

В. М. Кофман

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВОГО ПОТОКА НА ВЫХОДЕ ИЗ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД НА ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОСРЕДНЕНИЯ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

С помощью разработанных алгоритмов осреднения параметров неравномерных газовых потоков и соответствующей программы для ЭВМ исследовано влияние неравномерности поля температуры торможения газового потока на выходе из камеры сгорания ГТД на интегральные характеристики потока и результаты осреднения его параметров. Установлен наиболее обоснованный способ осреднения параметров газового потока для оценки показателей эффективности работы камер сгорания и турбин ГТД по результатам их испытаний. *ГТД; камера сгорания; неравномерный газовый поток; способы осреднения; интегральные характеристики потока; средние параметры*

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В процессе доводки узлов горячей части ГТД (камер сгорания, турбин) для оценки достигнутого уровня коэффициентов, характеризующих эффективность работы этих узлов (коэффициента восстановления полного давления в камере сгорания, КПД турбины), для проверки методов проектирования узлов и оценки влияния вводимых в конструкцию узлов изменений, проводятся автономные испытания полноразмерных камер сгорания и турбин на специальных камерных и турбинных стендах.

Поток газа в сечениях на входе и выходе из узлов ГТД имеет неравномерность полного, статического давлений и неравномерность поля температуры торможения (температурную неравномерность). Как показывают результаты испытаний камер сгорания и турбин авиационных ГТД, отношение максимальной температуры газа к минимальной в сечении на выходе из основной камеры сгорания (на входе в турбину) и на выходе из турбины может достигать $T_{г\max}^* / T_{г\min}^* = 1,6...1,8$. Наличие температурной неравномерности в потоке газа оказывает влияние на его интегральные характеристики, а также на параметры потока, по величинам которых рассчитываются показатели эффективности работы камер сгорания и турбин.

В связи с наличием на входе и выходе узлов ГТД неравномерности параметров газового потока при проведении их испытаний для измерения в окружном и радиальном направлениях

параметров газовых потоков устанавливаются соответствующие приемники. Для определения показателей эффективности работы узлов по результатам измерения давлений и температур неравномерного потока используются величины средних параметров этого потока, которые рассчитываются с помощью того или иного способа осреднения. Задачу осреднения параметров неравномерных газовых потоков при обработке результатов испытаний камер сгорания и турбин ГТД, по результатам решения которой определяются показатели, характеризующие эффективность работы этих узлов, можно отнести к классу обратных термогазодинамических задач.

Как известно [1, 2], свойства установившегося течения цилиндрического осесимметричного, незакрученного в окружном направлении газа в выбранном сечении канала описываются обладающими свойствами аддитивности интегральными характеристиками потока – массовым расходом G , потоком полного импульса Φ , потоком полного теплосодержания I^* , потоком энтропии S , потоками теплосодержания I и кинетической энергии E .

Указанные характеристики важны при расчете ГТД и анализе его работы в целом [1, 2], так как они отражают свойства действительного потока в проточной части двигателя, а из уравнений этих характеристик рассчитываются средние параметры потока. При осреднении параметров действительного неравномерного потока он условно заменяется каноническим равномерным потоком. Критерием правильности выбора способа осреднения является равенство величин интегральных характеристик осред-

ненного потока величинам интегральных характеристик действительного неравномерного потока.

Цилиндрический осесимметричный, незакрученный в окружном направлении, поток имеет три степени свободы (p , W , T). При осреднении таких потоков, соответственно, можно выдержать равенство в каноническом осредненном потоке, как и в действительном неравномерном потоке, величин только трех интегральных характеристик. Поэтому при осреднении по тому или иному способу «часть свойств потока газа неизбежно утрачивается» и «при различных способах осреднения значения характеристик одного и того же режима движения могут отличаться на несколько процентов» [1, 2].

В связи с утратой части свойств неравномерного потока при его осреднении, высокой температурной неравномерностью газового потока в сечении на выходе из камеры сгорания (на входе в турбину), ее влиянием на результаты осреднения неравномерных газовых потоков и, соответственно, на величины показателей эффективности работы камер сгорания и турбин, возникает необходимость выбора обоснованного способа осреднения.

Выбор такого способа может быть выполнен на основе проведения исследований, показывающих, при применении различных способов осреднения, влияние неравномерности температуры торможения в потоке газа на величины интегральных характеристик действительного и осредненных потоков и на погрешности расчета средних давлений, температур и скоростей. Результаты такого исследования, применительно к измеренным при испытаниях полям параметров неравномерного газового потока в сечении на выходе основной камеры сгорания двухконтурного ГТД приведены в настоящей статье.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для осреднения газового потока на выходе из основной камеры сгорания ГТД были использованы разработанные алгоритмы осреднения параметров неравномерных воздушных и газовых потоков и программа для ЭВМ, описанные в [3] и в дальнейшем модифицированные автором [4] с целью методического совершенствования и для возможности выполнения осреднения неравномерных потоков по большому количеству способов.

Одним из допущений, принятых в алгоритмах и программе [3, 4] при обработке неравномерных воздушных и газовых потоков на входе

и выходе из узлов ГТД, является одномерная аппроксимация течения элементарной газовой струйки и соответствующая форма записи уравнений интегральных характеристик потока. То есть предполагается, что в сечении измерения параметров практически отсутствует закрутка потока в окружном направлении, а угол между вектором скорости потока и осью канала мал. Принимаемое допущение, как правило, оправдано и соответствует реальным условиям работы узлов ГТД, так как оно применяется для выбираемых экспериментатором таких сечений проточной части ГТД, в которых закрутка потока в окружном направлении и угол наклона вектора скорости к оси канала малы [5]. Разработанные алгоритмы и программа позволяют осуществлять осреднение параметров неравномерных воздушных и газовых потоков в цилиндрических и кольцевых каналах по 12 способам. К этим способам относятся осреднение по площади, по массовому расходу, с сохранением одинаковых в каноническом осредненном потоке, как и в действительном неравномерном потоке, величин трех интегральных характеристик потока – $G, I, S; G, I, \Phi; G, I^*, S; G, I^*, \Phi; G, \Phi, S; \Phi, S, I; E, G, I; E, G, \Phi; E, G, S$ и G, I^*, E . (В приведенном ниже тексте и таблицах способы осреднения условно обозначены буквами латинского алфавита.) При осреднении по способу с сохранением Φ, S, I принималось допущение, что величина массового расхода G известна. Результаты расчета, полученные при этом способе, приводятся для сведения. Учет теплофизических свойств рабочего тела в [3, 4] осуществляется на уровне элементарных струек в области установки приемников (датчиков) давления и температуры с помощью метода и подпрограмм расчета термодинамических параметров воздуха и продуктов сгорания углеродородных топлив, разработанных Л. Н. Дружининым, Л. И. Швецом, Н. С. Малининой [6]. При расчетах предполагается, что коэффициенты избытка воздуха в элементарных струйках в заданном сечении канала имеют одинаковое значение. Интегральные характеристики действительного неравномерного потока воздуха и газа рассчитываются по формулам

$$G = \iint_D \rho(r, \varphi) W(r, \varphi) r dr d\varphi,$$

$$\Phi = \iint_D (p(r, \varphi) + \rho(r, \varphi) W^2(r, \varphi)) r dr d\varphi,$$

$$S = R_r \iint_D \ln \left[\frac{T(r, \varphi)^{\frac{k}{k-1}}}{p(r, \varphi)} \right] \rho(r, \varphi) W(r, \varphi) r dr d\varphi,$$

$$I = \iint_D c_p(T) T(r, \varphi) \rho(r, \varphi) W(r, \varphi) r dr d\varphi,$$

$$I^* = \iint_D c_p(T^*) T^*(r, \varphi) \rho(r, \varphi) W(r, \varphi) r dr d\varphi,$$

$$E = \frac{1}{2} \iint_D \rho(r, \varphi) W^3(r, \varphi) r dr d\varphi.$$

Кроме интегральных характеристик неравномерного потока в программе рассчитываются величина среднemasсовой осевой скорости потока по формуле

$$c = \frac{\iint_D \rho(r, \varphi) W(r, \varphi) r dr d\varphi}{\iint_D \rho(r, \varphi) r dr d\varphi}.$$

и величина коэффициента поля τ_r [7], характеризующего степень неравномерности поля скоростей потока

$$\tau_r = \frac{\iint_D \rho(r, \varphi) W^2(r, \varphi) r dr d\varphi}{\left[\iint_D \rho(r, \varphi) W(r, \varphi) r dr d\varphi \right]^2},$$

где $D = \{(R, \varphi) \mid R_1 \leq R \leq R_N, \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_M\}$ – область на плоскости в полярной системе координат; $\bar{R} = (R_1, R_2, \dots, R_N)$, $\bar{\varphi} = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M)$ – массивы радиусов и углов, на которых осуществляется измерение параметров p_i, p_i^*, T_i^* в элементарных струйках; ρ, W – плотность и скорость воздуха; r, φ – переменные интегрирования (радиус и угол).

При осреднении параметров по способам с сохранением в каноническом осредненном потоке, как и в неравномерном действительном, трех из шести перечисленных выше интегральных характеристик, в каждом случае (способе осреднения), после расчета интегральных характеристик потока, решается система соответствующих трех из следующих шести уравнений

$$G = \bar{W} F \frac{\bar{p}}{R_r \bar{T}} = \frac{m \bar{p}^* q(\bar{\lambda}) F}{\sqrt{\bar{T}^*}},$$

$$I = G c_p(\bar{T}) \bar{T}, \quad I^* = G c_p(\bar{T}^*) \bar{T}^*,$$

$$S = R_r G \ln \left[\frac{\bar{T}^{\frac{k}{k-1}}}{\bar{p}} \right] = R_r G \ln \left[\frac{\bar{T}^{*\frac{k}{k-1}}}{\bar{p}^*} \right],$$

$$\Phi = G \bar{W} + \bar{p} F = \frac{k+1}{2k} G a_{\text{кр}} z(\bar{\lambda}), \quad E = \frac{G}{2} \bar{W}^2$$

и определяются для этого способа осреднения соответствующие средние параметры $\bar{p}, \bar{T}, \bar{W}$

или $\bar{p}^*, \bar{T}^*, \bar{\lambda}$. Далее из трех оставшихся уравнений определяются интегральные характеристики канонического осредненного потока, величины которых при данном способе осреднения могут не сохраняться равными величинам интегральных характеристик действительного неравномерного потока.

3. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнительный анализ способов осреднения выполнен применительно к неравномерному газовому потоку (назовем его условно поток «7») в сечении на выходе из кольцевой камеры сгорания двухконтурного ГТД «Л». Температурное поле газа на выходе из камеры сгорания получено по результатам ее испытаний на специализированном камерном стенде. При проведении испытаний камеры на соответствующих мерных участках стенда производилось измерение подаваемых в камеру расходов воздуха и топлива и отбираемого из камеры расхода воздуха. В выходном сечении камеры в радиальном и окружном направлениях измерялась температура торможения с помощью устройства кругового замера, на котором были установлены две гребенки «А» и «Б» с термопарами (по 5 термопар на каждой гребенке). Схема расположения гребенок для измерения температуры газа показана на рис. 1, 2. В радиальном направлении термопары устанавливались с неравномерным шагом для обеспечения расположения термопар в центрах равновеликих кольцевых площадей. Измерение температуры газа производилось на 10 радиусах при 112 угловых положениях устройства кругового замера. Погрешность измерения температуры газа не превышала $\pm 0,3\%$ от верхнего предела измеряемой величины. Результаты измерения температуры газа на выходе из камеры сгорания ГТД «Л» на одном из углов и одном из радиусов показаны на рис. 3, 4.

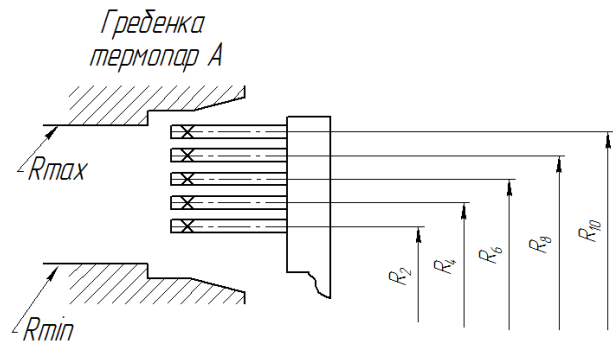


Рис. 1. Схема гребенки «А» для измерения температуры газа

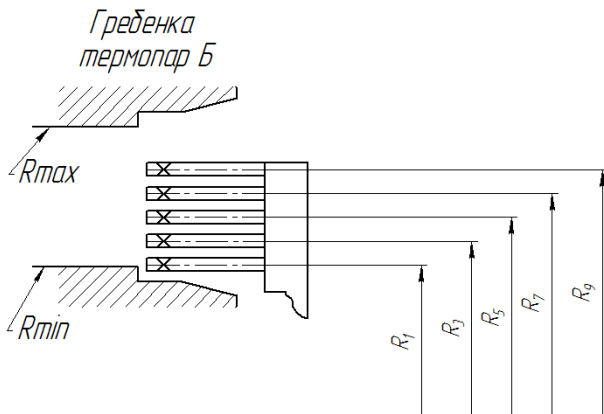


Рис. 2. Схема гребенки «Б» для измерения температуры газа

Так как поле полных давлений газа на выходе из камеры сгорания при испытаниях на камерном стенде не измерялось, то при проведении настоящего исследования использовалась зависимость изменения относительного полного давления от относительной высоты канала

$$p_r^* = \frac{p_{r,i}^* - p_r}{p_{r,max}^* - p_r} = f(\bar{h}),$$

полученная по результатам измерений давлений при холодной продувке модели камеры сгорания ГТД «Л», где \bar{h} – относительная высота канала, p_r – статическое давление в выходном сечении камеры сгорания.

Следует отметить, что режим испытания камеры на камерном стенде отличался от режима работы камеры на максимальном режиме в системе ГТД «Л» пониженными значениями давлений и температур, расхода воздуха и газа в сечениях на входе и выходе из камеры. Эпюра полного давления газа в сечении на выходе из камеры сгорания для режима испытания камеры ГТД «Л» на камерном стенде была получена путем пересчета эпюры относительного полного давления имевшей место при холодной продувке модели этой камеры и приведена на рис. 5. Статическое давление газа в сечении на выходе из камеры при проведении расчетов принималось постоянным.

Расход газа в выходном сечении камеры на режиме ее испытания, рассчитанный путем интегрирования по струйкам с помощью программы [4], отличался от суммы расходов воздуха (с учетом его отбора) и топлива, измеренных при испытании камеры, на 0,14 %.

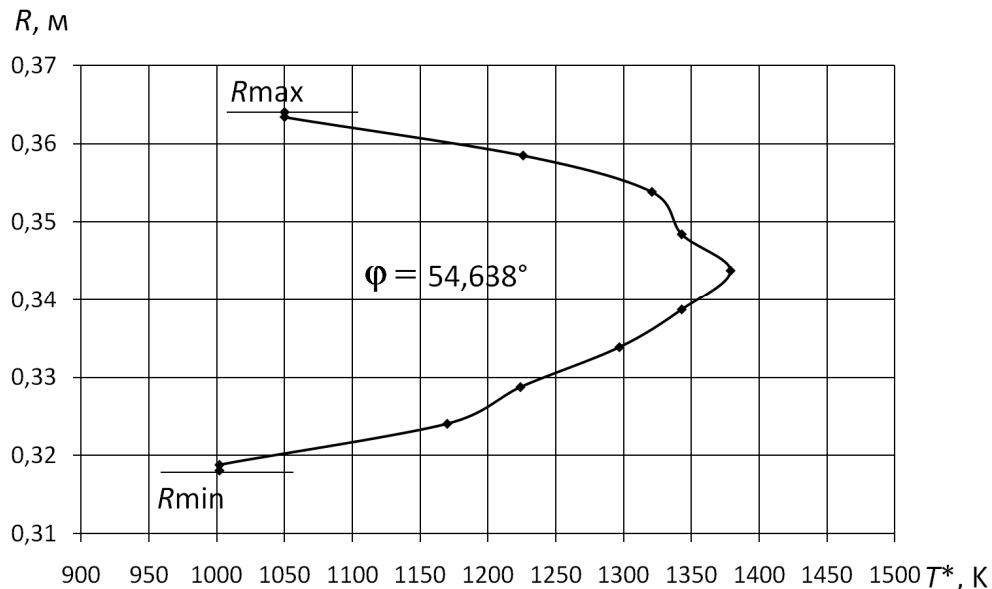


Рис. 3. Результаты измерения температуры газа на выходе из камеры сгорания ГТД «Л» в радиальном направлении при $\varphi = \text{idem}$

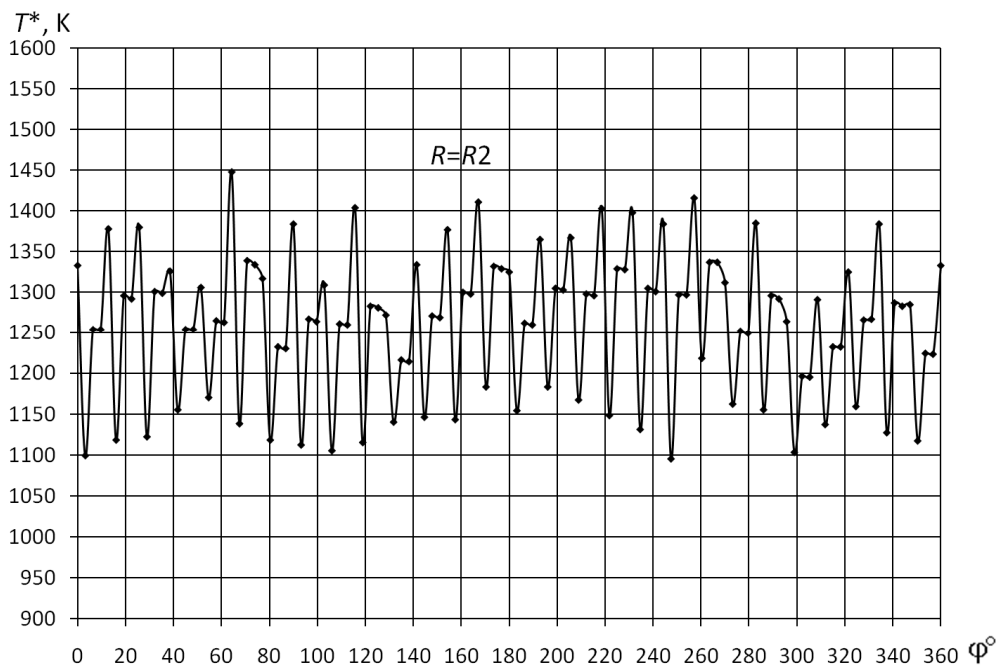


Рис. 4. Результаты измерения температуры газа на выходе из камеры сгорания ГТД «Л» в окружном направлении при $R = idem$

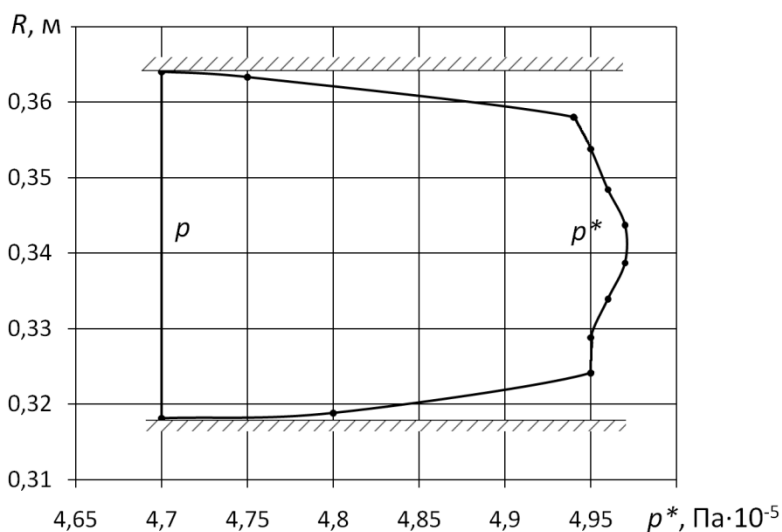


Рис. 5. Эпюра полного давления газа на выходе из камеры сгорания «Л»

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Этапы исследования

Анализ результатов осреднения неравномерного газового потока на выходе из камеры сгорания выполнялся в два этапа.

На I этапе проводилось осреднение полученных при испытаниях камеры параметров действительного неравномерного потока газа (назовем его поток «7»). Поток «7» имел относительно невысокие коэффициент поля ($\tau_r = 1,057$), приведенную среднемассовую ско-

рость ($\lambda_c = 0,163$) и высокую температурную неравномерность, которая характеризовалась коэффициентом

$$K_T = \frac{T_{г.макс}^* - T_{г.мин}^*}{T_{г.ср}^*} 100 \%$$

и отношением температур $T_{г.макс}^* / T_{г.мин}^*$, где $T_{г.ср}^*$ – средняя температура газового потока, рассчитанная из уравнения потока полного теплосодержания. При этом коэффициент K_T был равен 49,1 %, а отношение максимальной температу-

ры газа к минимальной составляло $T_{r \max}^* / T_{r \min}^* = 1,708$.

На II этапе при тех же исходных данных ($p_r, p_{r i}^*$), но при условии, что температурная неравномерность потока отсутствует, было выполнено осреднение параметров неравномерного газового потока (назовем его поток «7Т0»). При обработке параметров потока «7Т0» принималось, что температура торможения газа в нем постоянна и равна средней температуре торможения, рассчитанной из уравнения потока полного теплосодержания потока «7», имеющего температурную неравномерность. Коэффициент поля потока «7Т0» был равен $\tau_r = 1,041$, приведенная среднемаховая скорость в потоке $\lambda_c = 0,166$ ($K_T = 0 \%$, $T_{r \max}^* / T_{r \min}^* = 1,0$). Сравнение результатов исследования потоков «7Т0» и «7» позволяет оценить влияние температурной неравномерности в сечении на выходе из камеры сгорания «Л» на интегральные характеристики газового потока и на результаты осреднения его параметров.

4.2. Результаты сравнительных расчетов

Результаты расчета и сравнительного анализа интегральных характеристик и параметров неравномерных газовых потоков «7Т0» и «7» при различных способах осреднения представлены в табл. 1, 2, 3, 4 и 5.

В табл. 1 приведены данные показывающие, при прочих равных условиях, влияние температурной неравномерности газового потока на изменение (в процентах) величин интегральных характеристик действительного неравномерного потока G, I, I^*, Φ, S, E при переходе от потока «7Т0» к потоку «7».

В табл. 2 и 3 приведены величины относительных интегральных характеристик, статического давления и скоростей, рассчитанные при использовании различных способов осреднения, соответственно для потоков «7Т0» и «7». Отнесение параметров производилось к величинам интегральных характеристик, статического давления соответствующего действительного неравномерного потока и величине его среднемаховой скорости c .

В табл. 4 для потоков «7Т0» и «7» приведены полученные при различных способах осреднения величины относительных средних температур торможения, средних статических температур, средних приведенных скоростей потока. Отнесение параметров производилось, соответственно, к температуре торможения и статиче-

ской температуре, рассчитанным из уравнений потоков теплосодержания I^*, I потоков «7Т0» и «7», и к приведенной скорости λ_c , рассчитанной по величине среднемаховой скорости c соответствующих потоков и температуре торможения, полученной из уравнения потока полного теплосодержания потока «7».

Выбор температур, к которым производилось отнесение, обусловлен тем, что они рассчитаны из уравнений соответствующих потоков теплосодержания и отражают свойства действительного газового потока. Выбор в качестве параметра отнесения приведенной скорости λ_c обусловлен тем, что она используется при выполнении расчетов ГТД и для обобщения результатов экспериментальных исследований ГТД и его узлов.

В табл. 5 приведены полученные при различных способах осреднения величины относительных средних полных давлений в потоках «7Т0» и «7» и данные, показывающие изменение среднего полного давления в потоке «7» по отношению к потоку «7Т0». При этом отнесение средних полных давлений осуществлялось к полученному при осреднении по массовому расходу среднему полному давлению, величина которого, как показали расчеты, не изменяется при появлении в газовом потоке температурной неравномерности. В табл. 5 также приведены величины среднего полного давления потоков «7Т0» и «7», отнесенные к максимальной величине полного давления действительного потока.

4.3. Влияние неравномерности температуры газового потока на его интегральные характеристики

Величины интегральных характеристик действительного неравномерного потока «7» на выходе из камеры «Л», имеющего температурную неравномерность, по сравнению с характеристиками потока «7Т0», не имеющего температурной неравномерности, при прочих равных условиях, изменились незначительно – на (0,1...0,5) % (табл. 1). При этом расход газа в потоке «7» увеличился на $\delta G = 0,101 \%$, что качественно и приближенно количественно согласуется с приближенными аналитическими оценками, полученными в [8]. Величина потока энтропии в потоке «7» уменьшилась на $\delta S = 0,113 \%$. Полный импульс потока «7» сохранился таким же, как и в потоке «7Т0», в котором отсутствует температурная неравномерность. Потоки теплосодержания увеличились на (0,103...0,105) %, поток кинетической энергии увеличился на 0,559 % (табл. 1).

Таблица 1
Влияние неравномерности температуры газового потока на выходе из камеры сгорания ГТД «Л» на изменение интегральных характеристик потока (в процентах)

	δG	δI	δI^*	$\delta \Phi$	δS	δE
Поток «7Т0», $K_T = 0\%$	0	0	0	0	0	0
Поток «7», $K_T = 49,1\%$	0,101	0,103	0,105	0	-0,1138	0,559

4.4. Влияние неравномерности температуры газового потока на интегральные характеристики осредненных потоков

Следует отметить, что знание отличия интегральных характеристик осредненного потока газа от интегральных характеристик действительного потока при наличии или отсутствии в потоке температурной неравномерности необходимо для оценки степени потерь свойств осредненного потока газа по сравнению со свойствами действительного потока.

В целом, из рассмотрения результатов осреднения газового потока «7Т0» на выходе из камеры «Л» с помощью способов, в которых сохраняются величины трех интегральных характеристик, следует (табл. 2), что при отсутствии температурной неравномерности в большинстве этих способов осреднения имеет место потеря части свойств потока. Некоторые интегральные характеристики осредненного канонического потока при ряде способов осреднения не равны соответствующим характеристикам действительного неравномерного потока. Как правило, в большинстве способов имеют место погрешности расчета величин двух или трех из шести (G, I^*, I, S, Φ, E) интегральных характеристик осредненного потока (от 0,1 % до 9,5 %) (табл. 2).

В случае появления в газовом потоке температурной неравномерности (при переходе от потока «7Т0» к потоку «7»), следует (табл. 2, 3), что при способах осреднения, в которых обеспечивается сохранение постоянного потока энтропии ($G, I, S; E, G, S; G, \Phi, S$ и G, I^*, S), погрешности расчета некоторых интегральных характеристик осредненного потока, не сохраняемых при указанных способах осреднения, как правило, увеличиваются (табл. 2, 3).

Таблица 2
Результаты сравнительного анализа интегральных характеристик газового потока «7Т0» на выходе из камеры сгорания ГТД «Л» при различных способах осреднения
(Поток «7Т0» – $\tau_r = 1,041, \lambda_c = 0,166, T_{r \max}^* / T_{r \min}^* = 1,0, K_T = 0\%$)

Z								Способ осреднения
\bar{G}	\bar{I}	\bar{I}^*	$\bar{\Phi}$	\bar{S}	\bar{E}	\bar{p}	W/c	
Действительный поток								
1	1	1	1	1	1	1	1	
Осредненный поток								
1,021	1,021	1,021	1,000	1,021	0,966	1,000	1,021	F
1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,049	G
1	1	0,999	0,998	1	0,908	1,000	0,999	G, I, S
1	1	0,999	1	0,999	0,905	1,001	0,998	G, I, Φ
1	1	0,999	1	1	0,985	1,000	1,041	Φ, S, I
1	1	1,000	0,954	1,002	1	0,952	1,049	E, G, I
1	1,057	1,056	1	1,021	1	0,999	1,049	E, G, Φ
1	0,984	0,984	0,941	1	1	0,939	1,049	E, G, S
1	0,999	0,999	1	1	0,905	1,001	0,998	G, Φ, S
1	1,000	1	1,000	1	0,909	1,001	1,001	G, I^*, S
1	1,000	1	1	1,000	0,915	0,998	1,004	G, I^*, Φ
1	1,000	1	0,959	1,002	1	0,955	1,049	G, I^*, E

Таблица 3

Результаты сравнительного анализа интегральных характеристик газового потока «7» на выходе из камеры сгорания ГТД «Л» при различных способах осреднения
(Поток «7» – $\tau_r = 1,057$, $\lambda_c = 0,163$, $T_{r \max}^* / T_{r \min}^* = 1,708$, $K_T = 49,1$ %)

Относительные характеристики потока								Способ осреднения
\bar{G}	\bar{I}	\bar{I}^*	$\bar{\Phi}$	\bar{S}	\bar{E}	\bar{p}	W/c	
Действительный поток								
1	1	1	1	1	1	1	1	
Осредненный поток								
1,023	1,015	1,0148	1,000	1,022	0,957	1,000	1,033	<i>F</i>
1	0,9998	0,9997	1,000	1,002	0,990	1,000	1,063	<i>G</i>
1	1	0,999	1,041	1	0,828	1,045	0,972	<i>G, I, S</i>
1	1	0,999	1	1,002	0,903	1,001	1,0146	<i>G, I, Φ</i>
1	1	0,996	1	1	0,140	1,045	-0,400	<i>Φ, S, I</i>
1	1	1,000	0,953	1,004	1	0,951	1,067	<i>E, G, I</i>
1	1,058	1,058	1	1,024	1	0,9995	1,067	<i>E, G, Φ</i>
1	0,968	0,968	0,928	1	1	0,925	1,067	<i>E, G, S</i>
1	0,989	0,988	1	1	0,885	1,0014	1,005	<i>G, Φ, S</i>
1	1,0008	1	1,044	1	0,828	1,048	0,972	<i>G, I*, S</i>
1	1,0004	1	1	1,002	0,913	0,998	1,020	<i>G, I*, Φ</i>
1	1,0000	1	0,957	1,004	1	0,953	1,067	<i>G, I*, E</i>

Таблица 4

Результаты сравнительного анализа параметров при различных способах осреднения неравномерных газовых потоков «7Т0» и «7» на выходе из камеры сгорания ГТД «Л»

Способ осреднения	Поток «7Т0» $\tau_r = 1,041$, $\lambda_c = 0,166$, $K_T = 0$ %			Поток «7» $\tau_r = 1,057$, $\lambda_c = 0,163$, $K_T = 49,1$ %		
	$\frac{T^*}{T_{GI^*S}^*}$	$\frac{T}{T_{GIS}}$	$\frac{\lambda}{\lambda_u}$	$\frac{T^*}{T_{GI^*S}^*}$	$\frac{T}{T_{GIS}}$	$\frac{\lambda}{\lambda_c}$
<i>F</i>	1,000	1,000	1,024	0,992	0,993	1,043
<i>G</i>	1,000	1,000	1,054	0,9998	0,9998	1,071
<i>G, I, S</i>	0,9996	1	1,005	0,9993	1	0,980
<i>G, I, Φ</i>	0,9996	1	1,004	0,9996	1	1,023
<i>Φ, S, I</i>	0,999	1	1,047	0,996	1	-0,404
<i>E, G, I</i>	1,000	1	1,055	1,000	1	1,073
<i>E, G, Φ</i>	1,049	1,049	1,030	1,050	1,050	1,049
<i>E, G, S</i>	0,986	0,986	1,060	0,972	0,972	1,091
<i>G, Φ, S</i>	0,999	0,999	1,000	0,990	0,990	1,018
<i>G, I*, S</i>	1	1,000	1,006	1	1,001	0,980
<i>G, I*, Φ</i>	1	1,0003	1,009	1	1,0003	1,029
<i>G, I*, E</i>	1	1,000	1,054	1	1,000	1,076

Таблица 5

Результаты сравнения среднего полного давления в потоках «7Т0» ($\tau_r = 1,041$, $\lambda_c = 0,166$, $K_T = 0$ %) и «7» ($\tau_r = 1,057$, $\lambda_c = 0,163$, $K_T = 49,1$ %) на выходе из камеры сгорания «Л»

Способ осреднения	Сравнение среднего полного давления в потоках «7» и «7Т0»		Относительное среднее полное давление в потоке «7Т0», $K_T = 0$ %		Относительное среднее полное давление в потоке «7», $K_T = 49,1$ %	
	$\frac{p_7^*}{p_{7Т0}^*}$	δp %	$\frac{p^*}{p_G^*}$	$\frac{p^*}{p_{max}^*}$	$\frac{p^*}{p_G^*}$	$\frac{p^*}{p_{max}^*}$
F	1,000	0	0,999	0,997	0,9991	0,997
G	1,000	0	1	0,998	1	0,998
G, I, S	1,044	4,4	0,998	0,9966	1,042	*1,0407
G, I, Φ	0,9999	-0,01	0,9997	0,9979	0,9997	0,9979
Φ, S, I	1,030	3,0	0,9997	0,9980	1,030	* 1,0281
E, G, I	0,998	-0,2	** 0,952	0,951	** 0,9518	0,950
E, G, Φ	1,000	0	0,9988	0,9970	0,9988	0,997
E, G, S	0,985	-1,5	** 0,939	0,938	** 0,926	0,924
G, Φ, S	1,000	0	0,9997	0,9979	0,9999	0,9981
G, I^*, S	1,0457	4,5	1,000	0,998	1,0457	* 1,0438
G, I^*, Φ	0,9998	-0,02	0,997	0,9954	0,997	0,9953
G, I^*, E	0,999	-0,1	** 0,954	0,9532	** 0,9539	0,952

Примечания: 1)* – $p^* > p_{дейст. max}^*$, 2) ** – $p^* \leq p_{дейст.}$

При способах осреднения, в которых по принятым условиям осреднения не обеспечивается сохранение потока энтропии (способы с сохранением G, I, Φ ; E, G, I ; E, G, Φ ; G, I^*, Φ ; G, I^*, E), при появлении в потоке температурной неравномерности, погрешности расчета интегральных характеристик, не сохраняемых при указанных способах осреднения, изменились незначительно, не более чем на (0,1...0,3) %, (табл. 2, 3).

Влияние неравномерности температуры газового потока на результаты осреднения параметров по площади

При осреднении по площади параметров потока «7Т0», имеющего неравномерность поля скоростей, но не имеющего температурной неравномерности, отмечается потеря свойств осредненного по этому способу потока по сравнению со свойствами действительного потока. Величины таких интегральных характеристик осредненного потока как G, I, I^*, S рассчитываются при этом способе с погрешностью 2,1 %, E – с погрешностью –3,4 %. Величины полного импульса Φ осредненного потока, среднего статического давления при этом способе сохраняются равными соответствующим величинам, имеющим место в действительном потоке

(табл. 2). Величины средних температуры торможения и статической температуры равны температурам, рассчитанным из уравнений соответствующих потоков теплосодержания (табл. 4).

При переходе от потока «7Т0» к потоку «7», имеющему температурную неравномерность, погрешности расчета характеристик G, I, I^*, S при осреднении по площади (по отношению к погрешностям расчета этих параметров в потоке «7Т0»), изменились незначительно (на 0,2...0,9 %) (табл. 2, 3). Средние статическая и температура торможения при наличии температурной неравномерности рассчитываются с погрешностями (–0,7...–0,8) % (табл. 4). Под погрешностью расчета температур понимается отличие средних температур, полученных при осреднении по площади, от средних температур, рассчитанных из уравнений потоков теплосодержания.

При осреднении по площади и при переходе от потока «7Т0» к потоку «7», имеющему температурную неравномерность, абсолютные и относительные величины потока импульса Φ , величины средних статического и полного давлений, не изменились (табл. 2, 3, 5).

4.6. Влияние неравномерности температуры газового потока на температуру торможения осредненных потоков

Величины потоков полного теплосодержания I^* осредненного потока «7Т0» (согласно условиям, принятым при осреднении) при способах осреднения с сохранением $G, I^*, S; G, I^*, \Phi; G, I^*, E$ равны потоку полного теплосодержания действительного потока «7Т0». Такое же равенство соблюдается при осреднении потока «7Т0» по способу с сохранением E, G, I (табл. 1). Соответственно при этом способе осреднения обеспечивается равенство температуры торможения T^* осредненного потока «7Т0» величине температуры торможения, рассчитанной из уравнения потока полного теплосодержания действительного потока. Указанная закономерность для способа осреднения с сохранением E, G, I отмечается и при переходе к потоку «7», имеющему температурную неравномерность (табл. 3, 4). При всех остальных способах осреднения ($G, I, S; G, I, \Phi; G, \Phi, S; E, G, \Phi$ и E, G, S), в которых сохраняются три из шести интегральных характеристик действительного потока (G, I, I^*, Φ, S, E), отмечаются погрешности расчета потока полного теплосодержания осредненного потока и средней температуры торможения потоков «7Т0» и «7» (см. табл. 2, 3, 4). Наибольшие погрешности расчета потока I^* имеют место при способах осреднения с сохранением E, G, Φ и E, G, S (5,6...5,8) % и (-1,6...-3,2) % соответственно. Следует отметить, что величина погрешности расчета средней температуры торможения по абсолютной величине несколько меньше погрешности расчета потока полного теплосодержания I^* (табл. 2, 3, 4), что обусловлено компенсирующим изменением удельной теплоемкости газа в уравнении потока полного теплосодержания.

4.7. Влияние неравномерности температуры газового потока на статическую температуру осредненных потоков

Величины потоков теплосодержания I осредненного потока «7Т0» (согласно условиям, принятым при осреднении) при способах осреднения с сохранением $G, I, S; G, I, \Phi$ и E, G, I равны потоку теплосодержания действительного потока «7Т0». Такое же равенство также соблюдается при осреднении потока «7Т0» с сохранением G, I^*, E (табл. 2). Соответственно, при указанных выше способах осреднения

обеспечивается равенство статической температуры осредненного потока «7Т0» величине статической температуры, рассчитанной из уравнения потока теплосодержания I (табл. 3). Указанная закономерность для способа с сохранением G, I^*, E отмечается и при переходе к потоку «7», имеющему температурную неравномерность (табл. 3). При всех остальных способах осреднения ($G, I^*, S; G, I^*, \Phi; G, \Phi, S; E, G, \Phi; E, G, S$), в которых сохраняются три из шести интегральных характеристик действительного потока (G, I, I^*, Φ, S, E) отмечаются погрешности расчета потока теплосодержания осредненного потока и средней статической температуры потоков «7Т0» и «7» (см. табл. 2, 3, 4). Наибольшие погрешности расчета потока I имеют место при способах осреднения с сохранением E, G, Φ и E, G, S (5,7...5,8) % и (-1,6...-3,2) % соответственно.

4.8. Влияние неравномерности температуры газового потока на среднее статическое давление осредненных потоков

Среднее статическое давление газа на выходе из камеры сгорания «Л» в потоке «7Т0» (при отсутствии температурной неравномерности), равно статическому давлению действительного потока газа только при способах осреднения по площади, по массовому расходу, с сохранением G, I, S (табл. 2).

В потоке «7» (имеющем температурную неравномерность) статическое давление в осредненном потоке сохраняется равным статическому давлению действительного потока только при способах осреднения по площади и по массовому расходу (табл. 3), т. е. p_F (при $T^* \neq \text{const}$) = p_F (при $T^* = \text{const}$) = $p_{\text{дейст}}$; p_G (при $T^* \neq \text{const}$) = p_G (при $T^* = \text{const}$) = $p_{\text{дейст}}$.

При всех других способах отмечаются погрешности расчета среднего статического давления. Например, при способе осреднения с сохранением G, I^*, S погрешности расчета среднего статического давления составляют 0,1 % для потока «7Т0» (табл. 2) и 4,8 % для потока «7» (табл. 3).

4.9. Влияние неравномерности температуры газового потока на параметры при осреднении по массовому расходу

Сравнение результатов осреднения по массовому расходу параметров потока «7Т0», в котором отсутствует температурная неравномерность, и параметров потока «7», имеющего тем-

пературную неравномерность, показало следующее.

Величины средних температуры торможения и статической температуры при осреднении по массовому расходу газовых потоков «7Т0» и «7», как при отсутствии, так и при наличии температурной неравномерности, равны температуре торможения и статической температуре, рассчитанным из соответствующих потоков теплосодержания (табл. 4), т. е.

$$T_G^* = T_{G^*s}^*, \quad T_G = T_{GIS}.$$

Величина среднего полного давления в газовом потоке «7», имеющем температурную неравномерность, при осреднении его параметров по массовому расходу равна среднему полному давлению, полученному при этом способе в потоке «7Т0» с постоянной температурой торможения (табл. 4), т. е. p_G^* (при $T^* \neq \text{const}$) = p_G^* (при $T^* = \text{const}$).

Полученный результат при осреднении по массовому расходу соответствует физическому смыслу, так как условное внесение в поток или исключение из него температурной неравномерности, при прочих равных условиях, не может изменить существующую в действительном потоке газа эпюру полного давления и, соответственно, изменить среднее значения полного давления в этом потоке.

Величины интегральных характеристик (I_G^* , Φ_G , E_G) осредненного по массовому расходу канонического потока (полученные путем расчета по величинам средних по массовому расходу температуры торможения T_G^* , полного и статического давлений p_G^* , p_G) как при отсутствии, так и при наличии в действительном газовом потоке температурной неравномерности, равны соответствующим характеристикам действительных неравномерных потоков.

Исключением является поток энтропии S_G , полученный при осреднении по массовому расходу потока, величина которого в осредненном потоке больше на 0,21 % величины потока энтропии действительного неравномерного потока «7», имеющего температурную неравномерность.

Полученное отличие обусловлено следующим:

• При появлении в потоке «7» температурной неравномерности (при прочих равных условиях) величина удельной энтропии этого потока s пропорциональна соотношению

$$\frac{1}{G} \int \ln \left(T^{\frac{*k-1}{k}} \right) dG$$

формально [9], при выполнении операции интегрирования и замене интеграла суммами, всегда меньше удельной энтропии потока, (в котором отсутствует температурная неравномерность), т. е. имеет место неравенство

$$\frac{1}{G} \int \ln \left(T^{\frac{*k-1}{k}} \right) dG < \ln T_{cp}^{\frac{*k-1}{k}},$$

где

$$T_{cp}^* = \frac{1}{G} \int T^* dG = T_G^* = T_{G^*s}^*.$$

• Величина расхода газа (при прочих равных условиях) в неравномерном по температуре потоке больше расхода газа потока, в котором отсутствует температурная неравномерность.

Как было показано выше, при переходе от потока «7Т0», имеющего постоянную температуру газа в выходном сечении камеры «Л», к потоку «7», в котором имеется неравномерность температуры, расход газа в потоке «7» увеличился на $\delta G = 0,101$ %, а поток энтропии действительного потока уменьшился на $\delta S = -0,1138$ %.

С помощью метода малых отклонений [13] можно получить изменение удельной энтропии действительного потока при появлении в потоке температурной неравномерности с помощью уравнения $\delta s = \delta S - \delta G = -0,1138 - 0,101 = -0,2148$ %.

При осреднении действительного неравномерного по температуре потока «7» по массовому расходу величина удельной энтропии s_G , рассчитанная по величинам средних по массовому расходу давлений и температур p_G^* и T_G^* , сохраняется такой же, как и в потоке «7Т0», т. е. s_G (при $T^* \neq \text{const}$) = s_G (при $T^* = \text{const}$).

Величина же потока энтропии S_G в потоке «7» при осреднении его по массовому расходу возрастает по сравнению с потоком энтропии S_G потока «7Т0» ровно в той же степени (0,1 %), в какой увеличивается в потоке «7» расход газа.

Таким образом, превышение потока энтропии S_G , полученного при осреднении по массовому расходу потока «7» на 0,21 %, по отношению к потоку энтропии действительного потока «7» является следствием возникающей формальной погрешности расчета [9] (уменьшения) удельной энтропии s в неравномерном по температуре потоке «7», а также увеличения расхода газа в этом потоке.

4.10. Выбор обоснованного способа осреднения параметров неравномерных газовых потоков

Важным параметром, который используется для расчета степени понижения полного давления газа, приведенного расхода газа, КПД турбины, коэффициента восстановления полного давления в камере сгорания ГТД, является среднее полное давление газового потока.

Как указывается в [1, 2], способ осреднения с сохранением G, I^*, S является наиболее обоснованным при определении среднего полного давления. В то же время в работах [9, 10, 11, 12] указывается, что при использовании способа осреднения с сохранением G, I^*, S при обработке потоков, имеющих неравномерное поле температуры торможения, возникают ограничения, обусловленные тем, что величина среднего полного давления, рассчитанная с использованием этого способа, имеет значительную погрешность и может превышать величину максимального полного давления действительного потока. Это обусловлено тем, что предположение о сохранении в осредненном потоке величины потока энтропии такой же как и величина потока энтропии в действительном неравномерном по температуре торможения потоке, как указано в [9], всегда приводит, из-за формального уменьшения в неравномерном по температуре потоке удельной энтропии s , к погрешности расчета (завышению) полного давления осредненного потока. Из рассмотрения табл. 5, следует, что при отсутствии в потоке температурной неравномерности (поток «7Т0») среднее полное давление при способе осреднения с сохранением G, I^*, S равно среднему полному давлению при осреднении по массовому расходу, т. е. $p_{G^*S}^*$ (при $T^* = \text{const}$) = p_G^* (при $T^* = \text{const}$).

При наличии температурной неравномерности потока (поток «7») величина среднего полного давления, полученная при способе осреднения с сохранением G, I^*, S , превышает среднее полное давление при этом способе в потоке с постоянной температурой торможения (потоке «7Т0») на 4,57 % (табл. 5), т. е. $p_{G^*S}^*$ (при $T^* \neq \text{const}$) > p_G^* (при $T^* \neq \text{const}$) = p_G^* (при $T^* = \text{const}$). Для оценки влияния изменения массового расхода и потока энтропии на величины средних статического и полного давлений, полученных с помощью способов, в которых поток энтропии сохраняется постоянным, запишем уравнения для расчета давлений и уравнения для расчета их изменения в малых отклонениях [13]

$$\frac{p^*}{p} = \frac{\left(\frac{T^*}{T}\right)^{\frac{k}{k-1}}}{y}, \quad \frac{p}{p^*} = \frac{\left(\frac{T}{T^*}\right)^{\frac{k}{k-1}}}{y},$$

$$\delta p = \delta(T^{k-1}) - \delta y, \quad \delta p^* = \delta(T^{*k-1}) - \delta y,$$

$$\text{где } y = \exp\left(\frac{S}{RG}\right).$$

Как следует из полученных в малых отклонениях уравнений, увеличение расхода газа и уменьшение потока энтропии в неравномерном по температуре потоке газа «7» на выходе из камеры сгорания «Л» приводит к уменьшению параметра y и, соответственно, к увеличению среднего полного и статического давлений при способах осреднения с сохранением потока энтропии.

В потоке «7» с температурной неравномерностью, по сравнению с потоком «7Т0», из-за увеличения в потоке «7» расхода газа ($\delta G = 0,101\%$) и уменьшения потока энтропии ($\delta S = -0,1138\%$), (табл. 5) происходит уменьшение параметра y на $\delta y = -4,57\%$.

Уменьшение параметра y приводит к повышению средних полного и статического давлений в потоке «7», по сравнению с потоком «7Т0», при способе осреднения с сохранением G, I^*, S на $\delta p^* = 4,57\%$ (табл. 5), $\delta p = 4,8\%$ (табл. 3), при способе осреднения с сохранением G, I, S – на $\delta p^* = 4,2\%$ (табл. 5), $\delta p = 4,5\%$ (табл. 3). При этом средние полные давления, полученное с использованием способов осреднения с сохранением G, I^*, S и G, I, S превышают максимальное полное давление в потоке «7» соответственно на 4,38 % и 4,07 % (табл. 5). Как показали расчеты, величина относительного коэффициента влияния [13] $\delta p^* / \delta S$ для способа с сохранением G, I^*, S и рассматриваемого потока «7» составила (-20,4), т. е. незначительная погрешность расчета потока энтропии $\delta S = -1\%$ приводит к погрешности расчета среднего полного давления $\delta p^* = 20,4\%$.

Как показали результаты осреднения других равномерных и неравномерных по температуре газовых потоков [14, 15]:

- потоков на выходе из турбины «Б» ($\lambda_c = 0,65, \tau_r = 1,1, T_{r \max}^* / T_{r \min}^* = 1,0 \dots 1,755$) [14],

- потоков на выходе из камеры сгорания «Б» ($\lambda_c = 0,33, \tau_r = 1,08 \dots 1,1, T_{r \max}^* / T_{r \min}^* = 1,0 \dots 1,8$) [15],

отличие среднего полного давления при способе осреднения с сохранением G, I^*, S от давления осредненного по массовому расходу существенно возрастает при увеличении неравномер-

ности температуры торможения в потоке. Так, при величине коэффициента $T_{r\max}^*/T_{r\min}^* = 1,8$ [15], полное давление при осреднении по способу с сохранением G, I^*, S превышает полное давление при осреднении по массовому расходу на 18,3 %.

При всех других способах осреднения величины средних полных давлений в потоках «7Т0» и «7» отличаются от среднего полного давления при осреднении по массовому расходу на 0,01...7,4 % (табл. 5). Наименьшее отличие среднего полного давления имеет место при способах осреднения с сохранением G, I, Φ и G, Φ, S . (Однако, как показали расчеты [14], при этих способах осреднения неравномерного по температуре потока, и при увеличении в потоке приведенной скорости λ_c с 0,16 до 0,65, отмечается погрешность расчета средней температуры торможения (-2,5) %).

Как было показано выше, при способе осреднения по массовому расходу среднее полное давление при появлении в потоке температурной неравномерности при прочих равных условиях не изменяется (табл. 5) и равно среднему полному давлению в равномерном по температуре потоке при осреднении этого потока по способу с сохранением G, I^*, S , т. е. p_G^* (при $T^* \neq \text{const}$) = p_G^* (при $T^* = \text{const}$) = $p_{GI^*S}^*$ (при $T^* = \text{const}$), а величина среднего по массовому расходу статического давления равна статическому давлению действительного потока.

Также было получено, что величины удельных энтропий, осредненных по массовому расходу равномерного и неравномерного по температуре потоков, равны s_G (при $T^* \neq \text{const}$) = s_G (при $T^* = \text{const}$), величины интегральных характеристик осредненных по массовому расходу потоков равны интегральным характеристикам действительных потоков (табл.1, 2), т. е. $(I_G^*, I_G, \Phi_G, E_G) = (I^*, I, \Phi, E)_{\text{действ}}$, а величины средних температуры торможения и статической температуры при осреднении по массовому расходу газовых потоков «7Т0» и «7», как при отсутствии, так и при наличии температурной неравномерности, равны температуре торможения и статической температуре, рассчитанным из соответствующих потоков теплосодержания (табл. 3), т. е. $T_G^* = T_{GI^*S}^*$, $T_G = T_{GIS}$.

Таким образом, из всех рассмотренных 12 способов осреднения наиболее физически обоснованным способом при осреднении неравномерных газовых потоков является способ осреднения по массовому расходу, так как при этом способе все интегральные характеристики

и статическое давление осредненного потока сохраняются равными интегральным характеристикам и статическому давлению действительного неравномерного потока

Соответственно, этот способ является наиболее обоснованным при расчете по параметрам неравномерных газовых потоков показателей эффективности работы камер сгорания и турбин ГТД (коэффициента восстановления полного давления в камере сгорания и КПД турбины).

ВЫВОДЫ

1. Наличие температурной неравномерности в потоке газа на выходе из камеры сгорания «Л», характеризуемой коэффициентом $T_{r\max}^*/T_{r\min}^* = 1,708$ (при $\lambda_c \approx 0,16$ и $\tau_r \approx 1,05$), приводит, при прочих равных условиях, к незначительному увеличению (на 0,1...0,5%) таких интегральных характеристик действительного потока как расход газа, поток теплосодержания, поток полного теплосодержания, поток кинетической энергии. Величина потока энтропии при этом незначительно уменьшается (-0,1138 %), а поток полного импульса не изменяется.

2. При появлении в газовом потоке на выходе из камеры сгорания, при прочих равных условиях, температурной неравномерности, при способах осреднения, в которых обеспечивается сохранение потока энтропии ($G, I, S; E, G, S; G, \Phi, S$ и G, I^*, S), погрешности расчета некоторых интегральных характеристик и статического давления осредненного потока, как правило, увеличиваются. Соответственно, увеличиваются и погрешности расчета средних статической температуры и температуры торможения.

При способах осреднения, в которых по принятым условиям осреднения не обеспечивается сохранение потока энтропии (способы осреднения по площади и с сохранением $G, I, \Phi; E, G, I; E, G, \Phi; G, I^*, \Phi; G, I^*, E$), при появлении в потоке температурной неравномерности погрешности расчета интегральных характеристик, давлений и температур осредненного потока изменяются незначительно, не более чем на (0,1...0,2) %.

3. При способах осреднения неравномерных потоков с сохранением G, I^*, S G, I, S появление температурной неравномерности в потоке газа в сечении на выходе из камеры сгорания «Л» (при $\lambda_c \approx 0,16$, $\tau_r \approx 1,05$) приводит, по сравнению с равномерным по температуре газовым

потоком, к существенной (до 4,5 % и более) погрешности расчета величин среднего полного и статического давлений.

4. Наиболее физически обоснованным способом при осреднении неравномерных газовых потоков является способ осреднения по массовому расходу, так как при этом способе все интегральные характеристики и статическое давление осредненного потока сохраняются равными интегральным характеристикам и статическому давлению действительного неравномерного потока.

Соответственно, способ осреднения по массовому расходу является наиболее обоснованным при расчете по параметрам неравномерных газовых потоков показателей эффективности камер сгорания и турбин ГТД (коэффициента восстановления полного давления в камере сгорания и КПД турбины).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Седов Л. И.** Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1967. 428 с.
2. **Седов Л. И., Черный Г. Г.** Об осреднении неравномерных потоков газа в каналах // Теоретическая гидромеханика. М.: Оборонгиз, 1954. № 12. Вып. 4. С. 17–30.
3. **Кофман В. М., Тагирова Р. А.** Система алгоритмов и программ для осреднения параметров неравномерных газовых потоков при обработке результатов испытаний ГТД и его узлов // Вопросы авиационной науки и техники: Науч.-техн. сб. Серия «Авиационное двигателестроение». М.: ЦИАМ, 1992. Вып. 4. С. 13–17.
4. **Кофман В. М.** Система алгоритмов и программа для осреднения параметров неравномерных воздушных и газовых потоков при обработке результатов испытаний ГТД и его узлов // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 13, № 1(34). С. 38–47.
5. **Крокко Л.** Одномерное рассмотрение газовой динамики установившихся течений // Основы газовой динамики под ред. Г. Эммонса. М.: Иностран. лит., 1963. С. 64–323.
6. **Дружинин Л. Н., Швец Л.И., Малинина Н. С.** Метод и подпрограмма расчета термодинамических параметров воздуха и продуктов сгорания углеводородных топлив // Двигатели авиационные и газотурбинные. Руководящий техн. материал авиационной техники. 1983. 1667 – 83. 68 с.
7. **Абрамович Г. Н.** Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976. 888 с.
8. **Абианц В. Х., Подвидз Г. Л., Лебедева Л. М.** Влияние радиальной и окружной неравномерности поля температур газа перед ступенью турбины на ее газодинамические параметры // Труды ЦИАМ № 740. 1976. 17 с.
9. **Зуев В. С., Макарон В. С.** Теория прямоточных и ракетно-прямоточных двигателей. М.: Машиностроение, 1971. 368 с.
10. **Межиров И. И.** Об ограничениях при осреднении полного давления неравномерных газовых потоков // Ученые записки ЦАГИ. Т. 13. № 4, 1982. С. 125–128.
11. **Данцыг А. Я., Лабендик В. П., Петров Н. М.** Метод осреднения параметров газового потока по сечению канала // Теплоэнергетика. 1982. № 11. С. 39–43.
12. **Рекин А. Д.** Определение полного давления в неравномерном газовом потоке при постоянном статическом давлении в его поперечном сечении // Академия наук БССР. Редколлегия «Инженерно-физический журнал. Минск. 1986. 13 с.
13. **Черкез А. Я.** Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений. М.: Машиностроение, 1975. 380 с.
14. **Кофман В. М.** Исследование влияния температурной неравномерности газового потока в проточной части турбины ГТД на интегральные характеристики и осредненные параметры потока // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2011»: Материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. Казань, КГТУ им. А. Н. Туполева, 2011, Т. 1. С. 265–281.
15. **Кофман В. М.** Определение коэффициента полезного действия турбины ГТД по параметрам неравномерных газовых потоков // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2011»: Материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. Казань, КГТУ им. А. Н. Туполева, 2011. Т. 1. С. 282–298.

ОБ АВТОРЕ

Кофман Вячеслав Моисеевич, доц. каф. авиац. теплотехники и теплоэнергетики. Дипл. инж.-механик по авиац. двигателям (УГАТУ, 1970). Канд. техн. наук (УГАТУ, 1983). Иссл. в обл. идентификации и матем. моделирования ГТД.