

Г.И. Воронин, А.Д. Суслов, Ю.В. Чижиков, С.В. Иванов

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ  
ВОЗДУХА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Принятые обозначения

$D$ - диаметр вихревой трубы	$Y$ - содержание кислорода в обедненном кислородом потоке
$P_0$ - давление воздуха на входе в вихревую трубу	$X_0$ - содержание кислорода в разделяемом воздухе
$\mu$ - относительный расход обедненного кислородом потока	$K_{об}$ - коэффициент обогащения
$X$ - содержание кислорода в обогащенном кислородом потоке	$\varepsilon$ - коэффициент эффективности обогащения

Исследования вихревой трубы [1 - 3] показали возможность использования ее для разделения газовых смесей, компоненты которых существенно отличаются по своим теплофизическим свойствам. Однако существует ряд важных в промышленном отношении смесей, в частности воздух, компоненты которых имеют близкие свойства. Имеются попытки применения вихревой трубы для разделения воздуха, используя эффект центрифугирования [4]. Эти исследования показали, что такой способ разделения недостаточно эффективен и не может найти промышленного применения.

Цель работы - исследование процесса разделения предварительно охлажденного воздуха в вихревой трубе. Предполагалось, что в этих условиях интенсификация тепло- и массообмена между жидкостью и паром в двухфазном вихревом потоке может оказать существенное влияние на процесс разделения.

Исследования проводились на экспериментальной установке, основным элементом которой является низкотемпературный блок, состоящий из двух рекуперативных теплообменников и конденсатора-испарителя (в паровую полость которого помещена вихревая труба). Охлаждение воздуха осуществлялось за счет испарения азота, заливаемого в межтрубное пространство конденсатора-испарителя. При истечении жидкого воздуха из сопла вихревой трубы образуется двухфазный вихревой поток. Под действием центробежных сил жидкая фаза, обогащен-

ная кислородом, удерживается на периферии камеры разделения вихревой трубы, а ее приосевую зону заполняют пары, обедненные кислородом. В ходе исследования испытывались вихревые трубы различных типоразмеров, отличающиеся величиной диаметра диафрагмы, длиной и формой камеры разделения. Диаметр вихревой трубы  $D = 0,006\text{м}$ . Каждая из модификаций вихревых труб испытывалась при давлении разделяемого воздуха  $P_0 = (2,942; 3,92; 4,903; 5,884) \cdot 10^5 \text{н/м}^2$ .

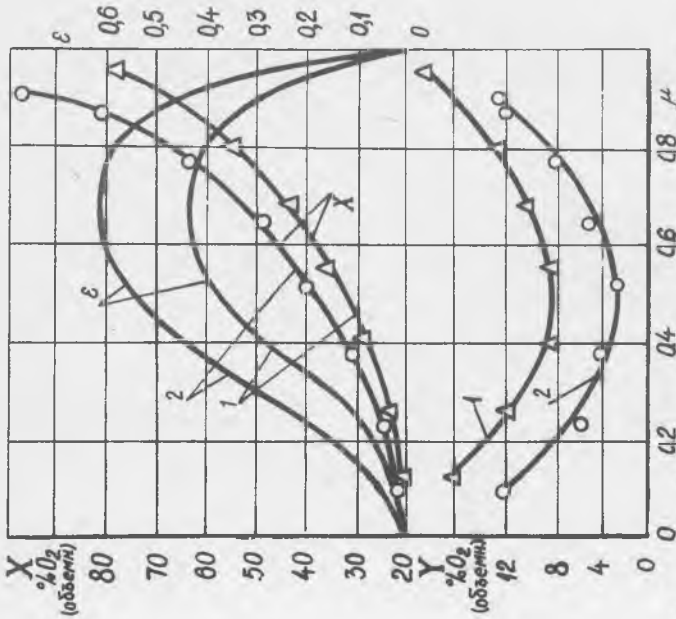
Типичные концентрационные характеристики вихревой трубы приведены на рис.1. На оси абсцисс отложены значения относительного расхода обедненного кислородом потока  $\mu$ , а по оси ординат концентрация кислорода в обогащенном X и обедненном Y кислородом потоке. Показана также зависимость эффективности обогащения  $\varepsilon = \frac{(1-\mu)K_{ос}}{[(1-\mu)K_{ос}]_T}$ , где  $K_{ос} = \frac{X-X_0}{X_0}$  - коэффициент обогащения;  $X_0$  - концентрация кислорода в разделяемом воздухе, %  $O_2$  (объемн.);  $[(1-\mu)K_{ос}]_T$  - теоретически максимально возможное значение, от величины  $\mu$  (см.рис.1).

С точки зрения применения вихревой трубы можно выделить три основных режима работы: получения продуктов разделения с максимальной или минимальной концентрацией кислорода, получения обогащенного кислородом воздуха. Как следует из рис.1 последний режим характеризуется максимальной эффективностью обогащения.

На рис.2 приведены результаты исследования влияния давления разделяемого воздуха на эффект обогащения. Видно, что с ростом давления  $P_0$  концентрация кислорода в обогащенном кислородом потоке увеличивается. Однако, можно предположить существование некоторого давления  $P_0$ , при превышении которого эффект обогащения не будет возрастать. Об этом свидетельствует также ход зависимости  $\varepsilon_{max} = f(P_0)$ . При возрастании давления от  $5 \cdot 10^5$  до  $6 \cdot 10^5 \text{н/м}^2$  значение эффективности практически не меняется.

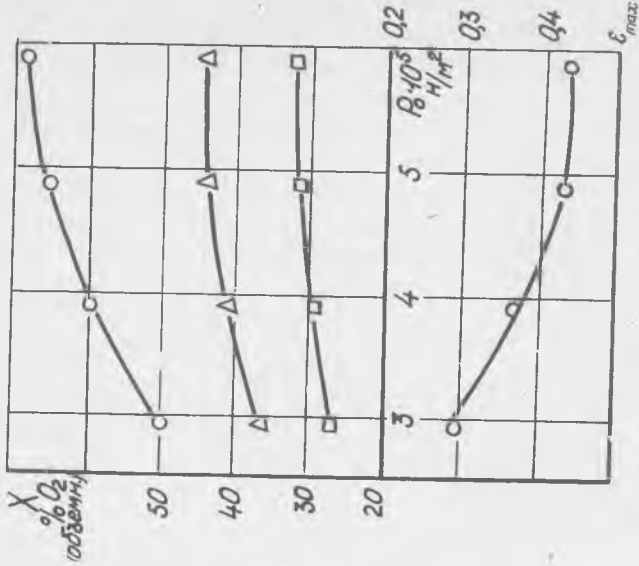
Испытания труб различных типоразмеров показали существенное влияние геометрических характеристик на эффективность разделения. Причем, каждому из трех, рассмотренных режимов работы вихревой трубы соответствуют свои оптимальные значения геометрических параметров.

На работу вихревой трубы существенное влияние оказывает наличие "паразитного" потока [5], [6]. Известно несколько способов



Р и с. 1. Концентрационные характеристики вихревой трубы:

1 - вихревая труба без отсека "паразитного" потока и без сепаратора; 2 - вихревая труба с отсеком "паразитного" потока и с сепаратором



Р и с. 2. Зависимость X и  $\epsilon_{max}$  от давления разделенного воздуха при значениях  $\mu$ :

- 0 - 0,9; -  $\Delta$  - 0,7; -  $\square$  - 0,5

исключения влияния этого потока, наиболее эффективным считается способ, при котором "паразитный" поток отсасывается с торцевой стенки диафрагмы [7]. Кроме того, при работе вихревой трубы в качестве воздуходелительного аппарата значительное влияние на эффект обогащения оказывает подмешивание пара к жидкости, отводимой из вихревой трубы.

Для исключения этих явлений была спроектирована вихревая труба, конструкция которой схематически представлена на рис.3. Испытания показали, что в вихревой трубе предполагаемой конструкции можно осуществить более полное разделение воздуха (см. рис.2, кривая 2). Содержание кислорода в обогащенном

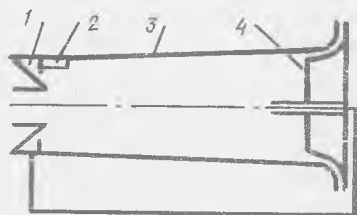
кислородом потоке повысилось до  $X = 98\% \text{ O}_2$  (объемных), а концентрация кислорода в обедненном кислородом потоке уменьшилось до  $Y = 3\% \text{ O}_2$  (объемн.). Эффективность обогащения

$\varepsilon_{\text{max}} = 0,61$ . При этом концентрация кислорода в обогащенном воздухе  $X=50\% \text{ O}_2$  (объемн.) и извлечение кислорода составило около 80%.

В результате проведенного исследования было установлено, что в вихревой трубе можно разделить воздух с удовлетворительной чистотой получающихся продуктов. Вихревая труба может быть использована как для получения обогащенного кислородом воздуха  $X = 50-60\% \text{ O}_2$  (объемн.) в промышленных масштабах, так и для получения технологического азота и кислорода в составе блока разделения воздуха или в качестве автономного ректификатора. В последнем случае возможно каскадное включение нескольких вихревых труб.

#### Л и т е р а т у р а

И. Бродянский В.М., Мартинов А.В., Вихревая труба для сепарации природного газа. "Новости нефтяной и газовой техники. Газовое дело", 1962, №5.



Р и с. 3. Схема вихревой трубы:  
1 - полость для отсоса "паразитного" потока;  
2 - сопло; 3 - камера разделения;  
4 - сепаратор

2. Райский Ю.Д. Исследование работы вихревой трубы на газо-жидкостных смесях. "Газовая промышленность", 1967, № 6.
3. Лейтес И.Л., Семенов В.П., Половинкин В.А., Жидков Н.А., Гагинцев Б.Г., Атаманова В.В. Очистки природного газа с помощью вихревого эффекта. - В сб.: Некоторые вопросы исследования вихревого эффекта и его промышленного применения. Куйбышев, 1974 (Труды первой научно-технической конференции).
4. Lindestrzem - Lang G.U. Gas Separation in the Ranque-Hilsch Vortex Tube. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 7, 1964.
5. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М., "Машиностроение", 1969.
6. Lau J.E. An Experimental and Analytical Study of Vortex-Flow Temperature Separation by Superposition of Spiral and Axial Flows. *Journal of Heat Transfer Trans of the ASME, Series C*, 1959, №3.
7. Райский Ю.Д., Тинкель Л.Е. Разделение парогазовых смесей в вихревой трубе. "Химическая промышленность", 1973, № 10.

А.В. Мурашкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ХОЛОДИЛЬНИКА,  
РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ РЕВЕРСА

П р и н я т ы е   о б о з н а ч е н и я

$D$ - диаметр вихревой трубы	$T_{вх}$ - температура воздуха на входе в вихревой холодильник
$L$ - длина вихревой трубы	$T_x$ - температура холодного воздуха
$F_c$ - площадь проходного сечения сопла	$\mu$ - массовая доля холодного потока
$\eta_t$ - температурная эффективность	$G_x$ - расход холодного воздуха
$\Delta T$ - приращение температуры	$G_{вх}$ - расход входного воздуха
$\kappa$ - показатель изоэнтропы	$\bar{d}$ - относительный диаметр диафрагмы
$\varepsilon$ - степень расширения	$d$ - диаметр диафрагмы
$P_{вх}$ - давление воздуха на входе в вихревой холодильник	