УДК 532.5

РАСЧЕТ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ МАССЫ ПОТОКА В ВИХРЕВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Карышев Ю.Д.

Самарский институт инженеров железнодорожного транспорта

Сильно закрученные струи, к которым относятся струи в вихревых элементах с тангенциальным вводом рабочего тела, характеризуются наличием зоны обратных токов. В общем случае, приосевой обратный поток распространяется до торцевой стенки камеры закручивания [1] и, отражаясь от нее, возвращается вместе с периферийным потоком в выходное сопло. Этот поток можно назвать «спутным». В целом, приосевой и спутный потоки образуют циркуляционный.

При расчетах параметров смесеобразования и горения в камерах сгорания существенным является вопрос об относительной массе в циркуляционном потоке. В настоящее время в основном используют результаты экспериментальных данных. Для получения аналитических зависимостей запишем относительную циркуляционную массу в виде

$$\overline{m} = \frac{m_0}{m} = \frac{\overline{\rho}_{o.cp}\overline{V}_{z.cp}\varphi_o}{\varphi} \qquad (1)$$

Здесь обозначено: $\varphi = 1-(r_m/r_c)^2$, r_m - радиус внутренней границы основного потока, r_c радиус сопла; $\varphi_o = (r_o/r_c)^2$, r_o-радиус внешней границы обратного потока; $\overline{\rho}_{o.cp}$ - отношение осредненной плотности в обратном потоке $\rho_{o.cp}$ к осредненной плотности в основном потоке ρ_{cp}; $\overline{V}_{z.cp}$ -отношение осредненных значений аксиальных составляющих скорости в обратном $V_{z.cp}$ и $c_{z.cp}$ основном потоках.

Определим значения входящих в уравнение (1) величин. Примем гипотезу, основанную на данных эксперимента, что распределение окружной составляющей скорости внутри сопла имеет вид присущий вихрю Рэнкина. Кроме того, будем считать, что окружные составляющие скорости на внутренней границе основного потока в вынужденном вихре $u_{\theta m}$ и основном потоке $c_{\theta m}$ пропорциональны с коэффициентом пропорциональности ψ, который назовем коэффициентом сцепления

$$u_{\theta m} = \psi c_{\theta m} \tag{2}$$

На основании[2] можно записать

$$c_{\theta m}^2 = \frac{2k}{k-1}\frac{p_m}{\rho_m}(\pi_m^{\frac{k-1}{k}} - 1)\sin^2\alpha_m, \tag{3}$$

где k- показатель адиабаты в основном потоке; π_m-отношение давления торможения на входе в вихревой элемент к давлению на внутренней границе основного потока, равного давлению в окружающей среде (p_m=p_h); синус угла закрутки потока на внутренней границе

$$\sin^2\alpha_m = \frac{2(1-\varphi)}{2-\varphi}.$$

В дальнейшем индексы m, h – будут относиться к параметрам на внутренней границе основного потока и во внешней среде соответственно. Из решения уравнения радиального равновесия в циркуляционном потоке, осредненного по времени движения,

$$\frac{u_\theta^2}{r} = \frac{1}{\rho}\frac{dp}{dr}$$

совместно с уравнением адиабаты и уравнением (3),после разложения в ряд Тейлора, ограничиваясь при этом первыми двумя членами, запишем

$$p = p_h\left[1 - \psi^2\frac{\rho_h}{\rho_m}\frac{k}{k-1}(\pi_m^{\frac{k-1}{k}} - 1)(1 - \frac{r^2}{r_m^2})\sin^2\alpha_m\right], \tag{4}$$

$$\rho = \rho_h\left[1 - \psi^2\frac{\rho_h}{\rho_m}\frac{1}{\chi}\frac{k}{k-1}(\pi_m^{\frac{k-1}{k}} - 1)(1 - \frac{r^2}{r_m^2})\sin^2\alpha_m\right] \tag{5}$$

χ - показатель адиабаты в окружающей среде; p,ρ- давление и плотность соответственно, Значение среднеинтегральной по площади плотности в обратном потоке получим из выражения

$$\rho_{o.cp} = \frac{2\pi}{\pi r_o^2} \int_o^{r_o} \rho r dr =$$

$$= \rho_h \left[1 - \psi^2 \frac{\rho_h}{\rho_m} \frac{1}{\chi} \frac{k}{k-1} (\pi_{mk}^{\frac{k-1}{k}} - 1)(1 - 0,5 \frac{\varphi_o}{1-\varphi}) \sin^2 \alpha_m \right] . \quad (6)$$

Используя результаты, приведенные в [2], получим первое соотношение

$$\bar{\rho}_{o.cp} = \frac{\rho_{o.cp}}{\rho_{cp}} = \frac{1 - \psi^2 \bar{\rho} \frac{k}{\chi(k-1)} (\pi_{mk}^{\frac{k-1}{k}} - 1)(1 - 0,5 \frac{\varphi_o}{1-\varphi}) \sin^2 \alpha_m}{1 + \frac{1}{k-1} (\pi_{mk}^{\frac{k-1}{k}} - 1)(1 - 2 \frac{1-\varphi}{\varphi} \ln \frac{1}{\sqrt{1-\varphi}}) \sin^2 \alpha_m} \quad (7)$$

Для определения среднеинтегрального значения аксиальной скорости в обратном потоке найдем распределение избыточного давления по радиусу вынужденного вихря, приводящее к появлению аксиальной составляющей скорости, p^* и соответствующую ему плотность ρ^* Из уравнения Бернулли

$$\frac{p^*}{\rho^*} = \frac{p}{\rho} + \frac{\chi - 1}{2\chi} u_\theta^2 , \quad (8).$$

уравнения (4), с учетом уравнения адиабаты, после разложения в степенной ряд для простоты вычислений, но практически без потери точности, получим

$$\frac{p^*}{p_h} = \left[1 + \frac{\psi^2}{\xi_3} \frac{k}{k-1} \frac{\rho_h}{\rho_m} (\pi_{mk}^{\frac{k-1}{k}} - 1)(2 \frac{r^2}{r_m^2} - 1) \sin^2 \alpha_m \right] . \quad (9)$$

Тогда из уравнения (9) следует, что радиус разделения обратного и спутного потоков в сопле (внешняя граница обратного потока) r_o, который удобнее представить в безразмерном виде $\eta_o = r_o / r_m$, определится из условия равенства нулю второй внутренней скобки, то есть

$$\eta_o = \frac{\eta_m}{\sqrt{2}}, \quad \text{или} \quad \varphi_o = 0,5(1 - \varphi)$$

Средненинтегральное значение степени понижения давления в зоне обратного приосевого потока

$$\beta_{об} = \frac{2\pi}{\pi r_0^2}\int_0^{r_0}\frac{p^*}{p_h}rdr = 1-\frac{\rho_h}{\rho_m}\frac{k}{k-1}(\pi_{mk}^{\frac{k-1}{k}}-1)(1-\frac{\varphi_0}{1-\varphi})\psi^2\sin^2\alpha_m \qquad (10)$$

Уравнение (10) позволяет определить осредненное значение аксиальной составляющей скорости в обратном приосевом потоке

$$V_{z.r} = \sqrt{\frac{2\chi}{\chi-1}R_hT_h(1-\beta_{об}^{\frac{\chi}{\chi-1}})} \qquad (11)$$

Здесь R_h, T_h -газовая постоянная и температура окружающей среды.

Коэффициент сцепления ψ на основании экспериментальных данных может быть представлен как функция параметра закрутки А∂ (действующей характеристики) или однозначно с ним связанного коэффициента заполнения сопла φ [2].

$$A_\partial < 1{,}3 \qquad \psi = 0{,}4286\,A_\partial^2 \;;$$

$$1{,}3 \le A_\partial \le 2{,}785 \qquad \psi = 0{,}85/\exp[0{,}16\cdot(2{,}3-A_\partial)]^2 \;; \qquad (12)$$

$$A_\partial > 2{,}785 \qquad \psi = 1{,}882\varphi \;.$$

Зависимость аксиальной скорости от радиуса в основном потоке определяется выражением

$$c_z = c_{\theta m}\sqrt{\frac{\varphi}{2(1-\varphi)}} \qquad (13)$$

В результате получим соотношение

$$\overline{V}_{z.cp} = \frac{V_{z.cp}}{c_z} = \sqrt{\frac{\chi}{\chi-1}\frac{k-1}{k}\frac{(1-\beta_{об}^{\frac{\chi-1}{\chi}})}{\overline{\rho}(\pi_{mk}^{\frac{k-1}{k}}-1)\frac{\varphi}{2-\varphi}}} ,$$

где

$$\overline{\rho} = \frac{\rho_h}{\rho_m}.$$

На рис.1 приведена теоретическая зависимость относительной циркуляционной массы от действующей характеристики при значении

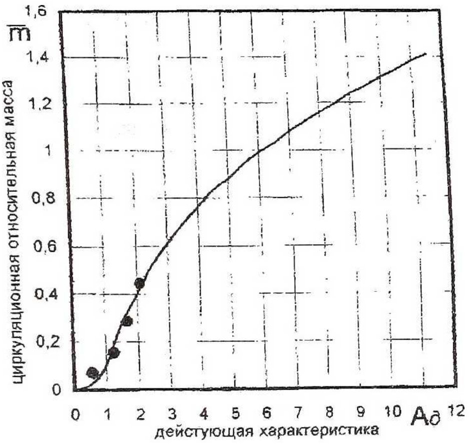

Рис. 1. Зависимость относительной циркуляционной массы от действующей характеристики

степени понижения давления $\beta = 1/\pi_m = 0{,}9$ и экспериментальные точки по данным работы [3]. Как следует из рисунка, эксперимент достаточно хорошо подтверждает расчетные данные. Зависимость относительной циркуляционной массы от коэффициента заполнения сопла φ при двух значениях степени понижения давления $\beta = 0{,}9$ и $\beta = 0{,}6$ приведены на рис. 2. Как видно из рисунка влияние величины β не очень значительно.

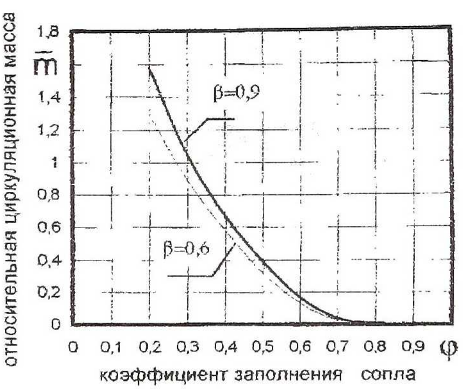

Рис. 2 Зависимость относительной циркуляционной массы от коэффициента заполнения сопла

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нахапетян Е.А. Исследование аэродинамики циклонной топки на натурной модели.// Теплоэнергетика .1954, № 9, с. 10-16.

2. Карышев Ю.Д. О коэффициенте расхода газовых вихревых элементов.//Вопросы н.-технического прогресса на ж.д. транспорте.Самара, СамИИТ, Межвуз. сборник научн. трудов.1998. - с.134-138.

3. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки.-М.:МИР,1987.-588с.