

фактов подогрева (рис. 2,а) и охлаждения (рис. 2,б). Диссоциация с соответствующим изменением величин K и R может снижать эффекты подогрева и охлаждения на 12%. Существенное влияние на названные эффекты оказывает и состав газовой смеси. Так, использование в качестве рабочего тела продуктов сгорания керосина в воздухе вместо чистого воздуха снижает названные эффекты на 2-5%.

Л и т е р а т у р а

1. П и р а л и ш в и л и Ш.А. Теоретическое и экспериментальное исследование вихревой трубы с дополнительным потоком. - Дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. Куйбышев: КуАИ, 1971.
2. Д о б р о д е е в В.П. Исследование термодинамики течений реальных газов. - Дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. Рига: РИИГА, 1971.

УДК 532.527

Л.М.Дыскин, П.Т.Крамаренко

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЭНЕРГИИ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ ГАЗА

Гипотеза взаимодействия вихрей, выдвинутая А.П.Меркуловым [1], является в настоящее время основной для анализа вихревого эффекта. Согласно этой гипотезе в сечении соплового ввода ВТ температура распределяется по радиусу адиабатно за счет турбулентности закрученного потока.

Хаотические молекулярные движения приводят к равномерному распределению молекул по объему газа. Под действием на объем газа центробежных сил в случае отсутствия теплового движения молекул последние уносились бы от центра, собираясь тонким слоем на периферии вихря. Но в результате существования теплового движения молекулы распределяются по всему сечению вихря. Соответственно этому устанавливается и определенный закон изменения давления по радиусу вихря.

Радиальное распределение молекул зависит от величины ускорения α центробежного поля и пути, пройденного молекулой под действием этого ускорения.

При радиальном распределении молекул под действием центробежных сил происходит перераспределение кинетической энергии молекул по радиусу вихря. В результате перемещения молекулы к оси вихря тепловая скорость ее понижается от U на периферии до U_0 на оси вихря. По закону сохранения энергии

$$\frac{mU^2}{2} = \frac{mU_0^2}{2} + amr_0. \quad (1)$$

Скорость U_0 на оси вихря

$$U_0^2 = U^2 - 2ar_0. \quad (2)$$

Уменьшение средней скорости молекул на оси вихря приводит к понижению термодинамической температуры.

При движении молекулы от оси вихря к периферии ее скорость увеличивается за счет действия ускорения центробежного поля от начального значения U_0 на величину $2ar_0$, что приводит к увеличению средней скорости молекул и повышению термодинамической температуры.

Так как в стационарном процессе число молекул, движущихся от оси вихря к периферии, равно числу молекул, движущихся в обратном направлении, то количество тепла, отобранное от осевых слоев газа, равно количеству тепла, подведенного к периферийным слоям.

Статическое давление в элементарном объеме на текущем относительном радиусе \bar{r} закрученного потока газа

$$P_{\bar{r}} = n_{\bar{r}} k T_{\bar{r}}. \quad (3)$$

На периферии вихря при $\bar{r} = 1$ давление

$$P_1 = n_1 k T_1. \quad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) определяется величина относительного снижения термодинамической температуры по радиусу вихря:

$$\epsilon_{\bar{r}} = \frac{T_{\bar{r}}}{T_1} = \frac{P_{\bar{r}} n_1}{P_1 n_{\bar{r}}}. \quad (5)$$

Соответственно, величина относительного снижения полной температуры

$$\epsilon_{\bar{r}}^* = \frac{P_{\bar{r}} n_1 \left(1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda_1^2\right)}{n_{\bar{r}} P_1 \left(1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda_{\bar{r}}^2\right)}, \quad (6)$$

где λ - безразмерная скорость; κ - показатель адиабаты.

Величину отношения n_1/n_F чисел молекул в элементарных объемах в уравнении (6) можно заменить величиной отношения X_1/X_F вероятностей нахождения молекул в элементарных объемах.

Вероятность нахождения молекул в элементарном объеме произвольного кольцевого сечения вихря радиусом r и толщиной dr определяется уравнением

$$X_r = X_{(r-dr)} + \frac{\frac{4}{\pi} \left(\int_{U_r}^{\infty} z^2 e^{-z^2} dz - \int_{U_{(r-dr)}}^{\infty} z^2 e^{-z^2} dz \right)}{S_{\text{пол}} - S_{(r-dr)}} \quad (7)$$

полученным на основании известной формулы Максвелла [2] для распределения молекул по тепловым скоростям.

Здесь $X_{(r-dr)}$ - вероятность нахождения молекул в элементарном объеме газа кольцевого сечения радиусом $(r-dr)$; $S_{\text{пол}}$ - число элементарных объемов в вихревой зоне; $S_{(r-dr)}$ - число элементарных объемов в вихре, ограниченном радиусом $(r-dr)$; $U_{(r-dr)}$ и U_r - относительные скорости молекулы, необходимые для преодоления центробежного ускорения вихря при перемещении молекулы с периферии вихря до кольцевых сечений с радиусами $(r-dr)$ и r соответственно.

Известно, что при переходе в неинерциальную систему отсчета в уравнениях движения частиц появляются неинерционные силы. Поэтому, переходя во вращающуюся вместе с газом в трубе систему отсчета, мы должны учесть центробежные силы. Согласно общим физическим законам, решать задачу можно с одинаковым результатом в любой системе отсчета.

Действие центробежных сил на одиночные молекулы во вращающемся потоке газа можно объяснить также следующим образом. Выделим элементарный объем газа, вращающийся вокруг неподвижного центра. Очевидно, что все одиночные молекулы, находящиеся в выделенном объеме, также вращаются вокруг этого центра, одновременно хаотически перемещаясь внутри объема с тепловыми скоростями. С точки зрения молекулярно-кинетической теории газа действие центробежной силы на одиночные молекулы проявляется в этом случае как совокупность соударений между молекулами.

Влияние поля центробежных сил определяется потенциальной энергией $m\omega r^2/2$, где ω - угловая скорость вращения газа, r - текущий радиус вихря. Если молекула газа перейдет с периферии вихря к центру, то изменение ее энергии будет порядка $m\omega^2 R^2/2$,

где R - радиус ВТ. Порядок разности температур на периферии и в центре вихря можно оценить из соотношения

$$\frac{3}{2} K_B \Delta T \sim m \omega^2 R^2 / 2,$$

откуда
$$\Delta T \sim \frac{m \omega^2 R^2}{3 K_B}.$$

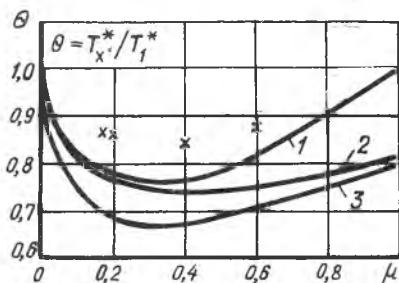
Принимая массу молекулы $m \approx 10^{-23}$, постоянную Больцмана $K_B = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/град, окружную скорость на периферии вихря $U_{\tau} = \omega R = 350$ м/с $= 3,5 \cdot 10^4$ см/с, получим

$$\Delta T \sim \frac{10^{-23} (3,5 \cdot 10^4)^2}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-16}} = 0,24 \cdot 10^2 \text{ град},$$

что сравнимо с результатами экспериментов.

На основе изложенного, с использованием газодинамических соотношений гипотезы взаимодействия вихрей разработана методика расчета температурных характеристик для адиабатной и неадиабатной ВТ, которая реализована в программе для ЭВМ.

На рис. I представлены температурные характеристики, рассчитанные по предлагаемой методике для адиабатной (кривая 1) и неадиабатной (кривая 2) ВТ, а также характеристика, полученная на основе гипотезы взаимодействия вихрей (кривая 3). Здесь же нанесены экспериментальные данные [1]. Как видно из графиков, кривые 1 и 2 более близки к экспериментальным результатам.



Р и с. I. Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик ВТ: $\kappa = 1,4$; $\sigma^2 = 0,45$; $\bar{n} = 5$; $\omega = 0,098$, x - эксперимент

Л и т е р а т у р а

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969, 183 с.
2. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. - М.: Наука, 1976, 480 с.