

Инженерная методика оценки коэффициента восстановления полного давления в канале в условиях дозвукового течения

Шлякотин В.Е.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва
e-mail: veshlyakotin@ciam.ru

Рассмотрен приближенный подход к определению коэффициента восстановления полного давления при дозвуковом течении газа в канале с учетом изменения параметров потока на входе

Ключевые слова: гидравлические потери в канале, расчет гидравлических потерь, коэффициент восстановления полного давления

Engineering method for estimating a total pressure recovery factor in a duct with subsonic conditions

Shlyakotin V.E.

CIAM, Moscow

An approximate approach to determining total pressure recovery factor of a subsonic gas flow in a duct, which considers changes in the flow parameters at the inlet, is examined.

Keywords: hydraulic losses in a duct, calculation of hydraulic losses, total pressure recovery factor

Вычислительные мощности современных комплексов ЭВМ уже сейчас позволяют проводить сложнейшие многомерные расчеты отдельных узлов воздушно-реактивных двигателей. Однако подобные расчеты требуют подчас значительных временных затрат и не позволяют проводить серийные, например оптимизационные, расчеты таких узлов и тем более газодинамические расчеты воздушно-реактивного двигателя в целом.

Для подобных расчетов двигателя используют, как правило, одномерные, а чаще всего нульмерные (для расчетов в характерных сечениях двигателя) термодинамические математические модели, например как в [1]. Эти модели широко применяют в промышленности для сравнительного анализа различных схемных решений, траекторных расчетов летательного аппарата, решения оптимизационных задач, задач увязки параметров двигателя с экспериментальными данными и пр.

В таких моделях расчет проводится на основе классических одномерных законов сохранения с использованием полных параметров (параметров торможения) газовых потоков (давления, температуры, энтальпии и пр.) и определением при необходимости их статических значений.

В частности, в практике термодинамического моделирования параметров и характеристик воздушно-реактивных двигателей возникает необходимость расчета потерь полного давления газового потока в каналах различного вида (наружного контура, переходных и пр.). В этом случае для удобства вводят параметр – коэффициент восстановления полного давления $\sigma^* = p_{\text{вых}}^* / p_{\text{вх}}^*$, а его численное значение (главным образом на расчетном режиме работы двигателя) обычно принимают, исходя из опыта расчетов каналов подобного типа или на основе экспериментальных данных.

В настоящей статье рассматривается приближенный подход к определению коэффициента восстановления полного давления при дозвуковом течении газа в канале с учетом изменения параметров потока на входе.

В термодинамических расчетах ГТД часто применяют зависимость для определения σ^* , учитывающую приведенную скорость потока (λ) на входе в канал:

$$\sigma^* = 1 - K_{\xi} \Pi(\lambda),$$

где $\Pi(\lambda)$ – функциональный параметр как некая функция приведенной скорости; K_{ξ} – коэффициент, опреде-

ляемый по параметрам потока на расчетном режиме (обозначены индексом «0»):

$$K_{\xi} = (1 - \sigma_0^*) / \Pi(\lambda_0),$$

при этом K_{ξ} остается неизменным при всех прочих условиях на входе в канал, а σ^* в этом случае является функцией только скорости потока на входе.

Так, в [1] функциональный параметр используется в виде $\Pi(\lambda) = \lambda^2$.

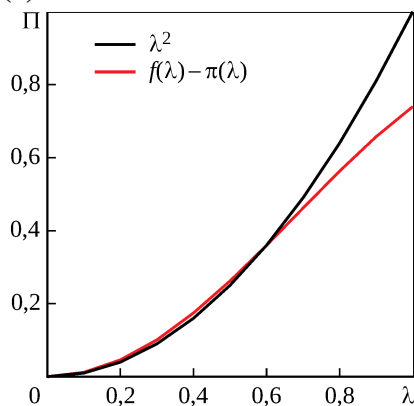


Рис. 1. Изменение параметра $\Pi(\lambda)$ в зависимости от приведенной скорости

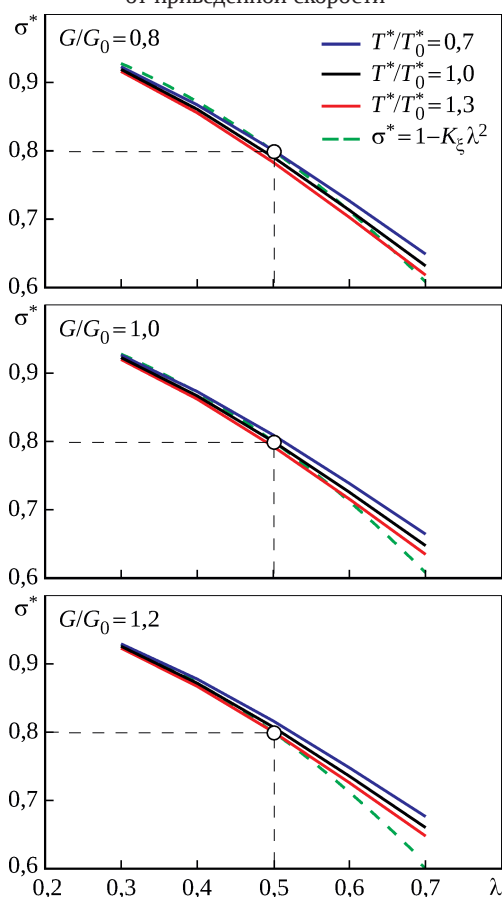


Рис. 2. Изменение коэффициента восстановления полного давления в зависимости от приведенной скорости, относительного расхода и относительной температуры воздуха на входе в канал

С другой стороны, как известно, полное давление на выходе из канала можно представить в виде

$$p_{\text{вых}}^* = p_{\text{вх}}^* - \xi(\rho u^2 / 2)_{\text{вх}},$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; ρ и u – плотность и скорость потока. В этом случае, исходя из определения газодинамической функции

$$f(\lambda) = (\rho u^2 + p) / p^*,$$

нетрудно показать, что рассматриваемый параметр представляется в виде $\Pi(\lambda) = f(\lambda) - \pi(\lambda)$, где $\pi(\lambda)$ – газодинамическая функция.

На рис. 1 представлено сравнение рассмотренных видов функционального параметра $\Pi(\lambda)$ при показателе адиабаты $k = 1,4$: в диапазоне приведенной скорости $\lambda = 0 \dots 0,4$ значения параметра близки, однако с ростом скорости наблюдаются заметные различия.

Подобный подход к расчету потерь полного давления не учитывает изменения других (кроме скорости) параметров потока на входе в канал. Для учета этих параметров воспользуемся наиболее удобным определением коэффициента гидравлического сопротивления в представлении Блазиуса для турбулентного течения при обтекании пластины, что оправдано при расчетах пограничного слоя в цилиндрических каналах сравнительно большого диаметра (несомкнутые пограничные слои) [2]. В этом случае $\xi \sim 1/\text{Re}^{0,2}$. Тогда, исходя из определения числа Рейнольдса, можно записать:

$$\frac{\xi}{\xi_0} = \left(\frac{\text{Re}_0}{\text{Re}} \right)^{0,2} = \left(\frac{G_0}{G} \right)^{0,2} \left(\frac{\mu}{\mu_0} \right)^{0,2},$$

где G и μ – секундный расход рабочего тела и коэффициент динамической вязкости.

Принимая степенную зависимость коэффициента динамической вязкости от температуры в виде $\mu \sim T^\omega$, где для воздуха $\omega = 0,68$ [2], для продуктов сгорания получим

$$\frac{\xi}{\xi_0} = \left(\frac{G_0}{G} \right)^{0,2} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0,136}.$$

С учетом этого окончательно можно представить зависимость коэффициента восстановления полного давления в канале в следующем виде:

$$\sigma^* = 1 - \frac{\Pi(\lambda)}{\Pi(\lambda_0)} (1 - \sigma_0^*) \left(\frac{G}{G_0} \right)^{-0,2} \left(\frac{T^*}{T_0^*} \right)^{0,136}.$$

На рис. 2 в качестве примера показано изменение коэффициента восстановления полного давления в канале в зависимости от приведенной скорости, относительного расхода $G/G_0 = 0,8 \dots 1,2$ и относительной температуры потока $T^*/T_0^* = 0,7 \dots 1,3$ ($k = 1,4$). В расчетной точке приняты значения $\lambda_0 = 0,5$, $\sigma_0^* = 0,8$ при использовании соотношения $\Pi(\lambda) = f(\lambda) - \pi(\lambda)$. Пунк-

тиром обозначена широко применяемая зависимость $\sigma^* = 1 - K_\xi \lambda^2$, где $K_\xi = 0,8$.

На представленных графиках видно, что расход и температура потока на входе в канал не оказывают значительного влияния на σ^* , но с увеличением приведенной скорости влияние температуры становится более заметным. Тем не менее для корректного расчета потерь полного давления в канале влияние этих параметров необходимо учесть.

В случае развитого турбулентного течения в трубчатых каналах коэффициент гидравлического сопротивления в форме Блазиуса представляется в похожем виде (отличается степенью при числе Рейнольдса) [2]: $\xi \sim 1/Re^{0,25}$. В этом случае зависимость коэффициента восстановления полного давления в трубчатом канале записывают как

$$\sigma^* = 1 - \frac{\Pi(\lambda)}{\Pi(\lambda_0)} (1 - \sigma_0^*) \left(\frac{G}{G_0} \right)^{-0,25} \left(\frac{T^*}{T_0^*} \right)^{0,17}.$$

Представленные зависимости выводились для условий турбулентного режима течения, однако подобный подход можно распространить и на случай ламинарного пограничного слоя с учетом характерной записи коэффициента гидравлического сопротивления.

Так, для ламинарного режима течения на пластине коэффициент гидравлического сопротивления представляется в виде $\xi \sim 1/Re^{0,5}$, а для внутритрубного течения – в виде $\xi \sim 1/Re$ [2].

В общем случае зависимость для определения коэффициента восстановления полного давления представляется в виде

$$\sigma^* = 1 - \frac{\Pi(\lambda)}{\Pi(\lambda_0)} (1 - \sigma_0^*) \left(\frac{G}{G_0} \right)^{-m} \left(\frac{T^*}{T_0^*} \right)^n,$$

где m и n – коэффициенты, числовые значения которых сведены в таблицу.

Влияние расхода и температуры потока на входе в канал, незначительное при турбулентном режиме течения, в случае ламинарного режима становится более выраженным.

В условиях охлаждаемой (нагреваемой) стенки канала при необходимости можно учесть и температурный фактор. Так, в [3–5] для учета влияния неизомеричности потока на теплоотдачу, а с учетом аналогии Рейнольдса и на гидравлическое сопротивление, для всех режимов дозвукового течения как при обтекании пластины, так и при внутритрубном течении предлагается использовать поправку $\varepsilon_T = (Pr/Pr_w)^{0,25}$ (где Pr_w – число Прандтля на стенке), а с учетом пропорциональности изобарной теплоемкости и коэффициента теплопроводности для газовых потоков – поправку $\varepsilon_T = (\mu/\mu_w)^{0,25}$ или для воздуха и продуктов сгорания – $\varepsilon_T = (T^*/T_w)^{0,17}$. Исходя из того, что $St/St_{из} = c_f/c_{fиз} = \xi/\xi_{из}$ (где St – число

Таблица. Числовые значения коэффициентов m и n

Режим	Поверхность	m	n
Ламинарное течение	Пластина	0,5	0,34
	Трубчатый канал	1,0	0,68
Турбулентное течение	Пластина	0,2	0,136
	Трубчатый канал	0,25	0,17

Стэнтона; c_f – коэффициент сопротивления; «из» – изотермические значения), относительная поправка на неизомеричность для полученной выше зависимости составит $\varepsilon_T/\varepsilon_{T0} = [(T^*/T_0^*)/(T_w/T_{w0})]^{0,17}$.

Окончательно зависимость для определения коэффициента восстановления полного давления представляется в общем виде как

$$\sigma^* = 1 - \frac{\Pi(\lambda)}{\Pi(\lambda_0)} (1 - \sigma_0^*) \left(\frac{G}{G_0} \right)^{-m} \left(\frac{T^*}{T_0^*} \right)^n \left(\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{T0}} \right).$$

Обычно температура стенки канала задается некоторым распределением по ее длине, поэтому потери полного давления необходимо рассчитывать по участкам разбиения общей длины канала. В этом случае предложенный подход применяется к i -му участку разбиения с некоторым распределением коэффициента восстановления полного давления на расчетном режиме, например в виде $\sigma_{i0}^* = \sigma_{\Sigma 0}^{1/N}$, где $\sigma_{\Sigma 0}^*$ – суммарный коэф-

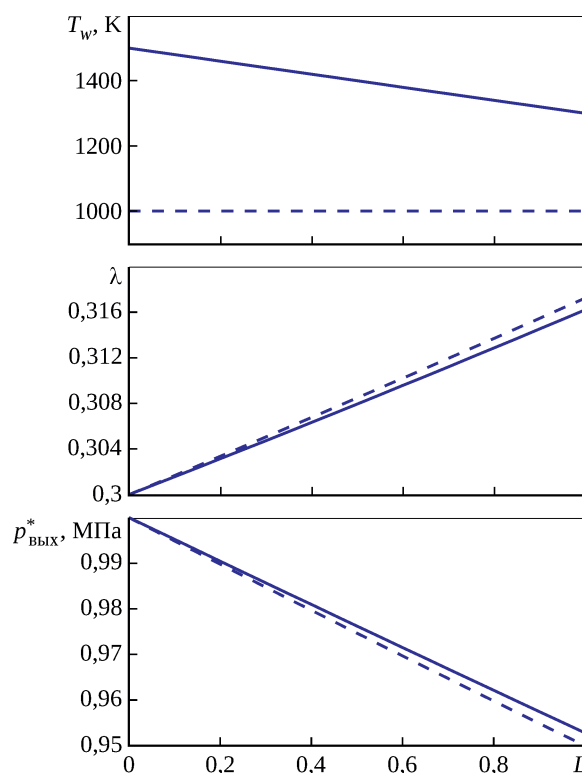


Рис. 3. Изменение приведенной скорости и полного давления на выходе из канала при заданном изменении температуры стенки по условной длине канала на расчетном (пунктир) и нерасчетном (сплошная линия) режимах

коэффициент восстановления полного давления во всем канале на расчетном режиме; N – количество участков разбиения.

Рассмотрим влияние изменения температуры стенки канала. На рис. 3 представлено изотермическое турбулентное течение в канале при условиях на расчетном режиме: $\sigma_{\Sigma}^* = 0,95$, $p_{\text{вх}0}^* = 1,0$ МПа, $T_{\text{вх}0}^* = 1000$ К, $G_{\text{вх}0} = 1,0$ кг/с, $k = 1,4$ – с постоянной температурой стенки канала $T_w = 1000$ К. Число разбиений условной длины канала (L) принято $N = 20$. На нерасчетном режиме задавалось линейное распределение температуры стенки при прочих равных условиях. Указанный пример демонстрирует небольшое, но заметное изменение коэффициента восстановления полного давления (на рис. 3 – полного давления ($p_{\text{вых}}^*$)) в зависимости от изменения температуры стенки канала, составившего $\sigma_{\Sigma}^* = 0,953$.

Отметим, что полученная зависимость, в которой использованы устоявшиеся подходы, носит приближенный характер и не претендует на абсолютную точность. С другой стороны, относительная точность зависимости во многом нивелирует возможные погрешности.

Таким образом, полученная зависимость позволяет определять потери полного давления в каналах на нерасчетных режимах при ламинарном и турбулентном режиме течения в условиях дозвукового изотермического и неизоэтермического потока и может быть рекомендована для практических расчетов. В случае переходного режима течения вследствие консервативности коэффициента восстановления полного давления достаточно определить его на границах режимов, соответствующих критическим значениям числа Рейнольдса, в дальнейшей линейной интерполяции.

Литература

1. Дружинин Л.Н., Швец Л.И., Ланшин А.И. Математическое моделирование ГТД на современных ЭВМ при исследовании параметров и характеристик авиационных двигателей. М. : ЦИАМ, 1979. 45 с. (Труды ЦИАМ ; № 832).
2. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Изд. 3-е, перераб. и доп. М. : Наука, 1969. 824 с.
3. Жукаускас А.А., Жюгжда И.И. Теплоотдача в ламинарном потоке жидкости / под ред. А. Жукаускаса. Вильнюс : Минтис, 1969. 262 с. (Теплофизика / Акад. наук Литовской ССР, Ин-т физико-техн. проблем энергетики ; 2).
4. Жукаускас А.А., Шланчяускас А.А. Теплоотдача в турбулентном потоке жидкости / под ред. А. Жукаускаса. Вильнюс : Минтис, 1973. 327 с. (Теплофизика / Акад. наук Литовской ССР, Ин-т физико-техн. проблем энергетики ; 5).
5. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках / Акад. наук СССР, Акад. наук Литовской ССР, Ин-т физико-техн. проблем энергетики. М. : Наука, 1982. 472 с.

References

1. Druzhinin L.N., Shvets L.I., Lanshin A.I. Matematicheskoe modelirovanie GTD na sovremennykh EVM pri issledovanii parametrov i kharakteristik aviatsionnykh dvigatelei [Mathematical modeling of gas turbine engines on modern computers in studies of aircraft engines' parameters and characteristics]. Moscow: CIAM, 1979. 45 p. (Proceedings of CIAM; no. 832).
2. Abramovich G.N. Prikladnaia gazovaia dinamika [Applied gas dynamics]. 3rd edition, revised and supplemented. Moscow: Nauka, 1969. 824 p.
3. Zhukauskas A.A., Zhiugzhda I.I. Teplootdacha v laminarnom potoke zhidkosti [Heat transfer in laminar fluid flow]. Edited by A. Zhukauskas. Vilnius: Minthis, 1969. 262 p. (Teplofizika. Akademiia nauk Litovskoi SSR, Institut fiziko-tekhnicheskikh problem energetiki; 2 [Thermophysics. Academy of Sciences of Lithuanian SSR, Institute of Physical and Technical Problems of Power Engineering; 2]).
4. Zhukauskas A.A., Shlanchiauskas A.A. Teplootdacha v turbulentnom potoke zhidkosti [Heat transfer in turbulent fluid flow]. Edited by A. Zhukauskas. Vilnius: Minthis, 1973. 327 p. (Teplofizika. Akademiia nauk Litovskoi SSR, Institut fiziko-tekhnicheskikh problem energetiki; 5 [Thermophysics. Academy of Sciences of Lithuanian SSR, Institute of Physical and Technical Problems of Power Engineering; 5]).
5. Zhukauskas A.A. Konvektivnyi perenos v teploobmennikakh [Convective transfer in heat exchangers]. Akademiia nauk SSSR [Academy of Sciences of the USSR], Akademiia nauk Litovskoi SSR [Academy of Sciences of Lithuanian SSR], Institut fiziko-tekhnicheskikh problem energetiki [Institute of Physical and Technical Problems of Power Engineering]. Moscow: Science, 1982. 472 p.

Материалы получены редакцией 01.04.2021