

эффективность работы СВТ были проведены испытания с гладкой задней стенкой диффузора. Изменения степени расширения вихря и температуры газа на оси вихревой трубы за счет установки колеса турбины на выходе ее обнаружено не было.

Таким образом, установка колеса центробежной турбины на выходе исследуемой СВТ позволила получить без ухудшения эффекта энерго-разделения при давлении газа на входе  $P_0 = 5 \cdot 10$  КПа и частоте вращения  $n = 21,7 \frac{1}{с}$  ( $\sim 13000$  об/мин) дополнительную мощность вращения  $N_7 = 54$  Вт, что вполне достаточно для привода охлаждаемого его устройства.

#### Библиографический список

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.:Машиностроение, 1969. 183 с.
2. Наталевич А.С. Воздушные микротурбины. М.:Машиностроение, 1979. 192 с.

УДК 523.697.3

Б.Ф.Абросимов, Н.А.Артамонов

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТИВОТОКА С ПЕРИФЕРИЙНЫМ ПОТОКОМ В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ С ВИНТОВЫМ ЗАКРУЧИВАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

Исследование роли различных участков взаимодействия периферийного потока и противотока с помощью тонкостенных (0,2...0,3 мм) полых коаксиальных стальных цилиндрических вставок [1] привело к выводу о том, что их взаимодействие на участке от 3 до 30 калибров несущественно для процесса энергетического разделения. Изоляция периферийного потока от противотока на первых 2-3-х калибрах снижает эффект охлаждения на 60-75 % и уменьшает сопротивление противотоку в 2-3 раза.

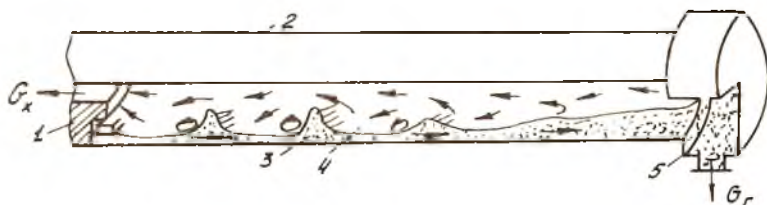
На уровне  $0,2 R$  ( $R$  - радиус ВТ) от оси трубы с помощью зонда было исследовано поле градиентов давления в осевом направлении, экстремальные значения которого были обусловлены, главным образом, радиальной составляющей скорости газа противотока. В плоскости осевого сечения закрученного потока может быть выделено три

характерных расстояния  $\bar{h}_1 = (0,625 \pm 0,125)$ ,  $\bar{h}_2 = (1,25 \pm 0,25)$ ,  $\bar{h}_3 = 2,5 - 3$ , характеризующих периодичность экстремальных градиентов давления [1,2] .

При увеличении  $M$  экстремальные значения градиентов давления увеличиваются, зона с характерным расстоянием  $h_1$  и  $h_2$  сокращается, значения  $h_1$  и  $h_2$  уменьшаются. При больших  $M$  ( $M > 0,5$ ) наблюдалась только периодичность  $h_3$  .

Исследования показали, что области экстремальных градиентов давления расположены по винтовой линии. При малых  $M$  ( $M = 0,1$ ) винтообразная область минимальных градиентов давления, фиксируемых зондом, представляла собой область отрицательных градиентов давления (градиентов, "препятствующих" движению противотока). Это возможно, если динамический напор, обусловленный относительной радиальной составляющей скорости газа на первом отверстии, превосходит статический градиент давления по вихревой трубе. Число таких областей соответствовало числу каналов винтового закручивающего устройства (ВЗУ), их протяженность составляла 12-15 калибров.

Для объяснения результатов исследований предложена струйная модель периферийного потока, профиль осевого сечения которого переменный по высоте (рис.1). Наиболее высокие и "жесткие" для про-



Р и с. Схема течения закрученного потока газа в ВТ:  
 1 - ВЗУ; 2 - камера энергетического разделения; 3 - струйные течения периферийного потока; 4 - противоток;  
 5 - ресивер нагретого потока;  $G_x$ ,  $G_r$  - охлажденный и нагретый потоки

тивотока участки образованы струйными или квазиструйными винтовыми течениями периферийного потока. Их скорость на первых 3-4 калибрах превосходит скорость газа в межструйном пространстве на 15-20 %. Динамику поля градиентов давления можно объяснить динамикой струйных течений, изменением их высоты.

Для модели струи с одинаковыми по высоте струи шагом винта и

скорости  $V$  на участках, где термодинамическая температура по сечению струи одинаковая, относительная длина ее витка определяется соотношением

$$\bar{L} = \bar{p} \frac{R T_c}{V \mu M}, \quad (1)$$

где  $\bar{p} = p/p_n$  - относительное давление (параметры с индексом  $n$  - параметры периферии струи);

$R, M$  - универсальная газовая постоянная и молярная масса газа.

Для одних и тех же значений  $V$  и  $T_c$  чем больше градиент давления в радиальном направлении, т.е. меньше  $\bar{p}$ , тем меньше относительная длина витка  $\bar{L}$ , выше струя. При течении по вихревой трубе скорость струи уменьшается, температура, относительное давление и относительная длина витка элементарной струйки (см. формулу (1)) увеличиваются. Она приближается к периферии. Значит высота струйного течения уменьшается. Профиль осевого сечения периферийного потока выравнивается, что находит соответствующее отражение в поле радиальной скорости газа противотока и градиентов давления. Аналогичные изменения происходят при увеличении  $\mu$ ,  $h_2$  соответствует шагу винта струи,  $h_1$  - межструйное расстояние,  $h_3$  - шаг винтового волнового возмущения, возникающего при взаимодействии периферийного потока с противотоком.

Если тонкостенная полая цилиндрическая вставка касается гребней струйных течений, то при соответствующих аксиальной и радиальной скоростях газ противотока, очевидно, способен течь над вставкой в межструйном пространстве. В этом случае газ противотока и вставка будут иметь вращение, противоположное вращению периферийного потока. Из струйной модели периферийного потока следует, что он представляет собой систему разнотемпературных течений, а внутри противотока имеет место области повышенной угловой скорости. Эти следствия были подтверждены экспериментально [2, 4].

Измерения на периферии потока показали, что разнотемпературные течения сохраняются для всех  $\mu$  на всем исследованном участке длиной 20 калибров. С увеличением  $\mu$  разница температур соседних участков при приближении к ресиверу нагретого потока увеличивается. При степени расширения газа  $\mathcal{N} = 2$  максимальное значение градиента температур, равное 35 К/см, обнаружено при  $\mu = 1$ .

Увеличение градиента температур при удалении от ВЗУ можно

объяснить тем, что после выравнивания профиля осевого сечения периферийного потока струйные течения испытывают сопротивление, в основном из-за трения о поверхность трубы. Более быстрые и наиболее взаимодействовавшие с противотоком участки струи под действием центробежных сил начнут погружаться, приближаться к периферии закрученного потока. Температура торможения в этих местах начнет увеличиваться. Основной рост градиента температур на периферии закрученного потока происходит при увеличении степени расширения газа с  $\pi = 1,5$  до  $\pi = 2$ . С точки зрения струи ( $V = const$ ,  $H = const$ ) снижение температуры торможения  $\Delta T$  газа происходит и за счет его перемещения в поле центробежных сил. Расчетное значение

$$\Delta T = \frac{V^2}{c_p} \ln \pi, \quad (2)$$

равное 19...20 К при переходе с уровня 0,85 R на уровень 0,65 R ( $\pi = 2,7$ ,  $M < M_{opt}$ ,  $R = 40$  мм), оказалось в согласии с результатами измерений (17,2 К) в придиафрагменной зоне.

Более интенсивное взаимодействие струй с противотоком, сопровождаемое выравниванием их термодинамической температуры, приведет к аномальному росту температуры торможения струй периферийного потока, поэтому поле температуры торможения периферийного потока в плоскости осевого сечения представляет систему чередующихся, различных по температуре участков [2].

Исходя из струйной модели периферийного потока, для усиления теплообмена со струей на первых 2-3 калибрах вихревой трубы с ВЗУ проделывали винтовые прорезы, через которые в межструйное пространство из камеры сжатия подавался газ [3]. В интервале  $M = 0...0,4$  холодопроизводительность удалось увеличить в 1,9 раза.

Установлено влияние геометрии диафрагмы на эффект охлаждения [4]. При малых  $M$  ( $M < 0,2$ ) эффект охлаждения увеличивается на 7-10 %, если охлажденный поток выводится через отверстия, расположенные в межструйном пространстве.

Замена двухканального ВЗУ на двухканальное тангенциальное закручивающее устройство принципиальной разницы полей температур торможения на периферии закрученного потока и градиентов давления на уровне 0,2 R не выявила, за одним исключением: не обнаруживалась периодичность градиентов давления, равная  $h_3$ .

Таким образом, исследования в вихревой трубе с двухканальным ВЗУ и ТЗУ показали, что особенности их работы могут быть объясне-

ны струйной моделью периферийного потока, высота профиля осевого сечения которого колеблется по длине трубы. При  $h_3$  0,5 более высокие участки образованы струйными или квазиструйными течениями периферийного потока, деформированными волновыми возмущениями; при  $h_3$  0,5 может остаться только винтообразное волновое возмущение периферийного потока на его границе раздела с противостоком.

#### Библиографический список

1. Артамонов Н.А., Абросимов Б.Ф. Исследование взаимодействия вынужденного и свободного вихрей в трубе с ВЗУ /Уфимск.нефт. ин-т. Уфа, 1984.- С.10. Деп. в ВИНТИ. 25.04.84, № 2613-84.
2. Артамонов Н.А., Абросимов Б.Ф., Пономарев В.А. Исследование температурных полей в периферийной области закрученного потока /Уфимск.нефт.ин-т. Уфа, 1984.-С.9.-Деп. в ВИНТИ 19.06.84, № 4053-84.
3. А.с. 1302124. Вихревой вертикальный кожухотрубчатый теплообменник /Н.А.Артамонов и др. № 3971689/24-06; Заявлено 01.II.85; Опубл. 7.04.87, Бюл. № 13.- С.4.
4. Артамонов Н.А., Абросимов Б.Ф., Максименко М.З. Струйный характер течения газа в вихревой трубе и ее реверсирование/ ИЖ. 1986, № 5. С.861-962.

УДК 533.697.3

Ю.А.Кныш

#### О МЕХАНИЗМЕ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ ПУЛЬСИРУЮЩИМИ КРУПНЫМИ ВИХРЯМИ

Прикладные вопросы расчета, проектирования и использования вихревых холодильно-нагревательных устройств разработаны достаточно полно. Обширная литература и патентная информация открывают широкие возможности для освоения новых областей применения вихревых труб. Успехи практического применения вихревого эффекта заметно снизили интерес исследователей к более глубокому изучению этого чрезвычайно сложного гидродинамического явления, физическая природа которого во многом остается неясной. Особенно мало публикует-