

кого воздуха пара ΔT_1 и жидкости ΔT_2 , выходящих из вихревой трубы. На рис.3 представлены экспериментальные данные по содержанию кислорода в жидкости и паре, выходящих из вихревой трубы, в зависимости от μ .

Проведенные исследования показали, что температура потока, отводимого с периферии камеры разделения вихревой трубы соответствует температуре кипения жидкой азотно-кислородной смеси при ее давлении и концентрации, а температура пара отводимого из отверстия диафрагмы равна температуре насыщенного пара при его давлении и концентрации. Полученные результаты подтверждают также данные работы [1] о возможности получения в вихревой трубе понижения температуры криогенной жидкости.

Л и т е р а т у р а

- I. Festez A.D., Wilde R.J. *An Analytical and Experimental Study of the Subcooler - a New Concept in Mass Transfer Cooling.*, Soc. Automat. Engngs. Inc., New York, 1965.

В.А. Высочин

О СВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА В СОПЛОВОМ СЕЧЕНИИ С РЕЖИМОМ РАБОТЫ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

Принятые обозначения

$\bar{R}, \bar{L}, \bar{F}, \bar{D}$ -	безразмерный радиус, длина горячего участка, суммарная площадь сопла в критическом сечении, диа- метр отверстия диафрагмы	$\tau, (\lambda)$ -	газодинамическая функ- ция
n -	число каналов сопла	κ -	показатель изоэнтропии
H, B -	высота и ширина каналов сопла	$\rho_{из}^*, T_{из}^*$ -	значения параметров потока при изоэнтропн- ном процессе
p -	давление	μ -	относительная доля хо- лодного потока
T -	температура	G -	массовый секундный рас- ход газа
ρ^*, T^* -	значения заторможенных параметров потока		
A -	приведенная скорость		

И н д е к с ы

0, 1, 2, Г, X для параметров на входе в сопло, выходе из сопла, радиусе кромки диафрагмы, горячего и холодного потоков

Анализ опубликованных работ [1 - 4] посвященных исследованию течений в горячем участке вихревой трубы дает основание заключить, что наибольшая интенсивность процессов температурного разделения достигается в сопловом и близлежащем к нему сечениях.

В данной работе изложены результаты исследования полей давлений и температур торможения в сопловом сечении радиально перемещаемыми зондами, которые вводились внутрь вихревой трубы через отверстие диафрагмы (рис.1). Радиальные эпюры статических давлений были получены посредством дренажных отверстий в теле диафрагмы. Расстояние от приемной части зондов r^* и r' до плоскости диафрагмы составляло 10 мм, т.е. 0,5 В сопла. На измеренную зондом температуру вводилась поправка с учетом коэффициента восстановления термопары.

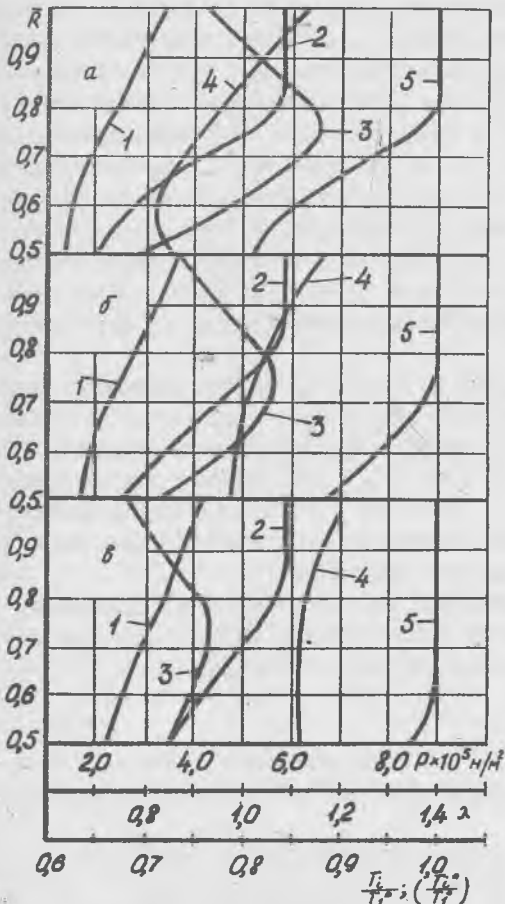
Работа проводилась на 100-миллиметровой вихревой трубе, имеющей следующие соотношения $F = 0,1$; $\bar{D} = 0,5$; $L = 12,5$; $n = 4$; $H/B = 0,5$.

На рис.1 представлены измеренные и расчетные параметры потока при относительных расходах холодного потока $\mu = 0,33$; 0,55 и 0,86.

Обращают внимание радиальные эпюры окружных скоростей. На выходе из каналов сопла поток имеет дозвуковую осредненную по окружности скорость. По мере уменьшения радиуса от $\bar{R} = 1,0$ до $\bar{R} = 0,8$ происходит разгон потока до звуковых и сверхзвуковых скоростей по закону, весьма близко описываемому уравнением свободного вихря $C_u R = const$. На этом же участке сохраняется постоянным полное давление. Ускорение потока происходит за счет падения статического давления. Начиная с $R \approx 0,8$ появляется переходной участок, где радиальная эпюра скоростей описывается уравнением

$$C_u R^m = const. \quad (1)$$

На этом участке показатель степени при m изменяется от $m = +1$ до $m = -1$, т.е. продолжается ускорение потока с последующим торможением опять-таки с переходом через скорость звука.



Р и с. 1. Распределение параметров в содовом сечении вихревой трубы ($P_0 = 6 \cdot 10^5$ Н/м²):

- а - $\mu = 0,33$; б - $\mu = 0,55$;
- в - $\mu = 0,86$; 1 - P; 2 - P* ;
- 3 - λ ; 4 - $\frac{T_i}{T_i^*}$; 5 - $\frac{T_i^*}{T_i}$

Падение полной температуры начинается с $\bar{R} = 0,85$ при $\mu = 0,33$ и $\bar{R} = 0,8$ и $0,65$ соответственно при $\mu = 0,55$ и $0,86$.

Как известно из гидромеханики зависимость вида $Q_u R = const$ носит название потенциального течения, закона постоянства циркуляции, постоянства момента количества движения. В соответствии с этим, закономерным является сохранение постоянства полного давления в области существования потенциального течения, что и наблюдается в диапазоне $\bar{R} = 0,8 - 1,0$.

Понижение полного давления газового потока при адиабатическом процессе может быть либо следствием совершенной им работы, диссипативных причин, либо одновременно следствием того и другого.

Но в том случае, когда падение полного давления обусловлено лишь проявлениями вязкости, температура торможения сохраняется постоянной. Одновременное понижение полного давления и температуры торможения газового потока может быть объяснено тем, что газ совершает работу. В соответствии с этим на радиальных эпюрах измеренных и расчетных параметров потока можно отметить следующие области. Для примера возьмем режим $\mu = 0,55$ (см. рис. I). На этом режиме в диапазоне $\bar{R} = 1,0 - 0,85$ вихрь весьма близко описывается уравнением $C_v R = const$. В этом же диапазоне \bar{R} полное давление также примерно постоянно и сохраняется постоянной полная температура. На этом участке разгон потока происходит подобно тому, как это имеет место в безлопаточном направляющем аппарате [5] центро-стремительной турбины.

При дальнейшем перемещении по радиусу к центру радиальная эпюра окружных скоростей уже более существенно отклоняется от закона постоянства циркуляции и радиальный градиент полного давления становится значительным ($\bar{R} = 0,85 - 0,80$). Однако, полная температура в этом диапазоне \bar{R} остается постоянной. Потеря момента количества движения газового потока на этом участке может быть объяснена только диссипативными причинами.

Анализ соотношений измеренных параметров потока в диапазоне $\bar{R} = 0,8 - 0,5$ показывает, что здесь падение полного давления связано с уменьшением полной температуры соотношением вида

$$T_1^* - T_2^* = q_{ад} T_1^* \left[1 - \left(\frac{p_2^*}{p_1^*} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right], \quad (2)$$

т.е. на участке $\bar{R} = 0,8 - 0,5$ понижение полного давления связано одновременно как с совершением работы, так и диссипативными потерями.

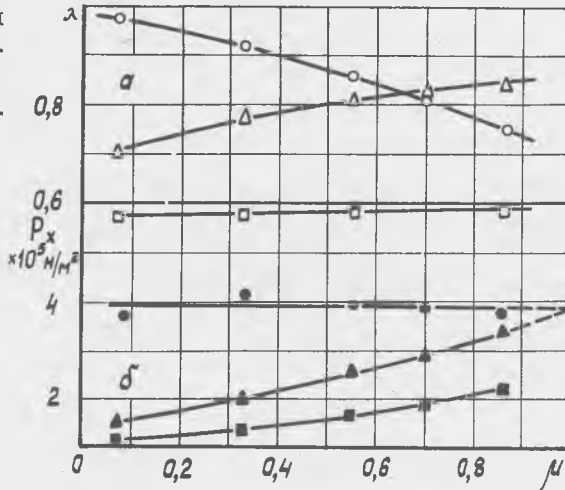
На рис. 2, а представлены графики зависимостей изменения приведенных скоростей, измеренных на относительных радиусах $\bar{R} = 1,0$ (λ_1) и $\bar{R} = 0,5$ (λ_2), а также статических и полных давлений от μ . Из рис. 2а следует, что по мере увеличения μ происходит возрастание λ_2 и убывание λ_1 . Убывание приведенных скоростей на выходе из соплового аппарата (λ_1) является следствием возрастания λ_2 и свидетельствует о перераспределении теплоперепада [5] между вихревой камерой и сопловым аппаратом.

При увеличении μ происходит повышение полного и статичес-

кого давлений на радиусе отверстий диафрагмы ($\bar{R} = 0,5$).

Р и с . 2. Графики изменения параметров потока в сопловом сечении вихревой трубе

- 0 - λ ;
- Δ - λ_2 ;
- \square - P_1^* ;
- \bullet - $P_{1\text{uz}}^*$;
- \blacktriangle - P_2^* ;
- \blacksquare - P_2



Возрастание статического давления на радиусе отверстия диафрагмы P_2 обусловлено одновременным ростом λ_2 и относительной доли холодного потока, отводимого через отверстие диафрагмы. Возрастание полного давления на том же радиусе - P_2^* свидетельствует о снижении потерь момента количества движения потока газа относительно оси в диапазоне $R = 1,0 - 0,5$ по мере увеличения μ .

Величину понижения полного давления совершенной газом работы можно оценить используя уравнение изоэнтропы

$$T_2^*/T_1^* = (p_2^*/p_{1\text{uz}}^*)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (3)$$

Значения $p_{1\text{uz}}^*$, подсчитанные по уравнению (3) с использованием экспериментальных данных (T_1^* , T_2^* , p_2^*), представлены на рис.2б. Разность между p_1^* и $p_{1\text{uz}}^*$ дает величину потерь полного давления в связи с вихревым характером течения в данном сечении. Вихревые потери составляют величину порядка $0,34 p_1^*$ (см. рис.2,б).

При $\mu = 1,0$, вследствие отсутствия отвода через дроссель масс потребляющих энергию, падение момента количества движения, связанного с энергообменом, становится равным нулю. Вихревые же

потери остаются и кривая $p_2^* = f(\mu)$ пересекается на этом режиме с кривой $p_{1uz}^* = f(\mu)$.

В заключение следует отметить, что гипотеза понижения температуры газа в вихревой трубе в связи с совершением им работы трения была высказана И.А. Чарным [6]. Результаты исследования приведенные в работе подтверждают правильность главной идеи.

Л и т е р а т у р а

1. Меркулов А.П. Совместная работа вихревой трубы и диффузора, "Холодильная техника", 1962, № 4, с.34.
2. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в механике. М., "Машиностроение", 1969.
3. Мартынов А.В., Бродянский В.М. Исследование параметров вихревого потока внутри трубы Ранка - Хилла. ИФЖ, 1967, т.ХП, № 5.
4. Мартынов А.В., Бродянский В.М. Исследование параметров вихревого потока в сопловом сечении трубы Ранка-Хилла. В сб. "Исследование нестационарного теплообмена", Минск, 1966.
5. Митрохин В.Т. Выбор параметров и расчет центростремительной турбины на стационарных и переходных режимах. М., "Машиностроение", 1974.
6. Чарный И.А. К теории вихревого холодильника. - Известия АН СССР (ОТН), 1962, № 6, с.148.

А.И. Борисенко, В.А. Высочин, В.А. Сафонов

О СВЯЗИ ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ
С ВИДАМИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОТОК В ЕЕ ГОРЯЧЕМ УЧАСТКЕ

Принятые обозначения

L, D, F - приведенные величины
длины горячего участка,
диаметра отверстия диафрагмы,
площади сопла в критическом сечении
 H, B - высота, ширина каналов
сопла в критическом сечении

n - число каналов сопла
 μ - относительная доля
холодного потока
 β - массовый секундный
расход