

УДК 621.452.3

## КВАЗИОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ И РАСЧЁТ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТД С УЧЁТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ, ИЗМЕНЕНИЯ МАССЫ, СОСТАВА, ТЕМПЕРАТУРЫ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА

© 2013 А. А. Диденко, А. Б. Соколов

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Существующая в СГАУ методика одномерного расчёта камеры сгорания значительно дополнена: а) учитывается неравномерность распределения топлива в зоне горения и его сгорание в диапазоне коэффициентов избытка воздуха 0,55...1,65; б) количество парообразного топлива на каждом участке определяется с учётом размеров испаряющихся капель; в) для каждой фракции сгорающего топлива определяется равновесный состав и адиабатическая температура пламени продуктов сгорания; г) предложена схема смешения продуктов сгорания с вторичным и смесительным воздухом с целью оценки неравномерности температуры газа на выходе из камеры сгорания; д) вводится коэффициент качества смешения. Оценивается влияние полноты смешения, состава и температуры газа на количество образующихся по длине жаровой трубы окислов азота, индекс эмиссии NO и неравномерность температурного поля в выходном сечении. Обновлённая методика расчёта иллюстрируется на примере малоэмиссионной камеры сгорания авиационного ГТД.

*Одномерный расчёт, неравномерность распределения топлива, коэффициент избытка воздуха, размеры капель, испаряющееся топливо, равновесный состав, продукты сгорания, температура пламени, коэффициент смешения, температура газа, индекс эмиссии.*

### Введение

Цель работы – разработать уточнённую методику квазиодномерного расчёта камеры сгорания (КС) авиационного ГТД, учитывающую начальную неравномерность распределения топлива по массе в зоне горения, сложный состав продуктов сгорания, неоднородность пламени по температуре и составу, а также качество процессов смешения. Используя разработанную модель, проследить количественную взаимосвязь индексов эмиссии NO с динамикой изменения температурных полей на участках и в выходном сечении жаровой трубы на примере расчёта процессов в камере сгорания современного авиационного ГТД.

Термогазодинамический расчёт камеры сгорания проводится в два этапа. На первом этапе расчёт выполняется в более простой постановке по существующей в СГАУ методике [1].

Суть исходной методики состоит в следующем. Пространство жаровой трубы (ЖТ) КС разбивается поперечными сечениями на несколько участков, при этом сечения проходят через пояса подвода охлаждающего и основного воздуха (крупные струи). Число и размеры всех отверстий определяются по эмпирическим зависимостям или по прототипу КС, пропорционально их относительной площади определяются соответствующие расходы воздуха по длине ЖТ. Его количество по участкам ЖТ переменное, непрерывно и ступенчато возрастает (рис. 1).

В соответствии с экспериментальными данными в первом приближении назначается график выгорания топлива по длине зоны горения – интегральный и дифференциальный (рис. 1); дифференциальный показывает, какая массовая доля топлива сгорает на каждом  $k$ -м участке зоны горения ЖТ.

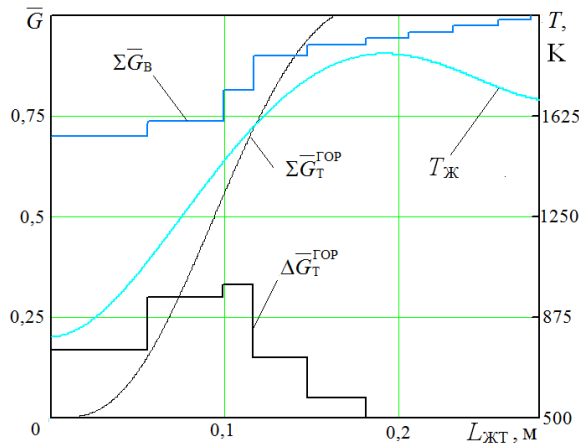


Рис. 1. Распределение воздуха и топлива по длине жаровой трубы: — — распределение среднемассовой температуры  $T_{Ж}$  по длине ЖТ;

$\Sigma \bar{G}_B$  – распределение воздуха;

$\Sigma \bar{G}_T^{GOP}$  – интегральная кривая выгорания топлива;

$\Delta \bar{G}_T^{GOP}$  – дифференциальная кривая выгорания топлива

Расчёт выполняется при условии, что каждая порция топлива – «вся» – сгорает при локальном коэффициенте избытка воздуха  $\alpha_j = 1$ , при этом образуются так называемые «чистые» продукты сгорания (ПС)  $CO_2$  и  $H_2O$ . Для каждого участка ЖТ из уравнений теплового баланса определяется среднемассовая температура газа  $T_{Ж}^*$ .

Рассчитываются теплофизические свойства газа, время его пребывания на каждом участке. Оцениваются начальные размеры капель  $D_{0i}$  для момента впрыска топлива такие, которые испарятся полностью к началу участка своего сгорания, обеспечивая назначенный график выгорания топлива.

### Модель и расчёт свойств рабочего тела с учётом неоднородности

На втором этапе расчёта принимается условие, что топливо сгорает не строго при  $\alpha_j = 1$ , а в некотором диапазоне  $\alpha_j = 0,55...1,65$ . Для каждой порции топлива задаются «неоднородные» функции распределения  $\Delta R_k(\alpha_j)$  (рис. 2, а), которые показывают, какая часть (фракция)  $\delta G_{Tj}^{GOP}$  от каждой порции топлива  $\Delta G_{Tk}^{GOP}$  сгорает на соответствующем  $k$ -м участке при фактической величине локального  $\alpha_j$ :

$$\Delta R_k = \frac{\delta G_{Tj}^{GOP}}{\Delta G_{Tk}^{GOP}} \tag{1}$$

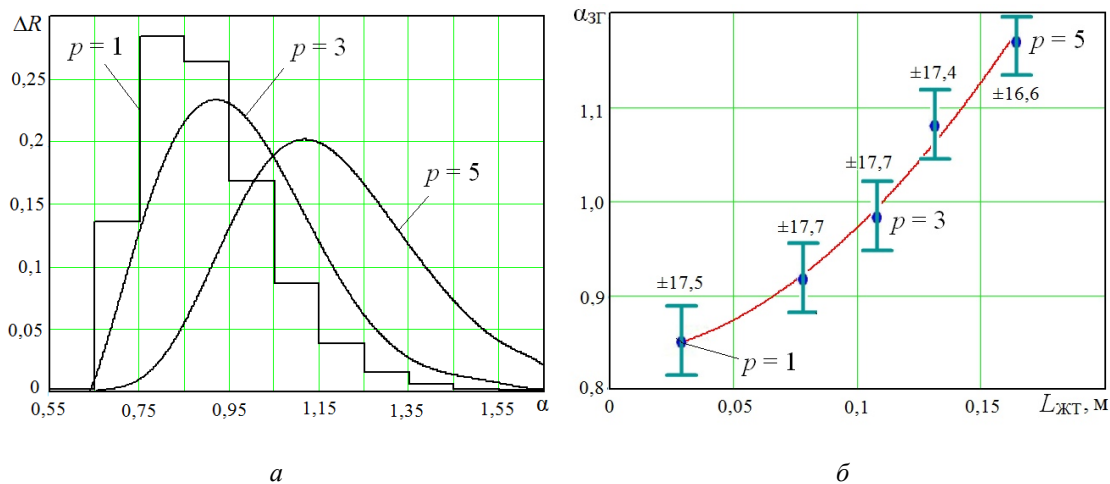


Рис. 2. Функции распределения топлива по  $\alpha$  (а) и их средние величины для каждой порции (б):  $p$  – номер порции топлива;  $\delta \alpha_{3Г}$  – неравномерность смеси по локальным  $\alpha$  в зоне горения

Каждая порция топлива состоит из двенадцати фракций со своим локальным  $\alpha_j$ . Для каждой порции подсчитываются средние величины коэффициентов избытка воздуха

$$\alpha_{3\Gamma k} = \sum_{j=1}^{12} \alpha_j \cdot \Delta R_k \quad (2)$$

и неравномерности смеси по составу

$$\delta\alpha_k = \sqrt{\sum_{j=1}^{12} \left( \frac{\alpha_j - \alpha_{3\Gamma k}}{\alpha_{3\Gamma k}} \right)^2 \cdot \Delta R_k}, \quad (3)$$

их значения представлены на рис. 2, б. Для данного варианта КС среднемассовые  $\alpha_{3\Gamma k} = 0,85 \dots 1,17$ , неравномерность смеси в среднем  $\delta\alpha_k = 17,4 \%$ .

Для каждой  $j$ -й фракции определяется равновесный состав продуктов сгорания и адиабатическая температура пламени  $T_{плj}^*$  по методике, изложенной в [2]. Принималось, что в составе продуктов сгорания присутствуют следующие 10 компонентов:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{O}$ . Для расчёта использовались уравнения теплового и материального баланса, баланса давлений и химического равновесия. Данная методика многократно испытана для многих расчётных вариантов [3, 4]. Результаты расчёта представлены на рис. 3.

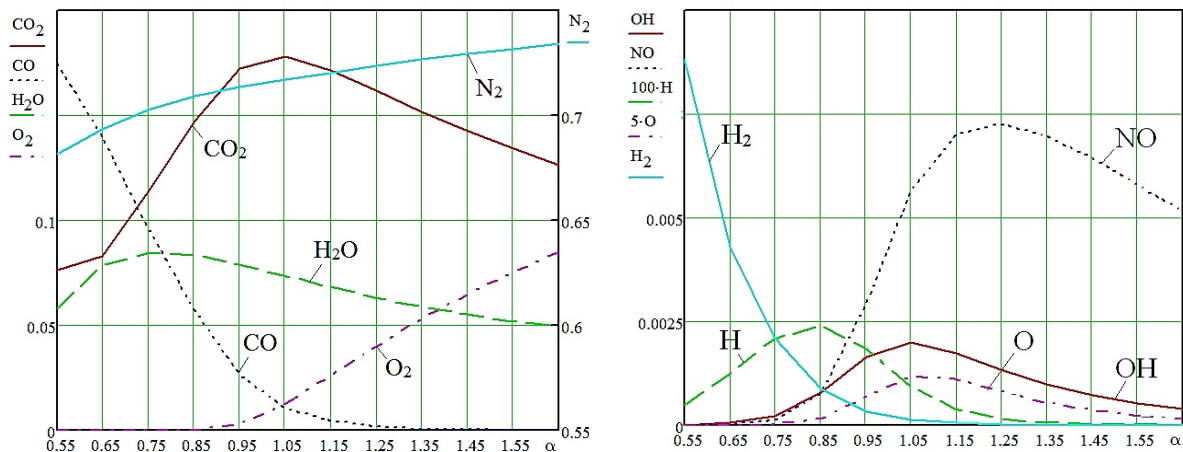


Рис. 3. Равновесный состав продуктов сгорания

Зависимость диаметра испаряющейся капли  $D$  от времени пребывания её в зоне высоких температур определялась по  $D^2$  - закону Срезневского, в соответствии с которым

$$D_i^2 = D_{0i}^2 - k_{испi} \cdot t_{прi}, \quad (4)$$

где  $D_{0i}$  и  $D_i$  – соответственно начальный и текущий диаметр капли  $i$ -го типоразмера;  $t_{прi}$  – время пребывания капли в зоне высоких температур;  $k_{испi}$  – константа испарения капли  $i$ -го типоразмера, зависящая от свойств топлива, окружающего воздуха и условий обтекания капли.

После завершения первого этапа теплогидравлического расчёта становятся известными все термогазодинамические параметры для расчёта  $t_{прi}$  и  $k_{испi}$ . Если заранее определить величины  $t_{прi}$  и  $k_{испi}$  и принять, что на момент полного испарения капелек их диаметр равен нулю, то из формулы (4) можно определить начальные диаметры капелек для каждого их типоразмера ( $k$ -й порции топлива). Далее подсчитывается средний диаметр капелек для всей их совокупности в факеле распыла, а также количество парообразного топлива, которое будет готово к выгоранию на соответствующем

$k$ -ом участке, и остаточное количество жидкого топлива в каплях.

В соответствии с назначенным графиком выгорания топлива принималась следующая последовательность испарения капель и вступления испарённого топлива в горение. После появления в сечении  $k = 1$  капель каждого  $i$ -го типоразмера  $p$ -й порции топлива и по мере их продвижения по направлению к выходу из КС капли прогреваются, последовательно испаряются, и их пары перемешиваются с воздухом на всех предыдущих участках при подходе к некоторому  $k$ -му участку своего сгорания.

В соответствии с принятой схемой капли 1-го типоразмера с начальным диаметром  $D_{01}$  после впрыска быстро

прогреваются, полностью испаряются, и масса их паров сгорает на первом участке. Капли 2-го типоразмера с начальным диаметром  $D_{02}$  после впрыска также быстро прогреваются и полностью испаряются на подготовительном участке ( $k = 1$ ), а на участке  $k = 2$  привнесённое ими парообразное топливо (топливо 2-й порции) полностью выгорает. Соответственно капли 3-го типоразмера с начальным диаметром  $D_{03}$  после впрыска также быстро прогреваются и полностью испаряются на подготовительном участке ( $k = 1$ ) + ( $k = 2$ ), а на участке 3 привнесённое ими парообразное топливо (топливо 3-й порции) полностью выгорает и т.д.

Константа испарения [5]:

$$k_{\text{испи}} = \frac{8 \cdot \lambda_{\Gamma i}}{\rho_{\Gamma} \cdot C_{p_{\Gamma i}}} \cdot \ln(1 + B) \cdot \left[ 1 + 0,255 \cdot \left( \frac{\varepsilon \cdot w_i \cdot D_{0i}}{2 \cdot v_{\Gamma i}} \right)^{0,5} \right], \quad (5)$$

где  $\lambda_{\Gamma i}, v_{\Gamma i}, C_{p_{\Gamma i}}$  – коэффициенты теплопроводности, вязкости и изобарная теплоёмкость газа, взятые для рассчитанных средневзвешенных температур газа для капли  $i$ -го типоразмера;  $\varepsilon$  – интенсивность турбулентности потока газа в жаровой трубе вблизи испаряющихся капель, принималось  $\varepsilon = 0,4$ ;  $w_i$  – некоторая средняя или характерная скорость газа;  $B = 3,75$  – параметр теплообмена.

В формулу (5) для капель каждой фракции подставляются средние значения перечисленных теплофизических характеристик газа.

Средние значения  $\lambda_{\Gamma i}, v_{\Gamma i}, C_{p_{\Gamma i}}$  и  $w_i$  подсчитываются с учётом их конкретных значений на подготовительных участках в зависимости от температуры и осредняются по времени пребывания на этих участках.

По вычисленным для каждой порции сгорающего топлива размерам капель и известным из кривой выгорания массам этих порций рассчитываются средние диаметры капель (СДК) по Заутеру, а также спектр (функция) распределения капель по диаметрам (рис. 4) по формулам:

$$D_{320} = \frac{\sum_{i=1}^5 \Delta \bar{G}_{\Gamma i}^{\text{ГОР}} \cdot D_i^3}{\sum_{i=1}^5 \Delta \bar{G}_{\Gamma i}^{\text{ГОР}} \cdot D_i^2} = 1 / \frac{\sum_{i=1}^5 \Delta \bar{G}_{\Gamma i}^{\text{ГОР}}}{D_i},$$

$$P(D_i) = \frac{\Delta N_i}{\sum_i \Delta N_i} = \left( \Delta \bar{G}_{\Gamma i}^{\text{ГОР}} / D_i^3 \right) / \sum_{i=1}^5 \left( \Delta \bar{G}_{\Gamma i}^{\text{ГОР}} / D_i^3 \right),$$

где  $\Delta N_i$  – число капель в каждой порции топлива.

Величина среднеарифметического диаметра капель



Массовый расход воздуха, который участвует в сгорании каждой  $j$ -й топливной фракции

$$\delta G_{Вj}^{ГОР} = \alpha_j \cdot L_0 \cdot \delta G_{Tj}^{ГОР}. \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{12} \left[ (\alpha_j \cdot L_0 + 1) \cdot \Delta R_{p,j} \cdot \sum_{i=1}^{10} g_{i,j} \cdot \Delta I_{ПС}^* \left[ \frac{T_{Плj}^*}{293} \right] \right] = (\alpha_{3Г} \cdot L_0 + 1) \cdot C_{p_{СМР}} \cdot (T_{Плk}^* - 293,15), \quad (8)$$

из которого определяется среднемассовая температура пламени  $T_{Плk}$  на  $k$ -м участке. Таким образом, на  $k$ -м участке для каждой фракции сгорающей  $p$ -й порции топлива становятся известными локальная  $T_{Плj}^*$  и среднемассовая  $T_{Плk}$  температуры пламени. В результате оценивается неравномерность пламени по температуре

$$\delta T_k = \sqrt{\sum_{j=1}^{12} \left( \frac{T_{Плj}^* - T_{Плk}^*}{T_{Плk}^*} \right)^2 \cdot \Delta R_k}. \quad (9)$$

Величины  $T_{Плk}$  и  $\delta T_k$  представлены на рис. 6.

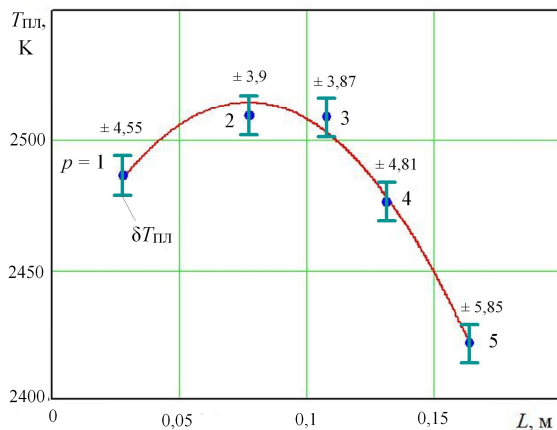


Рис. 6. Изменение среднемассовой температуры пламени  $T_{Пл}$  по длине  $L$  ЖТ

Из уравнений теплового баланса (6), учитывающих графики выгорания (рис. 1) и испарения топлива (рис. 5), в предположении, что теплота, выделившаяся от сгоревших порций топлива и воздуха, а также привнесённая продуктами сгорания с предыдущих участков, равномерно распределяется по всей массе рабочего тела на данном  $k$ -м участке ЖТ, определяется среднемассовая

Просуммировав уравнения (6) по всем фракциям и учтя (7), получим уравнение теплового баланса для  $k$ -го участка ЖТ:

температура газа для всей текущей массы рабочего тела  $T_{Жk}^*$  (рис. 1).

### Модель и расчёт подмешивания вторичного воздуха

Рассматриваются две схемы смешения порций сгоревших топлива и воздуха с вторичным воздухом. Поскольку расчёт проводится в квазиодномерной постановке и перемешивание составами продуктов сгорания между соседними струйками (порциями топливно-воздушной смеси – ТВС) не моделируется, то под процессом перемешивания понимается лишь подмешивание к струйкам балластного (вторичного) воздуха.

В схеме смешения № 1 суммарная масса смесительного воздуха распределяется между всеми струйками следующим образом. Каждая порция последовательно по направлению к выходу испытывает акты подмешивания балластного воздуха на каждом  $k$ -м участке, причём масса смесительного воздуха в каждом акте смешения пропорциональна массе порции чистых продуктов сгорания (смеси):

$$\frac{\Delta G_{ПС p}}{\Delta G_{ПС 1}} = \frac{\delta G_{СМ p}}{\delta G_{СМ 1}}. \quad (10)$$

Жаровая труба разделена поперечными сечениями на 10 участков. При этом первая порция продуктов сгорания, образовавшаяся на 2-м участке, испытывает девять актов смешения, вторая – восемь и т.д., пятая – пять. В результате суммарная масса смесительного воздуха представляется суммой:

$$9 \cdot \delta G_{CM1} + 8 \cdot \delta G_{CM2} + 7 \cdot \delta G_{CM3} + 6 \cdot \delta G_{CM4} + 5 \cdot \delta G_{CM5} = G_{B CM}^{\Sigma};$$

$$9 + 8 \cdot \frac{\delta G_{CM2}}{\delta G_{CM1}} + 7 \cdot \frac{\delta G_{CM3}}{\delta G_{CM1}} + 6 \cdot \frac{\delta G_{CM4}}{\delta G_{CM1}} + 5 \cdot \frac{\delta G_{CM5}}{\delta G_{CM1}} = \frac{G_{B CM}^{\Sigma}}{\delta G_{CM1}}; \quad (11)$$

$$\sum_{p=1}^5 (10-p) \cdot \frac{\delta G_{CM p}}{\delta G_{CM1}} = \frac{G_{B CM}^{\Sigma}}{\delta G_{CM1}}.$$

Из равенства (11), учитывая соотношение (10), получаем массу «частички» смесительного воздуха для 1-й струйки:

$$\delta G_{CM1} = \frac{G_{CM}^{\Sigma}}{\sum_{p=1}^7 \left[ (11-p) \cdot \frac{\Delta G_{PC p}}{\Delta G_{PC1}} \right]}, \quad (12)$$

а для остальных – из пропорции

$$\delta G_{CM p} = \delta G_{CM1} \cdot \frac{\Delta G_{PC p}}{\Delta G_{PC1}}.$$

Недостаток 1-й схемы заключается в отсутствии проверки условия, что суммарное количество смесительного воздуха на каждом участке должно быть не более количества воздуха, который может быть доступным для смешения на данном участке. Другой недостаток состоит в том, что каждая порция продуктов сгорания (смеси) по мере продвижения к выходу из КС получает на каждом участке одинаковое количество воздуха при смешении в каждом акте подмешивания. Заметим, что частички вторичного смесительного воздуха для каждой порции продуктов сгорания (струйки) в общем случае разные, и их величины определяются согласно равенствам (10) и (12).

В схеме № 2 предпринята попытка устранить недостатки схемы № 1. Так, в схеме № 2 (рис. 7) доступный смесительный воздух, который имеется на каждом участке, каждый раз разбивается на порции, которые будут использованы для смешения. Каждая порция ТВС в пространстве занимает определённый объём и, очевидно, большему её объёму будет соответствовать большая поверхность соприкосновения с балластным воздухом. Таким образом, на

каждом участке воздух для смешения разбивается на части пропорционально порциям ТВС, принятым в данном примере – 17, 30, 33, 15, 5 %. В отличие от схемы смешения № 1, в данном варианте происходит автоматическая проверка количества доступного воздуха для смешения на каждом участке ЖТ.

В результате получаем следующую последовательность. На первом участке происходит горение и образование первой порции продуктов сгорания. На втором участке к этой первой порции подмешивается 17 % массы доступного смесительного воздуха. Одновременно на втором участке образуется порция  $p = 2$  продуктов сгорания, а оставшийся доступный смесительный воздух вновь разбивается в процентном отношении (на пять частей). Таким образом, на последующем участке  $k = 3$  первая порция «получает» 17 %, а вторая – 30 % от доступного смесительного воздуха и т.д. (рис. 7).

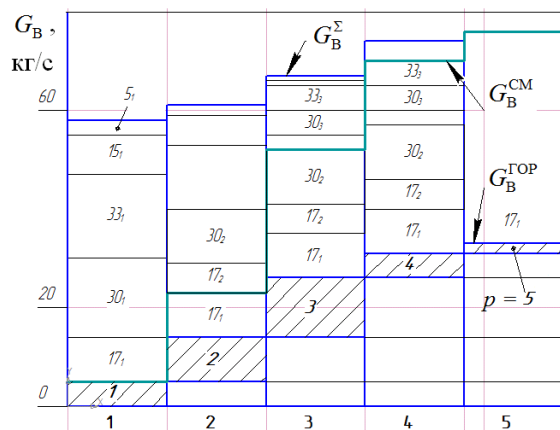


Рис. 7. Схема смешения № 2 порций ТВС со смесительным воздухом по участкам ЖТ



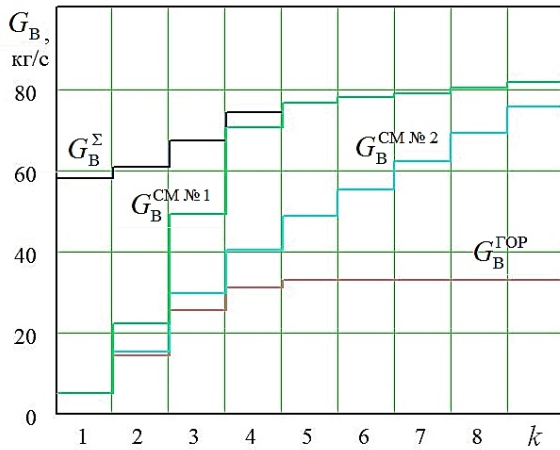


Рис. 8. Кривые изменения количества смесительного воздуха по участкам ЖТ для схем смешения № 1 и № 2

Рис. 8 иллюстрирует получившиеся законы распределения смесительного воздуха для каждой из рассмотренных схем смешения № 1 и № 2. Видно, что в

схеме смешения № 2 смесительный воздух расходуется на смешение значительно интенсивнее, чем в схеме № 1.

Каждая струйка по мере продвижения к выходу из КС увеличивается в своей массе, изменяется по составу рабочего тела и температуре газа, к выходному сечению имеет температуру  $T_{жр,k}^*$ . С учётом этого для принятых двух схем смешения проведён расчёт неравномерности температурного поля в выходном сечении ЖТ. Получена функция распределения относительной массы рабочего тела  $\bar{G}(T) = \Delta G(T) / G_{\Sigma}$  по температуре газа в выходном сечении ЖТ (рис. 9) и оценён коэффициент неравномерности температурного поля (табл. 1).

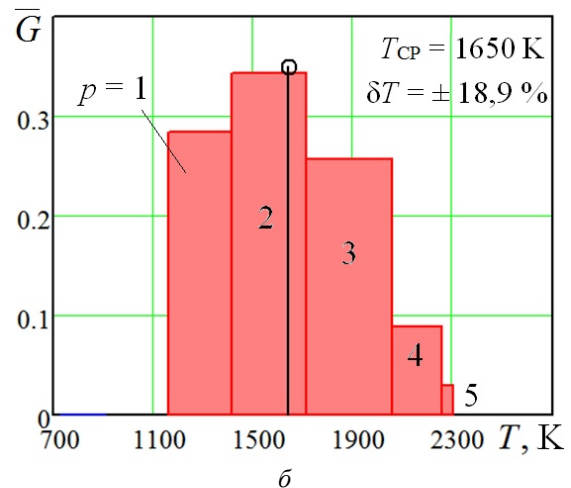
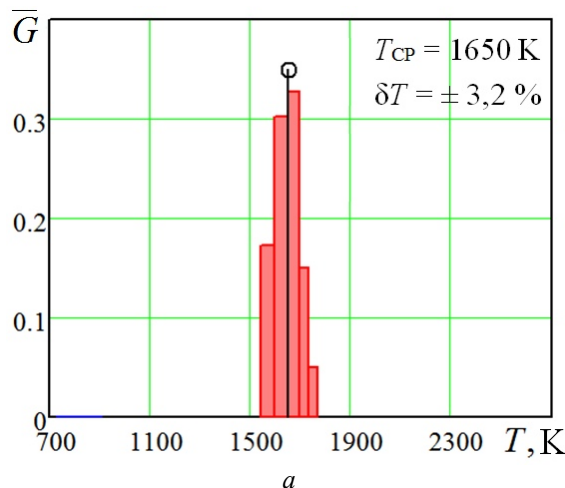


Рис. 9. Функция распределения рабочего тела по температуре в выходном десятом сечении: а – схема №1, б – схема №2

Для обеих схем смешения среднемассовая температура газа  $T_{Г\text{СР}}^* \approx 1650$  К получается одинаковой, а неравномерность выходного поля температур – разная: для схемы № 1  $\delta T_{Г}^* = \pm 3,2\%$ , для схемы № 2 –  $\pm 18,9\%$ . В схеме смешения № 1 неравномерность выходного температурного поля получается существенно меньшей в связи с тем, что исходная масса смесительного воздуха  $G_{\text{ВСМ}}^{\Sigma}$  распределяется

пропорционально величинам масс струек только в начале, а в каждом акте смешения массы порций смесительного воздуха для каждой струйки остаются, согласно соотношениям (10) – (12), постоянными величинами. Смесительный воздух в «гарантированных» размерах подводится как для первых, так и для последних порций сгорающего топлива. В схеме № 2 масса доступного для смешения смесительного воздуха оказывается более значительной для



первых порций сгорающего топлива. В итоге первая порция ( $p = 1$ ) продуктов сгорания захла-живается сильнее, а последняя – в меньшей степени. Так, имеем:  $T_{p=1,k=10} = 1525 \text{ К}$  – для схемы № 1 и  $T_{p=1,k=10} = 1150 \text{ К}$  – для схемы № 2;  $T_{p=5,k=10} = 1810 \text{ К}$  – для схемы № 1 и  $T_{p=1,k=10} = 2250 \text{ К}$  – для схемы № 2.

С целью улучшения схемы № 2 за счёт снижения темпа расходования смесительного воздуха первыми порциями введён коэффициент смешения, который показывает, какое количество балластного воздуха смешивается с продуктами сгорания на молекулярном уровне. Например, при коэффициенте смешения  $\eta_{\text{см}} = 0,5$  только 50 % воздуха, доступного для смешения на  $k$ -м участке, смешивается с продуктами сгорания на молекулярном уровне на данном участке, а оставшаяся часть смешивается на следующем. При  $\eta_{\text{см}} = 0,25$  первые 25 % воздуха смешиваются с ПС на молекулярном уровне на данном  $k$ -м участке, следующие 25 % на  $(k + 1)$  участке, следующие на  $(k + 2)$  участке, оставшаяся часть на  $(k + 3)$  участке.

Далее оценивается влияние коэффициентов смешения на неравномерность температурного поля в выходном сечении, влияние локальной температуры газа и состава рабочего тела, на скорость образования окислов азота по длине ЖТ, а также на индекс эмиссии NO для выходного сечения ЖТ.

На рис. 10 представлены графики изменения расходов воздуха для схемы смешения № 2. Вводится для учёта ещё одна особенность. Так, в варианте 4 этой схемы ( $\eta_{\text{см}} = 0,25$ , табл. 1) дополнительно принимаем, что воздух, который идёт на охлаждение стенок ЖТ, не участвует на данном  $k$ -м участке в процессах смешения, а присутствует в пристеночной области с температурой  $T_{\text{к}}$ . Далее он смешивается с основным потоком.

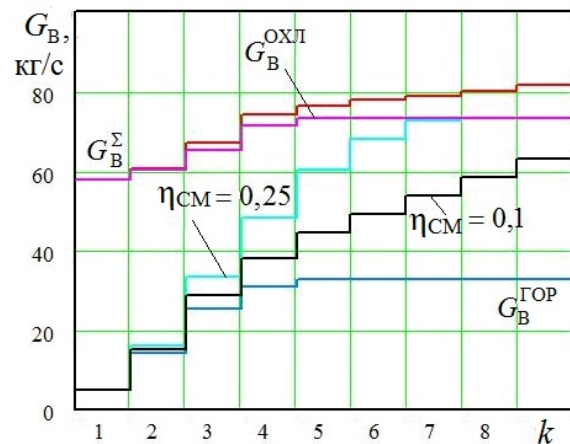


Рис. 10. Изменение расхода смесительного воздуха для схемы смешения № 2 с разными по величине коэффициентами смешения  $\eta_{\text{см}}$

На рис. 11 столбики в левой части характеризуют относительную массу доступного смесительного воздуха, находящегося на  $k$ -м участке при температуре  $T_{\text{к}}$ . Массив столбиков в правой части – относительная масса продуктов сгорания со своими температурами  $T_{p,k}$ . Номером обозначен их порядок и последовательность образования, нижний индекс – участок ЖТ. При подмешивании смесительного воздуха изменяется масса ПС и их температура, столбики для ПС смещаются влево по шкале температур. В частности, можно отметить следующую динамику. «Горячая» струйка 1 (порция 1) на участке  $k = 1$  имеет относительную массу продуктов сгорания и балластного воздуха в сумме  $\bar{G}_{1,1} = 0,063$  и находится при  $T_{1,1} = 2490 \text{ К}$ . На участке  $k = 2$  после подмешивания воздуха её масса увеличивается до  $\bar{G}_{1,2} = 0,075$  (левый столбик ПС, рис. 11), а температура снижается до  $T_{1,2} = 2350 \text{ К}$ . При этом  $g_{\text{NO}}$  (рис. 12) продолжает пока увеличиваться, но со значительно меньшим темпом, чем на предыдущем участке  $k = 1$ . В последующем (рис. 11) левый столбик порции 1 остаётся всегда слева, но одновременно (после подмешивания воздуха) он смещается ещё левей и имеет, соответственно, меньшую температуру



$$\frac{d}{dt}(\text{NO}) = \frac{2k_1' \cdot \left( \frac{(\text{O})e \cdot (\text{N}_2)e}{(\text{NO})e} \right) \cdot (1 - (\text{NO})^2)}{\left( 1 + \left( \frac{k_1'' \cdot (\text{NO})e}{k_2' \cdot (\text{O}_2)e} \right) \cdot (\text{NO}) \right)}, \quad (13)$$

где  $k_1', k_1''$  – константы скоростей химических реакции в прямом и обратном направлении для уравнения  $\text{N}_2 + \text{O} \leftrightarrow \text{NO} + \text{N}$  и  $k_2', k_2''$  – для уравнения  $\text{O}_2 + \text{N} \leftrightarrow \text{NO} + \text{O}$ ;  $(i)e$  –

равновесная концентрация  $i$ -го компонента.

Для примера на рис. 12 представлено изменение NO по времени пребывания для самой горячей 6-й фракции ( $\alpha_j=1,05$ ). Выносными линиями показаны варианты расчёта (табл. 1). Ступеньки уменьшения концентраций NO соответствуют актам подвода смеси-тельного воздуха по участкам ЖТ.

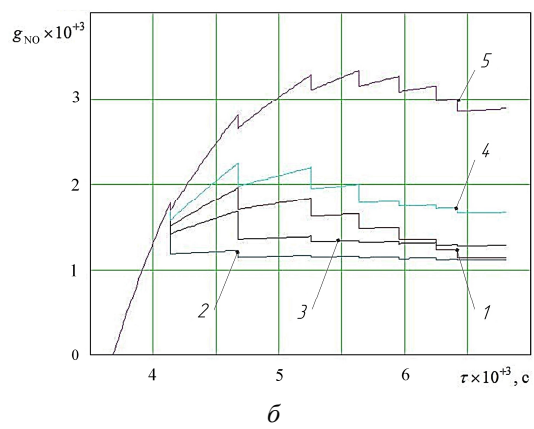
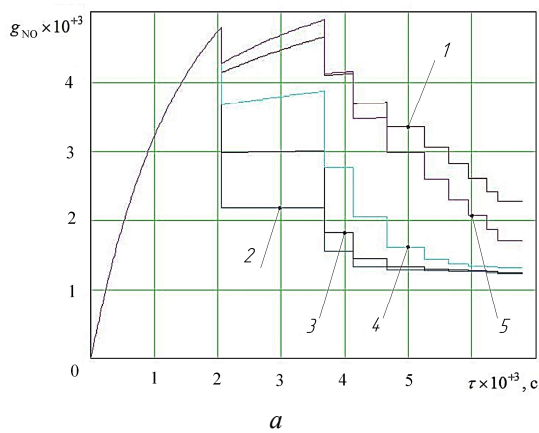


Рис. 12. Изменение NO по времени пребывания:  
а – для первой порции ( $p=1$ ), б – для третьей порции ( $p=3$ )

Таблица 1. Сводная таблица результатов расчёта

№ варианта расчёта	№ схемы смешения	$\eta_{\text{см}}$	$EI_{\text{NO}}$ , г/кг-топл	$\delta T$ , $\pm \%$	$\Delta\theta_{\Gamma} = \frac{T_{\Gamma \text{ MAX}} - T_{\text{Ж}}}{T_{\text{Ж}} - T_{\text{К}}} \times 100, \%$	$\Delta\theta'_{\Gamma}, \%$
1	1	1,0	22,6	3,2	12	< 1
2	2	1,0	22,5	18,9	78	13,7
3	2	0,5	23,8	18,9	79	14,3
4 <sup>*)</sup>	2	0,25	28,4	20,5	98	15,1
5	2	0,1	32,9	18,9	95	34,8
6 <sup>**)</sup>	2	0,5	28,5	18,9	79	14,3
7 <sup>**)</sup>	2	0,1	37,1	18,9	95	34,8

<sup>\*)</sup> воздух, который идёт на охлаждение стенок ЖТ, не участвует в процессах смешения;

<sup>\*\*)</sup> константы равновесия взяты из [2]

Индекс эмиссии вычисляется по формуле

$$EI_{NO} = \frac{\sum_{p=1}^5 \left( \sum_{j=1}^{12} G_{NO,j,p} \right) \cdot 1000}{G_T^{\Sigma}}, \text{ г/кг - топл,} \quad (14)$$

где

$$G_{NO,j,p} = g_{NO,j,p} \times \left[ (\alpha_j \cdot L_O + 1) \cdot \Delta G_{T_p}^{GOP} \cdot \Delta R_{j,p} + \Sigma G_{B,j,p}^{CM} \right]$$

– масса окислов азота  $j$ -й фракции  $p$ -й порции в выходном сечении (в кг);  $G_T^{\Sigma}$  – суммарная масса топлива.

Поскольку для расчёта равновесного состава использовались таблицы компонентов [2], то для более точного представления результатов был проведён пересчёт коэффициентов скоростей обратных химических реакций  $k_1''$ ,  $k_2''$  через константы равновесия (для варианта расчёта с  $\eta_{CM} = 0,5$  и  $\eta_{CM} = 0,1$ ), полученные по известной формуле

$$\ln K_k = \frac{T_k \cdot \Delta S(T_k) - \Delta I(T_k)}{R \cdot T_k}. \quad (15)$$

При этом теплофизические величины брались при известной температуре  $T_K$  для каждого участка [2].

Как известно, концентрация и скорость образования «термических» NO зависит от текущей локальной температуры газа  $T_{j,p}$  и времени пребывания газа  $\tau_{пр j,p}$  при данной температуре и наличия недоиспользованного при горении кислорода. При подмешивании смесительного воздуха уменьшаются концентрации всех химических компонентов и температура газа, и в результате уменьшается концентрация NO. Как видно из рис. 12, а, для порции 1 сильное влияние температуры газа и рост концентрации NO наблюдается только на первом и втором участках ЖТ, а далее концентрация NO только уменьшается из-за подмешивания смесительного воздуха.

В итоге из рис. 12 следует, что для варианта смешения 1 порция 1, как продолжительно более горячая, вносит больший вклад в суммарное количество NO, чем порция 3; для варианта 5 с малым  $\eta_{CM} = 0,1$  – наоборот, больший вклад вносит порция 3; для варианта 2 вклад в результирующую концентрацию NO порций 1 и 3 примерно одинаковый.

### Заключительный анализ и выводы

В соответствии с имеющимися обобщениями по экологическим характеристикам КС ТРДД [8] для данной КС в сечении на выходе из ЖТ ожидаемое значение суммарного индекса эмиссии NO должно составить величину  $EI_{NO} = 38$  г/кг-топл. Из табл. 1 следует, что значение суммарного индекса эмиссии окислов азота  $EI_{NO}$ , подсчитанное для выходного сечения КС, последовательно увеличивается от значения 22,5...22,6 г/кг-топл для вариантов расчёта 1 и 2 до значения 37 г/кг-топл для расчётного варианта 7. Последнее значение на 5 % меньше результата, который можно получить из анализа обобщений [8], и на 10 % больше результата трёхмерного расчёта процесса в КС в программе ANSYS Fluent.

Неравномерность поля температур в выходном сечении ЖТ  $\delta T = ((T_{ГР} - T_{Ж}) / T_{Ж})_{CP}$  в среднем для рассмотренных вариантов (табл. 1, столбец 5) составляет  $\delta T = \pm 18,9\%$ . То есть общая среднемассовая ширина гистограммы температур (рис. 9) – 39,8 %, что в два раза больше соответствующих  $\delta T$  для реальных КС ГТД [9].

Согласно столбцу 6 табл. 1 значения коэффициентов неравномерности температурного поля, подсчитанные по локальным  $T_{Г MAX}$  в выходном сечении ЖТ,  $\Delta \theta_{Г} = 0,78...0,95$ , что также более чем в 2 раза превосходит соответствующие данные для существующих КС. Но при

этом среднемаховые значения коэффициентов неравномерности (табл. 1, столбец 7) для схемы смещения № 2 составляют  $\Delta\theta'_r = 13,7\%$  ( $\eta_{CM}=1,0$ ) и  $34,8\%$  ( $\eta_{CM}=0,1$ ), что согласуется с данными для модельных и натуральных КС.

Все расчёты выполнены для условий малоэмиссионной камеры сгорания авиационного ГТД по вычислительной программе, написанной в среде Mathcad. Программа позволяет выполнять расчёт при любых значениях исходных данных.

Результаты расчётов и разработанная методика могут быть применены в индивидуальном курсовом и дипломном проектировании для студентов специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки», а также для инженерных расчётов камер сгорания авиационных ГТД и наземных ГТУ.

#### Библиографический список

1. Диденко, А.А. Теория и расчёт камер сгорания ВРД. Ч. 4. Тепловой и гидравлический расчёты камеры сгорания ГТД [Текст]: учеб. пособие для курсового и дипломного проектирования / А.А. Диденко – Самара: Изд-во СГАУ, 2009. – 40 с.
2. Квасников, А.В. Теория жидкостных ракетных двигателей. [Текст] / А.В. Квасников. – Л.: Судпромгиз, 1959. – Ч. 1. – 543 с.
3. Диденко, А.А. Расчёт равновесного состава продуктов сгорания гомогенной горючей смеси с учётом её неравномерности по коэффициенту избытка окислителя [Текст] / А.А. Диденко // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., посвящённой памяти Генерального конструктора аэрокосмической техники академика Н.Д. Кузнецова. – Самара: Изд-во СГАУ, Самар. науч. центр РАН, 2001. – Ч.1. – С. 47 – 49.
4. Диденко, А.А. Упрощённая математическая модель кинетики окисления углеводородного топлива и образования окислов азота NO [Текст] / А.А. Диденко, С.В. Лукачёв // Тез. докл. IV Всерос. науч.-техн. конф. «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей». – Самара: Изд-во СГАУ, 2002. – С. 59 – 68.
5. Лефевр, А. Процессы в камерах сгорания ГТД [Текст]: [пер. с англ.] / А. Лефевр. – М.: МИР, 1986. – 566 с.
6. Чигир, Н.А. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени [Текст]: [пер. с англ.] / Н.А. Чигир, Р.Дж. Вейнберг, К.Т. Боумэн. – М.: Машиностроение, 1981. – 407 с.
7. Диденко, А.А. Оценка влияния качества гомогенной керосиновоздушной смеси и времени пребывания газа в зоне высоких температур на уровень образования «термических» NO [Текст] / А.А. Диденко, С.В. Лукачёв // Тр. V Всерос. науч.-техн. конф. «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей». Вып. 5. – Самара: Изд-во СГАУ, 2004. – С. 227 – 232.
8. Диденко, А.А. Исследование термогазодинамического и экологического совершенства высокоэффективных гражданских ТРДД и их камер сгорания [Текст] / А.А. Диденко // Вестн. СГАУ. – 2013. – № 3.
9. Программа расчёта и анализ неравномерности полей температур на выходе из основных камер сгорания ГТД [Текст] / А.А. Диденко, С.В. Лукачёв, А.И. Крыжановский [и др.] // Вестн. СГАУ. Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. – 1999. – № 2. – С. 31 – 39.

**QUASI ONE-DIMENSIONAL MODEL AND CALCULATION OF PROCESSES  
IN GAS TURBINE ENGINE COMBUSTION CHAMBERS GIVEN  
THE HETEROGENEITY OF THE COMBUSTIBLE MIXTURE,  
CHANGES IN MASS, COMPOSITION, TEMPERATURE  
AND STIRRING EFFICIENCY OF THE WORKING BODY**

© 2013 A. A. Didenko, A. B. Sokolov

Samara State Aerospace University

The methodology of one-dimensional calculation of the combustion chamber existing at SSAU has been significantly complemented: a) the uneven distribution of fuel in the combustion zone and its combustion in the range of excess air ratio 0.55 ... 1.65 has been taken into account; b) the amount of vaporized fuel at each site is determined by considering the size of evaporating droplets; c) for each fraction of the fuel burnt the equilibrium composition and the adiabatic equilibrium flame temperature is determined; d) a scheme of mixing the combustion products with the secondary combustion air and mixing air is proposed in order to evaluate the non-uniformity of the temperature of exhaust gas at the output of the combustor; e) a mixing quality factor is introduced. The impact of the completeness of mixing, composition and temperature of the gas on the quantity of nitrogen oxides along the length of the flame tube, the NO emission index and the non-uniformity of the temperature field in the output section is assessed. The updated method of calculation is illustrated by the low-emission aviation turbine engine combustor.

*One-dimensional calculation, uneven distribution of fuel, excess air ratio, droplet size, evaporated fuel, equilibrium composition of combustion products, flame temperature, mixing ratio, gas temperature, index of emission.*

**Информация об авторах**

**Диденко Алексей Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [Didenko@ssau.ru](mailto:Didenko@ssau.ru). Область научных интересов: рабочий процесс в камерах сгорания ГТД, распыливание топлива форсунками, лазерно-оптическая диагностика процессов горения.

**Соколов Алексей Борисович**, инженер, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [SokolovAB63@yandex.ru](mailto:SokolovAB63@yandex.ru). Область научных интересов: рабочий процесс в камерах сгорания ГТД.

**Didenko Alexey Aleksandrovich**, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara State Aerospace University. E-mail: [Didenko@ssau.ru](mailto:Didenko@ssau.ru). Area of research: working process in combustion chambers of gas turbine engines, fuel atomization nozzles, laser-optical diagnostics of combustion processes.

**Sokolov Alexey Borisovich**, engineer, Samara State Aerospace University. E-mail: [SokolovAB63@yandex.ru](mailto:SokolovAB63@yandex.ru). Area of research: working process in combustion chambers of gas turbine engines.