

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АДИАБАТНОГО ПРОЦЕССА РАСШИРЕНИЯ ГАЗА В ПОТОКЕ

А.А. Балашов, А.Г. Кузьмин, Е.А. Герман, Е.М. Калюжный

Определение расходных характеристик различного рода проточных систем и каналов, энтропии, газодинамических потерь и параметров, движущегося потока, как правило, производится опытным путем с помощью индцирования различного рода энергетических установок, измерения давления и температуры. Однако экспериментальное определение упомянутых характеристик и параметров потока является достаточно дорогостоящим мероприятием, занимает длительный промежуток времени и используется, в связи со своей узкоспециализированной направленностью, в нешироком диапазоне, т.е. результаты экспериментальных исследований обычно нельзя проанализировать или переносить на широкий круг объектов.

Для того чтобы уменьшить объем экспериментальных исследований и, соответственно, снизить затраты на их проведение, желательнее определить газодинамические потери, приращение энтропии и параметры движущегося адиабатного потока расчетным путем.

С этой целью необходимо принять характерные заторможенные параметры потока на входе в проточную систему. Это давление P^* и температура T^* заторможенного потока. Кроме этого, для проведения расчета необходимо знать некоторые параметры потока в выходном сечении потока системы, такие как статическое P_2 и заторможенное P_2^* давления или, в дополнении к статическому давлению P_2 , массовый расход газа G_2 и проходное сечение канала F_2 на выходе потока [1, 2, 3].

Для выполнения теоретического расчета по определению параметров газа в движущемся потоке прежде всего необходимо определиться с термодинамическим процессом расширения. Приняв термодинамический процесс расширения газа, как правило адиабатным, задаемся заторможенными параметрами на входе потока P_1^* и T^* .

Теоретически возможное абсолютное статическое давление на выходе потока P_T из проточной системы принимаем равное атмосферному давлению.

Для определения статической теоретически достижимой температуры в потоке T_T , при принятых параметрах потока на входе,

воспользуемся выражением для изоэнтропного процесса расширения газа:

$$T_T = T^* \cdot \left(\frac{P_T}{P_1^*} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (1)$$

где T^* - заторможенная абсолютная температура потока;

P_1^* - заторможенное абсолютное давление во входном сечении потока;

P_T - теоретически возможное статическое давление в потоке при изоэнтропном процессе расширения;

T_T - теоретически достижимая абсолютная статическая температура в потоке при изоэнтропном процессе расширения;

k - показатель изоэнтропного процесса расширения газа.

В изоэнтропном процессе расширения газа энтропия $S_1=S_2=const$, а $\Delta S=0$, коэффициент газодинамических потерь $\xi=0$ и статическая температура в выходном сечении потока $T_2 = T_T$.

Поэтому, определив температуру T_T , необходимо далее определить статическую температуру T_2 в адиабатном процессе расширения газа в выходном сечении потока.

Для этого воспользуемся зависимостью коэффициента газодинамических потерь ξ от отношения перепада температур [1]:

$$\xi = \frac{\Delta T_T}{\Delta T}, \quad (2)$$

где ξ - коэффициент газодинамических потерь в адиабатном процессе расширения газа в потоке;

$\Delta T_T = T_2 - T_T$ - перепад статических температур в адиабатном и изоэнтропном процессах расширения газа в потоке;

$\Delta T = T^* - T_2$ - перепад заторможенной и статической температур в адиабатном потоке.

Раскрыв выражение (2) можем получить зависимость для определения статической температуры в адиабатном потоке T_2 , которая буде равна:

$$T_2 = \frac{\xi \cdot T^* + T_T}{\xi + 1}, \quad (3)$$

где T_2 - абсолютная статическая температура при адиабатном процессе расширения газа в потоке.

Задаваясь коэффициентом газодинамических потерь в диапазоне $\xi = 0 \div \infty$ при постоянных параметрах газа на входе потока, определим температуру T_2 для различных режимов течения газа по каналу.

Определившись, для различных режимов течения газа по каналу, с коэффициентом ξ можно получить показатель адиабатного процесса расширения газа в потоке [4, 5, 6]:

$$m = \frac{k(\xi + 1)}{k\xi + 1}, \quad (4)$$

где m - показатель адиабатного процесса расширения газа в потоке.

Далее нужно определить действительную скорость течения газа в выходном сечении потока:

$$W_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot (T^* - T_2)}, \quad (5)$$

где R - газовая постоянная;

W_2 - действительная скорость течения газа в выходном сечении потока.

Скорость звука в выходном сечении потока a будет равна:

$$a = \sqrt{k \cdot R \cdot T_2}. \quad (6)$$

Число Маха M определится по выражению:

$$M = \frac{W_2}{a}. \quad (7)$$

Зная коэффициент газодинамических потерь ξ и число M , определим изменение энтропии ΔS участке канала оси сечения 1-1 до сечения 2-2 [1, 2, 3, 4]:

$$\Delta S = C_p \cdot \ln \frac{2}{2 - (k-1) \cdot \xi \cdot M^2}. \quad (8)$$

Заторможенное давление в выходном сечении потока P_2^* определяется по выражению [1]:

$$P_2^* = P_1^* \cdot \left[\xi \cdot \frac{e^{\Delta S/C_p}}{(\xi + 1) \cdot e^{\Delta S/C_p} - 1} \right]^{\frac{k \cdot \xi}{k-1}},$$

где ΔS - изменение энтропии газа в потоке между входом в канал и выходом из него;

C_p - теплоемкость газа при постоянном давлении;

e - основание натуральных логарифмов;

Статическое давление в выходном сечении потока P_2 определяется по выражению:

$$P_2 = P_2^* \cdot \left[\xi \cdot \frac{e^{\Delta S/C_p}}{(\xi + 1) \cdot e^{\Delta S/C_p} - 1} \right]^{\frac{k}{k-1}} \text{ или}$$

$$P_2 = P_1^* \cdot \left[\xi \cdot \frac{e^{\Delta S/C_p}}{(\xi + 1) \cdot e^{\Delta S/C_p} - 1} \right]^{\frac{k \cdot (\xi + 1)}{k-1}}. \quad (9)$$

Теоретически возможная и действительная скорости (для проверки) могут быть определены еще и по выражениям:

$$W_T = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T^* \cdot \frac{(e^{\Delta S/C_p} - 1) \cdot (\xi + 1)}{(\xi + 1) \cdot e^{\Delta S/C_p} - 1}}, \quad (10)$$

$$W_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T^* \cdot \frac{e^{\Delta S/C_p} - 1}{(\xi + 1) \cdot e^{\Delta S/C_p} - 1}}. \quad (11)$$

Коэффициент скорости определяется по выражению:

$$\lambda = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \cdot \frac{e^{\Delta S/C_p} - 1}{(\xi + 1) \cdot e^{\Delta S/C_p} - 1}}. \quad (12)$$

Другой скоростной коэффициент будет равен:

$$\varphi = \frac{W_2}{W_T}. \quad (13)$$

Условия на входе и выходе потока:

$$P_1^* = 1,8 \text{ кг/см}^2, P_T = 1,0 \text{ кг/см}^2, T^* = 298 \text{ К}.$$

Задавшись коэффициентами газодинамических потерь от $\xi = 0$ до $\xi = 3$, заторможенными абсолютным давлением $P_1^* = 1,8 \text{ кг/см}^2$ и температурой $T^* = 298 \text{ К}$ определим по приведенным выше зависимостям параметры потока, приняв при этом для начала расчета теоретически возможное абсолютное давление $P_T = 1,0 \text{ кг/см}^2$. Шаг по ξ принят $\Delta \xi = 0,1$.

По результатам расчета построены графики зависимости заторможенных параметров потока P_2^* и T^* , статических параметров P_2, T_2 и T_T , а также коэффициента газодинамических потерь ξ и числа Маха M , а так же перепадов давлений $\Delta P^*, \Delta P, \Delta P_T, \Delta P_{\text{пот}}$ и температур ΔT и

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АДИАБАТНОГО ПРОЦЕССА РАСШИРЕНИЯ ГАЗА В ПОТОКЕ

ΔT_T от изменения энтропии в потоке рис. 1 и рис. 2.

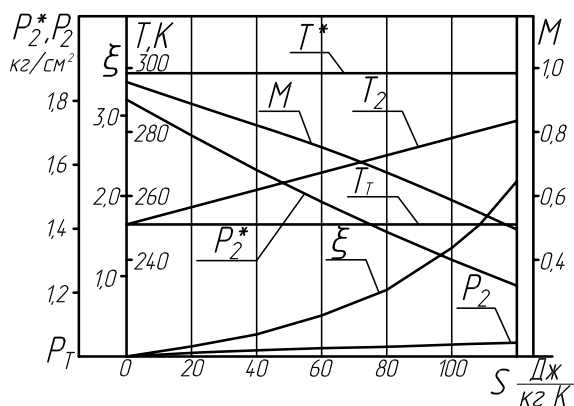


Рис. 1. Зависимость заторможенных P_2^* , T^* и статических параметров потока P_2 , T_2 , T , M , ζ от изменения энтропии

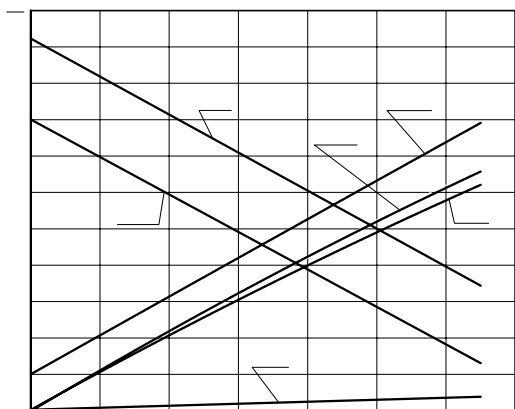


Рис. 2. Зависимость перепадов температур и давлений от изменения энтропии

С ростом энтропии в потоке снижается заторможенное давление на выходе потока P_2^* , от его исходного уровня P_1^* , что характеризует основную долю газодинамических потерь в потоке за счет диссипации и деградации энергии (рис. 1). Другая доля газодинамических потерь образуется за счет реализации диссепировавшей и деградировавшей энергии в теплоту усваиваемую газом и подогревающего его по потоку, что приводит к увеличению, статического давления P_2 (рис. 1).

Снижение заторможенного давления P_2^* на выходе из канала из-за увеличения энтропии приводит, как уже указывалось к росту температуры T_2 и давления P_2 в потоке, что, соответственно, уменьшает обратимую часть адиабатного процесса расширения газа, и увеличивает необратимую часть этого же процесса расширения газа в потоке характеризуемая $\Delta P_{пот}$ складывается из двух составляющих $\Delta P_{пот} = \Delta P^* - \Delta P_T$:

- потере полного напора при движении потока $\Delta P^* = P_1^* - P_2^*$;

- увеличении статического давления в адиабатном потоке P_2 относительно его изотропного уровня P_T , т.е. увеличении $\Delta P_T = P_2 - P_T$ за счет подогрева потока (рис. 2).

Число Маха, характеризующее действительную скорость газа на выходе потока снижается с ростом энтропии или, что одно и тоже, с ростом необратимой части термодинамического процесса расширения (рис. 1).

По мере роста энтропии интенсивность увеличения коэффициента газодинамических потерь ζ нарастает, так как изменение ζ от S носит явно выраженный нелинейный характер. Однако другие параметры, представленные на графике рис. 1 и рис. 2 имеют линейный или близкий к нему характер изменения в зависимости от изменения энтропии.

В связи с вышеизложенным можно сказать, что газодинамические потери характеризуемые коэффициентом ζ , складываются из потерь полного напора ΔP^* на который оказывает влияние механическое взаимодействие канала с потоком (трение о стенки, вихреобразование, местные потери), т.е. механическое влияние на поток, и тепловое влияние, которое приводит к росту ΔP_T , т.е. к росту статического давления P_2 при $P_T = const$ рис. 1 и 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуковский В.С. Термодинамика.- М.: Энергоатомиздат, 1983. – 304 с.

2. Рудой Б.П. Газовая динамика ДВС.- Уфа: Изд-во УАИ, 1983. – 52 с.
3. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1967. – 428 с.
4. Балашов А.А. Определение газодинамических потерь в проточных каналах ДВС // Меж. вуз. сб. Исследование и совершенствование быстроходных двигателей. Под ред. к.т.н., проф. Л.В. Нечаева.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1997. – С. 133 – 142.
5. Герц Е.В., Крейнин Г.В. Теория и расчет силовых пневматических устройств.- М.: Академия наук СССР, 1960. – 177 с.
6. Мамонтов М.А. Некоторые случаи течения газа.- М.: Оборонгиз, 1951. – 490 с.