

В. П. Лукачев, Ю. А. Кныш

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ФОРСУНОК

В последнее время в связи с использованием отработавших ресурс авиационных газотурбинных двигателей в стационарных наземных установках возникает проблема перевода их на газообразное топливо.

Трудности сжигания природного газа в ограниченном объеме, заключающиеся в увеличении длины факела, обильном сажеобразовании и значительном химическом недожоге, связаны с несовершенством перемешивания горючего газа с воздухом и заставляют изыскивать новые пути интенсификации рабочего процесса в камере сгорания ГТД.

Одним из таких новых методов является введение в зону горения мощных акустических колебаний. По имеющимся литературным данным [1], [2] облучение звуком топочного объема на 10—15% повышает экономичность процесса горения, значительно снижает коррозию элементов камеры сгорания и количество сажи-стых отложений.

В качестве источников звука для этой цели чаще всего применяются наиболее простые по устройству газоструйные и вихревые свистки. Из них более перспективны вихревые, т. к. создают дополнительную закрутку газового потока, улучшающую перемешивание топлива с воздухом и способствующую стабилизации пламени.

Обычно генератор звука и форсунка komponуются в единой конструкции. В этом случае носителем звуковых колебаний является непосредственно газообразное топливо, что позволяет с максимальной эффективностью передавать акустическую энергию в зону горения.

Целью настоящей работы являлось исследование расходных и акустических характеристик вихревых форсунок применительно к камере сгорания авиационного ГТД.

Исследование проводилось на стенде, включающем в себя акустическую камеру прямоугольной формы объемом 1 м^3 , выложен-

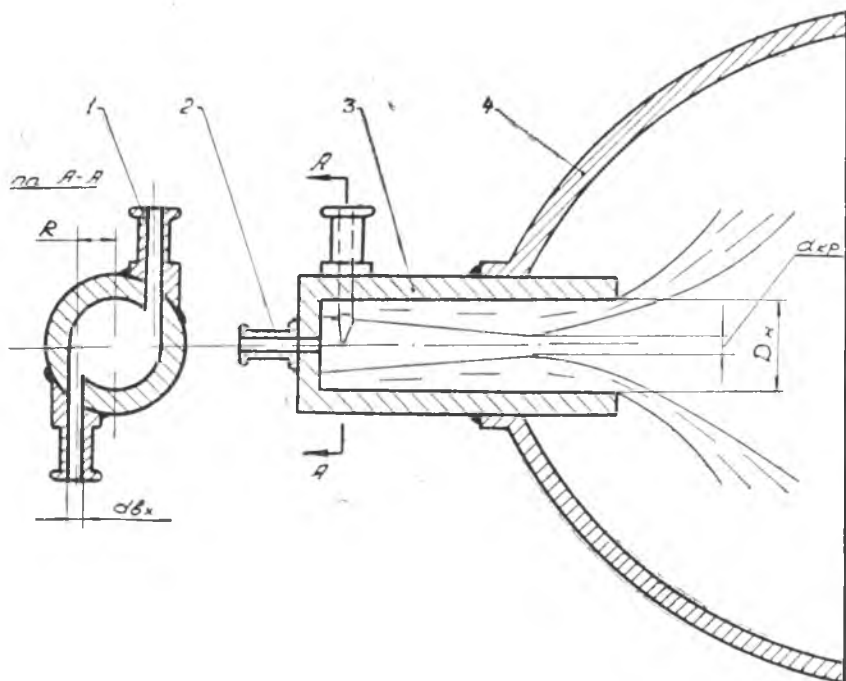
ную внутри войлоком; расходомерный участок, состоящий из двух дроссельных расходомеров с пределами измерений от 0,5 до 7 г/сек и от 3 до 50 г/сек; образцовые манометры кл. 0,16 для измерения давления; приборы регистрации акустических параметров форсунки—частоты, мощности и направленности звука.

Частота определялась методом сравнения: звуковые волны через микрофон (МД-51) и усилитель (ПИУ-1М) подавались на электронный осциллограф (УО-1М), на тот же осциллограф подавались стандартные сигналы известной частоты от генератора ЗГ-10; наложение сигналов давало определенную форму Лиссажу, по которой устанавливалась частота излучаемого звука.

Интенсивность звука регистрировалась по показаниям усилителя в относительных единицах.

Диаграммы направленности акустического поля снимались с помощью того же микрофона, закрепленного на специальном координатнике, который позволял перемещать микрофон вокруг среза сопла форсунки на 300° по окружности радиусом 300 мм.

Для визуального наблюдения истечения из форсунок и фотографирования угла факела воздух подкрашивался табачным дымом или алюминиевой пудрой.



Фиг. 1. Вихревая акустическая форсунка.

На фиг. 1 изображена одна из моделей вихревых форсунок, на которых проводились исследования, она состоит из вихревой камеры 3, штуцеров подвода воздуха 1, рефлектора 4 и штуцера 1.

Как видно из чертежа, вихревая акустическая форсунка ничем не отличается от обычной центробежной форсунки для распыливания жидкостей. Это дает основание предположить, что расчеты расхода топлива и угла факела можно производить по общепринятой методике для жидкостных центробежных форсунок, внося поправки на сжимаемость газа. Основная задача, таким образом, сводилась к экспериментальному определению влияния сжимаемости газа на коэффициент расхода вихревой форсунки.

Обработка экспериментальных данных велась в виде зависимостей $\frac{\mu_{\text{газ}}}{\mu_{\text{ж}}} = \varphi \left(\frac{P_{\text{вх}}}{P_0} \right)$, где $\mu_{\text{газ}}$ и $\mu_{\text{ж}}$ соответственно коэффициенты расхода на газовом и жидком компонентах, $P_{\text{вх}}$ — давление перед входом в форсунку, P_0 — давление окружающей среды.

За основной критерий подобия, аналогично жидкостным центробежным форсункам, была принята геометрическая характеристика

$$A_r = \frac{Rr_k}{nr_{\text{вх}}^2},$$

где R — расстояние между осями вихревой камеры и входного тангенциального канала,

r_k — радиус вихревой камеры;

$r_{\text{вх}}$ — радиус входного канала;

n — число входных каналов.

Результаты экспериментов представлены на фиг. 2, из рассмотрения которой можно заключить, что с увеличением геометрической характеристики и перепада давления коэффициент расхода вихревой форсунки уменьшается.

Определив по фиг. 2 $\mu_{\text{газ}}$, можно найти расход газа по формуле для центробежных форсунок [3]

$$Q = \pi r_k^2 \mu_{\text{газ}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{\text{вх}} - P_0)},$$

где Q и ρ — соответственно, объемный расход и плотность газа. Частоту излучаемого звука в грубом приближении можно определить по формуле, приведенной в работе [4],

$$f = \alpha \frac{V_s}{\pi D_k} \sqrt{\frac{P_{\text{вх}} - P_0}{P_0}},$$

где f — частота,

V_s — скорость звука,

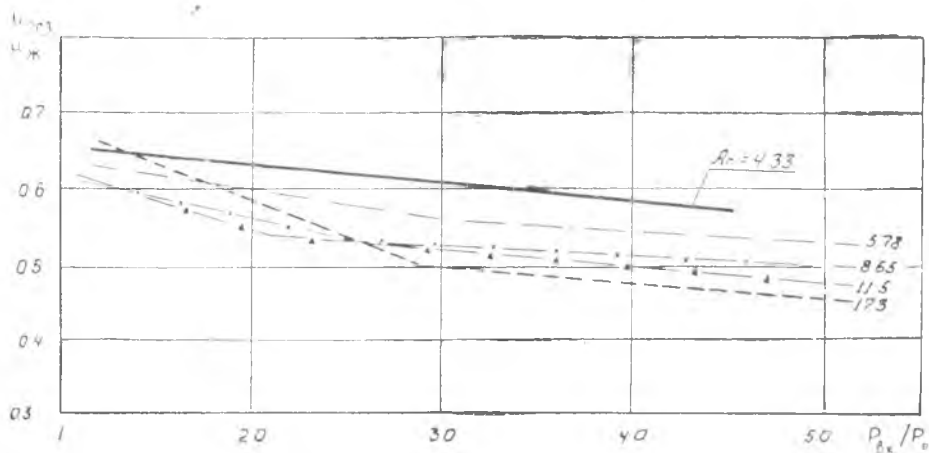
D_k — диаметр вихревой камеры,

α — коэффициент, учитывающий потери от трения в камере.

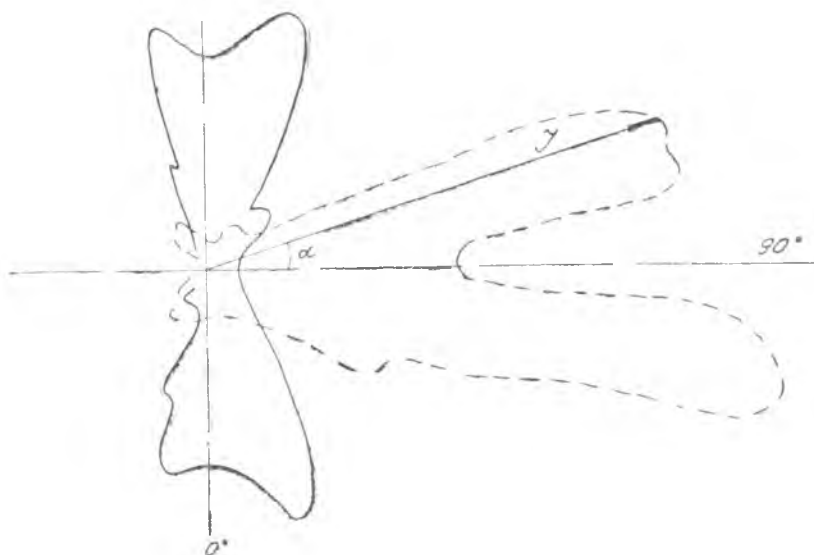
Важной характеристикой вихревой форсунки является направленность акустического поля. От распределения звуковой энергии

по объему камеры сгорания зависит эффективность воздействия на горение.

Вихревые свистки в свободном пространстве имеют «двухлепестковую» форму направленности, при наличии близкорасположенных отражающих поверхностей форма диаграммы может существенно искажаться.



Фиг. 2. Зависимость коэффициента расхода от давления.



Фиг. 3. Диаграммы направленности акустического поля вихревого свистка.

1 — без рефлектора; 2 — с рефлектором.

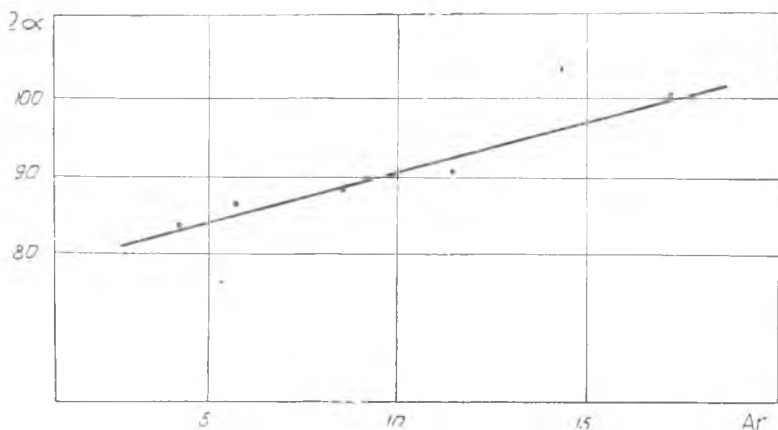
На фиг. 3 сплошной линией показана диаграмма направленности вихревого свистка в свободном пространстве, пунктирной — свистка с параболическим рефлектором.

На диаграмме I (вт/см^2) — величина звуковой энергии на единицу площади, перпендикулярной направлению распространения звука, α — направление I относительно оси свистка.

Рефлектор концентрирует звуковую энергию вблизи оси свистка, поэтому стабилизатору камеры сгорания следует придавать параболическую форму (вместо полусферы у некоторых двигателей), чтобы максимальное значение звукового поля находилось в зоне горения.

Как показали эксперименты, применение рефлектора увеличивает максимальное значение интенсивности звука в 5—7 раз.

Следующей важной характеристикой форсунки является угол топливного факела, от которого в значительной степени зависит распределение топлива по объему камеры сгорания. Экспериментальная зависимость угла факела от геометрической характеристики, представленная на фиг. 4, показывает, что как и в случае центробежных форсунок угол факела вихревой форсунки увеличивается с увеличением геометрической характеристики.



Фиг. 4. Зависимость угла факела от геометрической характеристики.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о целесообразности применения вихревой акустической форсунки для подачи газообразного топлива в камеру сгорания ГТД, поскольку она обеспечивает необходимый расход топлива, угол факела и, кроме того, способна дополнительно интенсифицировать рабочий процесс за счет излучения звуковой энергии в зону горения.

Однако в настоящее время вихревые свистки в качестве форсунок не нашли широкого применения из-за их сравнительно малой мощности и низкого акустического к. п. д.

Было установлено, что акустическая мощность свистка пропорциональна степени снижения давления в осевой зоне вихревой камеры. Следовательно, увеличить ее можно путем создания дополнительного разрежения в осевой зоне за счет постороннего источника вакуума.

На этом принципе авторами был разработан способ увеличения мощности и к. п. д. вихревых свистков [5]. Для выяснения сущности предложенного способа необходимо произвести анализ причин звукообразования в вихревой свистке.

Воздух от компрессора через тангенциально расположенные отверстия в штуцере 1 поступает в вихревую камеру 3. Вследствие тангенциального подвода струи воздуха приобретают относительно оси вихревой камеры момент количества движения, который приводит к возникновению центробежных сил, прижимающих воздушный поток к стенке вихревой камеры. В результате действия центробежных сил и сил давления течение воздуха в вихревой камере имеет вид постепенно расширяющегося кольцевого потока; это так называемый периферийный вихрь. Поскольку в сечении входных тангенциальных каналов осевая составляющая скорости потока равна нулю, распределение тангенциальной составляющей в радиальном направлении имеет вид:

$$v \cdot r = \text{const}, \quad (1)$$

где v — тангенциальная составляющая скорости потока;

r — расстояние частицы воздуха от оси вихревой камеры.

Т. е. в направлении от стенки вихревой камеры к оси статическое давление непрерывно уменьшается, а тангенциальная скорость возрастает. На срезе сопла подобно течению несжимаемой жидкости [3] статическое давление по всему сечению кольцевой струи должно быть равным атмосферному. Следовательно, вблизи среза сопла избыточное статическое давление в периферийном вихре переходит в скоростной напор, осевая скорость при этом возрастает, а сечение струи уменьшается согласно условию сохранения расхода. Таким образом, кольцевой поток воздуха при своем движении от входных тангенциальных каналов к выходу сначала расширяется, а затем снова сужается, как это схематично показано на фиг. 1. Согласно уравнению (1) в направлении от периферии к оси вихревой камеры с уменьшением радиуса до нуля скорость v растет до бесконечности.

В действительности этого не происходит; давление падает ниже атмосферного до определенной величины, зависящей от давления на входе и геометрии свистка, под действием возникшего перепада давления атмосферный воздух проникает в осевую зону свистка, и под влиянием вязкостных сил трения раскручивается, образуя так называемый центральный вынужденный вихрь. Распределение тангенциальной составляющей v у центрального вихря такое же как у твердого тела,

$$\frac{v}{r} = \text{const.}$$

Следовательно, при работе свистка в вихревой камере образуются два вихревых потока, движущихся относительно оси в противоположных направлениях. Граница разделения вихрей представляет собой поверхность вращения, имеющую минимальное сечение $d_{кр}$, условно названное критическим. По мнению авторов звукообразование в вихревом свистке возможно только при наличии критического сечения. Оно играет роль клапана, находящегося в автоколебательном режиме, периодически разобщающего область минимального давления (осевая зона в сечении входных тангенциальных каналов) с окружающей средой. Возникающие при этом перпериодические пульсации давления внутри вихревой камеры проникают в окружающую среду в виде звуковых волн.

Согласно рассмотренной схеме звукообразования частота звуковых колебаний зависит от объема, а амплитуда и мощность звука — от степени снижения давления в области центрального вихря от заглушенного конца до критического сечения. Следовательно, частоту можно регулировать изменением давления на входе или геометрией вихревой камеры, а повысить мощность звука можно только уменьшением давления в осевой зоне свистка.

Экспериментально было установлено, что дополнительное вакуумирование удобнее всего производить через отверстие в задней стенке вихревой камеры, как это показано на фиг. 1, посредством штуцера 2. Критическое сечение в зависимости от давления воздуха на входе в вихревую камеру располагается на расстоянии $(1,3—1,8) D_k$ от среза сопла (здесь D_k — диаметр вихревой камеры). Местоположение критического сечения легко обнаружить, помещая в различных местах на оси вихревой камеры твердый предмет небольших размеров, например, пластмассовый шарик диаметром $(0,2—0,3) D_k$ на жесткой нити. Возмущение течения, производимое шариком в момент попадания его в критическое сечение, оказывается достаточным для полного подавления звукообразования.

Для проверки эффективности предложенного способа были проведены сравнительные испытания опытного образца вихревого свистка по следующей методике.

1. Свисток выводился на номинальный режим (давление перед входом $P_{вх} = 1,9 \text{ кг/см}^2$).

2. Повышением давления сверх номинального на $0,4 \text{ кг/см}^2$ достигался прирост мощности звука в два раза по сравнению с первым замером, частота при этом составила 3100 гц .

3. При номинальном режиме $P_{вх} = 1,9 \text{ кг/см}^2$ вакуумированием осевой зоны свисток выводился на частоту 3100 гц , как во втором замере, при этом мощность звука увеличилась в 3,8 раза по сравнению с первым замером. Расчеты дополнительных затрат энергии по пунктам 2 и 3 показали, что прирост акустической

мощности на единицу затраченной энергии в случае вакуумирования осевой зоны в 1,9 раза больше, чем в случае дополнительного повышения давления, т. е. для повышения мощности и к. п. д. свистка целесообразнее использовать вакуум-насос. Это обусловлено малой эффективностью вихревой камеры, как генератора вакуума по сравнению с вакуум-насосом.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Грегуш. Воздействие звука на процессы горения. Акустический журнал, У111,4, 1962.
 2. «Опыт эксплуатации ультразвуковых форсунок на мазуте». Реф. журнал «Электротехника и энергетика», № 11, 1965.
 3. В. А. Бородин и др. Распыливание жидкостей. Изд. «Машиностроение», Москва, 1967.
 4. Д. Кроуфорд. Ультразвуковая техника. Изд. И-Л, Москва, 1960.
 5. В. П. Лукачев, Ю. А. Кыш. Способ увеличения мощности вихревого генератора акустической энергии. Авторское свидетельство № 214213.
-