

03.1

## Флуктуации скорости в эксперименте Рейнольдса при малой надкритичности

© В.В. Леманов, В.В. Лукашов, К.А. Шаров

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия  
E-mail: sharov\_konstantin@rambler.ru

Поступило в Редакцию 7 сентября 2023 г.

В окончательной редакции 27 октября 2023 г.

Принято к публикации 7 ноября 2023 г.

Представлены результаты исследования распределения флуктуаций скорости в эксперименте Рейнольдса при малой надкритичности  $n = 0-0.3$ . Показано, что для перемежаемого течения в диапазоне коэффициентов перемежаемости  $\gamma = 0.5-0.85$  распределение пульсаций по сечению круглой трубы имеет три максимума. Полученные результаты хорошо согласуются с более ранними теоретическими оценками.

**Ключевые слова:** ламинарно-турбулентный переход, эксперимент Рейнольдса, малая надкритичность, перемежаемость, турбулентные структуры.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.03.57039.19725

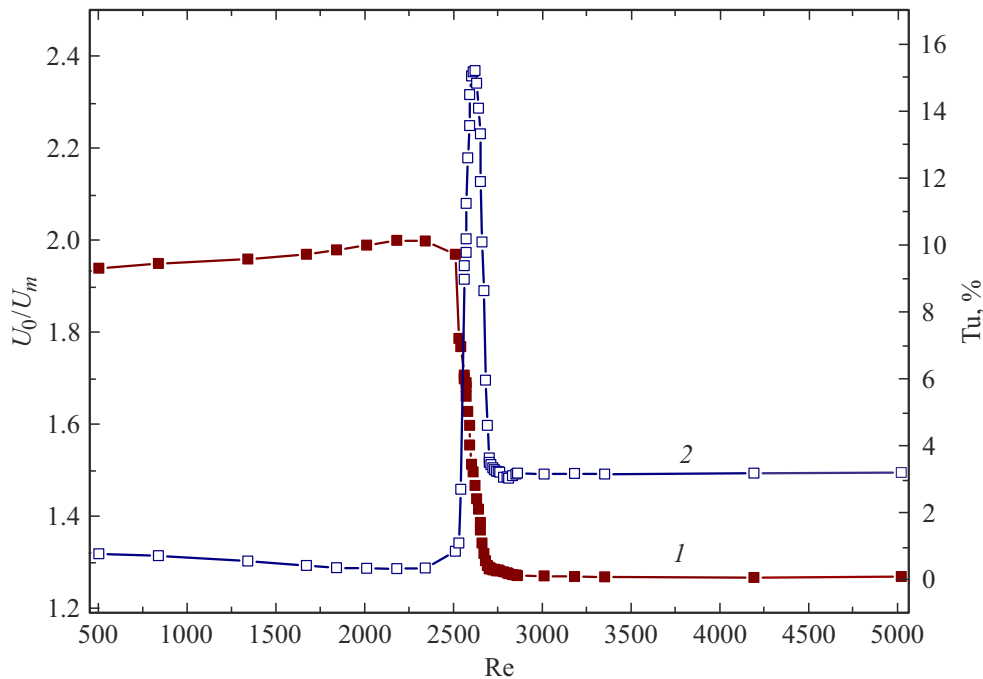
В последние годы в изучении ламинарно-турбулентного перехода достигнут существенный прогресс [1] при исследовании течения в трубах, где реализуется сценарий с перемежаемостью. Обнаружена аналогия с критическими явлениями в физике [2]. В связи с этим широко используется параметр надкритичности, характеризующий превышение актуального значения физического параметра над его критическим показателем. Такой подход используется в конвекции Рэлея–Бенара, в ячейке Тейлора–Куэтта, в течении на пластине, где в качестве физического параметра используются числа Рэлея, Тейлора, Рейнольдса [3]. В ходе современных исследований в трубах в основном изучались внутренняя структура единичных турбулентных областей (здесь и далее имеются в виду структуры типа „puff“) и взаимодействие их между собой [1]. Вместе с тем для расчета коэффициентов тепло- и массообмена в каналах в режиме перехода к турбулентности часто востребованы статистические характеристики течения, например распределение пульсаций скорости по сечению трубы.

Такая задача впервые рассматривалась в работе [4] с использованием параметра перемежаемости  $\gamma = T_i/T$ , где  $T_i$  — суммарное время, которое на осциллограмме занимает турбулентная часть,  $T$  — общее время выборки. Расчет проводился исходя из соображения, что в перемежаемом течении ламинарных и турбулентных областей потока профиль средней скорости соответственно перестраивается от ламинарного профиля к развитому турбулентному и наоборот. Это перестройка задает профиль распределения пульсаций скорости в поперечном сечении канала. Распределение пульсаций рассчитывалось для  $\gamma = 0.5$ , при этом одну половину времени выборки профиль средней скорости развитый турбулентный, а другую (в промежутке между турбулентными частями) — ламинарный (Пуазейля). Расчет

показал, что распределение интенсивности пульсаций по радиусу имеет три локальных максимума (возле стенок и на оси трубы), т.е. было получено трехмодовое распределение. Как оказалось, в рассмотренном случае степень турбулентности на оси значительно выше, чем в ламинарном или турбулентном режиме течения.

В дальнейшем экспериментально [5,6] и численно [7] было показано, что профиль средней скорости внутри единичной турбулентной области быстро эволюционирует к профилю, характерному для развитого турбулентного течения. Максимальный рост турбулентных пульсаций наблюдается в пристенной области трубы, а на оси их рост минимален. В этих работах трехмодовое распределение пульсаций скорости не обнаружено. В опытах [8] отмечалось появление трех максимумов в распределении пульсаций скорости, а также ее повышенные значения на оси трубы в режиме перемежаемого течения, но анализа полученных данных проведено не было. Исследованию распределения пульсаций скорости по сечению канала при малых значениях параметра надкритичности  $n = (Re - Re_{cr})/Re_{cr}$  в режиме перемежаемого течения посвящена настоящая работа. Здесь  $Re_{cr}$ ,  $Re = U_m d/\nu$  — критическое и текущее значения числа Рейнольдса ( $U_m$  — среднерасходная скорость газа через трубку диаметром  $d$ ;  $\nu$  — кинематическая вязкость).

Экспериментальная установка состояла из рабочего участка, системы подачи рабочего газа, системы измерения. Рабочий участок представлял собой цилиндрическую трубку длиной более 100 диаметров, к которой подводился рабочий газ. Расход газа устанавливался регулятором фирмы Bronkhorst. Измерения динамических параметров течения осуществлялись на выходе из трубки. Для измерений использовались термоанемометр фирмы DISA постоянной температуры DISA 55M с



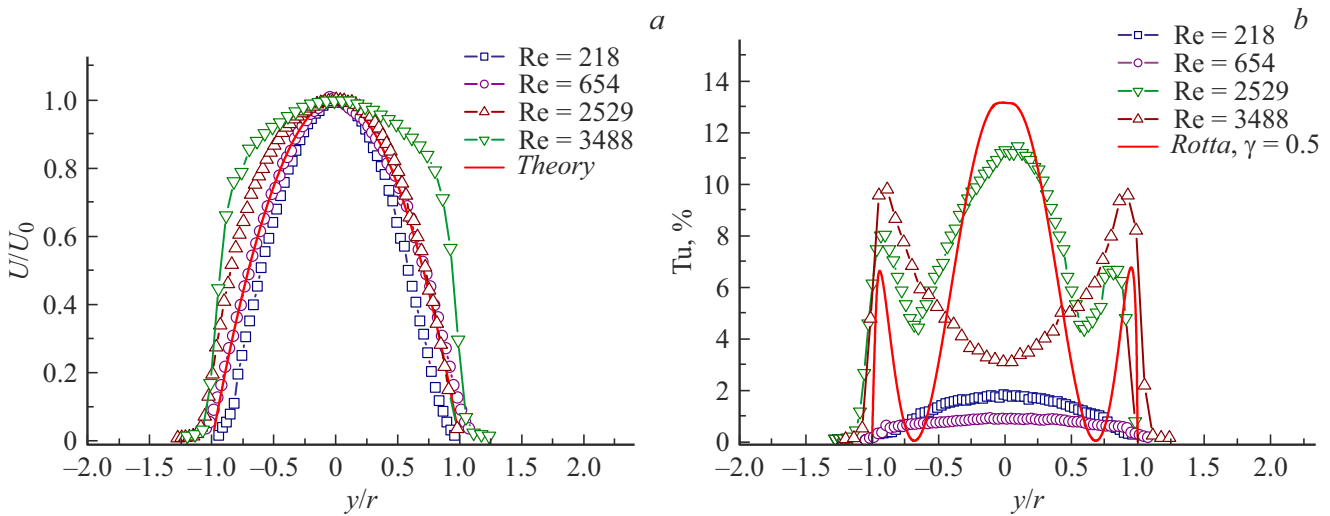
**Рис. 1.** Динамика изменения средней скорости  $U_0/U_m$  (1) и степени турбулентности  $Tu$  (2) в зависимости от числа Рейнольдса (воздух,  $d = 3.2$  mm).

одноточным миниатюрным датчиком DISA 55P11 и PIV-система (PIV — particle image velocimetry), состоящая из скоростного импульсного лазера Photonics DM компании Laser Photonics и камеры Photron SA5 (матрица 4 Mpix) фирмы Photron, Ltd для скоростной съемки. Видеосъемка в экспериментах проводилась с частотой 7 kHz. Истечение из трубки происходило в проточный канал. При измерениях термоанемометром использовалась латунная трубка диаметром  $d = 3.2$  mm, в случае PIV-измерения трубка была изготовлена из алюминия и имела диаметр  $d = 8$  mm. Для термоанемометрических измерений в качестве рабочего газа использовался воздух из магистрали высокого давления. PIV-измерения выполнялись в потоке  $CO_2$ , подаваемого из баллона. Газ  $CO_2$ , подаваемый в канал, предварительно проходил через генератор аэрозоля, в котором засеивался мелкими каплями глицерина диаметром 3–5  $\mu m$ , используемыми в качестве трассеров для PIV. Измерения термоанемометром проводились в диапазоне скоростей на оси 5–30 m/s ( $Re = 500–5000$ ), при PIV-измерениях скорость менялась в диапазоне 4–5 m/s ( $Re = 2400–3000$ ). Числа Маха в наших экспериментах не превышали  $M = U/c = 0.073$  (где  $c$  — скорость звука), турбулентные числа Маха [9] составляли  $M_t = u/c = 0.011$  для воздуха ( $u$  — среднеквадратичное значение пульсаций скорости) и  $M_t = 0.0022$  для  $CO_2$ . Вследствие  $M_t < 0.1$  эффектами сжимаемости пренебрегали [9]. Термодинамические параметры в начале струи соответствовали атмосферному давлению и комнатной температуре.

Сначала были проведены исследования динамики изменения средней скорости и пульсаций на оси трубки при вариации числа  $Re$  от соответствующего ламинарному течению до характерного для полностью развитого турбулентного течения. Измерения проводились с помощью термоанемометра, датчик располагался на расстоянии  $x = 0.3$  mm от среза трубки. Результаты измерений представлены на рис. 1.

На рисунке  $U_0$  — скорость газа в выходном сечении трубки на оси,  $Tu = (u/U_0) \cdot 100\%$  — степень турбулентности. Представление динамики средней скорости на оси в координатах  $U_0/U_m - Re$  при ламинарно-турбулентном переходе приведено в [10]. Как видно из рисунка, отношение скоростей при  $Re = 2511$  начинает резко снижаться и выходит на практически постоянное значение при  $Re = 2625$ . В этом диапазоне в трубке наблюдалось перемежаемое течение. Степень турбулентности также растет, достигает максимума при  $Re = 2620$ , а затем резко снижается. Максимальное значение  $Tu = 15.2\%$  намного больше, чем в ламинарном режиме течения в трубе ( $Tu \sim 1.2\%$ ) и турбулентном режиме ( $Tu \sim 3.2\%$ ). Такое поведение пульсаций при ламинарно-турбулентном переходе в трубах хорошо известно [11].

Далее были получены профили средней скорости и турбулентных пульсаций в том же сечении на выходе из трубки. Результаты измерений приведены на рис. 2. Здесь  $r = d/2$  — радиус трубки,  $y$  — координата с началом в центре канала. Распределения средних скоростей (рис. 2, a) при числах  $Re$  менее 3488 хорошо



**Рис. 2.** Распределение средней скорости (a) и степени турбулентности  $Tu$  (b) в зависимости от числа  $Re$  (воздух,  $d = 3.2$  mm). Теория — профиль Пуазейля, Rotta — расчет по методике [4].

описываются теоретической зависимостью для профиля Пуазейля. Это означает, что ламинарное течение в этих режимах преобладает. С достижением числа  $Re = 3488$  профиль средней скорости изменяется и принимает вид, соответствующий развитому турбулентному течению в трубке.

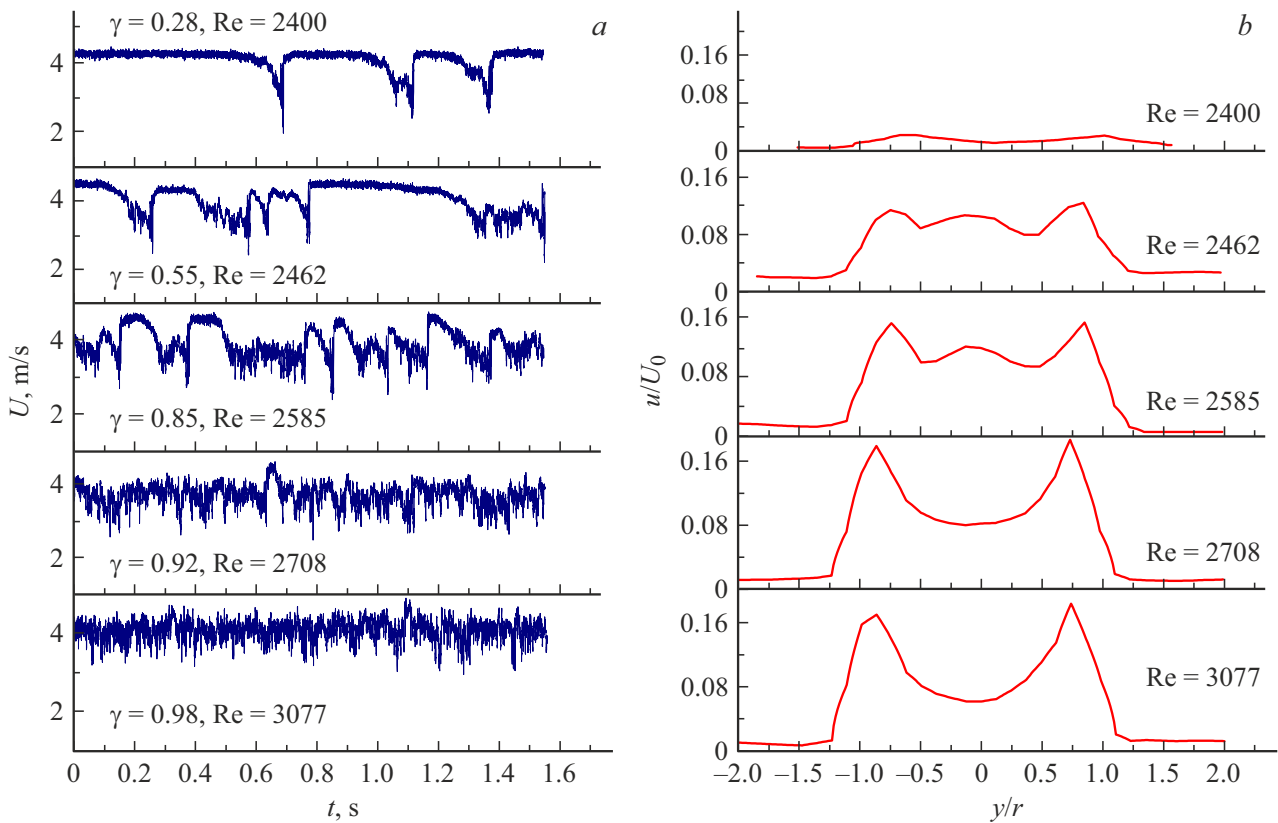
Распределения степени турбулентности на выходе из трубки приведены на рис. 2, b. При числах  $Re = 218–654$  распределение имеет максимум на оси струи. Значение степени турбулентности в максимуме немного снижается с ростом числа  $Re$ , что характерно для ламинарных течений в соплах и каналах. С достижением числа  $Re = 2529$  происходит значительный рост пульсаций в трубке, и вид распределения меняется. На распределении появляются три максимума, наибольший расположен на оси. Дальнейшее увеличение  $Re$  приводит к снижению интенсивности пульсаций на оси канала и ее увеличению в пристенных областях. С достижением  $Re = 3488$  распределение пульсаций принимает вид, характерный для развитого турбулентного течения в трубке.

На рисунке также приведен расчет по методике [4] распределения пульсаций скорости в предположении о перестройке профиля средней скорости в перемежаемом течении. В ламинарной части потока принимался профиль Пуазейля  $U_L/U = 2[1 - (y/r)^2]$ , где  $y$  — поперечная координата, отсчитываемая от оси. В турбулентной части течения профиль скорости имел вид  $U_T/U = 1 + (\lambda/8)^{0.5}[5.75 \lg(1 - y/r) + 3.75]$ , где  $\lambda$  — коэффициент сопротивления трубы. Пульсации скорости определялись по формуле  $u = \gamma(1 - \gamma)(U_L - U_T)^2$  [4]. Как видно из рисунка, расчет для  $\gamma = 0.5$  согласуется с распределением в опыте для  $Re = 2529$ .

Как можно понять из рис. 2, перемежаемость слабо влияет на распределение средних скоростей тече-

ния в трубке, однако серьезным образом модифицирует распределение пульсаций скорости в сечении трубки. Распределение пульсаций определяется количеством турбулентных областей (puff) в трубном течении. Это утверждение иллюстрирует рис. 3, на котором представлены распределения пульсаций скорости по сечению трубки и соответствующие им распределения мгновенных скоростей на оси трубки по времени, измеренные с помощью скоростного PIV, которые позволяют определить наличие puff в потоке.

Турбулентные структуры типа puff имеют характерный профиль мгновенной скорости по времени на оси трубы с плавным передним и крутым задним фронтом [1]. Преимущество скоростного PIV состоит в том, что он позволяет получить распределения пульсаций по сечению и одновременно осциллограмму на оси, соответствующую этому распределению. По осциллограммам было определено наличие структур типа puff в потоке и найден коэффициент перемежаемости  $\gamma$ . В данных экспериментах первые турбулентные пробки появились при числе  $Re = 2350$ . Это число Рейнольдса мы принимаем за  $Re_{cr}$  ( $n = 0$ ,  $\gamma = 0$ ). Как видно из рис. 3, наличие в ламинарном течении при параметре надкритичности  $n = 0.02$  единичных турбулентных структур ( $\gamma = 0.28$ ,  $Re = 2400$ ) (рис. 3, a) не приводит к существенным изменениям распределения пульсаций ( $Re = 2400$ ) (рис. 3, b). Увеличение скорости приводит к росту количества турбулентных структур, и при достижении  $Re = 2462$  примерно половину времени на осциллограмме занимает турбулентная часть ( $\gamma = 0.55$ ,  $n = 0.05$ ). При этом становится заметен максимум пульсаций на оси, возле стенок турбулентность также растет. С увеличением числа  $Re$  до значения  $Re = 2585$  ( $\gamma = 0.85$ ,  $n = 0.1$ ) максимум на оси сохраняется. Дальней-



**Рис. 3.** Осциллограмма мгновенной скорости (a) и распределение пульсаций скорости (b) в зависимости от числа  $Re$  (PIV,  $CO_2$ ,  $d = 8$  mm,  $x = 6$  mm).

шее увеличение чисел  $Re = 2708–3077$  ( $n = 0.15–0.3$ ) до соответствующих коэффициентам перемежаемости  $\gamma = 0.92–0.98$  приводит к распределению пульсаций, характерному для развитого турбулентного течения в трубках.

Результаты исследования в эксперименте Рейнольдса при малой надкритичности  $n = 0–0.3$  показали динамику распределения продольной компоненты флуктуаций скорости по радиусу трубки. В диапазоне  $n = 0–0.02$  оно характеризуется одним максимумом на оси трубки. Впервые показано, что в диапазоне коэффициентов перемежаемости  $\gamma = 0.5–0.85$  распределение пульсаций по сечению имеет три максимума (возле стенок и на оси трубки,  $n = 0.05–0.1$ ). При параметре надкритичности  $n > 0.1$  наблюдается течение с двумя экстремумами в пристенной области, характерное для развитого турбулентного течения в канале. Метод оценки турбулентных пульсаций скорости, предложенный Rotta [4] для переходного течения в трубках, может применяться в технических расчетах. Опытные данные по распределению флуктуаций скорости по сечению трубы рекомендуются для верификации методов расчета тепло- и массообмена в режиме ламинарно-турбулентного перехода в трубках, например в моделях с использованием коэффициента перемежаемости.

### Финансирование работы

Результаты получены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-79-30075).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] M. Avila, D. Barkley, B. Hof, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **55**, 575 (2023). DOI: 10.1146/annurev-fluid-120720-025957
- [2] H.Y. Shih, T.L. Hsieh, N. Goldenfeld, *Nat. Phys.*, **12**, 245 (2015). DOI: 10.1038/NPHYS3548
- [3] М.И. Рабинович, М.М. Суцник, УФН, **160** (1), 3 (1990). DOI: 10.3367/UFNr.0160.199001a.0003 [M.I. Rabinovich, M.M. Sushchik, *Sov. Phys. Usp.*, **33**, 1 (1990). DOI: 10.1070/PU1990v033n01ABEH002403].
- [4] J. Rotta, *Ing. Arch.*, **24**, 258 (1956). DOI: 10.1007/BF00536526
- [5] I.J. Wygnanski, F. Champagne, *J. Fluid Mech.*, **59**, 281 (1973). DOI: 10.1017/S0022112073001576
- [6] H. Li, R. Ewoldt, M.G. Olsen, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **29**, 435 (2005). DOI: 10.1016/j.expthermfluidsci.2004.06.001
- [7] A. Yakhot, Y. Feldman, D. Moxey, S. Sherwin, G.E. Karniadakis, *Flow Turbulence Combust.*, **103**, 1 (2019). DOI: 10.1007/s10494-018-0002-8

- [8] V.V. Lemanov, V.V. Lukashov, K.A. Sharov, R.Kh. Abdrakhmanov, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1105**, 012015 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012015
- [9] A.J. Smits, J.P. Dussauge, *Turbulent shear layers in supersonic flows* (Springer, N.Y., 2006).
- [10] T.E. Stanton, J.R. Pannel, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.*, **214**, 199 (1914). DOI: 10.1098/rsta.1914.0016
- [11] F. Durst, M. Fischer, J. Jovanovic, H. Kikura, *J. Fluids Eng.*, **120**, 496 (1998). DOI: 10.1115/1.2820690