

1. Современное состояние гидродинамики вязкой несжимаемой жидкости /Под ред. С.М.Гольдштейна. М.; 1948. Т.1.
2. Рошино, Лэвэн. Аналитическое исследование несжимаемого закрученного потока в неподвижных трубах//Прикладная механика. 1969. № 2. С.7-16.
3. Сабуров Э.Н. Аэродинамика и конвективный теплообмен в циклонных нагревательных устройствах. Л.:Изд-во Ленингр.ун-та, 1982.- 240 с.

УДК 534.422(088.8)

С.В.Лукачев

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ВИХРЕВОГО ГЕНЕРАТОРА ЗВУКА

Вихревые генераторы звука (ВГЗ) благодаря простоте своей конструкции, надежности работы (в том числе и в агрессивных средах) и возможности работы на дозвуковых перепадах давления нашли широкое применение в целях интенсификации процессов тепло-массо-переноса, горения и т.п. Однако акустический КПД $\eta_{ак}$ известных ВГЗ не превышает 3...4 %, что значительно (в несколько раз) ниже эффективности газоструйных излучателей. В то же время при исследовании аэродинамического способа удаления отработанного газа из озвучиваемого объема [1] было обнаружено, что наличие у ВГЗ соплового насадка с развитой торцевой поверхностью и плавным переходом от торца к камере закручивания приводит к более чем двукратному увеличению акустической мощности $N_{ак}$ и $\eta_{ак}$ в сравнении с генератором, имеющим выходное сопло с острой кромкой. Это свидетельствует о далеко не использованных возможностях повышения эффективности вихревых излучателей.

Задача данной работы - оптимизировать геометрию ВГЗ с целью получения максимального значения его акустического КПД.

Физический механизм генерирования звука вихревым излучателем заключается в следующем. По мере увеличения длины L камеры закручивания (КЗ) происходит непрерывный рост толщины слоя смешения на границе периферийного и осевого потоков в выходном сечении камеры (рис.1,а). Это, с одной стороны, приводит к повышению эжек-



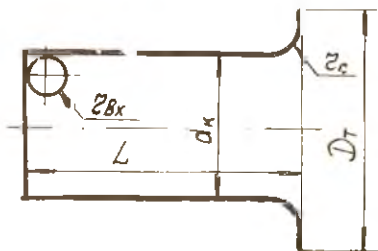
Р и с. 1. Схемы течения потока в КЗ

ционного выноса среды из присосевой области, а с другой - к снижению расхода в противотоке вследствие уменьшения площади его поперечного сечения. По достижении некоторой критической длины КЗ L_{min} , которая зависит от интенсивности закрутки потока $A = d_k \left(\frac{4k}{2} - 1 \right) \sqrt{2\pi} \sqrt{8x}$,

происходит скачкообразное смыкание вихревого слоя смещения и образование вихревого ядра с положительной осевой скоростью (рис. 1, б). При достаточно большой закрутке потока $A > 0,6 \dots 0,7$ полное давление в центре вихревого ядра оказывается меньше давления окружающей среды. В этом случае у центральной струйки не хватает энергии для преодоления положительного градиента давления и в потоке образуется свободная критическая точка, за которой начинается зона возвратного течения [2]. Вихревое ядро сворачивается в спираль, которая, вращаясь вокруг оси КЗ, деформирует периферийный поток рабочего тела, вызывая в нем регулярные пульсации давления, которые и генерируют в окружающей среде звук дискретного тона.

Таким образом, частота излучаемого звука определяется частотой прецессии спиралевидного вихревого ядра вокруг оси КЗ, а интенсивность излучения при прочих равных условиях - скоростью истечения рабочего тела на выходе из сопла. Следовательно, для получения максимальной эффективности ВГЗ необходимо, во-первых, свести к минимуму потери кинетической энергии рабочего тела внутри КЗ, т.е. минимизировать длину камеры L , и, во-вторых, за счет конструктив-

ных изменений генератора увеличить скорость истечения рабочего тела из КЗ. Последнее достаточно просто реализуется при использовании ультракинематического радиального газового диффузора, т.е. плоского торцевого насадка с плавным переходом от торца к КЗ (рис.1,в). Параметрами оптимизации при этом будут являться \bar{L} , \bar{r}_c и \bar{D}_T (здесь и в дальнейшем все геометрические размеры отнесены к диаметру КЗ d_k , рис.2).



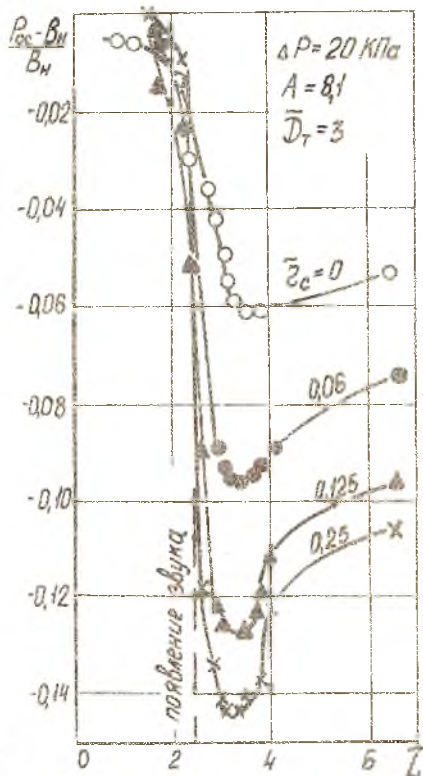
Р и с. 2. Схема ВГЗ

В связи с большой трудоемкостью акустического эксперимента было решено в качестве функции оптимизации на первой стадии исследования выбрать величину разряжения $\Delta P_{oc} = P_{oc} - P_H$ в замкнутой рециркуляционной зоне КЗ. Этот выбор обусловлен тем, что при заданных значениях степени закрутки потока A и перепаде давления на генераторе ΔP величина ΔP_{oc} однозначно определяется скоростью истечения рабочего тела из сопла. Газодинамические эксперименты проводились на модели ВГЗ со шнековыми завихрителями, позволяющей плавно изменять длину L . Наборы шнеков и сопловых насадков давали возможность варьировать геометрические параметры генератора в следующих диапазонах: $A = 1,75 \dots 20$; $\bar{r}_c = 0 \dots 0,5$, $\bar{D}_T = 1,5 \dots 6$; $L = 0 \dots 10$; $d_k = 16$ мм. Некоторые результаты этого исследования представлены на рис.3. Как и предполагалось, величины \bar{L} и \bar{r}_c существенным образом влияют на ΔP_{oc} и скорость истечения газа из сопла (что было подтверждено и качественными термоанемометрическими измерениями). Влияние же \bar{D}_T ($\bar{D}_T = 1,5 \dots 6$) обнаружено не было. Таким образом, по результатам гидродинамического исследования наиболее эффективно ВГЗ будет работать при $L_{opt} = 1,5 \dots 3$ и $\bar{r}_{c, opt} = 0,2 \dots 0,3$. Было отмечено также, что с ростом ΔP величина L_{opt} несколько уменьшается.

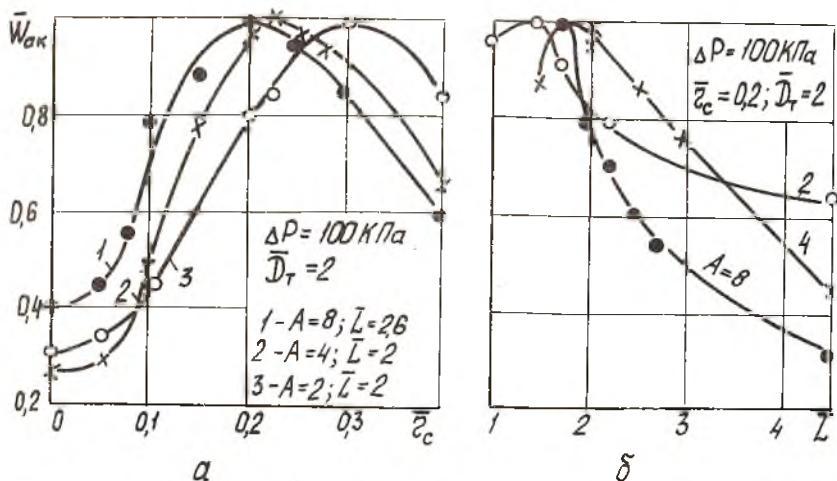
На втором этапе исследований проводился акустический эксперимент. Здесь использовалась модель ВГЗ с $d_k = 20$ мм, имеющая наборы завихрителей с тангенциальными входными каналами. Геометрические параметры изменялись в диапазонах: $\bar{D}_T = 1,5 \dots 6$; $\bar{r}_c = 0 \dots 0,4$; $A = 2,4, 8$; $\bar{L} = 1 \dots 5$. Измерения проводились в акустически заглушенной камере (3х3х3 м) с помощью комплекта акустической аппаратуры фирмы "Брюль и Кьер". Основные результаты из-

мерений, представленные на рис.4, подтверждают выводы, сделанные при газодинамическом эксперименте. Обнаружено, что $W_{ак}$ существенно зависит не только от величин \bar{r}_c и \bar{L} , но и от \bar{D}_T и имеет экстремальное значение по каждой из этих величин. Оптимальные значения \bar{r}_c , \bar{L} , \bar{D}_T в свою очередь зависят от интенсивности крутки A : большим значениям A соответствуют большие значения $\bar{D}_{опт}$ и $\bar{L}_{опт}$ и меньшие — $\bar{r}_{опт}$. Из рис.5 видно, что оптимизация геометрии ВГЗ позволяет получить $\eta_{ак} = 8...14\%$, т.е. выйти на тот же уровень эффективности, который имеют газоструйные излучатели.

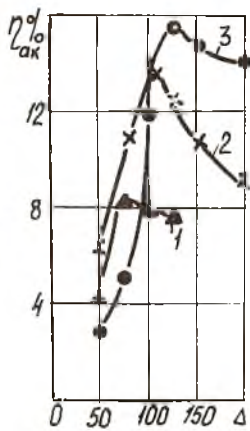
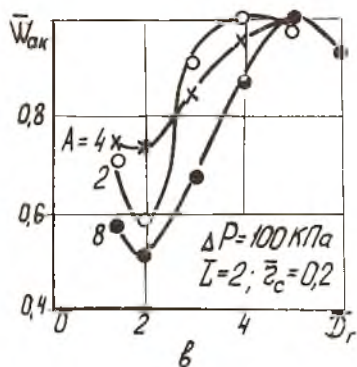
Значительное влияние величины \bar{D}_T на интенсивность излучаемого звука можно объяснить следующим образом. Известно, что закрученные струи обладают повышенной интенсивностью турбулентности. Именно это свойство способствует их широкому использованию для интенсификации процессов тепло- и массопереноса. Однако с точки зрения эффективности звукоизлучения закрученной струи высокая интенсивность неупорядоченной турбулентности в ней представляется отрицательным явлением, поскольку приводит к быстрому смешению струи и демпфирует передачу регулярных гидродинамических пульсаций от струи в окружающую среду. При реализации же плоского пристенного течения закрученной струи в ультракинематическом газовом диффузоре интенсивность турбулентности в слое смешения заметно уменьшается,



Р и с. 3. Изменение разряжения на оси КГ в зависимости от длины камеры



Р и с. 4. Изменение относительной акустической мощности ВГЗ от: а - \bar{L} ; б - L ; в - \bar{D}_r



Р и с. 5. Изменение акустического КПД от режима работы генератора:
 1 - $A = 2; L = 2; \bar{c}_c = 0,3; \bar{D}_r = 4$;
 2 - $A = 4; L = 2; \bar{c}_c = 0,2; \bar{D}_r = 5$;
 3 - $A = 8; L = 2; \bar{c}_c = 0,2; \bar{D}_r = 5$

что приводит к увеличению "эффективной" излучающей поверхности струи и снижению демпфирования передачи периодических пульсаций давления от струи в окружающую среду.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие рекомендации по проектированию

ВГЗ. Для получения максимальной эффективности $\eta_{ак}$ генератора целесообразно задавать расчетный режим его работы $\Delta P = 80 \dots 100$ КПа и выбирать геометрические параметры ВГЗ в диапазонах $A = 2 \dots 8$; $L = 1,5 \dots 2$; $D_T = 4 \dots 5$; $\tilde{r}_c = 0,2 \dots 0,3$.

Библиографический список

1. Кныш Ю.А., Лукачев С.В. Способ разделения потоков акустической энергии и отработанного воздуха в вихревом излучателе звука //Акуст.ж. 1980. Т.26. № 2. С.299-302.
2. Лайбович С. Распад вихря //Вихревые движения жидкости. М.: Мир, 1979. С.160-196.

УДК 532.517.4

А.Н.Белоусов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ КОРОТКИХ ВИХРЕВЫХ КАМЕР НА ПУЛЬСАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫТЕКАЮЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЙ

При создании различных вихревых устройств (горелок, форсунок, генераторов звука, вихревых труб и т.д.) часто приходится сталкиваться с нестационарным режимом течения затопленных закрученных потоков жидкости и газа, следствием которого является возникновение в потоке регулярных пульсаций скорости и давления [1]. Ввиду сложной аэродинамической структуры закрученных течений механизм возникновения автоколебаний в потоке изучен не до конца, однако исследования и эксперименты показывают, что в основе этого явления лежит гидродинамическая неустойчивость течения, при которой центральное вихревое ядро отклоняется от оси симметрии (геометрической оси вихревой камеры) и одновременно с собственным вращением совершает регулярное круговое прецессионное движение вокруг нее [2]. Причиной колебаний давления в закрученном потоке являются периодические пульсации скорости в периферийном потоке, обусловленные регулярными деформациями его границ центральным прецессирующим ядром вихря. По параметрам излучаемых при этом акустических колебаний