

Как показали результаты расчета, отсос пограничного слоя с торца вихревой трубы в диапазоне чисел Рейнольдса входного газа  $10^4-10^6$  позволяет понизить относительную температуру холодного потока на 10-15%, что приводит к повышению адиабатного к.п.д. на 1-2%. Энтальпийный к.п.д. при отсосе пограничного слоя увеличивается на малых  $M$  ( $M = 0,15$ ) на 10-15%, что расширяет область применения ВТ на этих режимах. Эффективность отсоса с увеличением степени расширения уменьшается.

## Л и т е р а т у р а

1. Гусев И.И. Теоретическое исследование структуры пограничного слоя на диафрагме вихревой трубы: Сборник трудов /Куйбышевский авиационный институт им. С.П.Королева. - Куйбышев, 1967, вып. 24, с. 103-108.
2. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969. - 183 с.
3. Балалаев А.Н. Применение вариационных принципов при расчете расходных характеристик вихревой трубы. - Куйбышев: КуАИ, 1982.- 12 с. Рукопись деп. в ВИНТИ, № 6382-82 Деп.
4. Федяевский К.К., Гиневский А.С., Колесников А.В. Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости. - Л.: Судостроение, 1973. - 256 с.
5. Багрянцев В.И., Волчков Э.П., Терехов В.И. и др. Исследование течения в вихревой камере доплеровским измерителем скорости. - Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1980. - 21 с.

УДК 532.527.004.14

С.В.Лукачев

### ОБРАЗОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ РАНКА

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

$L, d$  - длина и диаметр вихревой трубы;  $d_g$  - диаметр диафрагмы;  
 $L_g$  - расстояние от входных тангенциальных каналов до места расположения датчика давления;  $F_{Bx}$  - площадь входных тангенциальных каналов;  
 $\Delta P$  - перепад давления на ВТ;  $\Delta P_{BЧ}, \Delta P_x'$  - амплитуда ВЧ колебаний давления и суммарный уровень пульсаций давления;  $f_{BЧ}$  - частота ВЧ колебаний давления;  $K$  - коэффициент усиления сигнала вторичной аппаратурой; ВЧ - высокочастотный.

При исследовании энергетического разделения в ВТ [1] было обнаружено явление возбуждения в трубе интенсивных колебаний давления высокой (12000-18000 Гц) и низкой (1000-2000 Гц) частот, сопровождающееся излучением мощного звука дискретного тона. Ранее [2] было установлено, что термодинамические характеристики ВТ находятся в тесной взаимосвязи с акустической активностью потока газа в ней. Более того, существует гипотеза вихревого эффекта, базирующаяся на явлении возбуждения в ВТ регулярных пульсаций давления. Так, автор работы [3] считает, что трансформация профиля  $V_z$  от закона свободного вихря к вынужденному происходит под воздействием вторичных акустических течений, генерируемых регулярными пульсациями давления, имеющими место в ВТ. Экспериментальная проверка этой гипотезы проводилась на короткой ВТ ( $d = 17,5$  мм,  $L = 2,4$ ), работающей в режиме  $M = 0$  (на месте диафрагмы стояла заглушка). Термодинамическая эффективность ВТ оценивалась по величине  $\Delta T_x$ .  $T_x$  измерялась на оси камеры закручивания в сопловом сечении ВТ. Подавление звуковых колебаний (уменьшение акустической активности потока) в ВТ с помощью акустических демпферов, расположенных на теле камеры закручивания, приводило к существенному уменьшению  $\Delta T_x$ . Так, например, использование акустических демпферов, настроенных на частоту 4000 Гц, которая соответствовала режиму работы ЗТ при  $\Delta P = 250$  кПа, привело к снижению интенсивности звуковых колебаний на выходе из ВТ на 25 дБ (от начального уровня в 125 дБ) и уменьшению  $\Delta T_x$  на 35,6 К (от начального уровня  $\Delta T_x = 65$  К).

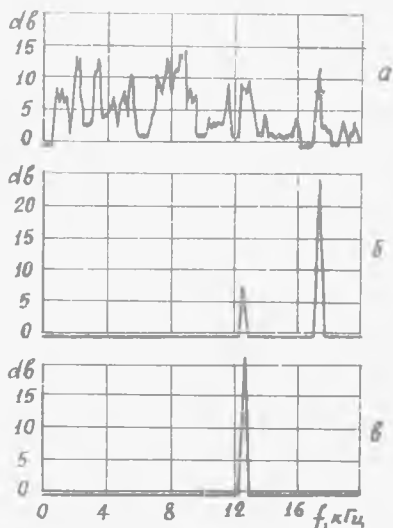
Так или иначе, регулярные пульсации давления, имеющие место в ВТ, играют определенную роль в реализации вихревого эффекта. В этой связи представляется важным выявление причин возбуждения регулярных колебаний давления в вихревых трубах. В данной работе рассматривается механизм ВЧ неустойчивости в ВТ [1].

Исследование проводилось на адиабатной вихревой трубе без спрямляющей крестовины. Основные геометрические размеры ВТ составляли:  $d = 32$  мм;  $\bar{d}_g = 0,45$ ;  $f_{Bx} = 0,1$ ;  $L = 4-40$ .

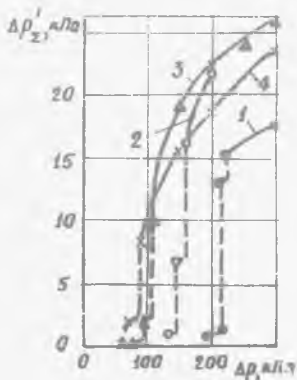
В работе [1] было показано, что возбуждение ВЧ колебаний происходит скачкообразно и зависит от величин  $L$ ,  $M$  и  $\Delta P$ . Чем меньше значения  $L$  и  $M$ , тем большие величины  $\Delta P$  необходимы для развития мощных пульсаций давления.

Рассмотрим процесс развития ВЧ неустойчивости на примере трубы с  $L = 6,5$  (рис. 1). При  $\Delta P < 110$  кПа (рис. 1,а)  $\Delta P'_{BЧ}$  находится на уровне турбулентного шума ( $\Delta P'_{\xi} = 338$  Па,  $\Delta P'_{BЧ} = 50$  Па). При  $\Delta P = 110$  кПа происходит скачкообразное увеличение (в 40 раз) амплитуды ВЧ сигнала. Причем основная доля интенсивности пульсаций давления приходится на дискретную составляющую (рис. 1,б) с  $f_{BЧ} = 17450$  Гц ( $\Delta P'_{\xi} =$

$= 2500$  Па,  $\Delta P'_{17450} = 2000$  Па) и небольшая доля - на дискретную составляющую  $f_{ВЧ} = 12350$  Гц ( $\Delta P'_{12350} = 150$  Па). Незначительное увеличение  $\Delta P$  до 140 кПа приводит к второму скачкообразному росту (в 4 раза) амплитуды колебаний (рис. 1, в). Причем в спектре имеет место только одна дискретная составляющая с  $f_{ВЧ} = 12650$  Гц ( $\Delta P'_{\Sigma} = 10,75$  кПа,  $\Delta P'_{12650} = 8,75$  кПа). При дальнейшем увеличении  $\Delta P$  величины  $\Delta P'_{ВЧ}$  и  $f_{ВЧ}$  возрастает монотонно. Таким образом, незначительное увеличение  $\Delta P$  (со 100 до 140 кПа) приводит к росту амплитуды ВЧ пульсаций давления на два порядка. Рост  $\Delta P'_{ВЧ}$  происходит в два скачкообразных этапа со сменой основной частоты излучения. На рис. 2 показан характер возбуждения колебаний в трубах с различными значениями  $L$ .



Р и с. 1. Спектры пульсаций давления в ВТ с  $L = 6,5$  при  $Z_a = 4,5$  и  $\mu = 1$  (а -  $\Delta P = 100$  кПа,  $K = +40$  дБ; б -  $\Delta P = 110$  кПа,  $K = +20$  дБ; в -  $\Delta P = 140$  кПа,  $K = 0$  дБ)

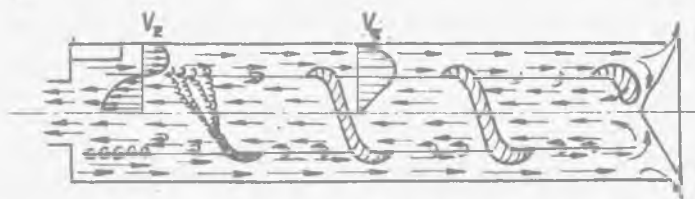


Р и с. 2. Зависимость суммарного уровня пульсаций давления от перепада давления на ВТ при  $\mu = 0,63$  ( $1-L = 4$ ;  $2-L = 6,5$ ;  $3-L = 9$ ;  $4-L = 11$ )

Возбуждение регулярных колебаний в ВТ не является следствием акустического резонанса, поскольку  $f_{ВЧ}$  очень слабо зависит от длины трубы (увеличение  $L$  с 6,5 до 18,5 калибров приводит к снижению  $f_{ВЧ}$  всего на 3% с 13200 до 12780 Гц для случая  $\mu = 1$ ) и монотонно возрастает при увеличении  $\Delta P$ . Начальные вращающиеся, вносимые в поток за счет подачи воздуха в трубу через дискретные сопла, также не оказывают влияния на возбуждение ВЧ неустойчивости: при замене 3-сопловой завихрителя на 4-сопловой с тем же значением  $f_{ВЧ}$  величины  $\Delta P'_{ВЧ}$  и  $f_{ВЧ}$  не изменяются.

Частота колебаний не изменяется по длине трубы, а амплитуда монотонно возрастает в направлении дросселя, особенно на последних 3–5 калибрах.

Представляется, что возбуждение регулярных ВЧ пульсаций давления является следствием образования в ВТ крупномасштабных когерентных вихревых структур сдвигового характера подобно тому, как это имеет место в плоских турбулентных слоях смещения струй с различными скоростями течения [4]. Характерной особенностью течения в ВТ является наличие в нем разрыва осевой составляющей скорости на границе раздела периферийного и вынужденного потоков (рис. 3). Максимальная величина сдвиговых напряжений имеет место в непосредственной близости от соплового сечения. Здесь и происходит образование мелкомасштабных сдвиговых вихревых структур, которые в случае полной симметрии течения должны иметь форму тора, опоясывающего вынужденный поток и вращающегося вместе с ним вокруг оси трубы. В реальном турбулентном потоке вихревые сдвиговые структуры сворачиваются в спиралевидные вихревые нити. При своем движении в направлении дросселя они попарно сливаются, образуя вихревые структуры более крупного масштаба, которые, в свою очередь, укрупняются и т.д. Акты попарного укрупнения вихрей будут происходить до тех пор, пока в слое смещения между периферийным и вынужденным потоками останется небольшое число вихревых спиралевидных структур (углов), слияние которых возможно только в случае нарушения окружной симметрии их расположения вокруг присоевского потока. Такую асимметрию можно вызвать повышением величины сдвиговых напряжений за счет увеличения  $M$  и  $\Delta P$ .



Р и с. 3. Схема образования вихревых спиралевидных структур сдвигового характера в ВТ

При своем поступательно-вращательном движении вихревые структуры регулярно деформируют периферийный поток. При этом амплитуда возникающих пульсаций давления будет определяться размером структур, а частота – их количеством ( $N$ ) и угловой частотой ( $\omega$ ) вращения вокруг оси трубы ( $f_{ВЧ} = n\omega/2\pi$ ). В момент слияния пар спиралевидных структур, например, при увеличении  $\Delta P$ , образуется меньшее число вихрей более крупного масштаба, т.е. датчик давления должен фиксировать скачкооб-

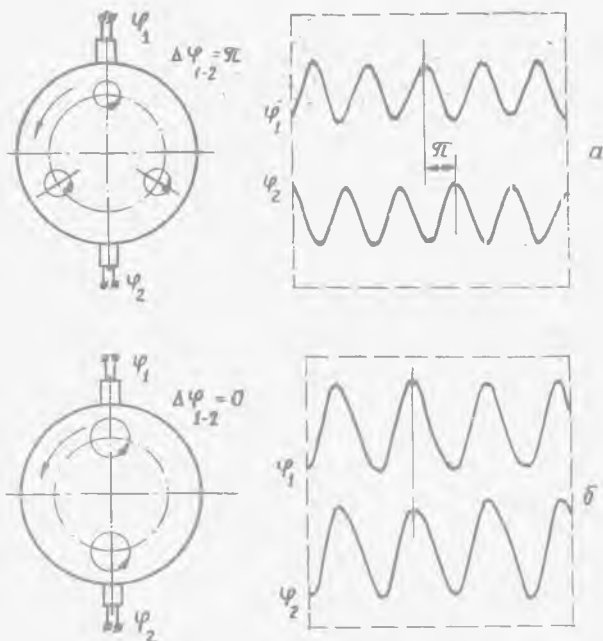
разное увеличение  $\Delta P'_{B4}$  и снижение  $f_{B4}$ , что и наблюдается в эксперименте (рис. 1, 2). Если число вихрей четное, то при их попарном укрупнении  $f_{B4}$  должна уменьшаться в два раза (в первом приближении можно считать, что величина  $\omega$  остается примерно постоянной). Если же число вихрей нечетное, то при их укрупнении один вихрь остается непарным и  $f_{B4}$  снижается менее чем в два раза. То есть укрупнение вихревых структур происходит в соответствии с соотношением  $n' > (n-1)/2 + 1$ , а изменение частоты  $-f'/f'' = n'/n''$ . Результаты такого случая ( $\omega = const$ ) приведены в таблице.

Т а б л и ц а

$n'$	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
$n''$	6	6	5	5	4	4	3	3	2	2	1
$f'/f''$	2	1,833	2	1,8	2	1,75	2	1,66	2	1,5	2

Таким образом, по отношению частот пульсаций давления до и после скачкообразного увеличения  $\Delta P'_{B4}$  можно судить о количестве вихревых структур до и после укрупнения. Для случая, проиллюстрированного на рис. 1,б и 1,в,  $f'/f'' = 1,41 \approx 1,5$ . То есть можно предположить, что до резкого увеличения  $\Delta P'_{B4}$  поток возмущался тремя вихревыми структурами, а после него - двумя (см. табл. 1). Экспериментально это предположение можно проверить по сдвигу фаз ( $\Delta \varphi$ ) сигналов с двух датчиков, расположенных в диаметрально противоположных точках ВТ (рис. 4). При симметричном расположении вихревых структур  $\Delta \varphi_{1-2}$  в первом случае должен быть равен  $\pi$  (рис. 4,а), во втором  $-\Delta \varphi_{1-2} = 0$  (рис. 4,б). Эксперимент показывает именно такую картину (на рис. 4 представлены копии с фотографий, запечатлевших форму сигналов с экрана осциллографа). Причем в первом случае на экране осциллографа заметен небольшой разброс  $\Delta \varphi / \Delta \varphi_{1-2} = \mathcal{F} \pm \mathcal{F} / \sigma$ , что свидетельствует о некоторой асимметрии расположения вихревых структур и, следовательно, об их склонности к укрупнению.

Вихревые спиралевидные структуры, в силу сдвигового механизма их образования, всегда имеют место в ВТ. Масштаб же этих структур, а, следовательно, и амплитуда пульсаций давления, генерируемых ими, зависят от режима работы трубы ( $\Delta P, \mu$ ) и ее геометрии ( $L$ ). Так, интенсивная диссипация кинетической энергии потока за счет сил вязкого трения в длинных трубах ( $L = 20-40$ ), равно как и диссипация самих вихревых структур, приводит к падению  $\Delta P'_{B4}$  на один-два порядка (рис. 5) по сравнению с  $\Delta P'_{B4}$  в коротких трубах (см. рис. 1, 2).

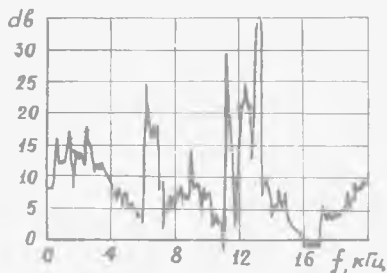


Р и с. 4. Схема экспериментальной проверки гипотезы об укрупнении вихревых структур ( $L = 6,5$ ;  $L_g = 4,5$ ;  $\mu = 1$ ; а  $-\Delta P = 110$  кПа, б  $-\Delta P = 140$  кПа)

### Л и т е р а т у р а

1. Лукачев С.В. Исследование неустойчивых режимов течения газа в вихревой трубе Ранка. - ИФЖ, 1981, № 5, с. 784-790.

2. Кыш Ю.А., Лукачев С.В. О взаимосвязи термодинамических и акустических параметров в вихревой трубе Ранка. Материалы УШ Всесоюзной акустической конференции. М.: 1973, с. 97-99.



Р и с. 5. Спектр пульсаций давления в ВТ:  $L = 20$ ;  $L_a = 18,5$ ;  $\mu = 0,8$ ;  $\Delta P = 200$  кПа

3. Kurosaka M. Acoustic streaming in swirling flow and the Ranque-Hilsch (vortex-tube) effect. *J. Fluid. Mech* 1982, v. 124, pp. 139-172.

4. Roshko A. Structure of turbulent shear flows: a new look. *AIAA Journal*, 1976, v. 14, №10, pp. 1349-1357.

УДК 633.697.3

Ш.А. Пиралишвили, В.Н. Синев, М.Н. Жорник

### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕГЕНЕРАТИВНОЙ СХЕМЫ ХОЛОДИЛЬНО-НАГРЕВАТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА НА ОСНОВЕ ВИХРЕВЫХ ТРУБ

Детальное исследование характеристик вихревой трубы с дополни- тельным потоком (ВТДП), имеющей высокий адиабатный к.п.д. ( $\varphi = 0,39$ ), существенно расширяет возможности регенеративных схем.

В работе рассматривается схема холодильно-нагревательного агре- гата (ХНА) (рис. 1), состоящего из двух ВТ, первая из которых является низкотемпературной трубой (НВТ) - 1, а другая ВТДП - 2.

Сжатый воздух подается в магистраль, где разделяется на две части. Одна часть проходит через регенеративный теплообменник 3, охлаждается и подается на вход низкотемпературной вихревой трубой. Холодный поток НВТ подается в теплообменник-рефрижератор 4, где отбирает у объекта охлаждения некоторое количество тепла и частично нагревается. Затем он подается в теплообменник-регенератор 3, где охлаждает входной по- ток НВТ и выбрасывается в атмосферу. Вторая часть сжатого воздуха по- ступает в завихритель ВТДП и участвует в процессе энергоразделения.

В качестве дополнительного потока используется "горячий" поток НВТ. Охлажденный воздух ВТДП подается в теплообменник-регенератор 3, а "горячий" поток выбрасывается в атмосферу или может быть использо- ван в эжекторе для компенсации гидрпотерь. Для определения влияния различных факторов на рабочий процесс ХНА и степени термодинамической эффективности вся схема была разбита рядом сечений (I-II), в которых определялись термодинамические параметры. Результатом анализа является выбор наиболее выгодных режимов работы схемы по наибольшей холодопро- изводительности при высоких значениях эксергетического  $\eta_e$  и адиа- батного  $\varphi$  к.п.д.

Термодинамика работы схемы описывается системой уравнений: баланса энергии схемы

$$(G_1 + G_2) c_p T_1 + A c_p T_1 = G_p c_p T + A c_p T + (G_x + G_x^*) (T_1 - \Delta T) c_p; \quad (I)$$