

новки и решения получим:

$$H_1(i\omega) = \frac{\hat{c}_1 + \hat{c}_2 - m_2\omega^2 + bi\omega}{(\hat{c}_1 - m_1\omega^2) \cdot (\hat{c}_1 + \hat{c}_2 - m_2\omega^2 + bi\omega) - \hat{c}_1^2}; \quad (19)$$

$$H_2(i\omega) = \frac{\hat{c}_1}{(\hat{c}_1 - m_1\omega^2) \cdot (\hat{c}_1 + \hat{c}_2 - m_2\omega^2 + bi\omega) - \hat{c}_1^2}. \quad (20)$$

Спектральные плотности и взаимная спектральная плотность процессов $q_1(t)$ и $q_2(t)$ будут вычисляться по следующим формулам:

$$S_{q_1}(\omega) = |H_1(i\omega)|^2 \cdot S_F(\omega); \quad (21)$$

$$S_{q_2}(\omega) = |H_2(i\omega)|^2 \cdot S_F(\omega); \quad (22)$$

$$S_{q_1q_2}(\omega) = |H_1(-i\omega)| \cdot |H_2(i\omega)| \cdot S_F(\omega). \quad (23)$$

Дисперсии и коэффициент корреляции процессов $q_1(t)$ и $q_2(t)$ будут выражаться следующими интегралами:

$$s_{q_1}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{q_1}(\omega) d\omega; \quad s_{q_2}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{q_2}(\omega) d\omega; \quad s_{q_1q_2} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{q_1q_2}(\omega) d\omega.$$

Теперь по формулам (16) и (17) определяем величины \hat{c}_1 и \hat{c}_2 , а по формулам (19) и (20) – передаточные функции. После этого по формулам (21), (22) и (23) находим спектральные плотности и взаимную спектральную плотность выходных случайных процессов $q_1(t)$ и $q_2(t)$. Рассматриваемую задачу можно считать решенной.

Таким образом, показано, что метод статистической линеаризации в динамике нелинейных систем с конечным числом степеней свободы эффективен и вполне реализуем.

Литература

1. Вибрации в технике: Справочник в 6 т. Т. 1. Колебания линейных систем /Под ред. В.В. Болотина. – М.: Машиностроение, 1999. – 504 с.
2. Гусев А.С. Вероятностные методы в механике машин и конструкций. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 223 с.
3. Гусев А.С. Расчет конструкций при случайных воздействиях /А.С. Гусев, В.А. Светлицкий. М.: Машиностроение, 1984. -240 с.
4. Щербаков В.И. Избранные задачи по динамике механических систем и конструкций /В.И. Щербаков, И.С. Чабунин, С.А. Стародубцева. М.: МГТУ «МАМИ», 2010. – 288с.

Закрученные струи за лопаточными завихрителями в свободном пространстве и в камере сгорания ГТД

к.т.н. доц. Эммиль М.В.
Университет машиностроения
8 (495) 223-05-23, доб. 1054

Аннотация. Рассматривается течение закрученного потока воздуха за кольцевыми лопаточными завихрителями в свободном пространстве и в жаровой трубе камеры сгорания ГТД. Представлены профили скоростей и показана интенсивность турбулентности в различных зонах жаровой трубы камеры сгорания.

Ключевые слова: закрученные струйные течения, профили скоростей, турбулентность, жаровая труба камеры сгорания

Закрученные струйные течения широко используются в различных устройствах для сжигания топлива. Закручивание потока воздуха в камере сгорания интенсифицирует процессы турбулентного смешения и, следовательно, процессы горения, поскольку основное влияние на них оказывают газодинамические факторы. Закрутка потока является простым и

эффективным средством изменения формы и размеров пламени. Учитывая сложность измерений ввиду пространственного течения и высокого уровня турбулентности закрученного потока, а также сложность теоретического исследования из-за наличия в уравнениях движения градиентов давления и рейнольдсовых напряжений трения, накопление экспериментальных данных имеет большое значение. В данной статье приводятся результаты исследования течения сильно закрученных струй за кольцевыми лопаточными завихрителями в свободном пространстве и в модели камеры сгорания ГТД, которые проводились автором в московском авиационном институте.

В опытах использовались лопаточные завихрители с углами установки лопаток по отношению к оси потока 65 и 75 градусов. Втулочное отношение обоих завихрителей равнялось 0,5, то есть завихрители были геометрически подобны. Расход воздуха в опытах составлял 0,003 – 0,130 кг/с. Измерения скорости проводились полусферическими насадками с диаметрами головки 6 и 10 мм, которые тарировались в потоке за соплом Витошинского, вторичными приборами являлись спиртовые микроанометры ММН. Измерение турбулентных пульсаций проводилось в модели камеры сгорания ГТД термоанемометром ЭТА-5А.

В приосевой области сильно закрученных турбулентных струй возникает зона обратных токов, основной причиной появления которой является центробежный эффект, развивающийся в поле течения. Центробежный эффект заключается в том, что при закрутке потока давление в центральной зоне струи понижается и появляющийся в связи с этим градиент давления вызывает силу давления, которая противодействует центробежной силе в каждом сечении струи.

Частица жидкости на выходе из завихрителя удерживается в равновесии благодаря действию сил давления и сил турбулентной вязкости (действие турбулентных напряжений трения). При этом условие неразрывности потока не позволяет образоваться вакууму в центральной части струи, а приводит к появлению радиальных перетеканий жидкости и образованию зоны циркуляции. Математически условие равновесия турбулентного закрученного потока выражается уравнением для радиальной составляющей скорости в системе уравнений Рейнольдса.

Картина линий тока в поле течения сильно закрученной струи показана на рисунке 1. Линии тока, представляющие собой линии равных расходов, рассчитаны путём графического интегрирования полей осевых скоростей. Центр зоны циркуляции находится на безразмерном расстоянии $x/R = 0,75$ от завихрителя (x – расстояние до центра циркуляции, R – наружный радиус завихрителя), что соответствует исследованиям, представленным в работе [5].

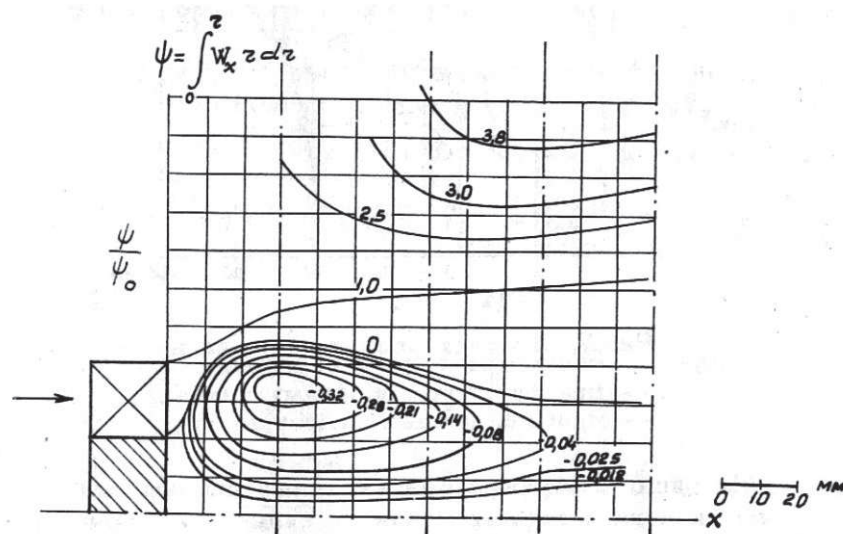


Рисунок 1. Линии тока в зоне циркуляции. Завихритель с $\phi = 65^\circ$, $R = 40$ мм

Из рассмотрения картины линий тока на рисунке 1 следует, что радиальные скорости в зоне циркуляции в сечениях правее центра вихря должны иметь характерный профиль. На внешней границе там, где окружающий воздух втекает в пограничный слой, линии тока рас-

полагаются вертикально, а радиальная скорость w_r должна иметь отрицательное значение. Далее, вниз по сечению, вследствие общего расширения струи линии тока наклонены вверх, в сторону внешней границы струи, а радиальные скорости имеют положительные значения. В области между основным и обратным течениями радиальные скорости отрицательны, что и обеспечивает расход обратного тока. У оси потока вследствие горизонтального положения линий тока и симметрии потока радиальная скорость равна нулю.

На рисунке 2 приведены профили осевых w_x и радиальных w_r скоростей для двух первых сечений в области развитого обратного тока, измеренные в струе, представленной на рисунке 1. Вид профилей соответствует линиям тока и приведённым выше соображениям, основанным на физической картине течения. Следует отметить, что точное измерение радиальных составляющих вектора скорости в турбулентном потоке задача трудно достижимая, поскольку реальные условия измерений не соответствуют условиям тарировки пятидырчатого насадка. Тем не менее, повторяемость в опытах была вполне удовлетворительной. Расхождение экспериментального профиля w_r с ожидаемым около оси струи вызывается погрешностями измерений в условиях высокой турбулентности. Подобный вид профиля радиальной скорости приводится также в работе [5].

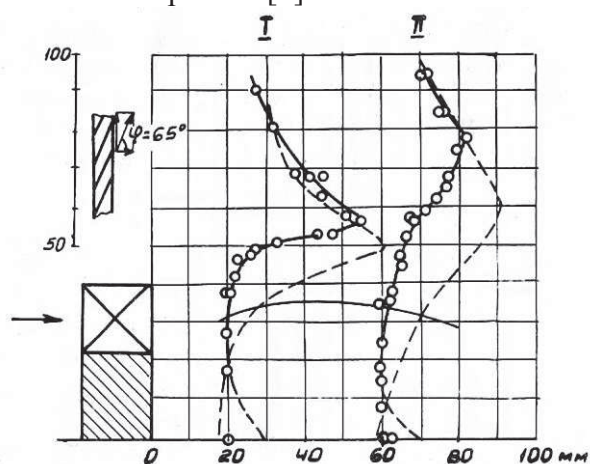


Рисунок 2. Профили осевых и радиальных скоростей в зоне циркуляции:
пунктир – профили w_x , точки – результаты измерений w_r , сплошная пологая линия – граница зоны обратных токов

В работе [3] представлен безразмерный профиль избыточной скорости в двух первых сечениях сильно закрученной струи, показанной выше на рисунке 1, то есть в области зоны обратных токов, который практически совпадает с безразмерной кривой в начальном участке осесимметричной затопленной струи по данным Г.Н. Абрамовича [1]. Подобные результаты были получены в камере сгорания ГТД А.И. Михайловым и др. [2].

Для изучения влияния закрутки потока на интенсивность смешения в струе были поставлены специальные опыты, в которых воздух подогревался до температуры 50°C . Такой низкий подогрев позволял считать струю изотермической и в то же время давал возможность с помощью простых измерений температуры термопарой хромель – копель получить интересные результаты по интенсивности перемешивания в закрученных струях.

Как видно из протекания кривых на графике (рисунок 3), закрутка потока сильно влияет на величину отношения $\frac{t_{max}}{t_0}$, где t_0 – начальная температура потока на выходе из завихрителя. Такая косвенная характеристика интенсивности смешения в закрученном потоке подтверждается измерениями уровня турбулентности в камере сгорания авиационного ГТД и в натурной модели камеры сгорания, которые проводились автором с использованием аппаратуры термоанемометра ЭТА-5А с одноточечным датчиком толщиной 19 мкм. Измерения проводились ряд лет назад и результаты ранее не публиковались. Измерения такой устаревшей аппаратурой позволяли получить только "суммарную" величину интенсивности пульсаций, то есть сигнал получали при расположении нити перпендикулярно вектору скорости. Результаты разделения пульсаций методом трёх

поворотов нити в этой статье не представлены. Интенсивность турбулентности – это отношение среднеквадратичной величины пульсации скорости, которая осредняется термоанемометром, к средней скорости в точке измерения $\varepsilon = \frac{w'}{w}$.

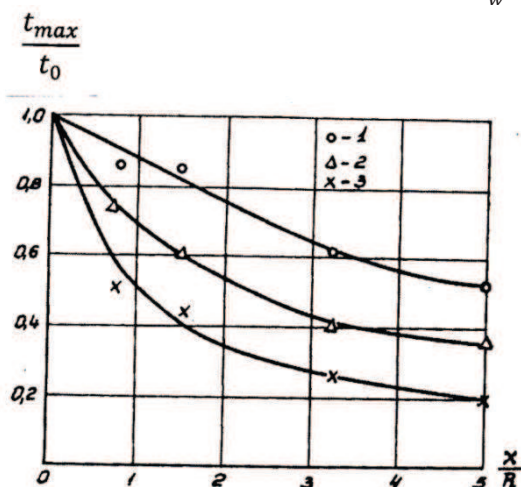


Рисунок 3. Затухание максимальных значений температур в свободной закрученной струе: 1 – $\varphi = 45^\circ$, 2 – $\varphi = 65^\circ$, $\varphi = 75^\circ$

Местная интенсивность турбулентности характеризует общий уровень турбулентности и позволяет оценить влияние на него особенностей газовой динамики в различных зонах камеры сгорания. Представленные ниже результаты позволяют оценить интенсивность смешения в камере сгорания с качественной стороны, поскольку остаются неизвестными численные значения напряжений турбулентного трения и коэффициенты турбулентной диффузии.

На рисунке 4 приведён график распределения интенсивностей турбулентности в модели камеры сгорания ГТД с лопаточным завихрителем.

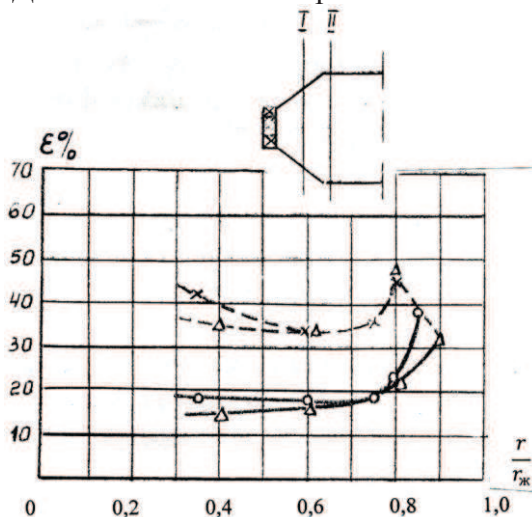


Рисунок 4. Характеристики интенсивности турбулентности в натурной модели камеры сгорания; I сечение: пунктир $x - \varepsilon_w$, сплошная $o - \varepsilon_{wmax}$; II сечение: пунктир $\Delta - \varepsilon_w$, сплошная $\Delta - \varepsilon_{wmax}$

Как видно на графике (рисунок 4), максимальная величина интенсивности турбулентности равна 48%. Величина интенсивности турбулентности, отнесённая к максимальной в сечении средней скорости, обозначена на рисунке 5 сплошной линией. Максимальное значение этой величины находится вблизи границы зоны обратных токов.

На рисунке 5 показан профиль величины интенсивности турбулентности в сечении $\frac{x}{R} \approx 7$ за сечением ввода струй вторичного воздуха. Максимальный уровень турбулентных пульсаций, как видно на графике, составляет 27%, что меньше, чем в головной части камеры

сгорания. Измерения проводились в двух сечениях – за боковой струёй и между двумя боковыми струями в соседних сечениях.

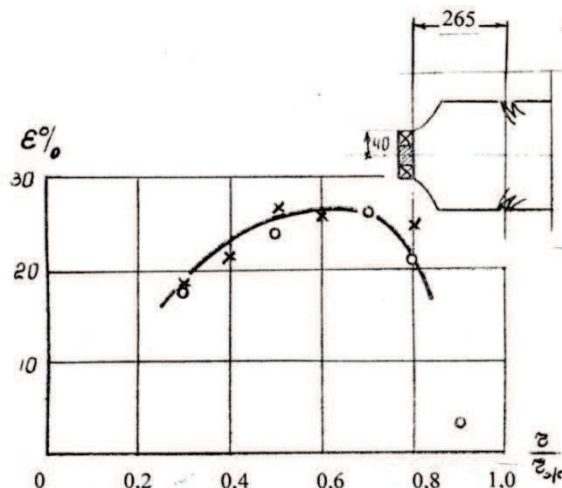


Рисунок 5. Распределение интенсивности турбулентности в зоне втекания струй вторичного воздуха: о – сечение за доковой струёй, х – сечение между боковыми струями

Как видно на графике (рисунок 5), различий в величине интенсивности турбулентности практически нет, что объясняется выравниванием уровня турбулентных пульсаций до сечения замера. Сравнительные измерения проводились в жаровых трубах с боковыми отверстиями диаметрами 20, 40 и 60 мм, при этом расход через все девять боковых отверстий не менялся и, следовательно, менялись только скорости истечения боковой струи в сносящий поток. Максимум интенсивности турбулентности соответствует относительному шагу отверстий $\bar{t} = \frac{t}{d_0}$, где d_0 – диаметр бокового отверстия.

Выводы

1. Исследована газодинамическая структура сильно закрученного потока в свободном пространстве. Показано, что особенностью сильно закрученной струи является наличие в приосевой области зоны циркуляции с зоной обратных токов.
2. Проведены измерения интенсивности турбулентности в камере сгорания ГТД. Результаты опытов показали существенное увеличение уровня турбулентности в закрученном потоке, достигающее 50%, по сравнению с обычными прямыми струями (~ 12%).

Литература

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976, 888 с.
2. Михайлов А.И., Горбунов Г.М. и др. Рабочий процесс и расчёт камер сгорания газотурбинных двигателей. М.: Оборонгиз, 1959, 285 с.
3. Эммиль М.В. Закрученные струи за кольцевыми лопаточными завихрителями. Исследование двухфазных, магнитогидродинамических и закрученных турбулентных струй. Труды МАИ, выпуск 248, М. 1972. – С. 93-100.
4. Горбунов Г.М., Эммиль М.В. Закрученные струи за кольцевыми лопаточными завихрителями в камере сгорания ГТД. Исследование двухфазных, магнитогидродинамических и закрученных турбулентных струй. Труды МАИ, выпуск 248, М. 1972. – С. 84 – 92.
5. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. Перевод с английского. М., МИР, 1986. 566 с.
6. Chigier N.A., Beer J.M. Trans. ASME, v.86, № 4, 1964.