

# Вырождение интенсивности турбулентности потока при различных числах Re

Непомнящий А.Д., Маслов В.П., Сунцов С.В.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: adnepomnyashchiy@ciam.ru

Приведены результаты измерения интенсивности турбулентности потока в аэродинамической трубе стенда ЦИАМ при разных значениях числа Рейнольдса (при полном давлении в аэродинамической трубе  $p_0^* = 0,2 \dots 0,8$  бар и приведенной скорости потока  $\lambda = 0,1 \dots 0,5$ ). Измерения выполнены при помощи термоанемометра. Показано, что скорость вырождения турбулентности зависит от Re. Показано также, что скорость вырождения турбулентности, определяемая степенным законом « $-5/7$ », не является универсальной характеристикой турбулентности.

**Ключевые слова:** турбулентность, интенсивность турбулентности, вырождение турбулентности, число Рейнольдса, термоанемометр

## Turbulence decay at various Reynolds numbers

Nepomnyashchiy A.D., Maslov V.P., Suntsov S.V.

CIAM, Moscow

The article presents measurements of a flow's turbulence intensity in the wind tunnel at CIAM's test facility at different values of the Reynolds number (at full pressure in the wind tunnel  $p_0^* = 0,2 \dots 0,8$  bar and reduced velocity  $\lambda = 0,1 \dots 0,5$ ). The measurements were carried out using a thermoanemometer. It is further shown that the rate of turbulence decay, determined by the power law “ $-5/7$ ”, is not a universal characteristic of turbulence.

**Keywords:** turbulence, turbulence intensity, turbulence decay, Reynolds number, thermoanemometer

Характеристики турбомашин (компрессоров и турбин) зависят не только от их режимных параметров, но и от условий работы, в частности от параметров турбулентности потока. Однако процессы генерации и вырождения турбулентности в проточной части лопаточных машин до сих пор не изучены, особенно в области низких значений числа Рейнольдса (Re).

Проектирование турбомашин сопровождается моделированием течений с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD). При моделировании турбулентных параметров потока в CFD применяют полуэмпирические модели турбулентности, которые являются всего лишь моделями и достоверно не отражают процессы генерации и вырождения турбулентности. Достоверное определение турбулентных параметров потока, процессов генерации и вырождения турбулентности в проточной части турбомашин важно для валидации программного обеспечения, используемого в процессе проектирования. Достоверное CFD-моделирование турбулентных параметров потока в проточной части – залог

достоверного CFD-прогнозирование характеристик турбомашин, особенно в области низких значений Re [1].

Ниже приведены результаты исследования вырождения турбулентности воздушного потока в аэродинамической трубе стенда ЦИАМ. Интенсивность турбулентности потока измеряли посредством многоканального термоанемометра Streamline Pro (Dantec Dynamics) с однокомпонентными датчиками-зондами 9055P0111, диаметр чувствительного элемента 5 мкм. Измерения выполняли методом постоянной температуры. Все используемые зонды термоанемометра прошли индивидуальную калибровку по скорости набегающего потока и Re [2]. Оцениваемая погрешность измерения интенсивности турбулентности – не более  $\pm 20\%$  измеряемой величины.

Исследование турбулентности потока выполняли при установке датчиков-зондов термоанемометра на разном удалении от хонейкомба, вниз по потоку: 99, 303, 403, 523 и 743 мм от края хонейкомба (пять позиций на рис. 1).

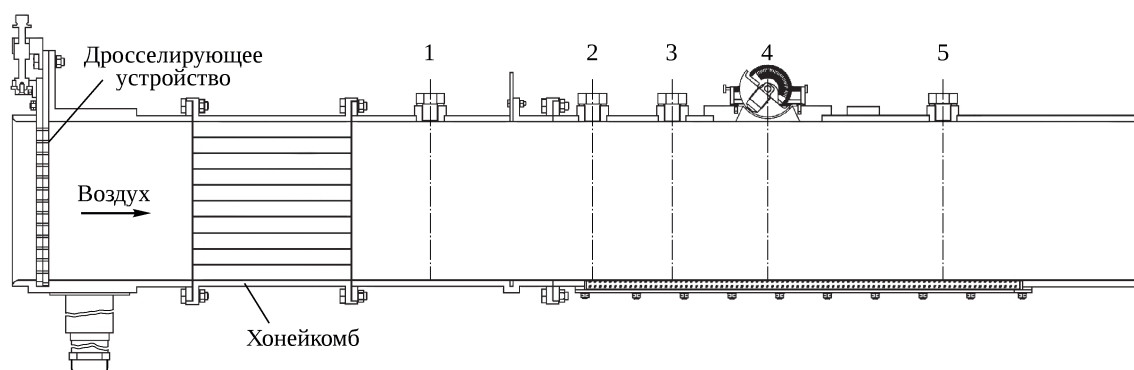


Рис. 1. Схема проточной части аэродинамической трубы

Размер проходного сечения аэродинамической трубы составляет  $220 \times 120$  мм. Толщина стенок хонейкомба составляет 1 мм, размер ячейки –  $19 \times 19$  мм (рис. 2), длина хонейкомба – 200 мм. Размеры ячеек хонейкомба были выбраны согласно принципу получения относительного удлинения данного узла не менее 10 калибров ячеек, чтобы устранить возможную начальную неравномерность/нестационарность потока на входе. Технологически минимально возможная толщина стенок ячеек 1 мм была выполнена с целью минимизации интенсивности газодинамических кромочных следов в потоке за хонейкомбом.

Исследование интенсивности турбулентности потока проводили в диапазоне полного давления в аэродинамической трубе  $p_0^* = 0,2 \dots 0,8$  бар, в диапазоне приведенной скорости потока  $\lambda = 0,1 \dots 0,5$ . При заданном полном давлении в рабочей области аэродинамической трубы варьировали приведенную скорость течения в указанном диапазоне. Полное давление поддерживали постоянным посредством регулирования дросселирующего устройства; приведенную скорость изменяли, регулируя перепуск воздуха.

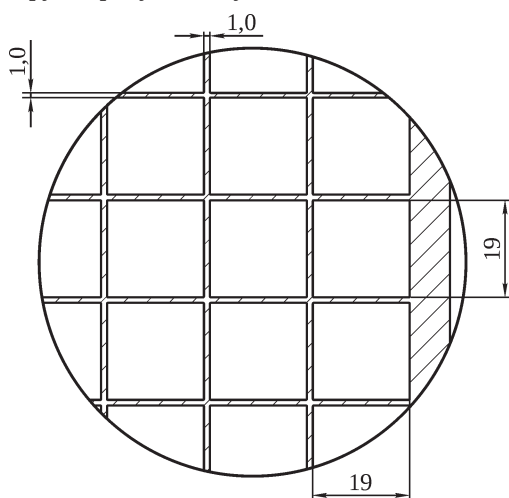


Рис. 2. Схема хонейкомба в поперечном сечении

На рис. 3 показана зависимость интенсивности турбулентности потока от числа Рейнольдса при различном положении датчика-зонда термоанемометра ( $Re$  определено по скорости набегающего потока и характерному размеру 10 мм; здесь и далее величина характерного размера 10 мм выбрана условно, как наиболее характерный размер измерительных приборов). Как было показано в [3],  $Re$  является автомодельным параметром для интенсивности турбулентности потока, поэтому приведенные зависимости описываются кривыми. Видно ожидаемое расслоение между кривыми, соответствующее вырождению турбулентности потока по длине аэродинамической трубы. Область слияния кривых  $Re < 5000$  указывает на почти полное отсутствие вырождения турбулентности в низкорейнольдсовых течениях (в высокоразрезанных средах) по длине канала.

Полученный результат измерения интенсивности турбулентности потока был перестроен в виде зависимости вырождения турбулентности потока по длине аэродинамической трубы при пяти значениях  $Re$  (рис. 4). Результат был аппроксимирован степенными функциями вида  $aX^b$ , где  $a$  – коэффициент;  $b$  – показатель степени;  $X$  – расстояние от края хонейкомба до положения замера в аэродинамической трубе, выраженное в калибрах.

В [4] указано, что турбулентность вырождается не по физической, а по относительной длине канала, определенной в калибрах. Калибр – величина возмущающего поток (генерирующего турбулентность) элемента, например диаметр прутьев, из которых составлена турбулизирующая сетка, или толщина перегородок [4]. Начальный размер возмущения в потоке соответствует калибру.

В настоящем исследовании калибр возмущающего элемента (хонейкомба) был выбран с учетом рекомендаций [4] равным 1 мм и использовался для построения всех аппроксимирующих кривых.

Если предположить, что в проведенном исследовании с уменьшением  $Re$  происходило изменение разме-

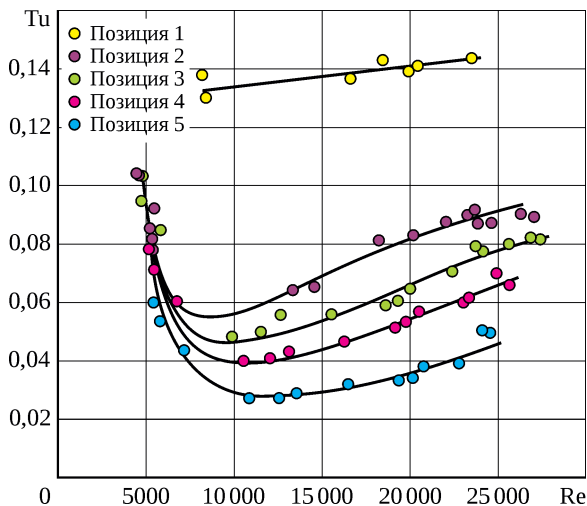


Рис. 3. Зависимость интенсивности турбулентности от числа Рейнольдса

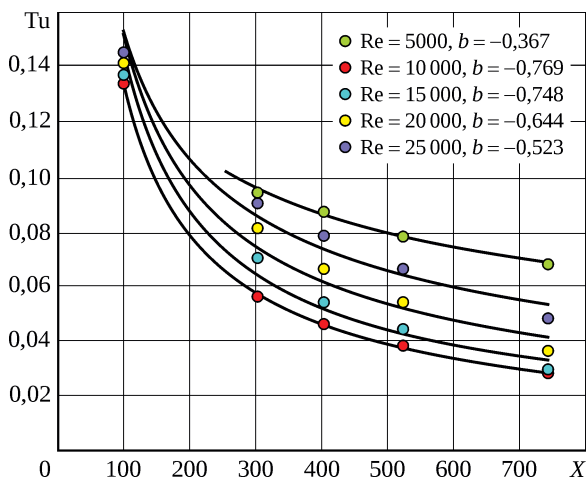


Рис. 4. Вырождение турбулентности по длине аэродинамической трубы

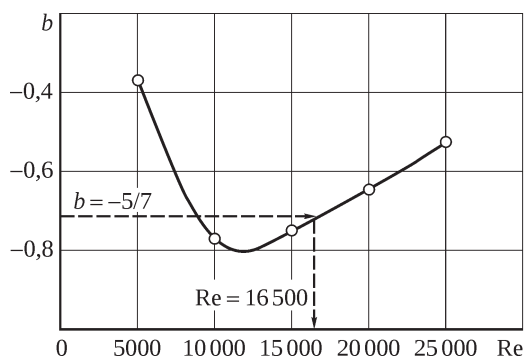


Рис. 5. Зависимость показателя степени аппроксимирующей функции от числа Рейнольдса

ров кромочных следов в потоке за хонейкомбом (изменение калибра), то, подобрав определенный калибр под каждое значение  $Re$  и перестроив полученные ре-

зультаты, можно получить единую степенную зависимость, с единым показателем степени. Однако на рис. 3 видно, что кривые смыкаются при одной величине интенсивности турбулентности и  $Re = 5000$ . Кроме того, при изменении калибра показатель степени аппроксимирующих кривых остается прежним, изменяется только коэффициент аппроксимирующей функции.

На рис. 5 приведена зависимость показателя степени аппроксимирующей функции – зависимость скорости вырождения турбулентности по длине аэродинамической трубы от числа Рейнольдса. В диапазоне  $Re = 5000 \dots 12\,000$  показатель степени убывает, в диапазоне  $Re = 12\,000 \dots 25\,000$  – увеличивается.

Необходимо отметить, что наиболее распространенной оценкой вырождения турбулентности с увеличением расстояния от источника является степенная зависимость с показателем степени  $-5/7$ . Она предлагается в качестве универсальной [4].

Степенная зависимость с показателем степени  $-5/7$  [4] была получена на основе обобщения результатов экспериментальных исследований, представленных в 33 работах разных авторов, использовавших турбулизирующие сетки восьми различных типов, и собственных исследований автора [4]. Опыты, проведенные для получения указанной зависимости, выполнялись в аэродинамических трубах при барометрическом полном давлении потока, приведенной скорости течения не более  $\lambda = 0,1$ , что соответствует  $Re = 20\,000$  (определено по характерному размеру 10 мм).

На рис. 5, согласно определенной зависимости показателя степенной функции вырождения турбулентности с изменением числа Рейнольдса, видно, что показатель степени  $-5/7$  (или  $-0,714$ ) соответствует  $Re = 16\,500$ , что близко к  $Re = 20\,000$ .

Таким образом, в настоящей работе получены следующие результаты:

- показано, что скорость вырождения турбулентности зависит от числа Рейнольдса: в диапазоне  $Re = 5000 \dots 12\,000$  она растет, а в диапазоне  $Re = 12\,000 \dots 25\,000$  снижается;

- показано, что скорость вырождения турбулентности, определяемая законом « $-5/7$ » [4], не является универсальной характеристикой турбулентности [4], а является всего лишь «срезом» обобщения опытов по определению вырождения турбулентности, полученного в потоках в определенных (неизменных) условиях.

Результаты исследования важны для настройки CFD-моделей, используемых в расчетах сложных течений, особенно в области течений с низкими значениями  $Re$ , для повышения достоверности расчетного определения характеристик турбомашин.

---

## Литература

1. Performances of LPT and linear cascades at low Reynolds numbers / A.D. Nepomnyashchiy, I.V. Tsvetkov, S.V. Suntsov, S.Y. Danilkin. 2018. 9 p. (31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences : Belo Horizonte, Brazil, September 9–14, 2018 ; ICAS 2018-652).
2. Хинце И.О. Турбулентность : Ее механизм и теория / пер. с англ. О.В. Яковлевского ; под ред. Г.Н. Абрамовича. М. : Физматгиз, 1963. 680 с.
3. Непомнящий А.Д., Маслов В.П. Измерение турбулентности при помощи высокочастотного зонда давления // Авиационные двигатели. 2021. № 3 (12). С. 63–71.
4. Roach P.E. The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids // International Journal of Heat and Fluid Flow. 1986. Vol. 8, iss. 2. P. 82–92.

## References

1. Performances of LPT and linear cascades at low Reynolds numbers / A.D. Nepomnyashchiy, I.V. Tsvetkov, S.V. Suntsov, S.Y. Danilkin. 2018. 9 p. (31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences : Belo Horizonte, Brazil, September 9–14, 2018 ; ICAS 2018-652).
2. Hinze J.O. Turbulence. An introduction to its mechanism and theory. London, McGraw-Hill, 1959. ix + 586 p. (McGraw-Hill series in mechanical engineering).
3. Nepomnyashchiy A.D., Maslov V.P. Turbulence measurements by means of a fast-response pressure probe. Aviatzionnye dvigateli [Aviation Engines]. 2021. No. 3 (12). P. 63–71.
4. Roach P.E. The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids // International Journal of Heat and Fluid Flow. 1986. Vol. 8, iss. 2. P. 82–92.

*Материалы получены редакцией 11.05.2022*