

2. М е т е н и н В.И. Экспериментальное исследование рабочего процесса воздушной вихревой холодильной установки. - Холодильная техника, 1959, № 4.
3. М е т е н и н В.И. Исследование противоточных вихревых труб. - ИФЖ, т. 7, 1964, № 12.
4. *Fulton C. D., Ranques Tube, Refrigerating Engineering, May, 1950.*
5. Д ы с к и н Л.М., К р а м а р е н к о П.Г. О зависимости температурной характеристики от длины вихревой трубы. - В сб.: Вихревой эффект и его применение в технике. - Куйбышев: КуАИ, 1976.

УДК 533.6.011.3

Р.Х.Мухутдинов

ЕЩЕ РАЗ О СУЩНОСТИ ВИХРЕВОГО ЭФФЕКТА

В настоящее время по вихревому эффекту накоплен обширный экспериментальный материал. Однако целый ряд экспериментальных фактов, а также положений различных гипотез противоречивы и пока не объясняются с единых позиций.

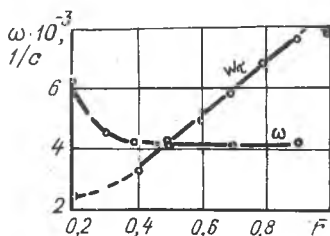
В основе современного толкования механизма вихревого эффекта лежат высокоскоростное закручивание и взаимодействие образующихся свободного и вынужденного вихрей с энергообменом за счет турбулентного переноса [1]. Доказательством возникновения вихревого эффекта считается образование горячего и холодного потоков при раскручивании периферийным потоком вводимого газа со стороны дросселя через центр. Однако данный эксперимент, являясь доказательством возникновения энергообмена между самостоятельными потоками, еще не подтверждает возникающее температурное разделение при образовании вторичного внутреннего потока из исходного внешнего. Рассмотрение рядом авторов сущности температурного разделения газа в ВТ в последовательности происходящих стадий, анализ каждого из потоков, и, в то же время, их взаимодействия изолированно от общего процесса, приводит, на наш взгляд, к недостаточно убедительным обобщениям с точки зрения таких категорий, как причина и следствие.

Внутри ВТ протекает целый комплекс процессов, уменьшающих или усиливающих конечный результат. Однако основоопределяющим, как уже отмечалось [2, 3], является процесс формирования термодинамических параметров исходного потока при течении в сопловых каналах. Исследования [2, 3, 6] позволяют поддержать мнение, что в окосопловой области преобладает вращение по закону твердого тела, но с отклонениями от этого закона в осевой и периферийной зонах трубы. Как известно [5], в случае вращения по закону твердого тела центробежные силы оказывают стабилизирующее влияние на поток, частично подавляя турбулентные пульсации (скорости и температуры). В этих условиях наряду с другими процессами, определяющими образование разнотемпературных потоков в трубе, можно самостоятельно рассмотреть и процесс торможения слоев газа по ее сечению в зоне квазитвердого вращения. Слои газа, из которых формируется холодный поток, испытывают более плавное торможение, чем периферийные слои, которые приобретают большую температуру торможения.

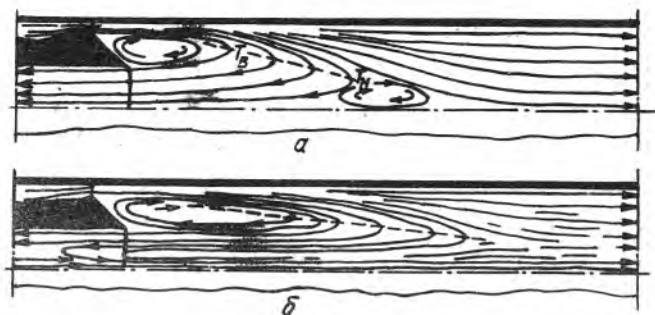
На рис. 1 даны эпюры угловой и тангенциальной скоростей в трубе с винтовым закручивающим устройством (ВЗУ). Интересно заметить, что угловая скорость в осевой зоне увеличивается в сторону оси трубы, как и в исследованиях [7], показывая, что в нее попадают слои газа, имеющие большую угловую скорость вращения. Причем, чем дальше от сопловой зоны (до $12,5 \varnothing_T$), тем значение ω выше на одном и том же радиусе.

На рис. 2 представлены схемы предполагаемого идеализированного распределения расширяющихся слоев струи

газа в трубе после его истечения из винтовых каналов. При общем снижении термодинамической температуры газа в каналах сопел из-за трения об их стенки более низкую температуру будут иметь струи в средних слоях по высоте сопла [3]. В этих условиях по периферии отверстия диафрагмы будут вытекать слои с температурой торможения T_B , а через центральную зону отверстия - слои с более низкой температурой T_H . При этом слои с температурой T_B меняют на-



Р и с. 1. Эпюры угловой ω и тангенциальной ω_T скоростей в ВТ с ВЗУ и $\varnothing_T = 41$ мм на расстоянии $2,5 \varnothing_T$ от выходных срезов сопел: $P_1 = 0,2$ МПа, $T_1 = 18^\circ\text{C}$, $\rho_1 = 35$ нм³/ч, $\mu = 0,5$



Р и с. 2. Схемы распределения расширяющихся слоев струи газа в трубе с ВЗУ при различном μ

правление на обратное на большем удалении от оси трубы и меньшем - от среза сопла, а слои с температурой T_H - сохраняют повышенную, по сравнению с первыми, угловую скорость вращения, которая уменьшается при продвижении к диафрагме. Холодный поток, таким образом, формируется из слоев с температурой T_B и T_H . При $\mu = \mu_{оп}$ (рис. 2,а) поток формируется из наиболее холодных средних слоев. Когда $\mu > \mu_{оп}$, в осевую зону начинают попадать менее холодные периферийные слои. В определенных условиях при $\mu < \mu_{оп}$ (рис. 2,б) может наступить и явление "реверса" - обращения потоков в трубе [1, 7]. Протяженность зоны формирования холодного потока от среза сопел ВЗУ будет устанавливаться, главным образом, направлением полной скорости частиц газа относительно оси, определяемой углом β .

Некоторым косвенным подтверждением существования описанного самостоятельного процесса при формировании холодного потока является эффект температурного разделения, наблюдаемый при натекании наклонной струи на плоскость, эффективность которой резко повышается при организации движения струи над плоскостью в сторону острого угла наклона [4]. По сравнению с ВТ, рассеивающей необратимо большую часть энергии движения, устройство на данном принципе обеспечивает сохранение энергии давления при высокой температурной эффективности. Образование разнотемпературных потоков на плоскости - холодного потока на стороне тупого угла, горячего - на стороне острого, можно объяснить различными условиями их торможения. Неравномерность скоростей будет иметь место уже в сечении свободной ст-

руи из-за различного противодействия на ее слои, создающего условия для перераспределения полной энергии.

Таким образом, в ВТ условно выделяются три зоны потока. Если в рассмотренной зоне существования квазитвердого вращения газа преобладает молекулярная диффузия в переносе энергии, то в периферийной зоне — закон вращения газа близок к квазиоптимальному, когда пульсационное движение и, соответственно, процессы переноса значительно интенсифицированы. В осевой зоне формирования холодного потока имеет место перераспределение полной энергии за счет некоторой перестройки поля скорости. На графиках изменения температуры торможения по сечению трубы при общем росте ее с увеличением радиуса в области границы формирования обратного потока наблюдается небольшой скачок в росте температуры, указывающий на более интенсивный процесс переноса тепла по сечению холодного потока.

Л и т е р а т у р а

1. М е р к у л о в А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. — М.: Машиностроение, 1969, с. 22.
2. М а р т ы н о в В.А., Б р о д я н с к и й В.М. Что такое вихревая труба? — М.: Энергия, 1976, с. 19.
3. Schepers U.W., *Refrigerating Engineering* 1951, т. 59, № 10, р. 985-989.
4. *Popular Science*, № 7, 1969, т. 32-33.
5. Д е й ч М.Е. Техническая газодинамика. — М.: Энергия, 1974, с. 463.
6. А л е к с е е в Т.С. — ИФЖ, т. УП, 1964, № 4, с. 121.
7. М а р т ы н о в с к и й В.С., А л е к с е е в В.П. — ЖТФ, т. XXVI, 1956, вып. 10, с. 2303.