

УДК 629.735.33.015.3.024 + 629.735.33.042

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ВОЗДУХА ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ВОЗДУХА ИЗ ОТСЕКА

В. Д. ДОНИК

АНТК им. О.К. Антонова, Киев

Получено 23.06.2003 ◊ Пересмотрено 20.02.2004

Проведен анализ существующих методов моделирования расхода воздуха, исследованы их преимущества и недостатки. Разработан метод моделирования расхода воздуха на основе политропности протекания процесса при истечении воздуха из отсека.

Проведений аналіз розроблених методів моделювання розходу повітря, досліджені їхні переваги і недоліки. Розроблений метод моделювання розходу повітря на підставі політропності протікання процесу при витіканні повітря із відсіку.

The analysis of existing methods of modelling of an air flow is executed. Their advantages and lacks are investigated. The method of modelling of an air flow on the basis polytropical process is developed at the air efflux from a fuselage bay.

ВВЕДЕНИЕ

При решении задач истечения воздуха из отсека возникает необходимость определения расхода воздуха. Существуют различные методы определения расхода воздуха [1-7], которые отличаются друг от друга, прежде всего, структурой модели расхода воздуха, входящими в модель параметрами воздуха, коэффициентами, методами измерения параметров воздуха, методами получения адекватности модели реальному процессу. Структура модели расхода воздуха во многих случаях определяет область применения и эффективность метода. В работе [1] выведена формула для расчета расхода воздуха по параметрам торможения воздуха на входе в сужающее устройство и газодинамическим функциям. Широкое распространение получил такой метод при проведении газодинамических расчетов газотурбинных двигателей [2]. Однако из-за его сложности возникла необходимость создания более простых инженерных методов расчета расхода воздуха. Так, в работе [3] представлена модель определения расхода воздуха по параметрам торможения воздуха внутри отсека и окружающей среды, в которую втекает воздух. Аналогичная модель расчета представлена в работе [4], в которой дается вывод формулы расчета расхода воздуха сквозь сопло, проведены исследования некоторых свойств такой модели и определена область применения модели. При расчете различных авиационных систем применяются модели определения расхода воздуха по перепаду давления на рассматриваемом элементе, температуре воздуха и переменным коэффициентам, которые зависят от режима течения и конструктивно-

го исполнения рассматриваемого элемента [5]. В работах [6, 7] формирование модели расхода воздуха проводится по параметрам движущегося потока. Методы измерения таких параметров оказались довольно трудоемкими и не доведены до широкого практического применения.

В основе разработанных моделей и методов лежит предположение об адиабатности или изотермности протекания процесса. Создание таких методов проводится на основе экспериментальных стендовых исследований конкретных изделий с определением различных коэффициентов (например, коэффициента расхода), которые во многих случаях являются функцией от режима течения воздуха. Определение таких коэффициентов для конкретных самолетов требует выполнения огромного количества экспериментальных исследований и практически не представляется возможным.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При решении многих практических задач возникает необходимость описать реальный процесс истечения воздуха из отсека по параметрам, которые контролируются штатным оборудованием. На основании измеренных параметров описание таких процессов имеет научное и практическое значение. Кроме того, измеренные параметры должны довольно полно отражать физику протекаемых процессов.

Для углубления уровня знания, расширения области применения математических моделей процессов истечения воздуха из отсека необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель определения скорости и расхода воздуха по параметрам потока, которые изменяются по политропному закону.

2. Разработать метод определения расхода воздуха при истечении воздуха из отсека.

2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ВОЗДУХА

Рассмотрим течение воздуха через элементарную струйку площадью F между сечениями 1 и 2. Предположим, что параметры воздуха между этими сечениями изменяются по политропному закону. Количественная оценка подводимой и отводимой энергии не проводится или измерить такие виды энергии на практике не представляется возможным. При движении потока вдоль струйки происходит изменение полной энтальпии (i_0), которая равняется изменению работы (ℓ). Работа (ℓ) затрачивается на изменение объёма газа и на совершение работы над окружающим пространством (ввод или вывод массы газа, изменение кинетической энергии движущегося потока). В дифференциальном виде это можно записать так:

$$di_0 = d\ell \quad (1)$$

или

$$di + d\left(\frac{w^2}{2}\right) = \frac{Rn}{n-1} dt_0, \quad (2)$$

где

$$i_0 = i + \frac{w^2}{2}; \quad \ell = \frac{Rn}{n-1} T_0;$$

i_0 – энтальпия заторможенного потока, Дж/кг; ℓ – работа, совершенная газом на единицу массы, Дж/кг; $i = C_p T$ – энтальпия потока, Дж/кг; C_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, Дж/(кг·град); w – скорость потока, м/с; n – показатель политропы; T_0 – температура заторможенного потока, °K; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·град).

Запишем уравнение (2) в таком виде:

$$d\left(\frac{w^2}{2}\right) = \frac{Rn}{n-1} dT_0 - di \quad (3)$$

и проинтегрируем его левую и правую части вдоль струйки от сечения 1 к сечению 2:

$$\int_1^2 d\left(\frac{w^2}{2}\right) = \int_1^2 \frac{Rn}{n-1} dT_0 - \int_1^2 di,$$

или

$$\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} = \frac{Rn}{n-1} (T_{02} - T_{01}) - C_p (T_2 - T_1), \quad (4)$$

где i_1, i_2 – энтальпия потока в сечениях 1 и 2 соответственно; T_{01}, T_{02} – температура торможения потока в сечениях 1 и 2 соответственно; T_1, T_2 – температура потока в сечениях 1 и 2 соответственно; w_1, w_2 – скорость потока в сечениях 1 и 2 соответственно.

Из уравнения (4) определим скорость воздуха в сечении 2:

$$w_2 = \sqrt{\frac{Rn}{n-1} (T_{02} - T_{01}) - 2C_p (T_2 - T_1) + w_1^2}. \quad (5)$$

Используя условие политропности протекающего процесса, запишем

$$T_1 = T_{02} \left(\frac{P_1}{P_{02}}\right)^{\frac{n-1}{n}}, \quad T_2 = T_{01} \left(\frac{P_2}{P_{01}}\right)^{\frac{n-1}{n}},$$

где P_1, P_2 – статические давления воздуха в соответствующих сечениях; P_{01}, P_{02} – полные давления воздуха в соответствующих сечениях.

Подставив T_1 и T_2 в уравнение (5), имеем

$$w_2 = \left\{ T_{02} \left[\frac{2Rn}{n-1} + 2C_p \left(\frac{P_1}{P_{02}}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right] - T_{01} \left[\frac{2Rn}{n-1} + 2C_p \left(\frac{P_2}{P_{01}}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right] + w_1^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Опуская промежуточные выкладки, уравнение (5) можно записать в таком виде:

$$w_2 = \left\{ \frac{2Rn}{n-1} (T_{02} - T_{01}) - 2C_p \left[T_{02} \left(\frac{P_2}{P_{02}}\right)^{\frac{n-1}{n}} - T_{01} \left(\frac{P_1}{P_{01}}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right] + w_1^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

В соответствии с уравнениями (5) – (7) представляется возможным определить скорость потока в сечении 2 по известным полным и статическим давлениям потока в двух сечениях и известной скорости потока в сечении 1.

Запишем уравнение массового расхода воздуха:

$$G = \rho_2 w_2 F = F \frac{P_{01}}{RT_{01}} \left(\frac{P_2}{P_{01}}\right)^{\frac{1}{n}} \left\{ \frac{2Rn}{n-1} (T_{02} - T_{01}) - 2C_p \left[T_{01} \left(\frac{P_2}{P_{01}}\right)^{\frac{n-1}{n}} - T_{02} \left(\frac{P_1}{P_{02}}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right] + w_1^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

где ρ_2 – массовая плотность воздуха в сечении 2, кг/м³; F – площадь сечения струйки, м².

Уравнение (8) представляет собой математическую модель определения расхода воздуха по заданной скорости потока в сечении 1 и известным параметрам $P_1, P_2, P_{01}, P_{02}, T_{01}, T_{02}$, которые изменяются по политропному закону. По сравнению с работами [1-4] разработанные математические модели (7) и (8) впервые учитывают влияние параметров P_1, P_{02}, T_{02}, n . Таким образом, степень новизны составляет 50%. При определенных допущениях по параметрам и режиму течения воздуха в двух сечениях разработанные математические модели преобразуются к известным уравнениям в соответствии с работами [1-4].

Если скорость потока в сечении 1 $w_1 = 0$, то $w_2 = w$ и уравнение (8) примет следующий вид:

$$G = F \frac{P_{01}}{RT_{01}} \left(\frac{P_2}{P_{01}} \right)^{\frac{1}{n}} \left\{ \frac{2Rn}{n-1} (T_{02} - T_{01}) - 2C_p \left[T_{01} \left(\frac{P_2}{P_{01}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - T_{02} \left(\frac{P_1}{P_{02}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

Полученное уравнение необходимо использовать при истечении воздуха из отсека большого объема и выполнении условия $w_1 = 0$.

Рассмотрим некоторые частные случаи, которые вытекают из уравнений (5)-(8).

При $w_1 = 0, w_2 = w, T_{01} = T_{02}$ имеем

$$w = \sqrt{2C_p \left[T_{01} \left(\frac{P_1}{P_{02}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - \left(\frac{P_2}{P_{01}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}. \quad (9)$$

Если $P_1 = P_{02}$, то уравнение (9) запишется в таком виде:

$$w = \sqrt{2C_p T_{01} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_{01}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}. \quad (10)$$

При допущениях $T_{01} = T_{02}, P_1 = P_{02}$ уравнение (8) преобразуется следующим образом:

$$G = F \frac{P_{01}}{RT_{01}} \left(\frac{P_2}{P_{01}} \right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{2C_p T_{01} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_{01}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}. \quad (11)$$

Уравнение (11) может быть также получено при допущениях $T_{01} = T_{02}, P_1 = P_{01}, T_1 = T_{01}$.

Для адиабатического процесса ($n = k = 1.4$) с учетом сжатия потока уравнение (11) преобразуется к уравнению, изложенному в работах [3, 4]:

$$G = \mu F P_{01} \left(\frac{P_2}{P_{01}} \right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_{01}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_{01}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (12)$$

где μ – коэффициент расхода.

Для критического режима течения при $P_1 = P_{01}$ уравнение (7) можно записать в таком виде:

$$w = \sqrt{\frac{2Rn}{n-1} (T_{02} - T_{01}) - 2C_p \left[T_{02} \left(\frac{P_1}{P_{02}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - T_{01} \right]}. \quad (13)$$

При $T_{01} = T_{02}$:

$$w = \sqrt{2C_p T_{01} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_{02}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}. \quad (14)$$

Для адиабатного процесса течения критическая скорость воздуха в соответствии с выражением (14) будет

$$w = \sqrt{\frac{2Rk}{k+1}} T_{01}. \quad (15)$$

Уравнение (8) для критического режима течения воздуха преобразуется в уравнение, изложенное в работах [1, 3, 4]:

$$G = \sqrt{\frac{k}{R}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1-k}{(k-1)^2}} \frac{P_{01}}{\sqrt{T_{01}}} F. \quad (16)$$

На основании полученных уравнений представляется возможным описать процесс истечения воздуха из отсека. В качестве исходных данных являются параметры среды внутри отсека и среды, в которую происходит истечение воздуха. Проведенный анализ уравнений (5)-(8) показывает, что при определенных допущениях разработанные уравнения преобразуются в уравнения, представленные в работах [1-4]. Незвестным параметром в разработанных моделях является показатель политропы. Определение показателя политропы проводится по результатам испытаний реальных объектов с применением метода наименьших квадратов или помехоустойчивых методов [9]. Оценки показателя политропы с применением помехоустойчивых методов оказываются предпочтительными.

Для стандартной атмосферы на земле при $dt_0 \neq 0$ проведены сравнительные оценки результатов расчета расхода воздуха (рис. 1). Расчет расхода воздуха проводился в соответствии с работами [1-4] при наличии коэффициента расхода для круглого отверстия. Сопоставление результатов расчета по разработанной математической модели и эксперимента для натурального отсека объемом 147 м^3 представлено на рис. 2. Истечение воздуха из отсека происходило через отверстие с регулирующей заслонкой. Математическая модель

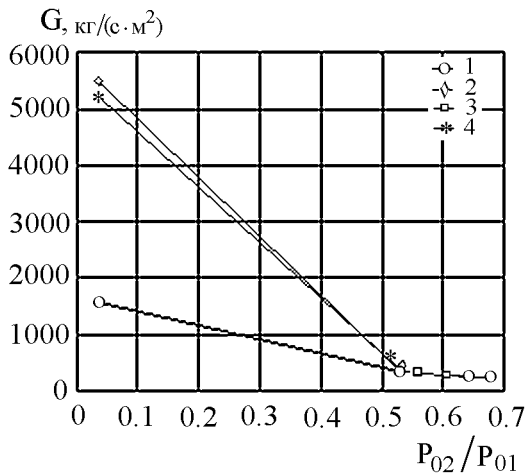


Рис. 1. Сравнительная оценка результатов расчета расхода воздуха:

1 – модель расхода воздуха в соответствии с уравнением (16) [1]; 2 – модель расхода воздуха в соответствии с [3]; 3 – модель расхода воздуха в соответствии с уравнением (8), докритическое течение, $P_{02}/P_{01} > 0.528$; 4 – модель расхода воздуха в соответствии с уравнением (8), закритическое течение, $P_{02}/P_{01} \leq 0.528$.

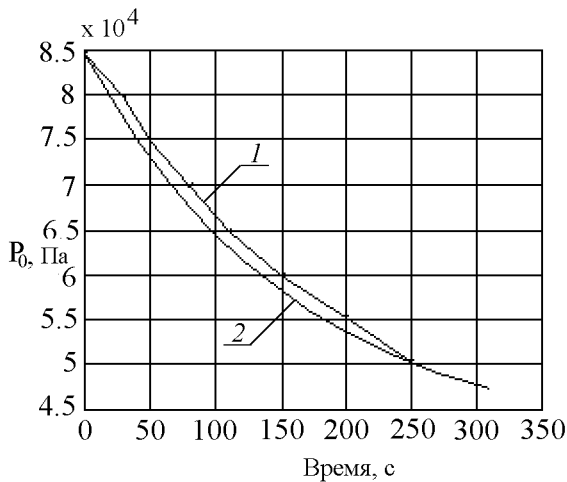


Рис. 2. Изменение давления воздуха P_0 в отсеке по времени с применением модели (8):
1 – эксперимент; 2 – расчет

истечения воздуха из отсека использовалась в соответствии с [8]. Показатель политропы составил 1.18. Измерение параметров среды осуществлялось с помощью штатного оборудования.

ВЫВОДЫ

Таким образом, уравнения (5)-(8) являются обобщенными моделями определения скорости и расхода воздуха для процесса истечения воздуха из отсека, когда параметры среды изменяются по политропному закону. В качестве неизвестной величины таких моделей является показатель политропы. Величину этого показателя определяем с помощью метода наименьших квадратов или помехоустойчивого метода по результатам исследований реальных объектов. Полученные результаты показывают, что разработанные модели отражают характер протекания процесса и имеют близкие значения к экспериментальным данным.

Проведенные теоретические, численные и экспериментальные исследования показывают, что с помощью разработанных моделей и метода определения расхода воздуха на основе политропности протекания процесса возможно описать с достаточной для практики точностью реальный процесс истечения воздуха из отсека.

На основании полученных результатов представляется целесообразным продолжить дальнейшие исследования нестационарных процессов перетекания воздуха.

1. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. Изво третье.– М.: Наука, 1969.– 824 с.
2. *Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М.* Теория авиационных двигателей. Ч. 2.– М.: Машиностроение, 1978.– 336 с.
3. *Быков Л.Т., Ивлентьев В.С., Кузнецов В.И.* Высотное оборудование пассажирских самолетов.– М.: Машиностроение, 1972.– 332 с.
4. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа.– М.: Наука, 1978.– 736 с.
5. *Кондращенко В.Я., Винничук С.Д., Федоров М.Ю.* Моделирование газовых и жидкостных распределительных систем.– К.: Наук. Думка, 1990.– 270 с.
6. *Турбулентное сдвиговое течение.* Пер. с англ./Под ред. *А.С.Гиневского*, М.: – Машиностроение.– 1982, 432 с.
7. *Шец Дж.* Турбулентное течение. Процессы вдува и перемешивания. Пер. с англ.– М.: Мир, 1984.– 247 с.
8. *Доник В.Д.* Математическая модель истечения воздуха из объема// Збірник наукових праць ІПМЕ НАН України, Київ.– 2001.– С. 38-49.
9. *Доник В.Д.* Алгоритм сглаживания экспериментальных данных с минимизацией остатков. -К., 1987. -Деп.ВИНИТИ 1.04.88. N2534- B88. - 8 с.