

УДК 658.5.011.46:621.452

В. М. КОФМАН**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОСРЕДНЕНИЯ
ПРИ ОБРАБОТКЕ ПАРАМЕТРОВ
НЕРАВНОМЕРНОГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ВХОДЕ В ГТД**

На основе разработанных алгоритмов и программ для осреднения параметров неравномерных воздушных и газовых потоков с помощью различных способов выполнен расчетный анализ неравномерных воздушных потоков на входе в ГТД, отличающихся величиной скорости. Показано, в какой степени в результате операции осреднения действительного неравномерного воздушного потока на входе в ГТД по тому или иному способу происходит искажение некоторых интегральных характеристик осредненного потока и средних величин статического давления и температуры торможения. Установлен наиболее обоснованный способ осреднения. *ГТД ; неравномерный поток ; способы осреднения ; интегральные характеристики потока ; средние параметры*

ВВЕДЕНИЕ

В процессе испытаний изолированных узлов ГТД на специальных стендах, а также в процессе стендовых испытаний ГТД производятся измерения параметров воздушного и газового потока в сечениях на входе и выходе из узлов. По результатам этих измерений выполняют оценку показателей эффективности работы узлов ГТД (коэффициентов полезного действия, восстановления полного давления, неравномерности температуры) и определяют характеристики узлов, представляющих собой зависимости показателей эффективности и других безразмерных параметров от критериев подобия. Так как в общем случае поля параметров рабочего тела во входных и выходных сечениях узлов ГТД являются неравномерными, то при вычислении критериев, определяющих их работу, и показателей эффективности узлов используются средние значения параметров воздушного и газового потоков, полученные путем применения при обработке результатов измерений того или иного способа осреднения.

Теоретическое обоснование правил осреднения неравномерных потоков газа в каналах изложено в [1] и сводится к следующему. Свойства установившегося течения цилиндрического осесимметричного потока описываются интегральными характеристиками потока: потоком

массы (массовым расходом) G , потоком импульса Φ , потоками энтальпий I, I^* , потоком энтропии S , потоком кинетической энергии E , которые обладают свойствами аддитивности. Именно эти параметры являются существенными при расчете двигателя и при анализе его работы. При осреднении параметров неравномерного потока он условно заменяется равномерным каноническим потоком. При этом должно соблюдаться равенство интегральных характеристик равномерного канонического осредненного потока интегральным характеристикам действительного неравномерного потока. Цилиндрический осесимметричный 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, только трех величин интегральных характеристик. Таким образом, при осреднении по тому или иному способу часть свойств потока газа неизбежно утрачивается и нельзя указать способ осреднения, применение которого не встречало бы возражений [1], поэтому для объективной оценки показателей эффективности узлов ГТД важной для практики задачей является выявление наиболее обоснованных способов осреднения неравномерных воздушных и газовых потоков.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки величин показателей эффективности работы узлов ГТД по результатам измерений неравномерного потока была разработана система алгоритмов и программ для ЭВМ [2, 3], позволяющих осуществлять осреднение параметров неравномерных цилиндрических осесимметричных газовых потоков при помощи 11 способов: по площади, массе, с сохранением в равномерном каноническом осредненном потоке, как и в неравномерном действительном, одинаковыми трех интегральных характеристик потока ($G, I, S; G, I, \Phi; G, \Phi, S; \Phi, S, I; E, G, I; E, G, \Phi; E, G, S; G, I^*, S; G, I^*, \Phi$). Принята одномерная аппроксимация течения элементарной газовой струйки. Учет теплофизических свойств рабочего тела осуществлялся на уровне элементарных струек в области установки термодвигателя с помощью метода [4]. На первом этапе расчета по данным измерений в зоне каждого термодвигателя локальных значений статического, полного давлений, температуры торможения газа определяются локальные значения его скоростей, плотностей, удельных теплоемкостей и интегральные характеристики действительного неравномерного потока:

$$G = \iint_{R\varphi} \rho(\bar{R}, \bar{\varphi}) W(\bar{R}, \bar{\varphi}) R dR d\varphi,$$

$$\Phi = \iint_{R\varphi} [p(\bar{R}, \bar{\varphi}) + \rho(\bar{R}, \bar{\varphi}) W^2(\bar{R}, \bar{\varphi})] R dR d\varphi,$$

$$S = R_r \iint_{R\varphi} \ln \left[\frac{T(\bar{R}, \bar{\varphi})^{\frac{k(\bar{R}, \bar{\varphi})}{k(\bar{R}, \bar{\varphi})-1}}}{p(\bar{R}, \bar{\varphi})} \right] \times$$

$$\quad \times \rho(\bar{R}, \bar{\varphi}) W(\bar{R}, \bar{\varphi}) R dR d\varphi,$$

$$I = \iint_{R\varphi} c_p(\bar{R}, \bar{\varphi}) T(\bar{R}, \bar{\varphi}) \times$$

$$\quad \times \rho(\bar{R}, \bar{\varphi}) W(\bar{R}, \bar{\varphi}) R dR d\varphi,$$

$$I^* = \iint_{R\varphi} c_p(\bar{R}, \bar{\varphi}) T^*(\bar{R}, \bar{\varphi}) \times$$

$$\quad \times \rho(\bar{R}, \bar{\varphi}) W(\bar{R}, \bar{\varphi}) R dR d\varphi,$$

$$E = \frac{1}{2} \iint_{R\varphi} \rho(\bar{R}, \bar{\varphi}) W^3(\bar{R}, \bar{\varphi}) R dR d\varphi.$$

При расчете потока энтропии величина показателя адиабаты в струйках потока определяется по средней в струйках температуре процесса изоэнтропического торможения потока. При расчете полных энтальпий I^* и I удельная теплоемкость воздуха или газа в струйках потока

определяется по величинам соответствующих температур T^* и T . В первом блоке программы также рассчитываются коэффициент поля τ_r [5] и среднemasсовая скорость потока газа u .

$$\tau_r = \frac{\iint_{R\varphi} \rho(\bar{R}, \bar{\varphi}) W^2(\bar{R}, \bar{\varphi}) R dR d\varphi}{\left[\iint_{R\varphi} \rho(\bar{R}, \bar{\varphi}) W(\bar{R}, \bar{\varphi}) R dR d\varphi \right]^2},$$

$$u = \frac{\iint_{R\varphi} \rho(\bar{R}, \bar{\varphi}) W(\bar{R}, \bar{\varphi}) R dR d\varphi}{\iint_{R\varphi} \rho(\bar{R}, \bar{\varphi}) R dR d\varphi},$$

где $\bar{R} = \overline{1, N}$; $\bar{\varphi} = \overline{1, M}$ – параметры, определяющие радиус и углы, при которых осуществляется измерение и регистрация параметров p, p^*, T^* . Параметр τ_r характеризует неравномерность скорости потока в рассматриваемом сечении. В случае равномерного поля параметров $\tau_r = 1$, неравномерного – $\tau_r > 1$.

На втором этапе расчета осуществляется осреднение параметров по вышеперечисленным способам. Сначала производится осреднение по площади и по массе. Вычисляются с помощью известных формул средние по площади и массе статическое и полное давления и температура торможения, а затем с использованием полученных величин средних давлений и температур определяются соответствующие средние скорости и величины интегральных характеристик G, I, I^*, Φ, S, E канонического осредненного потока, которые могут быть отличны от интегральных характеристик неравномерного действительного потока. Степень этого отличия характеризует «погрешность» определения средних параметров и интегральных характеристик, обусловленную применением способов осреднения по площади и массе. При осреднении параметров по способам с сохранением в каноническом осредненном потоке, как и в неравномерном действительном, идентичными трех из пяти интегральных характеристик G, I, Φ, S, E , решается система соответствующих трех из следующих пяти уравнений

$$G = \bar{W} F \frac{\bar{p}}{RT}, \quad I = G c_p(\bar{T}) \bar{T},$$

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

$$\Phi = G\bar{W} + \bar{p}F, \quad E = \frac{G}{2}\bar{W}^2$$

и определяются средние параметры $\bar{p}, \bar{T}, \bar{W}$. Показатель адиабаты в уравнении потока энтропии рассчитывается по величине средней температуры, определяемой по формуле $T_{cp} = (\bar{T} + \bar{T}^*)/2$. При этом величина температуры \bar{T}^* находится из уравнения потока полной энтальпии

$$I^* = Gc_p(\bar{T}^*)\bar{T}^*.$$

Из трех оставшихся уравнений определяются интегральные характеристики канонического осредненного потока, величины которых при данном способе осреднения не сохраняются. Исключением является способ осреднения с сохранением Φ, S, I , где из-за наличия четырех неизвестных в трех уравнениях предполагается, что величина G известна. Далее осуществляется осреднение по способам осреднения с сохранением G, I^*, S и G, I^*, Φ . Учитывая, что интегральные характеристики неравномерного действительного потока G, I^*, I, Φ, S определены ранее, при осреднении по этим способам применяются известные алгоритмы [5], базирующиеся на использовании аппарата газодинамических функций. Программа позволяет производить осреднение параметров при их измерении на 20 радиусах кольцевого или цилиндрического канала при 720 угловых положениях термопневмоприемника с равномерным и неравномерным шагом. Программы [2, 3] использовались для определения коэффициента восстановления полного давления в радиально-входном устройстве ВГТД [6]. Некоторые программы использованы в [7] для определения скорости и температуры газового потока в выходном сечении камеры сгорания. С помощью программ [2, 3] проведена обработка параметров воздушных потоков на входе в ГТД, имеющих различную степень неравномерности [8].

В настоящей статье приведены результаты осреднения неравномерных воздушных потоков на входе ГТД, отличающихся величиной скорости.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

С помощью разработанных программ осреднения неравномерных воздушных и газовых потоков [2, 3] проведена обработка неравномерных воздушных потоков в цилиндрическом

канале на входе в ГТД. При обработке принималось, что в поперечном сечении канала статическое давление и температура торможения постоянны. Принятые условия $p = \text{const}$ и $T^* = \text{const}$, как правило, соответствуют реально существующим условиям, имеющим место на входе в ГТД при его стендовых испытаниях на заводском и высотном стендах.

Рассмотрены два турбулентных потока воздуха – поток В и поток Г, имеющих практически одинаковую неравномерность ($\tau_r = 1,05$ и $\tau_r = 1,082$), но существенно отличающихся по величине приведенной скорости ($\lambda_u = 0,348$ и $\lambda_u = 0,72$) и расходу воздуха, где λ_u – приведенная скорость потока, рассчитанная по средне-массовой скорости u и температуре торможения действительного потока. Потоки В и Г имели профили скорости, соответствующие усеченной параболе. Изменение скорости в пограничном слое соответствовало закону

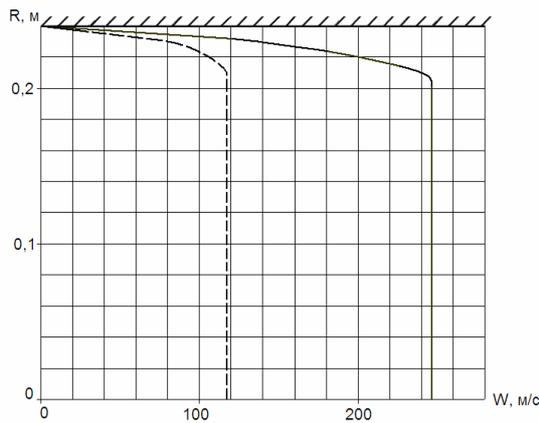
$$W = W_0 \left(\frac{y}{\delta} \right)^{1/n},$$

где W_0 – скорость воздуха на оси канала, δ – толщина пограничного слоя, y – расстояние от стенки канала. Потоки В и Г характеризуются следующими величинами параметров:

- поток В: $\delta/R = 0,125$, $T^* = 288\text{K}$, $p = 0,95 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $Re = 3,35 \cdot 10^6$, $R = 0,24 \text{ м}$, $\tau_r = 1,05$, $\lambda_u = 0,348$, $n = 3$;

- поток Г: $\delta/R = 0,125$, $T^* = 288 \text{ К}$, $p = 0,7 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $Re = 5,59 \cdot 10^6$, $R = 0,24 \text{ м}$, $\tau_r = 1,082$, $\lambda_u = 0,72$, $n = 2$.

Профили скоростей потоков В и Г показаны на рисунке. Осреднения потоков В и Г на входе в ГТД выполнены по шести наиболее распространенным в практике способам осреднения: по массе G , по площади F , по G, I, S ; по G, I, Φ ; по G, I^*, S ; по G, I^*, Φ . Результаты осреднения отражены в табл. 1 и 2. В них приведены относительные величины интегральных характеристик канонического осредненного потока $\bar{G}, \bar{I}, \bar{I}^*, \bar{\Phi}, \bar{S}, \bar{E}$, рассчитанные по величинам осредненных (по соответствующему способу) температур, давлений и скоростей. Отнесение осуществлялось к соответствующей величине интегральной характеристики неравномерного действительного потока.



Профили скорости в потоках воздуха на входе в ГТД (----- поток В, ————— поток Г)

В таблицах также приведены полученные в результате осреднения по соответствующему способу величины относительных статического давления \bar{p} и температуры торможения \bar{T}^* канонического осредненного потока воздуха (отнесение выполнялось к величинам T^* и p в действительном потоке). Для неравномерного действительного потока относительные величины \bar{G} , \bar{I} , \bar{I}^* , $\bar{\Phi}$, \bar{S} , \bar{E} , \bar{p} , \bar{T}^* , соответственно, равны 1,0. В каноническом осредненном потоке эти величины могут быть отличны от 1,0. Таким образом, данные, приведенные в табл. 1 и 2, показывают, в какой степени в результате операции осреднения неравномерного действительного воздушного потока по тому или иному способу произошло искажение интегральных характеристик осредненного потока и средних величин статического давления и температуры торможения. Рассмотрение табл. 1 и 2, в которых приведены относительные величины характеристик и параметров двух воздушных потоков В и Г, имеющих примерно одинаковую степень неравномерности (коэффициент поля потока В составляет $\tau_r=1,05$, потока Г — $\tau_r=1,082$), но существенно отличающихся по величине приведенной скорости ($\lambda_u=0,348$ и $\lambda_u=0,72$) и осредненных по площади, по массовому расходу, по способам с сохранением G, I, S ; G, I, Φ ; G, I^*, S ; G, I^*, Φ , показало следующее. При осреднении параметров воздушного потока на входе в ГТД по площади (F) даже при относительно невысокой скорости ($\lambda_u=0,348$) и при незначительной степени неравномерности потока В ($\tau_r=1,05$), отмечается

заметное отличие интегральных характеристик и параметров осредненного потока от характеристик и параметров неравномерного действительного потока. Величины таких интегральных характеристик осредненного потока, как G , I , I^* , S повышены по отношению к соответствующим характеристикам неравномерного действительного потока примерно на 2,6%. Величина потока кинетической энергии E осредненного потока снижена на 2,8%. При этом величина потока полного импульса Φ и параметры p и T^* осредненного потока равны соответствующим параметрам действительного потока.

При осреднении по G, I, S ; G, I, Φ ; G, I^*, S ; G, I^*, Φ при относительно невысокой скорости потока и его неравномерности ($\lambda_u=0,348$ и $\tau_r=1,05$) величины всех интегральных характеристик и параметров p и T^* осредненного потока равны или практически равны (с точностью до 0,2...1,0%) соответствующим характеристикам и параметрам действительного потока. Исключение составляет поток кинетической энергии E , который при этих способах осреднения снижен на 10...11,7%.

При способе осреднения по массе (G) (при $\lambda_u=0,348$ и $\tau_r=1,05$) величины всех интегральных характеристик осредненного потока G, I, I^*, S, Φ, E и параметров p и T^* сохраняются равными соответствующим параметрам и характеристикам неравномерного действительного потока. Отличие в результатах осреднения параметров воздушного потока на входе в ГТД при применении различных способов осреднения при увеличении скорости потока до $\lambda_u=0,72$ (при $\tau_r \approx \text{idem}$) возрастает (табл. 2). При осреднении по площади (F) с увеличением скорости потока до $\lambda_u=0,72$ интегральные характеристики осредненного потока G, I, I^*, S повышаются по отношению к соответствующим характеристикам действительного неравномерного потока примерно на 4,6...5,5%. При этом параметры p и T^* осредненного потока остаются равными соответствующим параметрам действительного потока. При увеличении скорости потока с $\lambda_u=0,348$ до $\lambda_u=0,72$ в способах осреднения по G, I, S ; G, I, Φ ; G, I^*, S ; G, I^*, Φ наибольшее отличие из интегральных характеристик осредненного потока от характеристик действительного имеет место по величине кинетической энергии.

Таблица 1

Сравнение результатов осреднения параметров неравномерного потока воздуха на входе в ГТД (поток В, $\delta/R = 0,125$, $R = 0,24$ м, $T^* = 288$ К, $p = 0,95 \cdot 10^5$ Па, $Re = 3,35 \cdot 10^6$, $\tau_r = 1,05$, $\lambda_u = 0,348$)

Относительные характеристики потока								Способ осреднения
\bar{G}	\bar{I}	\bar{I}^*	$\bar{\Phi}$	\bar{S}	\bar{E}	\bar{p}	\bar{T}^*	–
Действительный поток								–
1	1	1	1	1	1	1	1	–
Осредненный поток								–
1,026	1,027	1,026	1,0	1,026	0,972	1,0	1,0	F
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	G
1,0	1,0	0,998	0,993	1,0	0,899	1,0	0,998	G, I, S
1,0	1,0	0,997	1,0	0,999	0,883	1,008	0,997	G, I, Φ
1,0	1,002	1,0	1,00	1,0	0,887	1,010	1,0	G, I^*, S
1,0	1,002	1,0	1,0	1,000	0,888	1,008	1,0	G, I^*, Φ

Таблица 2

Сравнение результатов осреднения параметров неравномерного потока воздуха на входе в ГТД (поток Г, $\delta/R = 0,125$, $R = 0,24$ м, $T^* = 288$ К, $p = 0,7 \cdot 10^6$ Па, $Re = 5,59 \cdot 10^6$, $\tau_r = 1,082$, $\lambda_u = 0,72$)

Относительные характеристики потока								Способ осреднения
\bar{G}	\bar{I}	\bar{I}^*	$\bar{\Phi}$	\bar{S}	\bar{E}	\bar{p}	\bar{T}^*	–
Действительный поток								–
1	1	1	1	1	1	1	1	–
Осредненный поток								–
1,046	1,055	1,047	1,005	1,050	0,974	1,0	1,0	F
1,0	0,9996	1,0	1,001	1,0	1,0027	1,0	1,0	G
1,0	1,0	0,984	0,964	1,0	0,835	1,0	0,983	G, I, S
1,0	1,0	0,961	1,0	0,987	0,637	1,144	0,963	G, I, Φ
1,0	1,033	1,0	1,003	1,0	0,710	1,118	1,0	G, I^*, S
1,0	1,031	1,0	1,0	1,001	0,725	1,106	1,0	G, I^*, Φ

Так, снижение кинетической энергии осредненного потока по отношению к действительному потоку в способах осреднения по G, I, S ; G, I, Φ ; G, I^*, S ; G, I^*, Φ достигает при $\lambda_u = 0,72$ ($\tau_r = 1,082$) – 16,5...36,3% (вместо 10...11,7% при $\lambda_u = 0,348$ и $\tau_r = 1,05$). При увеличении скорости воздушного потока до $\lambda_u = 0,72$ в способе осреднения по G, I, S отмечается снижение величин интегральных характеристик I^* и Φ осредненного потока, по сравнению с величинами характеристик действительного потока, соответственно, на 1,6% и 3,6%; при осреднении по G, I, Φ отмечается снижение I^* на 3,9%, снижение S – на 1,3%; при осреднении по G, I^*, S отмечается увеличение I

на 3,3%, увеличение Φ – на 0,3%; при осреднении по G, I^*, Φ отмечается увеличение I на 3,1% при сохранении S .

Анализ осредненных величин параметров p и T^* , полученных по наиболее часто применяемым в практике способам по G, I^*, S и по G, I^*, Φ , показывает, что при сохранении равенства осредненной температуры T^* температуре торможения действительного потока, при осреднении по этим способам, осредненное статическое давление p превышает статическое давление действительного потока при $\lambda_u = 0,348$ на 1,0...0,8%, при $\lambda_u = 0,72$ – на 11,8...10,6%, соответственно.

Анализ осредненных величин параметров p и T^* , полученных по способам осреднения по $G,$

I, S и по G, I, Φ , показывает следующее. При осреднении по G, I, S сохраняется равенство величин осредненного статического давления со статическим давлением действительного потока, независимо от скорости потока. Осредненная температура торможения при осреднении по G, I, S при $\lambda_u = 0,348$ снижена на 0,2%, при $\lambda_u = 0,72$ – на 1,7%. При осреднении по G, I, Φ искажается (уменьшается) температура торможения: при $\lambda_u = 0,348$ – на 0,3%, при $\lambda_u = 0,72$ – на 3,7%. Осредненное статическое давление p , при осреднении по G, I, Φ , при $\lambda_u = 0,348$ повышено на 0,8%, при $\lambda_u = 0,72$ – на 14,4%.

Сравнение способов осреднения по G, I, S и G, I^*, S при условиях $p = \text{const}$ и $T^* = \text{const}$, показывает, что при скорости потока $\lambda_u = 0,348$ ($\tau_r = 1,05$), величины интегральных характеристик осредненного потока по указанным способам незначительно отличаются от интегральных характеристик действительного потока. Исключение составляет поток кинетической энергии (о чем было сказано выше) и статическое давление, которое при способе G, I^*, S превышает давление действительного потока на 1,0%. При увеличении скорости потока до $\lambda_u = 0,72$, при способе осреднения по G, I, S отмечается снижение осредненной температуры торможения по сравнению с температурой в действительном потоке на 1,7%, при равенстве осредненного статического давления p давлению в действительном потоке. При увеличении скорости потока до $\lambda_u = 0,72$, при способе осреднения по G, I^*, S отмечается повышение осредненного статического давления p по сравнению со статическим давлением в действительном потоке на 11,8%, при равенстве осредненной температуры торможения T^* температуре торможения действительного потока.

Сравнение способов осреднения по G, I, Φ и по G, I^*, Φ при условиях $p = \text{const}$ и $T^* = \text{const}$ показывает, что при скорости потока $\lambda_u = 0,348$ ($\tau_r = 1,05$) величины интегральных характеристик осредненного потока по указанным способам незначительно отличаются от интегральных характеристик действительного потока. Исключение составляет поток кинетической энергии и статическое давление. Последнее в обоих способах превышает давление действительного потока на 0,8%. При увеличении скорости потока до $\lambda_u = 0,72$, при способе осреднения G, I, Φ отмечается снижение осредненной температуры торможения по сравнению с температурой в

действительном потоке на 3,7%; при способе осреднения по G, I^*, Φ осредненная температура торможения сохраняется равной температуре торможения действительного потока. При увеличении скорости потока до $\lambda_u = 0,72$, в обоих способах осреднения (по G, I, Φ и по G, I^*, Φ) отмечается повышение осредненного статического давления по сравнению с давлением в действительном потоке на 14,4 и 10,6%, соответственно.

При способе осреднения по массовому расходу величины всех интегральных характеристик, статического давления и температуры торможения при скорости потока $\lambda_u = 0,72$ (как и при $\lambda_u = 0,348$) сохраняются равными соответствующим характеристикам и величинам действительного неравномерного потока. (Отмечается лишь незначительное увеличение потока кинетической энергии при $\lambda_u = 0,72$ на 0,27%.) Следует отметить, что в [8] при осреднении параметров воздушного потока на входе в ГТД при скорости потока $\lambda_u = 0,33$ и при изменении степени неравномерности потока (изменении коэффициента поля от $\tau_r = 1,037$ до $\tau_r = 1,36$), а также в [6], получены аналогичные результаты. При способе осреднения по массовому расходу величины всех интегральных характеристик, статического давления и температуры торможения также сохраняются равными величинам соответствующих характеристик и параметров действительного неравномерного потока. Приняв за единицу величины средних параметров p^*, T, W, λ , полученных при способе осреднения по массе, проведем сравнение с ними величин соответствующих средних параметров, полученных при применении других способов осреднения. Сравнение проведем для полей В ($\lambda_u = 0,348$) и Г ($\lambda_u = 0,72$), что позволяет провести оценку изменения относительных осредненных параметров p^*, T, W, λ , по сравнению с осреднением по массе при увеличении скорости потока. Результаты сравнения приведены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что в способах осреднения по $F; G, I, S; G, I, \Phi; G, I^*, S; G, I^*, \Phi$ (при $\lambda_u = 0,348$) величины средних полного давления и статической температуры практически равны соответствующим параметрам при способе осреднения по массе (отличие не превышает 0,1...0,8%).

Таблица 3

Сравнение результатов осреднения параметров неравномерных потоков воздуха на входе в ГТД ($R = 0,24$ м, $T^* = 288$ К, $\tau_r = 1,05 \dots 1,082$)

Способ осреднения	Поток В $\delta/R=0,125$, $\tau_r=1,05$, $\lambda_u=0,348$, $p=0,95 \cdot 10^5$ Па				Поток Г $\delta/R=0,125$, $\tau_r=1,082$, $\lambda_u=0,72$, $p=0,7 \cdot 10^5$ Па			
	\bar{p}^*	\bar{T}	\bar{W}	$\bar{\lambda}$	\bar{p}^*	\bar{T}	\bar{W}	$\bar{\lambda}$
F	0,995	1,00	0,973	0,972	0,97	1,008	0,963	0,962
G	1	1	1	1	1	1	1	1
G, I, S	0,992	1	0,947	0,95	0,941	1	0,912	0,92
G, I, Φ	0,999	1	0,939	0,942	1,002	1	0,797	0,813
G, I^*, S	1,00	1,003	0,941	0,943	0,9991	1,033	0,842	0,842
G, I^*, Φ	0,999	1,002	0,943	0,943	0,993	1,032	0,85	0,851

Что же касается средней скорости, то ее величина при вышеуказанных способах осреднения (по отношению к способу осреднения по массе) снижена на 2,7...6,1%. При увеличении скорости потока до $\lambda_u=0,72$, при способах осреднения по F ; G, I, S ; G, I^*, Φ , отмечается снижение полного давления по сравнению со способом осреднения по массе, соответственно, на 3%, 5,9% и 0,7%.

Следует подчеркнуть, что при осреднении по G, I, Φ и G, I^*, S (при $\lambda_u=0,72$) величина среднего полного давления незначительно отличается от величины полного давления осредненного по массовому расходу (0,2...0,1%). При осреднении по F ; G, I^*, S ; G, I^*, Φ величина средней статической температуры (по сравнению со способом осреднения по массе) повышена при $\lambda_u=0,72$ на 0,8% ... 3,3%.

При $\lambda_u=0,72$ и при осреднении по F величина средней скорости потока W снижена, по сравнению со способом осреднения по массе, на 3,7%, при осреднении по G, I, S ; G, I, Φ ; G, I^*, S ; G, I^*, Φ – на 8,8...20,3%.

ВЫВОДЫ

На основании результатов расчетов по осреднению параметров неравномерных воздушных потоков на входе в ГТД, выполненных с помощью разработанных алгоритмов и программ, установлено следующее.

1. При применении способа осреднения по площади отмечается погрешность в определении величины массового расхода воздуха и, соответственно, в определении интегральных характеристик осредненного потока. Погрешность возрастает с увеличением скорости потока и достигает примерно 5% при $\lambda_u=0,72$. При

этом полученные в результате осреднения величины статического давления и температуры торможения равны соответствующим параметрам действительного потока.

2. При применении наиболее распространенных способов осреднения с сохранением G, I^*, S и G, I^*, Φ при определении величины среднего статического давления имеет место погрешность, которая возрастает от 1% до 10...12% при изменении скорости от $\lambda_u=0,348$ до $\lambda_u=0,72$.

3. При применении способов осреднения по площади и с сохранением G, I^*, S и G, I^*, Φ кинетическая энергия осредненного потока не сохраняется равной величине кинетической энергии действительного потока. Наибольшая величина отклонения кинетической энергии осредненного потока от кинетической энергии действительного потока имеет место при осреднении по G, I^*, S и G, I^*, Φ , достигая при $\lambda_u=0,72$ примерно 30%.

4. Способ осреднения по массовому расходу является наиболее обоснованным при осреднении параметров неравномерного потока воздуха на входе в ГТД, так как при этом способе соблюдается равенство интегральных характеристик равномерного канонического осредненного потока интегральным характеристикам действительного неравномерного потока, а величины осредненных по этому способу статического давления и температуры торможения равны величинам статического давления и температуры действительного неравномерного потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седов, Л. И. Об осреднении неравномерных потоков газа в каналах / Л. И. Седов,

Г. Г. Черный // Теоретическая гидромеханика. 1954. № 12, вып. 4. С. 17–30.

2. **Кофман, В. М.** Система алгоритмов и программ для осреднения параметров неравномерных газовых потоков при обработке результатов испытаний ГТД и его узлов / В. М. Кофман, Р. А. Тагирова // Вопросы авиационной науки и техники. Серия Авиационное двигателестроение : науч.-техн. сб. ЦИАМ. 1992. Вып. 4. С. 13–17.

3. **Кофман, В. М.** Система алгоритмов и программ осреднения неравномерных газовых потоков для обработки результатов испытаний ГТД и его узлов / В. М. Кофман, Р. А. Тагирова // Автоматизированное проектирование авиационных двигателей : тез. докл. 5-й отрасл. конф. (Труды ЦИАМ № 1228). 1987. С. 281–282.

4. **Дружинин, Л. Н.** Метод и подпрограмма расчета термодинамических параметров воздуха и продуктов сгорания углеводородных топлив / Л. Н. Дружинин, Л. И. Швец, Н. С. Малинина // Двигатели авиационные и газотурбинные : Руководящий техн. материал авиационной техники. 1983. 1667- 83. 68 с.

5. **Абрамович, Г. Н.** Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. М. : Наука, 1976. 888 с.

6. **Кофман, В. М.** Экспериментальное определение потерь и неравномерности полного давления в радиально-осевом входном устройстве ВГТД / В. М. Кофман, Р. Г. Ахметов // Вопросы авиационной нау-

ки и техники (сер. «Авиационное двигателестроение») : науч.-техн. сб. ЦИАМ. 1992. Вып. 4. С. 5–9.

7. **Кофман, В. М.** Камеры сгорания основные газотурбинных двигателей. Метод определения скорости и температуры газа в выходном сечении : Руководящий материал авиационной техники / В. М. Кофман, Н. Б. Рыжова. 1984. 1685-84. 28 с.

8. **Кофман, В. М.** Методы оценки показателей эффективности работы узлов ГТД по результатам измерений параметров неравномерных воздушных и газовых потоков / В. М. Кофман // Наука и технологии. Тр. XXVIII Российск. шк. Т. 1. М. : РАН, 2008. С. 108–120.

ОБ АВТОРЕ



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