорания; $\Delta H_{ucn}^{ж.з}$ - теплота испарения жидкого горючего при температуре его кипения.

Значение $nI_{298}^{z.cm} = 433,9$ ккал/кг определялось из точного термодинамического уравнения материального баланса с использованием взаимосогласованных стехиометрических коэффициентов и с подстановкой в него значения Hu_{298}^Γ , взятого из справочника для керосина типа ТС-1. Поскольку при экспериментальном определении Hu_{298}^Γ сгорание горючего осуществляют в калориметрической «бомбе» при большом избытке кислорода с тем, чтобы в продуктах сгорания были только CO_2 и H_2O ,

поэтому при определении H_{u298}^{Γ} как по точному термодинамическому уравнению, так и по формуле (3), «стандартное» число продуктов сгорания принималось $z=5$. (При этом концентрация кислорода r_{O_2} в «чистых» продуктах сгорания при $\alpha = 1$ получалась равной 0). Вычисленное по справочным данным значение $H_{u298}^{\Gamma} = 10339,145$ ккал/кг точно совпадает с вычисленным по теплотехнической формуле (3). Подсчет H_{u298}^{Γ} по формуле (4) для $z=5$ дает такое же значение. Совпадение значений H_{u298}^{Γ} , полученное по (3) и (4) говорит о следующем:

- 1) отсутствуют ошибки при переходе от термодинамического уравнения со стехиометрическими коэффициентами к теплотехническому уравнению (3);
- 2) подтверждается безошибочность вывода и правильность формулы (4).

Формулы (5) и (6) были получены при следовании той же самой логике рассуждений, поэтому и в их справедливости не приходится сомневаться. Последнее строго соответствует лишь составу продуктов с $z=5$. Для случая с $z=3$ состав продуктов сгорания не совпадает с точными значениями для $z=5$).

Формулами (5) и (6) даются выражения для $H_{u}^{\Gamma}(T_{z,f,K}^*)$ - теплового эффекта химической реакции горения для случаев, когда горючее (керосин) и окислитель (воздух) находятся при температурах, соответственно, T_K^* и T_f^* , больших чем температура для стандартных термодинамических условий $T_{st} = 298,15$ К.

Значения $H_{u}^{\Gamma}(T_{z,f,K}^*)$, подсчитанные по (5) и (6), также получились одинаковыми и равными, в частности, примерно 10070 ккал/кг. Совпадение значений еще раз подтверждает правильность проделанных преобразований при выводе (5) и (6).

Соответственно, по отношению $H_{u}^{\Gamma}(T_{z,f,K}^*)$ к H_{u298}^{Γ} можно подсчитать коэффициент «химической» полноты тепловыделения $\eta_{\Gamma,x}$:

$$\eta_{\Gamma,x} = H_{u}^{\Gamma}(T_{z,f,K}^*) / H_{u298}^{\Gamma} = 10070 / 10339 \cong 0,974 \quad (7)$$

б) Для состава продуктов сгорания с числом веществ $z=36$ значение теплового эффекта реакции горения, подсчитанного по (5), получается $Hu^{\Gamma}(T_{z,f,K}^*) = 10062,4$ ккал/кг. Это оказывается чуть меньше значения 10070 ккал/кг, поскольку большим оказывается второе (вычитаемое) слагаемое из-за большего увеличения теплоемкости газа при $z=36$, чем при $z=5$. А третье и четвертое слагаемые в формуле (5) от числа компонентов в продуктах сгорания z не зависят.

Близость значения $Hu^{\Gamma}(T_{z,f,K}^*) = 10062,4$ ккал/кг при ($z=36$) к «точному» 10069.94 (при $z=5$) обеспечивается присутствием в формуле (5) слагаемого Hu_{298}^{Γ} . Потому что, как только это слагаемое исчезает, например в формуле (6), то значение $Hu^{\Gamma}(T_{z,f,K}^*)$ сразу уменьшается до значения 8541,4 ккал/кг. Это объясняется тем, что полная энтальпия продуктов сгорания $n I_{\alpha=1}^{np.cz.}(T_z^*)_{z=36}$ равна, по условию расчета, полной энтальпии горючей смеси $n I^{z.cm.}(T_k, T_f)$, а величина $n I_{\alpha=T}^{np.cz.}(T_z^*)_{z=36}$ больше $n I_{\alpha=1}^{np.cz.}(T_z^*)_{z=5}$, поэтому их разница $\Delta I_{\alpha=1}^{np.cz.}$ получается меньше соответствующей разницы для состава с $z=5$. В итоге и $Hu^{\Gamma}(T_{z,f,K}^*)$ получается, как уже было отмечено, меньше.

В результате, химическая полнота тепловыделения для случая $z=36$ оказывается существенно ниже, чем в предыдущем случае при $z=5$ /

$$\eta_{\Gamma.x} = Hu^{\Gamma}(T_{z,f,K}^*) / Hu_{298}^{\Gamma} = 8541,4 / 10339 \cong 0,826 \quad (8)$$

Следует отметить, что в «действительности» для состава продуктов сгорания с числом компонентов $z=36$ все располагаемое тепло, необходимо понимать, выделилось. Просто в окончательной фазе тепловыделения оно уже расходовалось не столько на увеличение T_z , сколько на увеличение энтальпии, т.е. теплоемкости смеси продуктов сгорания с большим числом компонентов $z=36 > z=5$. Добавим также, что и в случае (а) ($z=5$) и в случае (б) ($z=36$) при переходе от высокотемпературных к «охлажденным» продуктам сгорания, их состав (число компонентов) не изменялся. Т.е. обеспечивался «замороженный» состав продуктов сгорания.

в) Если подсчитывать тепловой эффект и полноту тепловыделения, осуществляя переход от состава с $z=36$ при T_z^* к составу при $z=5$ при T_K^* , то по формуле (6) $Hu^r(T_{z,f,K}) = 10070$ ккал/кг, а $\eta_{f,r} = 0,974$. Т.е. имеет место полное совпадение с рассмотренным ранее случаем (а) при $z=5$.

Такой переход от равновесного состава продуктов сгорания с $z=36$ при $T = T_z^*$ к равновесному составу с $z=5$ и $T = T_K^*$ можно осуществить, если при расчетном моделировании процесса «охлаждения» продуктов сгорания от $T = T_z^*$ до $T = T_K^*$ обеспечить на каждом вычислительном шаге равновесные для них условия. Такой процесс «охлаждения» продуктов сгорания с плавным понижением температуры был рассчитан. Число компонентов при этом выдерживалось неизменным и равным $z=36$, а их концентрации подсчитывались по методике определения равновесного состава. Полученные в результате этого расчета концентрации всех значимых веществ (O_2 , H_2 , H_2O , N_2 , CO_2 и Ar) для случая $z=36$ практически совпали с их концентрациями для случая $z=5$. Относительное значение теплоты $\Delta\bar{Q} = \Delta Q / Hu_{298}^r$, которую необходимо «отвести» от продуктов сгорания, чтобы понизить их температуру до некоторого значения T при достижении $T = T_K^* = 800K$ оказалась равной $\Delta\bar{Q} \cong 0,97$ (т.е. очень хорошо совпадает с $\eta_{f,r} = 0,974$).

Заключение.

1. Выполненный анализ и расчеты показали правильность формул (4), (5) и (6) для полноты и теплового эффекта сгорания. При этом $T_z^* \Big|_{z=36} = 2460.4 K$ и $T_z^* \Big|_{z=5} = 2735.3 K$ хотя и оказываются существенно различными, однако для каждого из этих расчетных случаев коэффициент химической полноты тепловыделения получается на уровне $0,97 \dots 0,974$.

2. Если выполнять термогазодинамический расчет ГТД при заданном по техническим условиям значении T_f^* и определять величину относительного расхода топлива q_T (т.е. величину общего коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1/q_T L_0$), то при использовании стандартного состава

ва продуктов сгорания с $z=5$ величина q_T должна получаться заведомо меньше, чем для состава с $z=36$. Т.е. двигатель как бы искусственно будет получаться более экономичным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок. / Д о р о ф е в В.М., Маслов В.Г., Первышин Н.В. и др. Куйбышевск. авиац. ин-т. им. С.П.Королева. –Куйбышев: КуАИ, 1973.-144с.
2. Ш м и д т Э. Введение в техническую термодинамику. –М.: Энергия, 1965.-392с.
3. Диденко А.А., Лукачев С.В. Упрощенная математическая модель кинетики окисления углеводородного топлива и образования окислов азота NO_x . // Тез. Докл. IV Всеросс. науч.-техн. конф. «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей». –Самара, 2002. –С.59-66.

УДК 621.431.75 + 662.6 + 536.46.1

УПРОЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ ОКИСЛЕНИЯ ВОДОРОДА H_2 В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА И ОБРАЗОВАНИЯ ОКИСЛОВ АЗОТА NO_x

Диденко А.А., Некрасова С.О.

Самарский государственный аэрокосмический университет

Для авиационных ГТД жидкий водород H_2 давно рассматривается как одна из выгодных альтернатив существующим углеводородным топливам. Так с точки зрения экологических проблем при его использовании в продуктах сгорания отсутствуют многие токсичные составляющие, такие как окись углерода, несгоревшие углеводороды, сажа и др. Однако, сохраняется опасность появления повышенных концентраций окислов азота NO_x (NO , NO_2). Сложность задачи по снижению образования NO_x связана с тем, что различные составляющие этих окислов образуются как непосредственно в пламени, так и в послепламенных зонах. Математические модели процессов горения, которые используются при проектировании камер сгорания ГТД, с одной стороны, долж-