

03

Ламинарно-турбулентный переход в гладком канале с местной закруткой потока

© В.М. Молочников, Н.Д. Пашкова, А.А. Паерелий

Федеральный исследовательский центр „Казанский научный центр РАН“, Казань, Россия
E-mail: vmolochnikov@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 февраля 2025 г.

В окончательной редакции 16 мая 2025 г.

Принято к публикации 16 мая 2025 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований слабо закрученного потока за лопаточным завихрителем в гладкой трубе при числах Рейнольдса осевого течения $Re = 240–1640$. Проанализировано изменение степени закрутки потока по длине трубы в зависимости от числа Рейнольдса. Обнаружены признаки локального ламинарно-турбулентного перехода в окрестности оси трубы и вблизи ее стенки: резкий рост среднеквадратичных пульсаций скорости с увеличением числа Рейнольдса и появление перемежаемости в осциллограммах скорости потока. Описан механизм локальной турбулизации потока вблизи стенки трубы.

Ключевые слова: закрутка потока, прецессия ядра вихря, ламинарно-турбулентный переход, перемежаемость течения, спектр пульсаций скорости, след за лопатками.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.15.60811.20299

Закрученный поток встречается во многих технических приложениях: теплообменниках, камерах сгорания реактивных двигателей, устройств сепарации и т.д. Закрутка потока позволяет интенсифицировать процессы тепло- и массообмена. Большинство исследований закрученных потоков выполнено для турбулентных режимов течения. Однако в последнее время существенно вырос интерес к ламинарным закрученным потокам, что связано, в частности, с растущими потребностями в микроканальных теплообменниках. В качестве устройств, обеспечивающих местную закрутку потока, часто используются лопаточные завихрители, вниз по потоку от которых степень закрутки снижается. Теоретически и экспериментально эта проблема изучалась в [1–5]. Получены аналитические выражения, описывающие уменьшение степени закрутки, выполнено исследование этого процесса при помощи численного моделирования [3]. Ряд исследований ламинарных закрученных потоков посвящен проблеме устойчивости формирующегося за завихрителем вихря, которая является общей для ламинарного и турбулентного режимов течений [6]. Для ламинарных течений основное внимание в таких исследованиях уделяется процессу разрушения прецессирующего вихревого ядра [7–10]. Вопросы ламинарно-турбулентного перехода закрученного потока в гладкой трубе практически не изучены.

В настоящей работе мы представляем результаты экспериментальных исследований ламинарно-турбулентного перехода в гладкой прямой трубе с внутренним диаметром $d = 17.4\text{ mm}$ после местной закрутки потока. Закрутка выполняется лопаточным завихрителем с четырьмя лопатками. Длина завихрителя вдоль оси канала $2d$. Угол установки лопаток на длине 4 mm ($0.23d$) от входа в завихритель составляет 0° , затем

переходит в 23° со скруглением 6 mm . На длине завихрителя лопатки делают оборот 0.23 витка. Толщина лопаток 1 mm , степень перекрытия потока лопатками 14% . Скругление передней и задней кромок лопаток выполнено эллиптическими кривыми с большой полуосью 2 и 3 mm соответственно. Центральное тело отсутствует.

Прямой предвключенный участок гладкой трубы обеспечивал перед завихрителем развитое ламинарное течение с профилем скорости, совпадающим с теоретическим профилем Пуазейля.

Эксперименты проводились в специализированной установке [11]. Расход жидкости через рабочий участок установки обеспечивался гидростатическим напором, создаваемым напорным баком с постоянным уровнем, и регулировался дозатором с системой сопел. В качестве рабочей жидкости использовался водный раствор глицерина с массовым процентным содержанием последнего 56.3% . Температура рабочей жидкости поддерживалась постоянной, ее кинематическая вязкость контролировалась перед каждым опытом. Были выполнены измерения мгновенных векторных полей скорости при помощи техники SIV (smoke image velocimetry) [12] в диаметральной плоскости трубы и в параллельных ей плоскостях, что позволило получить информацию о продольной и окружной компонентах скорости потока. Принципиальное отличие метода SIV от традиционного PIV заключается в значительно более высокой концентрации трассеров, при которой еще нет их влияния на течение. Алгоритм обработки изображений отслеживает не движение отдельных частиц-трассеров, а фрагментов с одинаковым распределением яркости. Пространственное разрешение SIV выше, а уровень шумов ниже, чем в традиционном методе PIV.

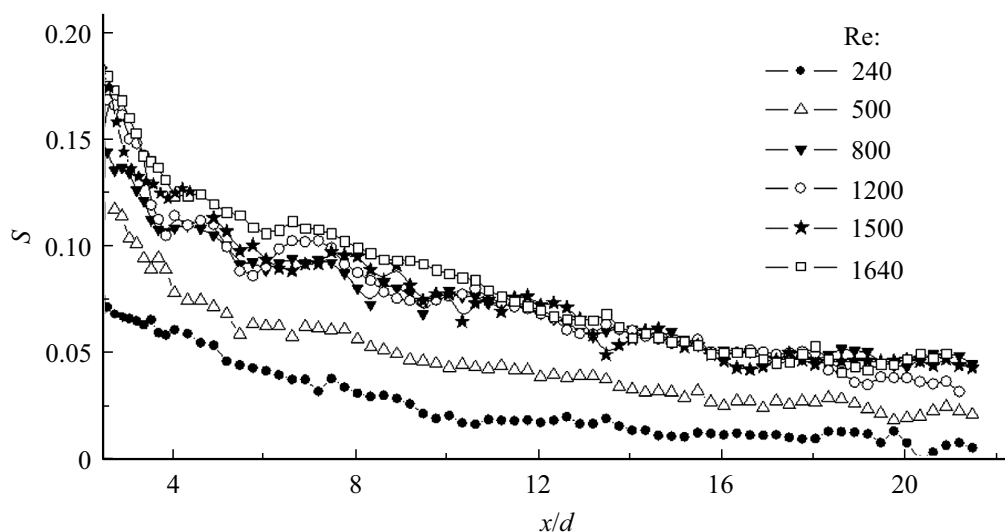


Рис. 1. Изменение степени закрутки потока за вихревателем в зависимости от числа Рейнольдса.

Измерения выполнялись при числах Рейнольдса $Re = \langle U \rangle d / \nu = 240, 500, 800, 1200, 1500$ и 1640 . Здесь ν — кинематическая вязкость рабочей жидкости, $\langle U \rangle$ — среднерасходная скорость потока в трубе. Наибольшая неопределенность результатов измерения скорости в настоящих экспериментах изменялась от 1.8 % при $Re = 240$ до 4.2 % при $Re = 1640$.

Поскольку в настоящее время окончательное определение турбулентности с учетом всех ее характеристик все еще не выработано [13], будем анализировать возможную турбулизацию потока по наличию некоторых признаков турбулентности. В переходных режимах течения в качестве этих признаков будем рассматривать резкий рост среднеквадратичных пульсаций скорости потока при увеличении числа Рейнольдса [14,15], наблюдаемый в каких-либо областях течения, и появление перемежаемости — чередование периодов времени существования ламинарного и турбулентного режимов течения на осциллограммах скорости потока [16,17].

Завихритель, который используется в настоящих исследованиях, создает слабо закрученный поток. Степень закрутки

$$S = \frac{\int_0^R \rho U_x U_\theta r^2 dr}{R \int_0^R \rho U_x^2 r dr}$$

оценивалась отношением осевого момента количества движения к полному осевому количеству движения. Здесь U_θ и U_x — локальная окружная и осевая скорости соответственно, r — текущий радиус, ρ — плотность рабочего тела, R — радиус канала. В основной области измерений ($x/d = 3-21.5$) степень закрутки в зависимости от числа Рейнольдса составляла 0.18–0.07 в начале этого диапазона и далее монотонно снижалась (рис. 1).

Используемый в экспериментах метод измерений относится к планарным (в одной плоскости) и при исследовании закрученных потоков не позволяет выполнять измерения вдоль пространственных линий тока. Однако, как показали оценки, максимальное значение окружной компоненты скорости не превышает 30 % от среднерасходной скорости потока в начале области измерений и снижается с увеличением расстояния от завихрителя.

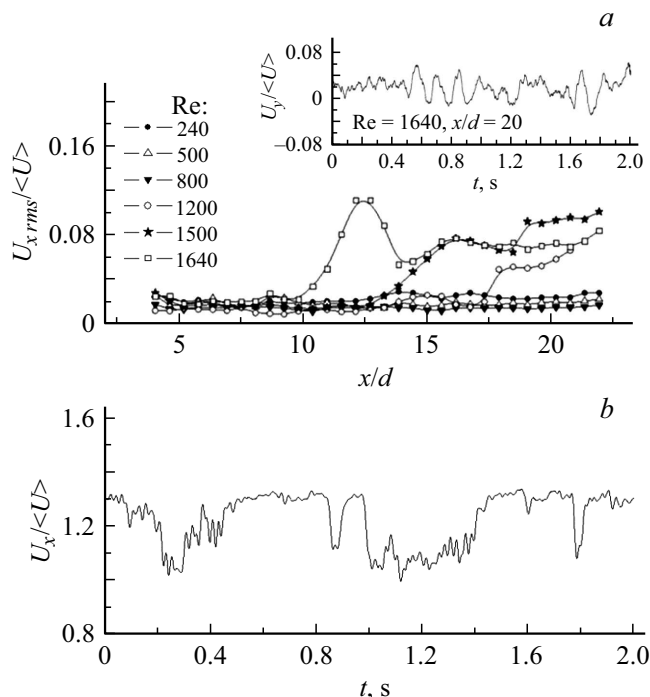


Рис. 2. Изменение параметров течения на оси трубы вниз по потоку от завихрителя. *a* — среднеквадратичные пульсации продольной компоненты скорости и осциллограмма поперечной скорости при $Re = 1640, x/d = 20$ (на вставке); *b* — осциллограмма продольной компоненты скорости потока при $Re = 1500, x/d = 15$.

довании закрученных потоков не позволяет выполнять измерения вдоль пространственных линий тока. Однако, как показали оценки, максимальное значение окружной компоненты скорости не превышает 30 % от среднерасходной скорости потока в начале области измерений и снижается с увеличением расстояния от завихрителя.

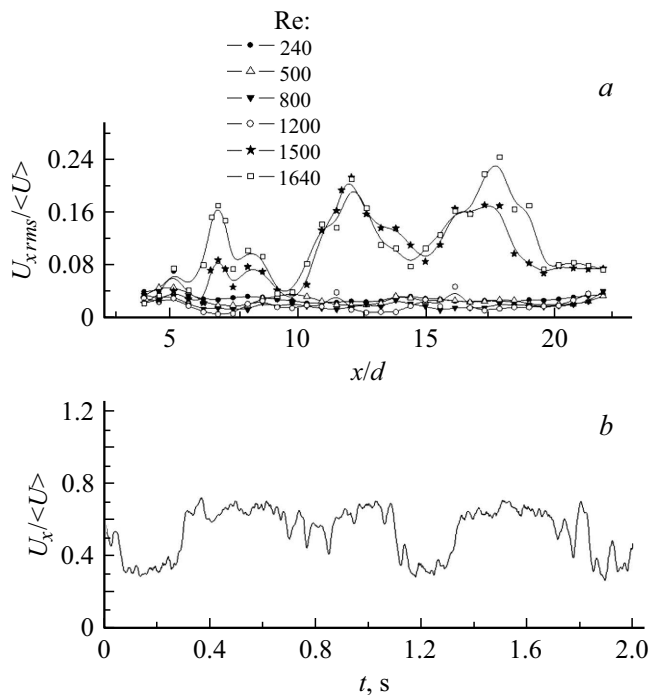


Рис. 3. Распределение интенсивности пульсаций продольной компоненты скорости потока при $y/R = 0.7$ (a) и осциллограмма продольной компоненты скорости при $Re = 1500$, $x/d = 15.5$ и $y/R = 0.7$ (b).

Поэтому мы считаем возможным анализ процессов ламинарно-турбулентного перехода выполнять на основе изучения поведения только продольной компоненты скорости потока.

На рис. 2, a показано изменение среднеквадратичных пульсаций $U_{x rms}$ на оси трубы с увеличением расстояния от завихрителя в зависимости от числа Рейнольдса. Видно, что при $Re \leq 800$ уровень пульсаций практически не изменяется по длине трубы и составляет менее 2.5% от среднерасходной скорости, что свидетельствует о ламинарном характере течения. При $Re = 1200$ рост пульсаций наблюдается начиная с $x/d \approx 17$, при $Re = 1500$ — с $x/d \approx 13$, при $Re = 1640$ — с $x/d \approx 10$. Локальный максимум пульсаций достигает 5, 7.5 и 11% соответственно, что выше, чем при турбулентном режиме (3.2%). Такое же поведение пульсаций наблюдается при ламинарно-турбулентном переходе в трубах [18]. На осциллограммах продольной компоненты скорости потока в этих областях в указанных режимах обнаружена перемежаемость течения. Пример такой осциллограммы для $Re = 1500$, $x/d = 15$, т.е. в области роста $U_{x rms}$, приведен на рис. 2, b. При $Re < 1200$ перемежаемость на осциллограммах скорости отсутствует. Полученные результаты свидетельствуют о наличии ламинарно-турбулентного перехода в центральной части канала, который начинается на расстоянии $x/d \approx 17$ при $Re \geq 1200$ и с ростом числа Рейнольдса смещается в сторону завихрителя.

Анализ результатов визуализации течения, отсутствие точки застоя и зоны возвратного течения в профилях скорости, а также вид осциллограммы поперечной компоненты скорости (вставка на рис. 2, a) свидетельствуют о том, что в исследуемых режимах не происходит разрушения вихря, сформированного за завихрителем.

Более сложная картина изменения среднеквадратичных пульсаций продольной компоненты скорости потока наблюдается вблизи стенок трубы. В качестве примера распределение $U_{x rms}(x/d)$ при $r/R = -0.7$, т.е. на расстоянии $0.15d$ от стенки канала, показано на рис. 3, a. Заметное локальное увеличение $U_{x rms}$ с ростом числа Рейнольдса начинается при $Re \geq 1500$ и наблюдается в трех областях: $x/d \approx 6.9$, 12.0 и 17.6 , причем первая расположена гораздо ближе к завихрителю, чем область роста $U_{x rms}$ на оси трубы. Отметим, что при $Re < 1200$ выраженные локальные максимумы в распределении $U_{x rms}(x/d)$ отсутствуют, однако общий уровень пульсаций составляет приблизительно 2.5–4%, что несколько выше, чем на оси трубы. При $Re = 1200$ тенденция к появлению локальных максимумов видна при $x/d = 11.5$ и 16 , но величина $U_{x rms}$ в этих областях не превышает 5%.

Механизм периодической локальной турбулизации потока вблизи стенки трубы заключается, по-видимому, в следующем. В реальных условиях эксперимента лопасти завихрителя имеют отличную от нулевой толщину. Поэтому за ними формируются области дефекта скорости [19] и следы, которые с удалением от завихрителя движутся по спирали. Эти следы периодически взаимодействуют со стенкой трубы, вызывая рост интенсивности пульсаций скорости и появление локальных максимумов на распределениях $U_{x rms}(x/d)$. Максимальная величина среднеквадратичных пульсаций скорости в этих областях достигает 25%, что значительно выше, чем уровень турбулентных пульсаций в области развитого турбулентного течения в гладкой трубе при отсутствии закрутки потока. Расстояние между максимумами $U_{x rms}$ изменяется по длине области измерений от $5.1d$ до $5.6d$, что согласуется с шагом спиралевидного движения следа за лопатками с учетом уменьшения угла закрутки потока с удалением от завихрителя. При $Re \leq 1200$ следы за лопатками, по-видимому, в значительной степени размываются за счет вязких эффектов, и в этом диапазоне чисел Рейнольдса признаков турбулизации потока в пристеночной области практически не наблюдается.

Локальная турбулизация потока вблизи стенки при $Re \geq 1500$ подтверждается наличием еще одного признака — перемежаемости течения, видной на осциллограммах продольной компоненты скорости потока вблизи стенки. Пример такой осциллограммы для $Re = 1500$ при $y/R = 0.7$ и $x/d = 15.5$ приведен на рис. 3, b.

Таким образом, установлено, что в исследуемых режимах слабо закрученного потока в гладкой трубе в зависимости от числа Рейнольдса (степени закрутки) могут наблюдаться признаки ламинарно-турбулентного перехода: рост интенсивности пульсаций скорости и

переменяемость течения. Начало роста пульсаций скорости на оси трубы начинается при $Re = 1200$, а первые локальные области роста пульсаций скорости в пристеночной области располагаются значительно ближе к завихрителю. Описаны физические механизмы начала турбулизации потока. Полученные данные могут быть полезны для прогнозирования параметров течения в трубах с локальной закруткой потока при низких числах Рейнольдса. Кроме того, результаты исследования можно использовать при моделировании естественной физиологической закрутки потока в элементах сердечно-сосудистой системы человека, в частности, при выборе параметров рабочих участков экспериментальных установок.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L. Talbot, J. Appl. Mech., **21** (1), 1 (1954). DOI: 10.1115/1.4010810
- [2] M. Kiya, S. Fukusako, M. Arie, Bull. JSME, **14** (73), 659 (1971). DOI: 10.1299/jsme1958.14.659
- [3] T.F. Ayinde, Sadhana, **35**, 129 (2010). DOI: 10.1007/s12046-010-0018-9
- [4] S. Yao, T. Fang, Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul., **17** (8), 3235 (2012). DOI: 10.1016/j.cnsns.2011.11.038
- [5] F. Beaubert, H. Pálson, S. Lalot, I. Choquet, H. Bauduin, Appl. Math. Mod., **40**, 6218 (2016). DOI: 10.1016/j.apm.2016.02.002
- [6] С.В. Алексеев, П.А. Куйбин, В.Л. Окулов, *Введение в теорию концентрированных вихрей* (Ин-т теплофизики СО РАН, Новосибирск, 2003), с. 420.
- [7] M. Escudier, Prog. Aerosp. Sci., **25** (2), 189 (1988). DOI: 10.1016/0376-0421(88)90007-3
- [8] A. Bottaro, I.L. Ryhming, M.B. Wehrli, F.S. Rys, P. Rys, Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., **89** (1-3), 41 (1991). DOI: 10.1016/0045-7825(91)90036-6
- [9] D.J.C. Dennis, C. Seraudie, R.J. Poole, Phys. Fluids, **26** (5), 053602 (2014). DOI: 10.1063/1.4875486
- [10] Z. Seifi, M. Raisee, M.J. Cervantes, J. Phys.: Conf. Ser., **2707** (1), 012129 (2024). DOI: 10.1088/1742-6596/2707/1/012129
- [11] V.M. Molochnikov, N.I. Mikheev, A.N. Mikheev, A.A. Paereliy, O.A. Dushina, Int. J. Heat Fluid Flow, **96**, 108984 (2022). DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2022.108984
- [12] N.I. Mikheev, N.S. Dushin, Instrum. Exp. Tech., **59** (6), 882 (2016). DOI: 10.1134/S0020441216060063
- [13] S. Ferrari, R. Rossi, A. Di Bernardino, Energies, **15** (20), 7580 (2022). DOI: 10.3390/en15207580
- [14] F. Durst, B. Unsal, J. Fluid Mech., **560**, 449 (2006). DOI: 10.1017/S0022112006000528
- [15] В.В. Леманов, В.В. Лукашов, К.А. Шаров, Письма в ЖТФ, **50** (3), 20 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.03.57039.19725 [V.V. Lemanov, V.V. Lukashov, K.A. Sharov, Tech. Phys. Lett., **50** (2), 17 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.03.57039.19725].
- [16] V. Uruba, *Turbulence handbook for experimental fluid mechanics professionals* (Dantec Dynamic, Skovlunde, 2012), p. 23.
- [17] Г. Шлихтинг, *Теория пограничного слоя* (Наука, М., 1974).
- [18] F. Durst, M. Fischer, J. Jovanovic, H. Kikura, J. Fluids Eng., **120**, 496 (1998). DOI: 10.1115/1.2820690
- [19] Á. Helgadóttir, S. Lalot, F. Beaubert, H. Pálsson, Appl. Sci., **8** (10), 1865 (2018). DOI: 10.3390/app8101865