

УДК 629.7.036

В. М. КОФМАН

## СИСТЕМА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММА ДЛЯ ОСРЕДНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕРАВНОМЕРНЫХ ВОЗДУШНЫХ И ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ГТД И ЕГО УЗЛОВ

Описаны разработанная система алгоритмов и программа для осреднения параметров неравномерных воздушных и газовых потоков по семи, наиболее часто применяемым в практике испытаний ГТД и его узлов, способам. Программа может входить в качестве модуля в системы автоматизированных испытаний ГТД и позволяет в зависимости от решаемой задачи использовать наиболее обоснованный способ осреднения. Программа апробирована при проведении численных экспериментов и при обработке результатов измерений в сечениях проточной части ГТД параметров неравномерных воздушных и газовых потоков. *ГТД; неравномерный поток; способы осреднения*

### ВВЕДЕНИЕ

При обработке результатов испытаний изолированных узлов ГТД или результатов их испытаний в системе двигателя по данным измерений неравномерных воздушных и газовых потоков на входе и выходе из узлов определяются средние параметры потока и далее по их величинам производится оценка показателей эффективности работы узлов. Как известно, при использовании для обработки результатов испытаний ГТД и его узлов различных способов осреднения та или иная часть свойств потока неизбежно утрачивается, что находит свое выражение в отличии средних величин параметров полученных по тому или иному способу осреднения и, соответственно, в отличии показателей эффективности, характеризующих работу узлов.

Несмотря на большое количество исследований, посвященных методам осреднения неравномерных воздушных и газовых потоков, (например, [1, 2, 3]), и установления в них целесообразности использования в тех или иных физических задачах конкретного способа осреднения, в практике работы некоторых отечественных и зарубежных двигательных ОКБ, еще довольно часто, независимо от решаемой задачи, используются различные, в том числе и упрощенные способы осреднения (например, по площади). В большинстве случаев при неравномерном поле температуры принимается допущение о постоянстве по сечению удельной теплоемкости рабочего тела. Применение упрощенных способов осреднения и принимае-

мых при этом допущений обусловлено в основном снижением трудоемкости вычислительных операций при обработке экспериментальных данных. Однако соображения практического удобства не могут быть признаны обоснованными в случае возрастания неравномерности исследуемых потоков и, как следствие, возрастания погрешности расчета «средних» величин параметров и, соответственно, возрастания погрешностей оценки показателей эффективности узлов.

На современном этапе дальнейшее совершенствование ГТД как сложной технической системы требует в процессе его доводки достоверной оценки изменения величин показателей эффективности работы узлов двигателя (коэффициентов полезного действия, восстановления полного давления и др.) в пределах 2...1% и менее. Поэтому задача осреднения параметров при обработке результатов испытаний ГТД и его узлов и при оценке показателей эффективности работы узлов является важной.

В связи с этим целесообразным является разработка алгоритмов и реализованных на ЭВМ программ для осреднения неравномерных газовых и воздушных потоков. Наличие таких программ, которые могут входить в виде модулей в системы автоматизированных испытаний ГТД и их узлов, позволяет осуществлять осреднение параметров при помощи различных способов и в зависимости от решаемой задачи, выбирать из них и применять наиболее обоснованный способ осреднения.

В настоящей статье приведено описание алгоритмов и созданной на их основе программы (комплекса подпрограмм) для осреднения

неравномерных воздушных и газовых потоков. Программа, ранее частично описанная в [4], к настоящему времени модернизирована с целью ее методического усовершенствования и выполнения осреднения по большему количеству способов. Программа составлена на языке программирования Compaq Visual Fortran Version 6.6. Разработанная программа носит как научный, так и прикладной характер. Основа разработанной программы позволяет проводить ее наращивание (путем ввода в программу других способов осреднения) или упрощение (путем отключения подпрограмм и способов, носящих научно-исследовательский характер).

## 2. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММЫ

### 2.1. Алгоритм расчета параметров газа в струйках и расчета интегральных характеристик неравномерного действительного потока

Переходя к описанию алгоритмов и программы и не повторяя основных положений теории осреднения, изложенных в известной литературе, следует отметить, что одним из допущений, принятых при их разработке 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, соответствует реальным условиям работы узлов ГТД, так как оно применяется для выбираемых экспериментатором сечений, например, во входном и выходном сечениях узла, и предполагает, что в области течения между этими сечениями закрутка потока и угол наклона вектора скорости к оси канала могут быть значительными [5]. Разработанные алгоритмы и программа позволяют осуществлять осреднение параметров неравномерных воздушных и газовых потоков в цилиндрических и кольцевых каналах по 12 способам: по площади, по массовому расходу, с сохранением в неравномерном действительном и каноническом осредненном потоках одинаковыми трех интегральных характеристик потока:  $G, I, S; G, I, \Phi; G, I^*, S; G, I^*, \Phi; G, \Phi, S; \Phi, S, I; E, G, I; E, G, \Phi; E, G, S; G, I^*, E$ , где  $G$  – массовый расход,  $\Phi$  – поток импульса,  $E$  – поток кинетической энергии,  $I^*$  – поток полного теплосодержания,  $I$  – поток теплосодержания,

$S$  – поток энтропии. Осреднение по каждому из перечисленных способов осреднения производится по соответствующей подпрограмме. Учет теплофизических свойств рабочего тела осуществляется на уровне элементарных струек в области предполагаемой установки термодинамических параметров воздуха и продуктов сгорания углеводородных топлив, разработанных Л. Н. Дружининым, Л. И. Швецом, Н. С. Малининой [6]. При расчетах предполагается, что коэффициент избытка воздуха в элементарных струйках (и соответственно, газовая постоянная) имеют одинаковое значение.

В первом блоке программы (подпрограмма OSROS) по данным измерений в зоне каждого термодинамического приемника локальных значений статического ( $p_i$ ) и полного  $p_i^*$  давлений, температуры торможения газа ( $T_i^*$ ) определяются локальные (для струек потока) значения статических температур, скоростей, плотностей.

Статическая температура  $T_i$  (при известных  $p_i, p_i^*$  и  $T_i^*$ ) определяется с помощью подпрограммы TPI [6] из уравнения, полученного при совместном решении 1-го закона термодинамики, уравнения энтропии и уравнения состояния идеального газа для случая изоэнтропического процесса расширения

$$\int_{T_i^*}^{T_i} C_p(T) \frac{dT}{T} = R_r \ln \left( \frac{p_i}{p_i^*} \right).$$

В этой же подпрограмме одновременно рассчитываются величина газовой постоянной рабочего тела  $R_r$ , зависящая от состава топлива, влагосодержания и коэффициента избытка воздуха в рассматриваемом сечении канала.

Локальные скорости в струйках потока рассчитываются с помощью уравнения энергии по формуле

$$W_i = \sqrt{2(\Delta i_i^* - \Delta i_i)},$$

в которой приращения энтальпий определяются по формулам

$$\Delta i_i^* = \int_{T_0}^{T_i^*} C_p dT,$$

$$\Delta i_i = \int_{T_0}^{T_i} C_p dT$$

с помощью подпрограммы DI [6], где  $T_0$  – условная начальная температура газа (при  $x > 0$   $T_0 = 273$  К, при  $x = 0$   $T_0 = 180$  К, где  $x = \frac{1}{\alpha}$ ,  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха).

Плотность газа в струйках потока рассчитывается из уравнения состояния идеального газа

$$\rho_i = \frac{P_i}{R_i T_i}.$$

В первом блоке программы (подпрограмме OSROS) также рассчитываются параметры

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

$$u = \frac{\iint_S \rho(r, \varphi) W(r, \varphi) r dr d\varphi}{\iint_S \rho(r, \varphi) r dr d\varphi},$$

где  $S = (R_1 \leq R \leq R_N, \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_M)$  – 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.

Параметр  $\tau_r$ , называемый коэффициентом поля [2], характеризует неравномерность скорости потока в рассматриваемом сечении. В случае равномерного поля параметров  $\tau_r = 1$ , неравномерного –  $\tau_r > 1,0$ . Параметр  $u$  – среднemasовая скорость потока газа, рассчитываемая для равномерного потока по уравнению

$$u = \frac{G}{\rho F}.$$

Параметры  $\tau_r$  и  $u$  выбраны в качестве критериев, первый из которых позволяет оценить неравномерность исследуемого потока газа в рассматриваемом сечении, а второй – степень отличия средней скорости потока, полученной при осреднении параметров по тому или иному способу, от среднemasовой скорости.

Во втором блоке программы (подпрограмма ROSGP) определяются обладающие свойством аддитивности интегральные характеристики действительного неравномерного потока:

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

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

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

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

$$I^* = \iint_{\varphi R} c_p(T^*) T^*(R, \varphi) \rho(R, \varphi) W(R, \varphi) R dR d\varphi,$$

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

При расчете потока энтропии входящая в формулу величина показателя адиабаты  $k$  в струйках потока рассчитывается по величине средней температуры в каждой струйке:

$$T_{cp,i} = \frac{T_i + T_i^*}{2}.$$

Численное интегрирование в программе выполнялось методом трапеций с помощью двух разработанных подпрограмм. В первой (по порядку выполнения операции двойного интегрирования) подпрограмме осуществляется интегрирование по радиусу для нахождения некоторой функции  $S_j$  зависящей от радиуса, при заданном значении угловой координаты ( $\varphi = \varphi_j$ )

$$S_j = \int_{R_1}^{R_N} \psi_j(r) r dr =$$

$$= \sum_{i=1}^{i=N-1} \left( \frac{\psi_j(R)_{i+1} + \psi_j(R)_i}{2} \right) \left( \frac{R_{i+1} + R_i}{2} \right) (R_{i+1} - R_i),$$

где  $\psi_j(r)$  – подынтегральная функция при заданной  $j$ -й величине угловой координаты.

С помощью второй подпрограммы (при полученных значениях функции  $S_j$ ) осуществляется интегрирование по углу для определения величины двойного интеграла

$$\iint_S \psi(r, \varphi) r dr d\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_M} S(\varphi) d\varphi =$$

$$= \sum_{j=1}^{j=M-1} \left( \frac{S_j(\varphi) + S_{j+1}(\varphi)}{2} \right) (\varphi_{j+1} - \varphi_j).$$

Программа позволяет выполнять операцию осреднения параметров при их измерении на 20 радиусах кольцевого или цилиндрического канала при 720 угловых положениях термодпар и приемников полного и статического давления при их установке (или перемещении) с равномерным и неравномерным шагом.

Последующие блоки программы представляющие собой подпрограммы, с помощью которых осуществляется осреднение параметров по указанным выше 12 способам. Ниже описаны 7 из этих способов, а именно – наиболее часто применяемые в практике способы осреднения: по площади, по массовому расходу, по спосо-

бам с сохранением в осредненном потоке  $G, I^*, S; G, I^*, \Phi; G, I, S; G, I, \Phi; G, I^*, E$ .

### 2.2. Алгоритм осреднения по площади

В подпрограмме, предназначенной для осреднения параметров по площади, сначала рассчитываются средние значения давлений  $p_F, p_F^*$  и температуры торможения  $T_F^*$

$$p_F = \frac{1}{F} \iint_S p(r, \varphi) r dr d\varphi,$$

$$p_F^* = \frac{1}{F} \iint_S p^*(r, \varphi) r dr d\varphi,$$

$$T_F^* = \frac{1}{F} \iint_S T^*(r, \varphi) r dr d\varphi.$$

Далее, по известным  $p_F, p_F^*$  и  $T_F^*$ , с помощью подпрограммы TPI [6], с помощью уравнения

$$\int_{T_F^*}^{T_F} C_p \frac{dT}{T} = R_r \ln \left( \frac{p_F}{p_F^*} \right)$$

рассчитывается средняя статическая температура  $T_F$ .

С помощью подпрограммы DI [6] рассчитываются приращения энтальпий

$$\Delta i_F^* = \int_{T_0}^{T_F^*} C_p dT,$$

$$\Delta i_F = \int_{T_0}^{T_F} C_p dT$$

и определяется средняя скорость

$$W_F = \sqrt{2(\Delta i_F^* - \Delta i_F)},$$

скорость звука  $a$

$$a = \sqrt{\frac{C_p}{C_p - R_r} R_r T_F},$$

где  $C_p = f(T_F)$ . Величина газовой постоянной  $R_r$ , зависящей от состава газа, здесь и далее определяется с помощью подпрограммы CPS [6].

Критическая скорость рассчитывается по уравнению

$$a_{кр} = \sqrt{\frac{C_p}{C_p - R_r} R_r T_{кр}},$$

где  $C_p = f(T_{кр})$ , а  $T_{кр}$  (при известных  $T_F$  и  $x = \frac{1}{\alpha}$ ) определяется с помощью подпрограммы TKR [6] из уравнения

$$i^* = i + \frac{1}{2} \left( \frac{C_p}{C_p - R_r} \right) R_r T_{кр},$$

полученного из уравнения энергии и уравнения для определения критической скорости. Далее в данной подпрограмме по величинам осредненных параметров  $T_F, p_F, W_F$  рассчитываются число  $M_F$ , приведенная скорость  $\lambda_F$ , плотность по уравнению состояния идеального газа

$$\rho_F = \frac{p_F}{R_r T_F},$$

массовый расход

$$G_F = \rho_F W_F F$$

и другие интегральные характеристики  $I, I^*, S, \Phi, E$  канонического осредненного потока, которые при неравномерном поле параметров могут быть отличны от интегральных характеристик неравномерного действительного потока. Степень этого отличия характеризует «погрешность» определения средних параметров, обусловленную применением, в данном случае – способа осреднения по площади.

### 2.3. Алгоритм осреднения по массовому расходу

В подпрограмме, предназначенной для осреднения параметров по массовому расходу, сначала (при известном массовом расходе, рассчитанном ранее путем интегрирования по струйкам потока) рассчитываются средние по расходу значения давлений  $p_G, p_G^*$  и температуры  $T_G^*$

$$p_G = \frac{1}{G} \iint_S p(r, \varphi) \rho(r, \varphi) W(r, \varphi) r dr d\varphi,$$

$$p_G^* = \frac{1}{G} \iint_S p^*(r, \varphi) \rho(r, \varphi) W(r, \varphi) r dr d\varphi,$$

$$T_G^* = \frac{1}{G} \iint_S T^*(r, \varphi) \rho(r, \varphi) W(r, \varphi) r dr d\varphi.$$

Далее порядок и формулы для расчета параметров  $T_G, \Delta i_G^*, \Delta i_G, W_G, M_G, \lambda_G$ , такие же, как и при осреднении по площади.

Особенностью алгоритма осреднения по массовому расходу является то, что величина скорости осредненного потока рассчитывается не с использованием уравнений состояния идеального газа и расхода, а с использованием, как и при осреднении по площади, уравнения энергии. В этом случае, как показали многочисленные расчеты по осреднению неравномерных газовых и воздушных потоков, имеющих различную степень динамической, температурной неравномерности и различную приведенную

скорость ( $\lambda = 0,2 \dots 0,72$ ), величины потока импульса  $\Phi$  и потока кинетической энергии  $E$  в каноническом осредненном потоке практически равны соответствующим характеристикам действительного неравномерного потока. Например, для неравномерного воздушного потока, имеющего  $\tau_r = 1,082$  и  $\lambda = 0,72$ , при осреднении по массовому расходу погрешности расчета вышеуказанных характеристик составляют соответственно  $\delta\Phi = 0,1\%$  и  $\delta E = 0,27\%$  [7]. При этом величина средней скорости, рассчитанная из уравнения энергии, превышает на 8,5% величину среднемассовой скорости, рассчитанную независимо от применяемого способа осреднения по приведенному выше интегральному соотношению. При расчете же средней скорости канонического потока из уравнения расхода, которая при этом меньше среднемассовой скорости на 0,9%, величины погрешностей расчета интегральных характеристик  $\Phi$  и  $E$  осредненного потока значительно возрастают и составляют  $\delta\Phi = -3,53\%$  и  $\delta E = -16,4\%$ .

#### 2.4. Основные положения алгоритмов осреднения по способам с сохранением в осредненном потоке $G, I, I^*, S, \Phi, E$

Как известно, осесимметричный цилиндрический (незакрученный) поток имеет три степени свободы –  $p, W, T$  [1]. При осреднении таких потоков, соответственно, можно выдерживать равенство в каноническом осредненном и неравномерном действительном потоках величин только трех интегральных характеристик.

Поэтому в подпрограммах, обеспечивающих осреднение параметров по способам с сохранением в каноническом осредненном потоке, как и в неравномерном действительном, идентичными трех из шести перечисленных выше интегральных характеристик, в каждом случае (способе осреднения) решается система соответствующих трех из следующих шести уравнений

$$G = \bar{W}F \frac{\bar{p}}{R_1 \bar{T}} = \frac{m \bar{p} q(\bar{\lambda}) F}{\sqrt{\bar{T}^*}},$$

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

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

$$S = R_1 G \ln \left[ \frac{\bar{T}^{\frac{k}{k-1}}}{\bar{p}} \right] = R_1 G \ln \left[ \frac{\bar{T}^{\frac{k}{k-1}}}{\bar{p}^*} \right],$$

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

$$E = \frac{G}{2} \bar{W}^2$$

и определяются для выбранного 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 не сохраняются равными интегральным характеристикам неравномерного действительного потока. Исключением является способ осреднения с сохранением  $\Phi, S, I$ , где из-за наличия четырех неизвестных в трех уравнениях предполагается, что величина  $G$  известна.

В уравнении потока энтропии, в способах осреднения, в которых величина потока энтропии сохраняется такой же, как и в неравномерном действительном потоке, показатель адиабаты рассчитывается по величине средней температуры

$$T_{cp} = \frac{\bar{T} + \bar{T}^*}{2},$$

где величины температур  $\bar{T}$  и  $\bar{T}^*$  рассчитываются из соответствующих уравнений теплосодержания.

При осреднении по способам с сохранением  $G, I^*, S$  и  $G, I^*, \Phi$  уравнения массового расхода и потока импульса записываются, соответственно, с использованием газодинамических функций  $q(\lambda)$  и  $z(\lambda)$  [2]

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

$$\Phi = \frac{k+1}{2k} G a_{кр} z(\bar{\lambda}).$$

При этом показатель адиабаты рассчитывается по величине средней температуры торможения потока  $\bar{T}^*$ , рассчитанной из уравнения потока полного теплосодержания.

#### 2.5. Алгоритм осреднения по способу с сохранением в осредненном потоке $G, I, S$

В подпрограмме, предназначенной для осреднения параметров по способу с сохранением в осредненном потоке  $G, I, S$ , последовательность расчета следующая.

По известным величинам потока энтальпии  $I$  и массового расхода  $G$  неравномерного дейст-

вительного потока, из уравнения потока теплосодержания

$$I = Gc_p(\bar{T})\bar{T}$$

методом последовательных приближений рассчитываются средняя статическая температура  $\bar{T}$ . Далее и из уравнения потока энтропии определяется среднее статическое давление

$$\bar{p} = \frac{(\bar{T})^k}{y},$$

где  $y$

$$y = \exp\left(\frac{S}{R_\Gamma G}\right).$$

Величина средней скорости рассчитывается из уравнения массового расхода

$$\bar{W} = \frac{GR_\Gamma \bar{T}}{Fp}.$$

Затем рассчитываются «местные» (не сохраняемые при данном способе осреднения) интегральные характеристики канонического осредненного потока – поток импульса и поток кинетической энергии

$$\Phi = G\bar{W} + \bar{p}F,$$

$$E = \frac{G}{2}\bar{W}^2.$$

Далее производится обращение к вспомогательной подпрограмме PDT, в которой рассчитываются следующие параметры:

- скорость звука

$$a = \sqrt{\frac{C_p}{C_p - R_\Gamma} R_\Gamma \bar{T}},$$

где  $C_p = f(\bar{T})$ ,

- число  $\bar{M}$  в осредненном потоке

$$\bar{M} = \frac{\bar{W}}{a},$$

- приращения энтальпий (с помощью подпрограммы DI [6])

$$\bar{\Delta i} = \int_{T_0}^{\bar{T}} C_p dT,$$

$$\bar{\Delta i}^* = \frac{\bar{W}^2}{2} + \bar{\Delta i},$$

и их разность

$$\Delta i = \bar{\Delta i}^* - \bar{\Delta i}.$$

Средняя температура торможения  $\bar{T}^*$  для этого способа осреднения рассчитывается с помощью подпрограммы П1 [6] методом последовательных приближений с помощью уравнения

$$\Delta i - \int_{\bar{T}}^{\bar{T}^*} C_p(T) dT = 0.$$

Как показали расчеты, величина средней температуры торможения  $\bar{T}^*$ , полученная по этому способу осреднения, несколько отличается от температуры торможения, рассчитанной из уравнения потока полного теплосодержания.

С помощью подпрограммы ТКР [6] по известной  $\bar{T}^*$  и составу смеси газа рассчитывается критическая температура  $T_{кр}$  из уравнения

$$\begin{aligned} \Delta i_{кр} &= \int_{T_0}^{\bar{T}^*} C_p(T) dT - \int_{T_0}^{T_{кр}} C_p(T) dT = \\ &= \frac{C_p(T_{кр})}{C_p(T_{кр}) - R_\Gamma} \frac{R_\Gamma T_{кр}}{2}. \end{aligned}$$

Далее рассчитываются критическая и приведенная скорости

$$\begin{aligned} a_{кр} &= \sqrt{\frac{C_p(T_{кр})}{C_p(T_{кр}) - R_\Gamma} R_\Gamma T_{кр}}, \\ \bar{\lambda} &= \frac{\bar{W}}{a_{кр}}. \end{aligned}$$

Затем с помощью подпрограммы П1Т [6] из уравнения изоэнтропического процесса по известным средним температурам  $\bar{T}^*$  и  $\bar{T}$  рассчитывается соответствующее отношение средних давлений

$$\Pi = \frac{\bar{p}}{p} = \exp\left[\frac{1}{R_\Gamma} \int_{\bar{T}}^{\bar{T}^*} \frac{C_p(T) dT}{T}\right]$$

и среднее полное давление

$$\bar{p}^* = \Pi \bar{p}.$$

Окончательно, по величине средней температуры торможения  $\bar{T}^*$ , рассчитывается величина «местного» потока полного теплосодержания  $I^*$  (не сохраняемого при способе осреднения по  $G, I, S$ ).

## 2.6. Алгоритм осреднения по способу с сохранением в осредненном потоке $G, I, \Phi$

В подпрограмме, предназначенной для осреднения параметров по способу с сохранением  $G, I, \Phi$ , сначала по известным величинам пото-

ка теплосодержания  $I$  и массового расхода  $G$  неравномерного действительного потока, из уравнения потока теплосодержания

$$I = Gc_p(\bar{T})\bar{T}$$

методом последовательных приближений рассчитывается средняя статическая температура  $\bar{T}$ . Далее из уравнения потока импульса, преобразованного с использованием уравнений массового расхода и состояния идеального газа к виду

$$G\bar{W}^2 - \Phi\bar{W} + GR_r\bar{T} = 0$$

рассчитывается величина средней скорости  $\bar{W}$ .

Величина среднего статического давления рассчитывается из уравнения массового расхода

$$\bar{p} = \frac{GR_r\bar{T}}{\bar{W}F}.$$

Затем рассчитывается «местный» (не сохраняемый при данном способе осреднения) поток кинетической энергии. Далее производится обращение к подпрограмме PDTS для расчета скорости звука, числа  $\bar{M}$ , приращений энтальпий, их разности, средней температура торможения  $\bar{T}^*$ , критической скорости, приведенной скорости  $\bar{\lambda}$  и среднего полного давления  $\bar{p}^*$ . Окончательно в подпрограмме PDTS рассчитывается величина «местного» потока полного теплосодержания по величине средней температуры торможения  $\bar{T}^*$ , полученной при использовании этого способа осреднения, и величина «местного» потока энтропии

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

Показатель адиабаты в уравнении потока энтропии рассчитывается по величине средней температуры

$$T_{cp} = \frac{\bar{T} + \bar{T}^*}{2}.$$

### 2.7. Алгоритм осреднения по способу с сохранением в осредненном потоке $G, I^*, S$

В подпрограмме, предназначенной для осреднения параметров с сохранением  $G, I^*, S$ , сначала по известным величинам потока полного теплосодержания  $I^*$  массового расхода  $G$

неравномерного действительного потока из уравнения потока полного теплосодержания

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

методом последовательных приближений рассчитываются средняя температура торможения  $\bar{T}^*$ . Из уравнения потока энтропии определяется среднее полное давление

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

где

$$y = \exp\left(\frac{S}{R_r G}\right).$$

Из уравнения массового расхода

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

рассчитывается величина газодинамической функции  $q(\bar{\lambda})$ , и далее средняя приведенная скорость  $\bar{\lambda}$ , газодинамические функции  $\pi(\bar{\lambda})$ ,  $\tau(\bar{\lambda})$ , средние величины статического давления  $\bar{p}$  и статической температуры  $\bar{T}$  для этого способа осреднения, критическая скорость, скорость звука в потоке, среднее число  $\bar{M}$  и средняя скорость осредненного потока

$$\bar{W} = \bar{\lambda} a_{кр}.$$

Окончательно определяются «местные» (не сохраняемые при данном способе осреднения) поток импульса, поток кинетической энергии и поток теплосодержания. «Местный» поток теплосодержания рассчитывается по величине средней статической температуры полученной при этом способе осреднения.

### 2.8. Алгоритм осреднения по способу с сохранением в осредненном потоке $G, I^*, \Phi$

В подпрограмме, предназначенной для осреднения параметров с сохранением  $G, I^*, \Phi$ , сначала по известным величинам потока полной энтальпии  $I^*$  и массового расхода  $G$  неравномерного действительного потока из уравнения потока полного теплосодержания

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

методом последовательных приближений рассчитываются средняя температура торможения  $\bar{T}^*$  и далее величина критической скорости.

Из уравнения потока импульса

$$\Phi = \frac{k+1}{2k} G a_{кр} z(\bar{\lambda})$$

методом последовательных приближений рассчитывается величина газодинамической функции

$$z(\bar{\lambda}) = \bar{\lambda} + 1/\bar{\lambda}$$

величины средней приведенной скорости  $\bar{\lambda}$  и газодинамических функций  $q(\bar{\lambda})$ ,  $\pi(\bar{\lambda})$ ,  $\tau(\bar{\lambda})$ .

Из уравнения массового расхода газа

$$G = \frac{m p q(\bar{\lambda}) F}{\sqrt{T}}$$

рассчитывается величина среднего полного давления  $\bar{p}^*$ , и далее, с использованием газодинамических функций, величины среднего статического давления  $\bar{p}$  и средней статической температуры  $\bar{T}$ .

Затем рассчитываются скорость звука в потоке, среднее число  $\bar{M}$  и средняя скорость осредненного потока

$$\bar{W} = \bar{\lambda} a_{кр}.$$

Окончательно определяются «местные» (не сохраняемые при данном способе осреднения) поток энтропии, поток кинетической энергии и поток теплосодержания.

### 2.9. Алгоритм осреднения по способу с сохранением в осредненном потоке $G, I^*, E$

В подпрограмме, предназначенной для осреднения параметров с сохранением  $G, I^*, E$ , сначала по известным величинам потока полной энтальпии  $I^*$  и массового расхода  $G$  неравномерного действительного потока, из уравнения потока полного теплосодержания

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

методом последовательных приближений рассчитываются средняя температура торможения  $\bar{T}^*$  и далее величина критической скорости.

Из уравнения потока кинетической энергии

$$E = \frac{G}{2} \bar{W}^2$$

рассчитывается скорость осредненного потока  $\bar{W}$  и далее – величины средней приведенной скорости  $\bar{\lambda}$  и газодинамических функций  $q(\bar{\lambda})$ ,  $\pi(\bar{\lambda})$ ,  $\tau(\bar{\lambda})$ .

Из уравнения массового расхода газа

$$G = \frac{m p q(\bar{\lambda}) F}{\sqrt{T}}$$

рассчитывается величина среднего полного давления  $\bar{p}^*$  и далее, с использованием газодинамических функций, величины среднего статического давления  $\bar{p}$  и средней статической температуры  $\bar{T}$ . Затем рассчитываются скорость звука в потоке и число  $\bar{M}$  осредненного потока.

Окончательно определяются «местные» (не сохраняемые при данном способе осреднения) поток энтропии, поток теплосодержания, поток импульса.

При этом поток теплосодержания рассчитывается по величине средней статической температуре полученной при данном способе осреднения, а показатель адиабаты в уравнении «местного» потока энтропии

$$S = R_1 G \ln \left[ \frac{\bar{T}^{\frac{k}{k-1}}}{\bar{p}} \right]$$

определяется по величине средней температуры

$$T_{cp} = \frac{\bar{T} + \bar{T}^*}{2}.$$

### 3. АПРОБИРОВАНИЕ ПРОГРАММЫ

Апробирование программы осуществлялось при осреднении неравномерных полей параметров воздуха на входе в ГТД [7, 8, 9], на входе и выходе вентилятора ГТД [10], на выходе из камеры сгорания, на выходе из турбины ГТД. Тривиальной проверкой программы является расчет при равномерном поле давлений и температур в потоке. В этом случае, независимо от способа осреднения, величины интегральных характеристик и средних параметров потока идентичны.

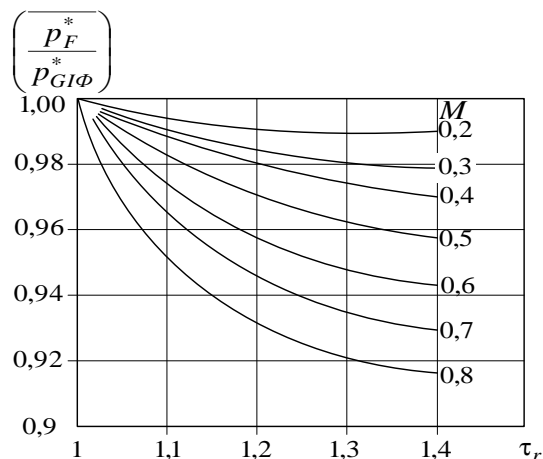
С помощью разработанной программы была осуществлена описанная ниже сравнительная оценка средних величин полного давления неравномерного потока воздуха во входном сечении ГТД при осреднении параметров по площади и с сохранением массового расхода, потока теплосодержания и потока импульса ( $G, I, \Phi$ ). Необходимость такой оценки обусловлена следующим. Как известно, в процессе стендовых испытаний ГТД при приведении тяги к стандартным атмосферным условиям в случае неравномерного поля полного давления



на входе в ГТД величину измеренной тяги относят к величине полного давления воздуха во входном сечении осредненного, как правило, по площади. Кроме этого, при имитации на стенде высотно-скоростных условий при испытании ГТД с присоединенным трубопроводом на входе имитируемое число  $M$  полета рассчитывается по отношению осредненного по площади полного давления воздуха во входном сечении двигателя к статическому давлению в термобарокамере. Очевидно, что от используемого способа осреднения полного давления воздуха во входном сечении ГТД (в данном случае осреднения по площади) зависят величины приведенной тяги двигателя и имитируемого числа  $M$  полета.

Как считает ряд исследователей, при определении приведенной тяги и числа  $M$  более обоснованным (с учетом физической стороны решаемой задачи) по сравнению с осреднением по площади является способ осреднения с сохранением в осредненном потоке, как и в действительном потоке, идентичными величин  $G$ ,  $I$ ,  $\Phi$ . Однако соответствующих количественных оценок к настоящему времени не приведено. С целью выявления влияния способа осреднения на величину среднего полного давления воздуха во входном сечении ГТД были проведены необходимые расчеты, результаты которых приводятся ниже.

Оценка отличия величин полного давления воздуха при его осреднении по площади и с сохранением массового расхода, потока теплового содержания и потока импульса осуществлялась путем сравнительных численных расчетов при различной неравномерности условного исследуемого потока (коэффициент поля  $\tau_r$  изменялся от 1,0 до 1,45) при различном уровне заторможенной температуры воздуха ( $T^* = 288 \div 500$  К), поле которой было равномерным, и различном числе  $M$  на входе в двигатель ( $M = 0,1 \div 0,8$ ). Обобщение результатов расчета производилось с использованием двух критериев: коэффициента поля  $\tau_r$  и числа  $M$ . Результаты обобщения сравнительных расчетов приведены на рисунке, из рассмотрения которого следует, что отличие полного давления, осредненного по площади, от полного давления, осредненного с сохранением  $G$ ,  $I$ ,  $\Phi$ , возрастает при увеличении числа  $M$  в потоке воздуха на входе в двигатель и степени неравномерности поля его скоростей. При величинах коэффициента поля  $\tau_r = 1,4$  и  $M = 0,8$  отличие достигает 7%. Давление, осредненное по площади, всегда меньше давления, осредненного по способу с сохранением  $G$ ,  $I$ ,  $\Phi$ .



**Рис.** Зависимость отношения полного давления, осредненного по площади, к полному давлению, осредненному с сохранением  $G$ ,  $I$ ,  $\Phi$ , от коэффициента поля  $\tau_r$  и числа  $M$

Приведенный выше обобщенный практический пример использования разработанных алгоритмов и программы осреднения неравномерных газовых потоков наглядно показывает возможность с их помощью повышения точности обработки и обоснованности представления результатов испытаний двигателя и его узлов.

## ВЫВОДЫ

Разработана система алгоритмов и программа осреднения параметров неравномерных воздушных и газовых потоков. Программа позволяет выполнять осреднение по нескольким способам, наиболее часто применяемым в практике доводки ГТД и его узлов. Программа апробирована при осреднении параметров неравномерных потоков на входе в ГТД, на входе и выходе из вентилятора ГТД, на выходе из камеры сгорания, на выходе из турбины и может быть использована как модуль в системах автоматизированных испытаний ГТД.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М: Наука, 1967. 428 с.
2. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976. 888 с.
3. Самойлович Г. С. Гидрогазодинамика. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
4. 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. Сер. «Авиационное двигателестроение»: науч.-техн. сб. ЦИАМ. 1992. Вып. 4. С. 13–17.

5. **Крокко Л.** Одномерное рассмотрение газовой динамики установившихся течений // Основы газовой динамики под ред. Г. Эммонса. М.: Иностран. лит., 1963. С. 64–324.

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. **Кофман В. М.** Сравнительный анализ способов осреднения при обработке параметров неравномерного воздушного потока на входе в ГТД // Вестник УГАТУ. 2009. Т.12, № 2(31). С. 35–42.

8. **Кофман В. М., Ахметов Р. Г.** Экспериментальное определение потерь и неравномерности полного давления в радиально-осевом входном устройстве ВГТД // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. «Авиационное двигателестроение»: науч.-техн. сб. ЦИАМ. 1992. Вып.4. С. 5–9.

9. **Кофман В. М.** Методы оценки показателей эффективности работы узлов ГТД по результатам измерений параметров неравномерных воздушных и

газовых потоков // Наука и технологии: Тр. XXVIII Российск. шк. М.: РАН, 2008. Т. 1. С. 108–120.

10. **Кофман В. М.** Определение КПД вентилятора по результатам измерения параметров неравномерных воздушных потоков // Полет. 2009. № 9. С. 38–47.

## 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 мат. моделир. ГТД.