

2. А з а р о в А.И. Характеристика вихревой трубы с рециркулирующим горячим потоком. - В сб.: Холодильная техника и технология. - Киев: 1974, № 18, с. 48-52.
3. А л е к с е е в В.П., А з а р о в А.И. и др. Вихревые трубы с внутренним оребрением горячего конца. - В сб.: Вихревой эффект и его применение в технике. - Куйбышев: 1976, с. 113-118.
4. Б и р ю к В.В., В и л я к и н В.Е. Экспериментальное исследование охлаждаемой вихревой трубы. - В сб.: Вихревой эффект и его применение в технике. - Куйбышев: 1976, с. 90-96.

УДК 621.573

А.П.Меркулов, Л.С.Кекконен

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ ТРУБ С КРИВОЛИНЕЙНОЙ ОСЬЮ СИММЕТРИИ

В литературе по вихревому эффекту отсутствуют какие-либо сведения относительно влияния криволинейности оси вихревой зоны на характеристики ВТ. Нами были проведены аналитическая оценка степени влияния изгиба оси вихревой зоны на эффективность ВТ, а также эксперименты с целью:

исследования характеристики ВТ в зависимости от параметров изгиба вихревой зоны, оцениваемых радиусом изгиба R и овальностью сечения $n = \frac{D_2 - D_1}{D} \cdot 100\%$;

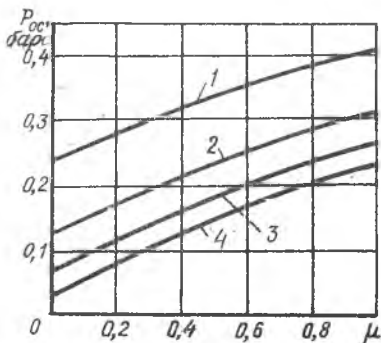
получения данных о влиянии конфигурации и места расположения изогнутого участка на длине вихревой зоны на характеристики ВТ; оценки способности изогнутой ВТ к самовакуумированию.

Для аналитической оценки воспользуемся известными выражениями гипотезы взаимодействия вихрей [1] для распределения статического давления, плотности и температуры по радиусу в свободном и вынужденном вихрях, а также полученным в работе [2] выражением для массовой доли холодного потока.

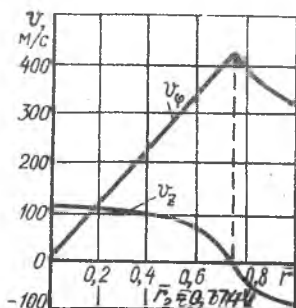
Решение этих уравнений позволяет найти зависимость давления $P_{ос}$ на оси от массовой доли μ холодного потока (рис. 1), из

которой следует, что при фиксированном значении μ по мере увеличения давления P_1^* статическое давление P_{oc} на оси соплового сечения падает, т.е. радиальный градиент статического давления возрастает.

В большинстве практических случаев окружная скорость на радиусе \bar{r}_1 равна критической и составляет $U_{\varphi 1} = v_{кр} = \sqrt{\frac{2K}{K-1} RT_1^{*1}}$. В пределах свободного вихря от \bar{r}_1 до \bar{r}_2 распределение окружной скорости по радиусу определяем по выражению $U_{\varphi} = \frac{U_{\varphi 1}}{\bar{r}}$, а в вынужденном вихре от \bar{r}_2 до $\bar{r} = 0$ имеется линейное распределение окружной скорости по радиусу (рис. 2): $U_{\varphi} = \omega r$.



Р и с. 1. Зависимость $\mu = f(P_{oc})$:
1-4 соответствуют $P_1^* = 3, 4, 5$
6 бар



Р и с. 2. Теоретическое распределение окружной (U_{φ}) и осевой (U_z) скорости вихря по радиусу вихревой трубы

Предположим, что радиус разделения вихрей \bar{r}_2 постоянен по длине вихревой зоны, а на достаточном удалении от соплового сечения в области регулирующего клапана закрутка потока незначительна, что позволяет принять статическое давление в этом сечении приблизительно постоянным и равным давлению P_2 на радиусе \bar{r}_2 .

С учетом этого осевое движение элементов газа будет обеспечиваться разностью давлений $P - P_2$. При этом теоретическая осевая скорость U_{zT} кольцевого слоя в свободном вихре на произвольном радиусе может быть определена выражением

$$U_{zT} = \sqrt{\frac{2K}{K-1} RT \left[1 - \left(\frac{p_2}{p} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]},$$

в вынужденном вихре

$$U'_{zT} = \sqrt{\frac{2K}{K-1} RT_2 \left[1 - \left(\frac{p}{p_2} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]}.$$

Однако в рассматриваемом случае, при наличии двух встречных вращающихся потоков, имеют место значительные потери давления на преодоление сопротивления осевому движению, поэтому действительные значения осевой составляющей скорости будут

$$U_{zq} = \xi U_{zT},$$

где ξ - коэффициент, учитывающий потери на сопротивление.

Значение ξ можно оценить путем сравнения массового расхода свободного вихря $G_{1T} = \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r \rho U_{zT} dr$, определяемого распределением по радиусу U_{zT} , и расхода $G_{1q} = F_c U_{\varphi} \rho_1$, определяемого условиями истечения газа из тангенциальных сопел, тогда $\xi = G_{1q}/G_{1T}$.

На рис. 2 представлены эпюры осевых скоростей U_z при $\mu = 0,501$ ($\xi = 0,325$). Уровень U_z даже в точках максимальных абсолютных значений ($\bar{r} = 0$ и $\bar{r} = 1$) оказывается значительно ниже, чем у окружных скоростей U_{φ} .

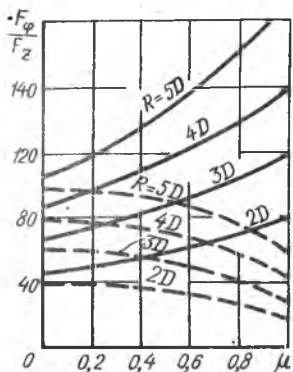
При криволинейной оси вихревой зоны, имеющей радиус кривизны R , наличие осевых скоростей U_z приведет к возникновению центробежной силы $F_z = U_z^2/R$, которая вызовет деформацию кругового потока, нарушение осевой симметрии течения и дополнительную турбулизацию газа.

Согласно гипотезе взаимодействия вихрей, турбулентность является основным механизмом энергетического обмена в круговом потоке [2]. Чем выше уровень турбулентности, тем интенсивнее и полнее энергообмен. Ввиду этого есть основания предполагать, что криволинейность оси вихревой зоны положительно сказывается на эффективности ВТ.

Сравнительная оценка центробежных сил (рис. 3) при максимальных значениях U_{φ} и U_{zq} для различных радиусов кривизны R по выражению

$$\frac{F_{\varphi}}{F_z} = \frac{U_{\varphi}^2}{U_z^2} \frac{R}{r}$$

показывает, что уровень центробежных сил F_{φ} от окружной составляющей на один-два порядка выше центробежных сил F_z от осе-



Р и с. 3. Соотношение центробежных сил F_ϕ/F_z от окружной и осевой составляющих скорости при различных радиусах кривизны вихревой зоны R : — для свободного вихря; - - - для вынужденного вихря

газа, определяющее влияние будет оказывать центробежная сила от осевой скорости вынужденного вихря. При этом, особенно для малых радиусов R , центробежная сила F_z имеет наибольшее значение и может оказать отрицательное воздействие на устойчивость кругового потока.

Перечень вариантов испытанных вихревых труб приведен в таблице.

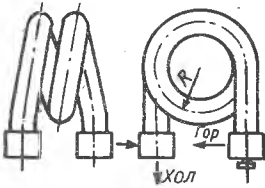
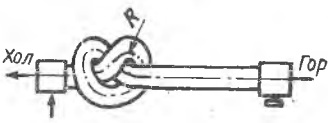

Вихревые трубы с криволинейной осью симметрии

Наименование	Эскиз ВТ	Основные геометрические параметры
Тороидальная		$\varnothing = 0,011 \text{ м}$ $L = 10-20 \varnothing$ $\bar{F}_c = 0,1$ $\bar{d}_g = 0,41-0,56$ $R = 2-5D$ $n = 6, 16 \text{ и } 24\%$

вой составляющей, поэтому последняя не может привести к разрушению кругового потока.

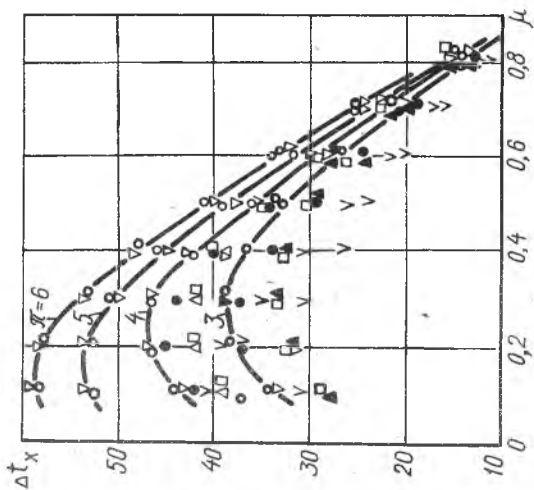
Однако, если в области малых значений массовой доли холодного потока μ соотношение центробежных сил приблизительно одинаково как в свободном, так и в вынужденном вихре, то по мере увеличения μ воздействие F_z на круговой поток в свободном вихре уменьшается, а в вынужденном возрастает. В связи с этим можно предположить, что в первом случае определяющее влияние на дополнительную турбулизацию кругового потока будет оказывать центробежная сила от осевой скорости свободного вихря, где сосредоточена основная масса вращающегося газа.

Во втором случае, в результате перераспределения масс вращающегося га-

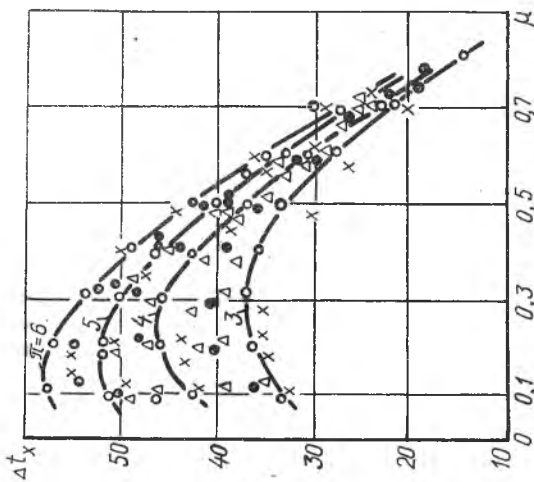
Наименование	Эскиз ВТ	Основные геометрические параметры
Спиральная		$D = 0,01 \text{ м}$ $L = 60 D$ $\bar{F}_c = 0,1$ $d_g = 0,45-0,56$ $R = 3D$ $n = 8\%$
"Узловая"		$D = 0,0125 \text{ м}$ $L = 15 D$ $\bar{F}_c = 0,072$ $d_g = 0,44$ $R = 1D$
Торoidalная самовакумирующаяся		$D = 0,01 \text{ м}$ $L = 9,2 D$ $\bar{F}_c = 0,065-0,075$ $\Delta = 0,04-0,065D$ $R = 2,25D$

Испытания торoidalной вихревой трубы при различных радиусах изгиба R показали, что уменьшение радиуса изгиба вихревой зоны от $R = 5D$ до $R = 2D$ приводит к увеличению эффектов охлаждения на 10-15% по сравнению с прямой ВТ при тех же условиях испытаний (рис. 4). Овальность сечения вихревой зоны в месте изгиба более 8% отрицательно сказывается на характеристиках вихревой трубы. Оптимальными с точки зрения эффективности ВТ и технологичности изготовления являются радиусы изгиба в пределах $R = 2-3 D$.

При испытаниях спирального и "узлового" вариантов (рис. 5) установлено, что начало изгиба вихревой зоны должно располагаться в непосредственной близости от соплового сечения. В этом случае форма изогнутого участка при одинаковом значении R (тороид, спираль, "узел") не оказывает заметного влияния на характери-



Р и с. 4. Характеристики торoidalной втулки при различных радиусах изгиба вихревой зоны ($\varnothing \approx 11 \text{ мм}$; $d_g = 0,41$; $F_c = 0,1$): $\circ - R = 2\varnothing$; $\square - R = 13\varnothing$; $\triangle - R = 4\varnothing$; $\nabla - R = 3\varnothing$; $L = 13\varnothing$; $\bullet - R = 4\varnothing$; $L = 16\varnothing$; $\blacktriangle - R = 5\varnothing$; $L = 20\varnothing$; $\square -$ прямая; $L = 13\varnothing$ с крестовиной; $\nabla - R = 3\varnothing$; $L = 13\varnothing$ без крестовины



Р и с. 5. Характеристики торoidalной спиральной, "узловой" и прямой вихревой трубки при $d_g = 0,45$: $\circ -$ торoidalная, $R = 3\varnothing$; $L = 13\varnothing$, с крестовиной; $\bullet -$ спиральная, $R = 3\varnothing$; $L = 60\varnothing$; $\times -$ "узловая", $R = 1,0\varnothing$; $L = 15\varnothing$ (начало изгиба на расстоянии $L \approx 2\varnothing$ от соплового сечения); $\triangle -$ прямая, $L = 60\varnothing$

ки ВТ. Установлено, что и в случае криволинейной оси вихревой зоны сохраняются особенности работы, присущие длинным ($L > 20 \varnothing$) и средним ($L = 10-20 \varnothing$) ВТ [3]: при малых степенях расширения ($\mathcal{K} = 3$) спиральный вариант ($L = 60 \varnothing$) обеспечивал большую холодопроизводительность ($\mu_{\text{х}} = 0,254$), чем тороидальный ($L = 10 \varnothing$ с крестовиной). Характеристики "узловой" варианта аналогичны характеристикам спиральной ВТ при степенях расширения $\mathcal{K} \geq 4$. С уменьшением степени расширения до $\mathcal{K} = 3$ показатели ее ниже, чем у спиральной трубы, что можно объяснить недостаточным размером сопла ($\bar{F}_c = 0,072$) и излишней турбулизацией вынужденного вихря при радиусе изгиба $R < 2 \varnothing$. При испытаниях этого варианта установлено также, что если "узел" расположен за пределами вынужденного вихря ($L > 14 \varnothing$), то на характеристиках ВТ наличие изогнутого участка вихревой зоны не отражается, т.е. в этом случае "узловой" вариант обеспечивает такие же показатели, как и прямая труба.

Испытания тороидальной самоуплаивающейся вихревой трубы (СВТ) проводились при давлениях $P_1^* = 2, 3, 4$ и 5 бар с различными сочетаниями относительного размера сопла и щели диффузора, которые изменялись в пределах $\bar{F}_c = 0,065-0,075$ и $\Delta = 0,04-0,065 \varnothing$. При этом с помощью радиально вводимой инъекционной иглы диаметром $0,00045$ м и ртутного пьезометра измерялось статическое давление в присоединительной зоне на расстоянии $1,7; 3,9$ и $6,7 \varnothing$ от плоскости соплового сечения.

Полученные результаты ($\mathcal{K}_{\text{max}} = 18,8$) значительно уступают показателям работы коротких прямых СВТ [1], которые обеспечивают степени расширения в вихре до $\mathcal{K} = 45$. Это позволяет сделать вывод о том, что при непрямолинейности оси симметрии вихревой зоны механизм кругового движения газа в ВТ не нарушается, однако дополнительная турбулизация вихря, вызванная осевой составляющей скорости, уменьшает способность изогнутой ВТ к самоуплаиванию.

Л и т е р а т у р а

1. Меркулов А.П. Гипотеза взаимодействия вихрей. - Куйбышев: КуАИ, 1969, вып. 37.
2. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969.

3. Дыскин Л.М., Крамаренко П.Т. О зависимости температурной характеристики от длины вихревой трубы. - В сб.: Вихревой эффект и его применение в технике. - Куйбышев: КуАИ, 1976.

УДК 66.074.38

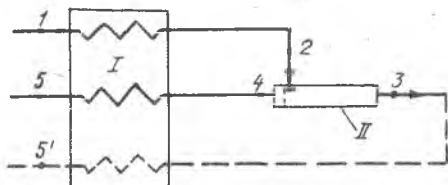
И.Л.Лейтес, М.А.Жидков

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВИХРЕВОГО ЭФФЕКТА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССАХ

Термодинамическая эффективность вихревого эффекта значительно выше, чем эффекта Джоуля-Томсона [1, 2]. Следовательно, ВТ могла бы найти применение в тех криогенных системах, в которых используется эффект дросселирования. Однако и в этом случае возникают трудности.

Как известно, количество холода, произведенного в ВТ дополнительно к эффекту Джоуля-Томсона, равно количеству тепла, отводимого с горячим потоком. Для адиабатной трубы справедливо уравнение

$$i_2 = \mu i_4 + (1 - \mu) i_3, \quad (I)$$



Р и с. I. Регенеративная схема с ВТ: I - теплообменник, II - ВТ (пунктир - вариант схемы с регенерацией холода горячего потока)

т.е. сумма энтальпий горячего и холодного потоков равна энтальпии исходного потока. В регенеративном цикле (рис. I) при $T_3 = T_0$ дополнительная холодопроизводительность ВТ равна нулю. Если же $T_3 < T_0$, то эта величина отрицательна вследствие потерь холода с горячим потоком. В криогенных схемах, как правило,

$T_3 < T_0$, поэтому необходима рекуперация холода горячего потока (рис. I), но тогда вихревой эффект не имеет преимуществ перед