

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вукалович М. П., Новиков И. И. Техническая термодинамика. М., «Энергия», 1968.

Ю. А. Кныш, С. В. Лукачев

### ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ЦИКЛОННОГО ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА СО СПУТНЫМ ОСЕВЫМ ПОТОКОМ

В настоящее время начинается широкое использование авиационных ГТД в наземных условиях для привода нагнетателей газоперекачивающих станций. В этих условиях ресурс двигателя должен быть значительно выше, чем при эксплуатации на самолете. В связи с этим проблема очистки воздуха, поступающего в двигатель, приобретает большое значение, так как присутствие пыли в газоздушном тракте приводит к быстрому эрозийному износу лопаток компрессора и турбины, а также к отложению частиц аэрозоля в газоздушном тракте, что снижает эффективность работы двигателя и его ресурс, т. е. уменьшается экономическая целесообразность применения ГТД в наземных условиях.

В качестве привода нагнетателей газоперекачивающих станций запланировано использование ГТД НК-12СТ. При нормальной запыленности воздуха (чистый воздух  $K=10$  мг/м<sup>3</sup>) в течение ресурса двигателя (в перспективе 10000 часов) через него проходит 18 т пыли. Это при идеальных условиях эксплуатации, а если учесть, что большинство магистральных газопроводов проходят по пустынной и степной местности, где часто бывают пыльные и песчаные бури ( $K=0,1-1$  г/м<sup>3</sup>), то эта цифра увеличивается, по крайней мере, в 2—4 раза.

Отличительными особенностями воздухоочистительных устройств (ВОУ), применяемых в ГТД, являются их малое гидравлическое сопротивление (не более 100—150 мм вод. ст.) и большая пропускная способность. Ввиду этого использование эффективных масляных задерживающих фильтров исключается, так как их применение требует больших площадей.

Очевидно, что в этих условиях применимы только инерционные пылеотделители, наиболее эффективными из которых являются прямоточные циклоны, представляющие собой трубки со вставленными в них лопаточными завихрителями. Твердые или жидкие частицы в закрученном потоке воздуха под воздействием центробежных сил сепарируются на периферию камеры закручивания и оттуда вместе с частью воздуха через зазор между трубками отсасываются в пылесборник.

Существующие циклоны обладают тем недостатком, что необходимая степень очистки воздуха в них достигается при значительном увеличении их гидравлического сопротивления и низкой пропускной способности (из-за наличия в камере закручивания сильно развитой зоны обратных токов). Указанные недостатки можно устранить, если изменить характер течения в камере закручивания, например, выполнив в завихрителе циклона центральное отверстие. При этом наличие осевого потока значительно сокращает зону обратных токов (т. е. увеличивается пропускная способность циклона) и уменьшает радиальный градиент давления, препятствующий сепарированию частиц аэрозоля на периферию камеры закручивания. Кроме того, при такой схеме течения потока внутри циклонной трубки должны возникать колебания воздушного столба (генерируется звук, подобно тому, как это происходит в вихревых свистках с дополнительным осевым потоком). Звуковые колебания также способствуют процессу сепарации пыли.

Таким образом, можно предположить, что прямоточный циклон, в завихрителе которого выполнено центральное отверстие, должен обладать повышенной пропускной способностью (по сравнению с обычной схемой) и достаточно высокой эффективностью пылеулавливания.

Для экспериментальной проверки выдвинутого предположения были созданы модель циклона и установка для ее продувки.

В ходе эксперимента определялись следующие величины: расход воздуха через циклон; потери давления на циклоне; расход воздуха, отсасываемого с пылью; эффективность пылеотделения в циклоне (весовым методом с помощью установки фильтра в отсасывающей магистрали).

В качестве пыли использовались монодисперсные фракции корунда ( $Al_2O_3$ ) размером от 5 до 80 мк и речной песок полидисперсного состава с преобладанием частиц размером 100—400 мк.

Исходя из имеющихся в литературе рекомендаций, были выбраны следующие геометрические размеры циклона: диаметр камеры закручивания 90 мм; длина камеры закручивания 3 калибра; диаметр втулки завихрителя 20 мм.

Предварительные эксперименты показали, что достаточно высокая эффективность пылеулавливания достигается при постоянном по радиусу завихрителя угле закрутки, равном  $30^\circ$ , причем для уменьшения сопротивления от гидравлического удара угол закрутки входных кромок должен быть в пределах  $60$ — $90^\circ$ .

При определении расходных характеристик циклона оказалось, что наличие центрального отверстия диаметром 10 мм в завихрителе приводит к увеличению пропускной способности циклона (при расчетном значении перепада давления 100 мм вод. ст.) на 9%. Это означает, что число циклонов в ВОУ может быть значительно снижено, т. е. уменьшены габариты и вес устройства. Так, для двигателя НК-12СТ число циклонов снизится с 900 до 820 штук.

Как и предполагалось, при работе циклона в его камере закру-

чивания возбуждались низкочастотные звуковые колебания, частота которых на расчетном режиме ( $\Delta H = 100$  мм вод. ст.) составляла 1850 гц.

Измерения эффективности пылеулавливания показали, что при одинаковом располагаемом перепаде давления эффективность предлагаемого циклона несколько выше (на 2—3%), чем у обычно, и составляет 97—98%.

Значительное уменьшение эффективности улавливания мелкодисперсной пыли ( $\delta = 5\text{--}10$  мк  $\rightarrow \eta = 70\text{--}80\%$ ) объясняется тем, что уменьшение центробежных сил, действующих на частицу, опережает уменьшение аэродинамического сопротивления, которое препятствует сепарированию частиц пыли, так как первые изменяются пропорционально  $\delta^3$ , а второе —  $\delta^2$ , т. е. частицы начинают двигаться так же, как элементы потока в данной точке пространства.

Снижение же эффективности улавливания крупных фракций пыли (более 100 мк) до 80—90% обусловлено явлением рикошетирувания частиц. При соударении частиц со стенкой камеры закручивания частицы отскакивают (рикошетируют) от нее в направлении оси трубы и попадают в слой очищенного воздуха. Причем крупные частицы, имеющие большой запас кинетической энергии, после соударения со стенкой проникают на большую глубину в очищенный поток воздуха. Поэтому при недостаточной величине зазора на входе в пылесборник ( $Z < 10$  мм) не удастся уловить рикошетируемые частицы пыли даже размером  $\delta = 20\text{--}30$  мк ( $\eta = 85\text{--}90\%$ ).

Из литературных данных известно, что количество воздуха, отсасываемого в пылесборник вместе с пылью, должно составлять 8—10% от расхода очищенного воздуха. Уменьшение этой величины приводит к ухудшению эффективности пылеулавливания, а увеличение незначительно сказывается на эффективности работы циклона. Эксперимент показал, что эти рекомендации справедливы и для циклона с осевым потоком.

## ВЫВОДЫ

1. Наличие центрального отверстия в завихрителе прямоточного циклона ( $d_{\text{ц.отв}} = 0,15\text{--}0,2$ ) позволяет увеличить пропускную способность циклона на 8—10%, эффективность пылеулавливания при этом возрастает на 2—3% и составит 97—98% для частиц пыли размером 20—100 мк.

2. При работе прямоточного циклона со спутным осевым потоком в его камере закручивания возбуждаются низкочастотные звуковые колебания, способствующие сепарации пыли на периферию камеры закручивания.

3. При выборе величины зазора между камерой закручивания и трубкой отвода чистого воздуха необходимо учитывать эффект рикошетирувания частиц пыли от стенки камеры закручивания. Рекомендуемое значение величины зазора  $Z = (0,1\text{--}0,15) D$  циклона.

4. Расход воздуха, отсасываемого с периферии циклона вместе с пылью, должен составлять 8—10% от расхода очищенного воздуха.

Ю. А. Кныш, С. В. Лукачев

## О ПРИМЕНЕНИИ ВИХРЕВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ФОРСУНОК В АВИАЦИОННЫХ ГТД

Проблема снижения токсичности выхлопных газов при одновременном повышении полноты сгорания топлива является одной из основных задач, решаемых при создании авиационных двигателей. Традиционным путем решения этой задачи является улучшение процессов смесеобразования и горения.

Для распыливания жидкого топлива чаще всего применяются центробежные форсунки. Газообразное топливо еще не нашло широкого применения в газотурбинных двигателях, поэтому вопрос о наилучшей конструкции газовой форсунки остается пока открытым. Весьма вероятно, что и для газообразного топлива центробежные (вихревые) форсунки будут предпочтительнее струйных. Закрученный поток газообразного топлива обладает более высокой степенью турбулентности, широким факелом раскрытия струи, поэтому процесс смесеобразования протекает более интенсивно и завершается на более коротком участке камеры сгорания.

В последнее время в теплоэнергетике начинают применяться акустические форсунки, позволяющие существенно интенсифицировать как предпламенные процессы (распыливание, смешение и испарение), так и непосредственно процесс горения [1], [2]. Практика применения вихревых акустических форсунок в газотурбинных двигателях показывает, что они не вызывают режимов вибрационного горения. Это, очевидно, объясняется тем, что частота генерируемых форсункой колебаний обычно в несколько раз превышает значение собственной акустической частоты возбуждения камеры, а своеобразный (прецессионный) механизм колебаний в форсунке не может иметь обратной связи через пульсации давления в камере сгорания. Высокое давление подачи жидкого топлива (в несколько раз превышающее давление в камере сгорания) исключает возможность проникновения колебаний из камеры сгорания в топливную систему.

Вихревые акустические форсунки наиболее целесообразно применять в многофорсуночных камерах сгорания, так как в этом случае за счет суперпозиции звуковых волн вся акустическая энергия будет рассеиваться в пределах зоны горения и возможность возникновения неустойчивых режимов горения еще больше снизится.

Величину геометрической характеристики воздушного контура пневмоакустической форсунки следует выбрать в диапазоне