

УДК 532.542.4

DOI: 10.63430/TIA2025020011

Прямое численное моделирование паффа в трубах различной длины*

В.А. Иващенко^{1,2}, Р.И. Мулладжанов^{1,2}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

E-mail: ivashchenko@itp.nsc.ru

При определенных условиях переход к турбулентности может сопровождаться возникновением локализованных турбулентных структур, известных как паффы. Паффы представляют собой области турбулентности, окруженные ламинарным течением, и их поведение значительно зависит от числа Рейнольдса (Re). В представленном исследовании изучается влияние начальных условий течения на формирование паффов в круглых трубах различной длины с использованием прямого численного моделирования (DNS) при фиксированном числе Рейнольдса $Re \approx 2200$. Из литературы известно, что при числах Рейнольдса около $Re \approx 2000$ одиночные паффы формируются как метастабильные структуры с возможностью распада или сохранения, а при $Re > 2300$ паффы взаимодействуют, образуя более сложные и стабильные конфигурации, такие как двойные и тройные паффы. Устойчивым принято называть пафф, время жизни которого значительно превышает характерное время в данной системе, обычно определяемое как отношение длины рассматриваемой области к значению осевой скорости в ламинарном участке течения. При этом известно об увеличении количества устойчивых паффов с ростом числа Рейнольдса, в то время как вопрос повторяемости конфигурации течения при одном и том же числе Рейнольдса остается открытым. Полученные данные имеют важное значение для прогнозирования и контроля турбулентности в различных инженерных приложениях.

Ключевые слова: турбулентный переход, течение в трубе, паффы, прямое численное моделирование.

Введение

Переход к турбулентности в трубопроводах является одним из самых часто встречаемых явлений в гидродинамике, в определенных случаях сопровождающийся формированием локализованных турбулентных структур, известных как паффы [1]. Паффы представляют собой области турбулентности, окруженные ламинарным течением, а их устойчивость и эволюция сильно зависят от числа Рейнольдса. Понимание механизмов, лежащих в основе формирования, стабильности и взаимодействия паффов, имеет решающее значение для прогнозирования и контроля турбулентности в различных инженерных приложениях.

* Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (FWNS-2022-0009).

Паффы обычно формируются при числах Рейнольдса около $Re \sim 2000$, где они существуют как метастабильные структуры. На этом этапе одиночные паффы могут спонтанно распадаться или сохраняться в течение некоторого времени, прежде чем снова перейти в ламинарное состояние. С увеличением числа Рейнольдса ($Re > 2300$) взаимодействие между паффами происходит интенсивнее, что приводит к формированию более сложных структур, таких как двойные и тройные паффы [2]. Эти многопаффовые конфигурации демонстрируют большую стабильность и менее склонны к распаду, что знаменует собой критическую фазу перехода к устойчивой турбулентности. Более детально проблема перехода и локализованные турбулентные структуры в трубах рассматривались в обзоре Никитина Н.В. [3, 4].

Численные расчеты, в частности прямое численное моделирование (DNS), часто используются при анализе динамики турбулентных структур [5–8]. Данный метод позволяет наиболее точно зафиксировать формирование и распад паффов, их взаимодействия и критические числа Рейнольдса, связанные с различными поведением, так как исключает любые внешние факторы, способные повлиять на результат при натурном эксперименте. Именно поэтому с помощью DNS в настоящей работе проводится исследование поведения паффов вблизи переходного числа Рейнольдса $Re = 2200$, при этом также рассматривается зависимость итоговой конфигурации турбулентных структур от начальных условий и от протяженности рассматриваемой круглой трубы, которая является дополнительным фактором, требующим особого внимания при исследовании динамики паффов.

Постановка задачи

Геометрия расчетной области представляет собой трубу круглого сечения радиуса $R = 1$ и длиной $L = 80R \div 200R$ с периодическими граничными условиями в продольном направлении. Среднерасходная скорость через сечение трубы фиксирована и составляет $U_{\text{bulk}} = 0,5$. Такая нормировка соответствует значению осевой скорости $U_c = 1$ при ламинарном течении. Генерация паффов происходит во всех рассматриваемых далее случаях по одному и тому же сценарию: сначала рассчитывается течение в круглой трубе при числе Рейнольдса $Re = 2400$ на протяжении безразмерного времени $T = tU_{\text{bulk}}/R = 1000$, что является достаточным условием для получения установившегося течения. Турбулизация течения происходит за счет внесения в начальный момент времени случайного шума фиксированной амплитуды в каждую точку расчетной сетки. Затем число Рейнольдса понижается скачком до $Re = 2200$ для генерации паффа и расчет продолжается до достижения безразмерного значения $T = 1500$, что является достаточно большим промежутком времени для формирования устойчивого течения.

В работе использовался вычислительный код, описанный в работе Никитина Н.В. [9] и верифицированный ранее в других работах, а также продемонстрировавший совпадение с экспериментальными данными по моделированию паффов. Численное решение строилось с применением метода, предложенного в работе [10], который сочетает консервативную конечно-разностную схему, аппроксимирующую уравнения в пространственных координатах, и полунявный метод Рунге–Кутты третьего порядка [11] для интегрирования по времени. Также был выполнен верификационный расчет полностью развитого турбулентного течения в круглой трубе при числе Рейнольдса $Re_\tau = 180$, сравнение результатов которого с литературными данными [12] приведено на рис. 1. Получено отличное совпадение среднего профиля скорости от расстояния до стенки

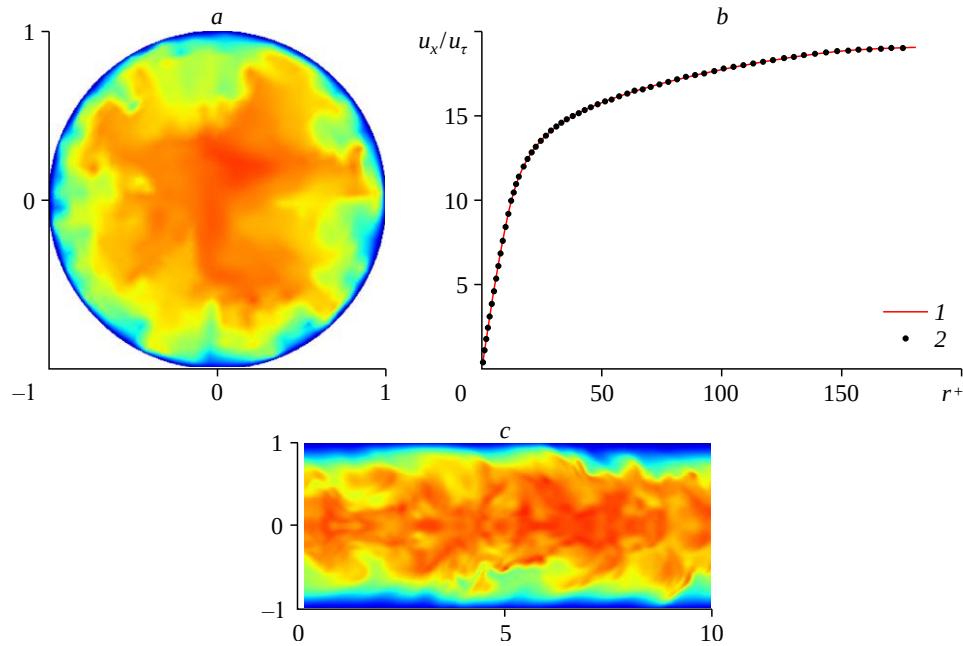


Рис. 1. Мгновенные поля скорости в круглой трубе в поперечном (a) и продольном (b) сечениях, а также сравнение среднего профиля продольной скорости с литературными данными [12] (c).

b: 1 — данные работы [12], 2 — результаты настоящего расчета.

в координатах стенки (r^+). Также для всех представленных далее результатов проводилось исследование сеточной сходимости, в ходе которого были получены качественно совпадающие и количественно аналогичные результаты. Итоговые результаты приводятся для расчетов с пространственным разрешением $2048 \times 64 \times 128$ в продольном, радиальном и азимутальном направлениях соответственно.

Результаты

На рис. 2 приведены осевые распределения продольной скорости для всех рассмотренных длин трубы. Видно, что для трубы $L = 80R$ распределение скорости соответствует одиночному паффу со снижением скорости потока на 30–40 % от ламинарного значения. При этом значение скорости на оси в ламинарном участке $U_c < 1$, что не соответствует классическому течению Пуазейля в трубе и является очевидным признаком недостаточной длины расчетной области. Именно по этой причине были сделаны расчеты с несколькими значениями длины расчетной области: $L = 160R, 170R, 180R, 200R$ и $220R$.

Отдельно следует пояснить, по какому критерию определяется количество сформированных паффов из графиков осевой скорости, изображенных на рис. 2. В литературе для определения паффов в переходном режиме течения в трубах обычно используются различные пороговые значения для осевой скорости [13–15], но в среднем можно установить это значение на уровне 15 % от средней осевой скорости в ламинарном течении, которая в нашем случае составляет $U_c = 1$. Именно это значение отмечено на рис. 2 и 4 горизонтальной штриховой линией. Отметим, что в хвостовой части паффа часто наблюдается резкий скачок осевой скорости, пробивающий пороговое значение, но не являющийся отдельным паффом, о чем также было указано в работе [14].

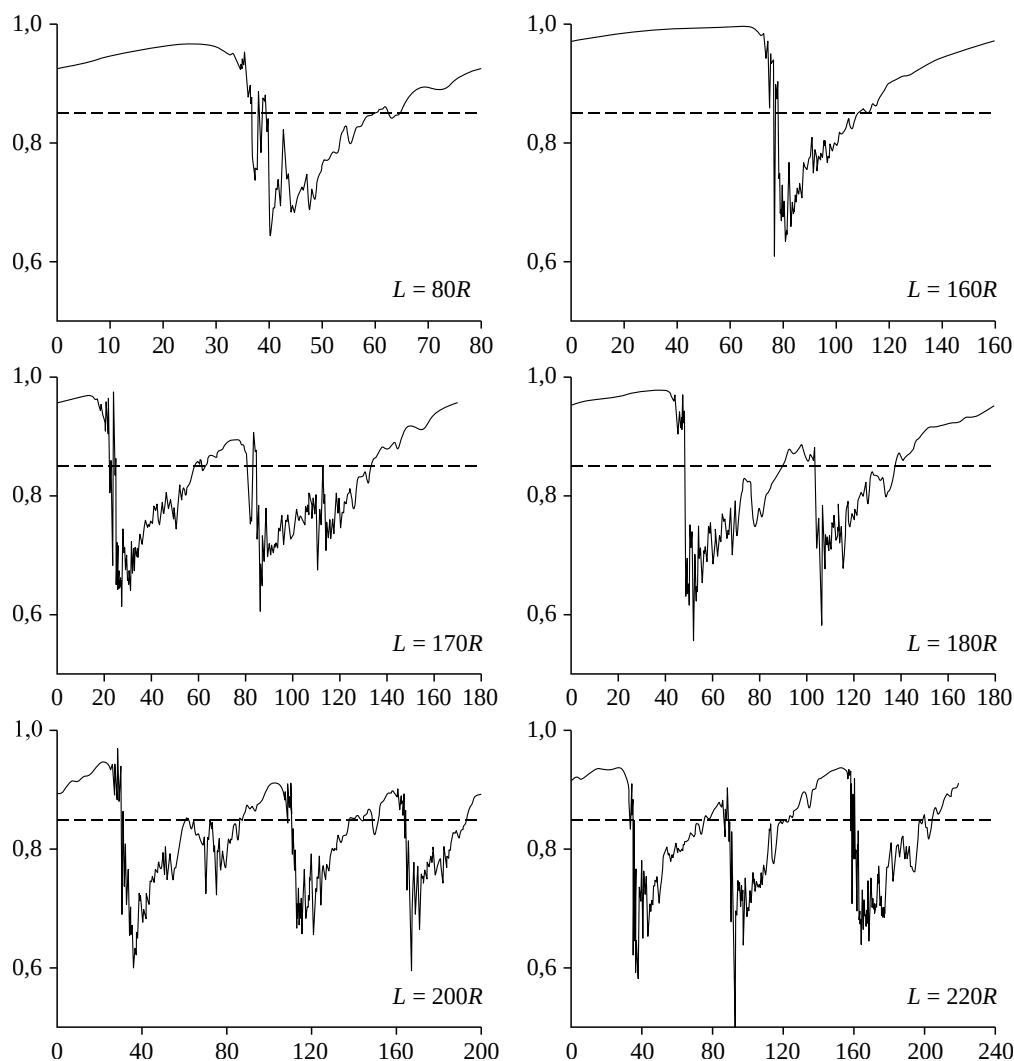


Рис. 2. Сравнение осевой скорости для расчетных областей с разным продольным размером L .

При анализе осевых распределений обнаруживается неожиданная особенность: в трубе длиной $160R$ наблюдается такой же одиночный пафф, как и в трубе $80R$, только длины расчетной области уже достаточно для наблюдения ламинарных участков течения со значением скорости на оси $U_c = 1$. Однако при незначительном увеличении расчетной области до $170R$ и $180R$ и при идентичности граничных условий и алгоритма получения развитого течения, а также при одинаковом времени сбора данных, наблюдается формирование так называемого двойного паффа. При этом для расчетных областей $200R$ и $220R$ имеет место формирование уже тройного паффа. Аналогичные выводы можно сделать из рис. 3, на котором приведено поле продольной скорости в поперечном сечении трубы для всех рассматриваемых длин.

Для расчетных областей $170R$ и $180R$ также проводились дополнительные расчеты с варьированием амплитуды начальных возмущений. На рис. 4 показано, что итоговое количество устойчивых турбулентных паффов меняется в зависимости не только от протяженности расчетной области, но и от начальных условий в расчете даже спустя длительный промежуток времени. Например, для расчетной области $170R$ при амплитуде

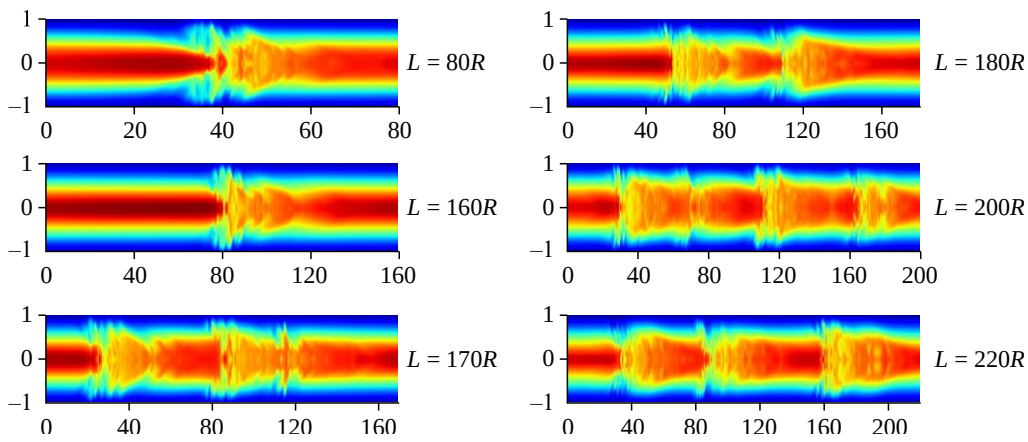


Рис. 3. Сравнение продольной скорости в поперечном сечении для расчетных областей с разным продольным размером L .

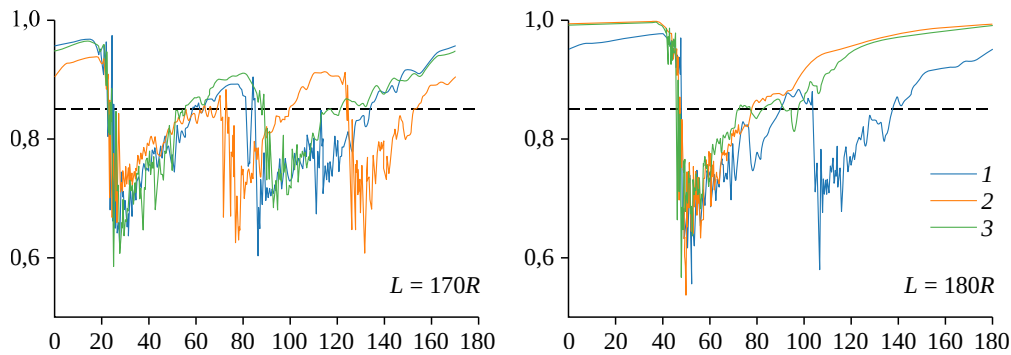


Рис. 4. Сравнение осевой скорости для разных расчетных областей при различных амплитудах начальных возмущений.

$A_{\text{мр}} = 0,5$ (1), $0,7$ (2), 1 (3).

начальных возмущений $A_{\text{мр}} = 0,5$ и $A_{\text{мр}} = 0,7$ наблюдается три четко выраженных паффа, а при амплитуде $A_{\text{мр}} = 1,0$ их количество уменьшается до двух. Для расчетной области $180R$ при амплитуде начальных возмущений $A_{\text{мр}} = 0,5$ наблюдается два четко выраженных паффа, а при $A_{\text{мр}} = 0,7$ и $A_{\text{мр}} = 1,0$ их количество уменьшается до одного.

Заключение

Проведено прямое численное моделирование паффов в круглых трубах различной длины при различных начальных условиях. Обнаружено различие в итоговых конфигурациях течения, зависящее как от размера расчетной области, так и от амплитуды начальных возмущений, причем для второго фактора зависимость количества сформированных устойчивых паффов носит нелинейный характер. Указанный факт является подтверждением стохастической природы образования одиночного, двойного и тройного паффов вблизи числа Рейнольдса $Re = 2200$. Таким образом, количество устойчивых турбулентных паффов меняется не только в зависимости от числа Рейнольдса, но и от начальных условий течения даже спустя длительный промежуток времени. Полученный результат является нетривиальным и требует дальнейшего исследования для установления точного сценария эволюции турбулентных паффов в круглой трубе.

Авторы выражают благодарность Н.В. Никитину за предоставление вычислительного кода, а также Институту теплофизики СО РАН за предоставление вычислительных ресурсов суперкомпьютера «Каскад».

Список литературы

1. **Wyganski I.J., Champagne F.H.** On transition in a pipe. Pt 1. The origin of puffs and slugs and a flow in a turbulent slug // *J. Fluid Mech.* 1973. Vol. 59, No. 2. P. 281–335.
2. **Wyganski I., Sokolov M., Friedman D.** On transition in a pipe. Pt. 2. The equilibrium puff // *J. Fluid Mech.* 1975. Vol. 69, No. 2. P. 283–304.
3. **Никитин Н.В.** Проблема перехода и локализованные турбулентные структуры в трубах // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа.* 2021. № 1. С. 32–46.
4. **Nikitin N.V.** Transition problem and localized turbulent structures in pipes // *Fluid Dynamics.* 2021. Vol. 56, No. 1. P. 31–44.
5. **Priymak V.G., Miyazaki T.** Direct numerical simulation of equilibrium spatially localized structures in pipe flow // *Physics of Fluids.* 2004. Vol. 16, No. 12. P. 4221–4234.
6. **Faisst H., Eckhardt B.** Sensitive dependence on initial conditions in transition to turbulence in pipe flow // *J. Fluid Mechanics.* 2004. Vol. 504. P. 343–352.
7. **Willis A.P., Kerswell R.R.** Critical behavior in the relaminarization of localized turbulence in pipe flow // *Physical review letters.* 2007. Vol. 98, No. 1. P. 014501-1–014501-4.
8. **Zaripov D.I., Ivashchenko V.A., Pantelev S.A., Luk'yanov A.A., Mullyadzhyanov R.I.** Direct numerical simulation of the turbulent flow laminarization in a pipe at $Re = 5000$ // *Russian Aeronautics.* 2023. Vol. 66, No. 4. P. 723–730.
9. **Nikitin N.V., Pimanov V.O.** Numerical study of localized turbulent structures in a pipe // *Fluid Dynamics.* 2015. Vol. 50. P. 655–664.
10. **Nikitin N.** Finite-difference method for incompressible Navier–Stokes equations in arbitrary orthogonal curvilinear coordinates // *J. Comp. Phys.* 2006. Vol. 217, No. 2. P. 759–781.
11. **Nikitin N.** Third-order-accurate semi-implicit Runge–Kutta scheme for incompressible Navier–Stokes equations // *Intern. J. Numerical Methods in Fluids.* 2006. Vol. 51, No. 2. P. 221–233.
12. **El Khoury G.K., Schlatter P., Noorani A., Fischer P.F., Brethouwer G., Johansson A.V.** Direct numerical simulation of turbulent pipe flow at moderately high Reynolds numbers // *Flow, Turbulence and Combustion.* 2013. Vol. 91. P. 475–495.
13. **Yakhot A., Feldman Y., Moxey D., Sherwin S., Karniadakis G. E.** Turbulence in a localized puff in a pipe // *Flow, Turbulence and Combustion.* 2019. Vol. 103. P. 1–24.
14. **Barkley D.** Theoretical perspective on the route to turbulence in a pipe // *J. Fluid Mechanics.* 2016. Vol. 803. P. P1.
15. **Barkley D., Song B., Mukund V., Lemoult G., Avila M., Hof B.** The rise of fully turbulent flow // *Nature.* 2015. Vol. 526, No. 7574. P. 550–553.

*Статья поступила в редакцию 20 июня 2024 г.,
принята к публикации 2 сентября 2024 г.*