УДК 533.6.011-1

ФОРМУЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ МАЛОГО ПОДВОДА (ОТВОДА) ТЕПЛА В РЕАГИРУЮЩЕМ ПОТОКЕ ГАЗА НА ЕГО ИМПУЛЬСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Л. Е. СТЕРНИН

(Москва)

При течениях реагирующих газовых потоков в каналах в ряде случаев имеет место небольшой подвод или отвод тепла (догорание в каналах, их регенеративное охлаждение и т. д.). Учет этих эффектов весьма актуален, но обычно сопряжен с численным интегрированием дифференциальных уравнений, характеризующих реагирующие потоки, или с подобными вычислительными операциями [1, 2]. Ниже показано, что для таких квазиодномерных потоков потери импульса могут быть оценены по очень простой формуле.

Рассмотрим произвольный сверхзвуковой стационарный квазиодномерный поток газа в заданном канале с неравновесными химическими реакциями. Любой из шести параметров потока (газовая постоянная R, энтальпия i, температура T, давление p, плотность ρ, скорость w) может быть выражен однозначной функцией от длины x или площади поперечного сечения F канала. Уравнения расхода, состояния, импульса и энергии запишем в виде

$$\dot m=\rho wF,\qquad p=\rho RT,\qquad dq=di-\frac{dp}{\rho},\qquad i_0+\Delta q=i+\frac{w^2}{2} \tag{1}$$

где $\dot m$ – постоянный расход, dq и Δq – соответственно элементарный и суммарный удельные подводы тепла в канале, i_0 – энтальпия торможения. При этом полагается, что подвод тепла осуществляется в закритической части канала и не влияет на расход.

При движении потока от начального (о) сечения из уравнений (1) с точностью до малых второго порядка следует:

$$\frac{\sqrt{i_0-i}}{RT}\exp\int_{i_0}^{i}\frac{di}{RT}=\frac{\xi}{F}\left(1+\int_0^{\Delta q}\frac{dq}{RT}-\frac{\Delta q}{2(i_0-i)}\right) \tag{2}$$

где ξ – размерная постоянная.

Из соотношения (2) могут быть получены формулы для изменения параметров потока вследствие подвода тепла; так, например,

$$\frac{\Delta T}{T}=\left[\frac{2(i_0-i)-RT}{2R(i_0-i)}\frac{di}{dT}-\frac{T}{R}\frac{dR}{dT}-1\right]^{-1}\left(\int_0^{\Delta q}\frac{dq}{RT}-\frac{\Delta q}{2(i_0-i)}\right) \tag{3}$$

Изменение удельного импульса $I=w_a+R_aT_a/w_a$, вследствие подвода или отвода тепла при применении (1) и (3) к выходному сечению a выражается простой и удобной для использования формулой

$$\delta\equiv\frac{\Delta I}{I}=\left(\frac{\Delta q}{R_aT_a}-\int_0^{\Delta q}\frac{dq}{RT}\right)\left(1+\frac{w_a^2}{R_aT_a}\right)^{-1} \tag{4}$$

Таким образом, влияние равновесных или неравновесных химических реакций на δ сказывается только при вычислении простейшей квадратуры, а также через параметры в выходном сечении. Естественно, что все величины, входящие в (3) и (4), кроме q, могут приниматься теми же, что и для теплоизолированного потока.

Второй сомножитель в формуле (4) для потоков с постоянным показателем адиабаты γ равен $(1+\gamma M_a^2)^{-1}$, где M_a – число Маха в выходном сечении.

Поскольку в выходном сечении R_aT_a меньше, чем в любом другом, то при $\Delta q>0$ $\delta>0$ и наоборот, т. е. подвод тепла увеличивает, а отвод – уменьшает удельный импульс.

Если тепло Δq, отобранное у потока, подводится на вход в канал с F_a/F_*=const, то прирост удельного импульса, обусловленный этим подводом, может быть оценен методами, изложенными в [3].

При этом

$$\delta_+ \equiv \frac{\Delta I}{I} = \Delta q \left[1 - \frac{T_a}{T_0} + \left(\alpha_{p*}\frac{T_*}{c_{p*}} - \frac{T_0 - T_*}{w_*^2}\right)\frac{R_a T_a}{T_0}\right] \times$$
$$\times \left[w_a^2\left(1 + \frac{R_a T_a}{w_a^2}\right)\right]^{-1}$$

где $\alpha_p = \rho(\partial v/\partial T)_p$ – изобарный коэффициент расширения, c_p – теплоемкость при постоянном давлении, звездочкой отмечены параметры в критическом сечении.

Для потока с постоянным составом и показателем адиабаты

$$\delta_+ = \frac{\Delta q}{w_a^2(1+\mu_a)}, \quad \mu_a^{-1} = \frac{\gamma - 1}{2} M_a^2$$

В целом регенеративный эффект, т. е. повышение удельного импульса, обусловленное отводом тепла вдоль канала и подводом этого же тепла в начале канала, определяется равенством

$$\delta_\Sigma = \delta_+ + \delta_-$$

где $\delta_- < 0$ вычисляется по формуле (4) при $\Delta q < 0$.

Если при определении параметров потока в канале рассчитывается пограничный слой с учетом теплообмена через стенку, то вторично, по формуле (4), теплообмен учитывать не следует. Однако такое течение уже не является квазиодномерным.

Поступила 16 IX 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вулис Л. А.* Термодинамика газовых потоков. М.– Л., Госэнергоиздат, 1950.
2. *Абрамович Г. Н.* Прикладная газовая динамика. М., «Наука», 1969.
3. *Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П., Худяков В. А.* Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания, т. 1. М., АН СССР, ВИНИТИ, 1971.

УДК 533.6.011.8

ПРОФИЛЬ СОПЛА, ФОРМИРУЮЩЕГО СВОБОДНОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ ПОТОК, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДУХОЗАБОРНИКОВ И РЕШЕТОК

Ю. Е. КУЗНЕЦОВ, Я. Ш. ФЛАКСМАН

(Москва)

В работе [1] авторами изложена методика создания в экспериментальных установках свободномолекулярного потока, моделирующего натурный свободномолекулярный поток по одному из моментов функции распределения, предназначенный для некоторых видов аэродинамических экспериментов, например для исследования расходных характеристик воздухозаборников и решеток. В настоящей работе даны результаты расчетов контуров сопл, формирующих свободномолекулярный поток с необходимой для моделирования функцией распределения.

Согласно [1] в искусственно созданном и натурном свободномолекулярных потоках относительные расходы молекул $N(\theta, \varphi)$ вдоль любой траектории равны. (Здесь $N(\theta, \varphi)$ – относительное число молекул, пересекающих единичную площадку, перпендикулярную траектории, в единичном пространственном угле в единицу времени.) При этом в обоих потоках по одинаковым траекториям будет двигаться одинаковое (относительное) число молекул при отличающихся законах распределения модулей скорости.