

6. Ружичка И. Е. Резонансные характеристики направленных виброзащитных систем с демпфированием вязким и сухим трением. Тр. американского общества инженеров-механиков, сер. В, 89, № 4, 1967.

7. Richardson H. H., Static and Dynamic Characteristics of Compressible Gas Bearings. Trans of the ASME, N 7, vol. 80, October, 1958.

Ю. А. Кныш, С. В. Лукачев

О МЕХАНИЗМЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ И ГАЗА В ЭЛЕМЕНТАХ ГТД

Закрученные течения рабочего тела широко используются в различных элементах авиационных газотурбинных двигателей. Подача жидкого и газообразного топлива центробежными форсунками, стабилизация пламени закрученным потоком топливо-воздушной смеси, очистка воздуха фильтрами циклонного типа в вертолетных двигателях и ГТД наземного применения, построение элементов струйной пневмоавтоматики регулирования — это далеко не полный перечень практической реализации закрученных струйных течений в современных двигателях. Исследованию перечисленных вихревых устройств посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ. Тем не менее физическая природа целого ряда особенностей течения закрученных потоков до сих пор не имеет своего полного объяснения.

Одним из наиболее важных и в то же время наименее изученных физических явлений, сопровождающих рассматриваемое течение, является потеря устойчивости стационарного движения и образование интенсивных колебаний давления в потоке и в окружающей среде.

В данной работе исследуются причины возникновения регулярного колебательного процесса в закрученном потоке, а также влияние режима работы и геометрических параметров вихревого устройства на частоту и интенсивность колебаний.

Рассмотрим модель закрученного потока жидкости на примере обычной центробежной форсунки (рис. 1а). Известно [1], что внутри камеры закручивания и сопла форсунки образуется система двух закрученных потоков. По периферии камеры движется так называемый первичный вихрь, имеющий в поперечном сечении форму кольца с наружным радиусом R и внутренним — r_m . Этот поток состоит из вещества рабочего тела, подаваемого в форсунку; распределение вращательной составляющей скорости по радиусу вихря соответствует потенциальному закону. Приосевую область камеры занимает вторичный вихрь, вращающийся как квазитвердое тело. Он образуется из вещества среды, в которую происходит истечение.

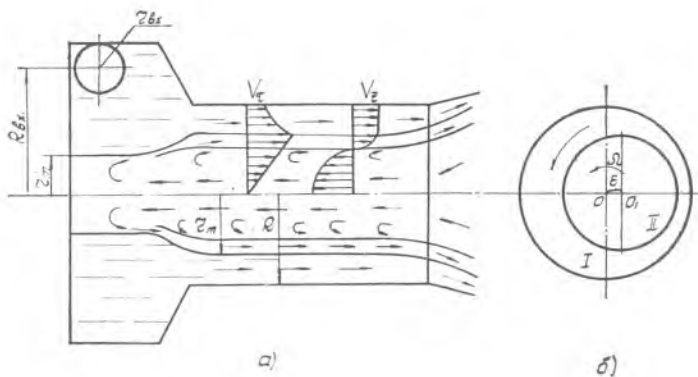


Рис. 1. Схема течения закрученного потока жидкости

Опыт показывает, что в случае незатопленного истечения жидкости (например, при истечении жидкости в газообразную среду) движение устойчиво и пульсации давления и скорости в потоке отсутствуют. Если же истечение закрученной струи затопленное, т. е. рабочее тело в форсунке и вещество окружающей среды имеют одну и ту же физическую природу, то в потоке генерируются регулярные пульсации давления, частота и амплитуда которых зависит от скорости истечения и геометрических параметров форсунки. В окружающей среде пульсации давления фиксируются как звук дискретного тона и значительной интенсивности.

Для установления причин возбуждения автоколебаний необходимо было, прежде всего, выяснить особенности динамики процессов, происходящих внутри камеры закручивания. С целью визуализации течения в приосевую область камеры подводились мелкие пузырьки воздуха, которые, располагаясь в области минимального давления, делали видимой физическую ось вторичного вихря. Оказалось, что при затопленном истечении (вода в воду) вторичный поток отклоняется от оси вихревой камеры и совершает регулярное прецессионное движение вокруг нее. Причем амплитуда смещения оси вторичного вихря увеличивается по мере увеличения длины вихревой камеры.

Отклонение вторичного потока относительно равновесного состояния вызывает определенную деформацию первичного потока по границе их сопряжения (рис. 1б). В силу этого (согласно закону сохранения энергии и уравнению неразрывности течения) нарушается окружная симметрия распределения давления и скорости в первичном потоке. Там, где уменьшается сечение первичного потока, увеличивается скорость и снижается статическое давление, и, наоборот, в диаметрально противоположной области давление повышается. Деформированная таким образом эпюра распределения давления вращается вокруг оси камеры со скоростью прецессионного движения вторичного вихря. Наблюдатель, расположенный неподвижно относительно камеры, воспринимает такое движение как

колебания, вызванные вращающимся дипольным источником возмущения.

Измерение переменной составляющей давления внутри камеры закручивания полностью подтвердило изложенный механизм автоколебательного процесса. Статическое давление в первичном потоке изменяется по почти гармоническому закону синхронно углу поворота прецессирующего вторичного вихря. Диаграмма направленности звукового поля, излучаемого закрученной струей, соответствует полю вращающегося дипольного источника.

Таким образом, причиной автоколебаний в закрученном потоке жидкости являются колебания скорости и давления в первичном вихре, вызванные периодической деформацией его границ вторичным вихрем, совершающим прецессионное вращение относительно оси камеры закручивания.

Экспериментальное исследование неустойчивости при течении закрученных потоков жидкости показало, что частота и амплитуда колебаний изменяются пропорционально скорости истечения и находятся в довольно сложной зависимости от степени закрутки потока. С увеличением длины вихревой камеры частота колебаний монотонно уменьшается, а амплитуда пульсаций давления имеет максимум на определенной длине $L=L_0$; при этом большим степеням закрутки потока соответствуют большие значения L_0 . Следует отметить, что колебания возникают только при наличии достаточно длинной вихревой камеры $\bar{L} = \frac{L}{2k} > \bar{L}_{\min} = 0,5 - 2,5$ (большие значения \bar{L}_{\min} соответствуют большим степеням крутки потока). Частичный перепуск рабочего тела через центральное отверстие в торцевой стенке камеры ослабляет колебания и, наоборот, отсос вещества из приосевой области приводит к увеличению их интенсивности. Подогрев окружающей среды, из вещества которой формируется вторичный вихрь, до 500—600°C приводит к частичному или полному подавлению автоколебательного процесса в вихревой камере.

По результатам обработки экспериментальных данных была получена формула для определения частоты колебаний:

$$\Omega = \frac{Q}{\pi R^3} \frac{(1 - \varphi/2)}{\sqrt{\frac{\varphi^3}{2} (1 - \varphi) \left(1 + \frac{1 - \varphi}{4}\right)}} \left[1 - \xi \frac{0,675 A_c \bar{L}}{1 + 0,2 A_r} \right] \text{ рад/сек,}$$

где Q — объемный расход жидкости (газа) через вихревую камеру;

A_r — геометрическая характеристика камеры $\left(A_r = \frac{RR_{\text{вх}}}{nr_{\text{вх}}^2} \right)$;

φ — коэффициент заполнения сопла $\varphi = 1 - \left(\frac{rm}{R} \right)^2$;

ξ — коэффициент трения жидкости о стенки камеры, в диапазоне.

$$10^4 < \text{Re} < 10^5 - \lg \xi = \frac{25,8}{(\text{eg } \text{Re}^{25,4})} - 2, \quad \text{Re} = \frac{V_{\tau R} 2R}{\nu}$$

($V_{\tau R}$ — тангенциальная составляющая скорости первичного потока на стенке сопла).

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/м³) 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/м³), 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.