

УДК 532.5.013.4  
DOI: 10.15372/PMTF202315328

## ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДЫ ВНОСИМОГО СТАЦИОНАРНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ НА ЕГО НЕМОДАЛЬНЫЙ РОСТ В ЛАМИНАРНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕ

Л. Р. Гареев, О. О. Иванов, В. В. Веденеев, Д. А. Ашуров

Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия  
E-mails: gareev.lr@yandex.ru, ivanov@imec.msu.ru, vasily.vedeneev@mail.ru, denis.ashurov@icloud.com

Исследуется влияние амплитуды вносимых в ламинарное струйное течение дефлекторов на коэффициент линейного изменения радиальной компоненты стационарного возмущения. Описаны метод внесения возмущений и метод их измерения. Показано, что уменьшение амплитуды дефлекторов не приводит к изменению картины течения, не предотвращает возникновение алгебраического механизма роста и вызывает пропорциональное уменьшение радиальной компоненты стационарного возмущения скорости. Переход к турбулентному режиму происходит после достижения определенного значения радиального расширения, не зависящего от начальной амплитуды вносимого возмущения.

**Ключевые слова:** немодальный рост возмущений, затопленная струя, ламинарно-турбулентный переход

**Введение.** В пристенных течениях помимо модального механизма развития возмущений имеет место алгебраический (немодальный) механизм, обеспечивающий обходной (bypass) переход к турбулентному режиму [1, 2]. Немодальный механизм приводит к возникновению продольных вихревых структур, вызывающих перемешивание слоев жидкости и турбулизацию основного течения. В работах [3, 4] показано, что на ламинарном участке в струйных течениях, так же как и в пристенных течениях, образуются продольные вихри, которые называются также полосчатыми структурами. Моделирование таких структур в виде стационарных возмущений, возникающих за элементами шероховатости, размещенными на выходе из сопла, проведено в работе [5], а визуализация этих структур и исследование их влияния на кольцевые вихри Кельвина — Гельмгольца выполнены в [6].

Однако, несмотря на большое количество работ, посвященных изучению когерентных структур, возникающих в затопленных струях, переход к турбулентному режиму в струйном ламинарном течении по немодальному механизму ранее не изучался, первые теоретические исследования оптимальных возмущений в струйных течениях появились сравнительно недавно [7, 8]. Насколько известно авторам данной работы, первое экспериментальное исследование немодального механизма развития возмущений в струйном течении проведено в работе [9], продолжением которой является настоящая работа.

В затопленных струях [7, 8], как и в пограничных слоях [10], стационарные возмущения приводят к наиболее существенному увеличению кинетической энергии по немодальному механизму. Поэтому было предложено в рассматриваемое в данной работе струйное

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 20-19-00404).

ламинарное течение помещать тонкие волнообразные конструкции (дефлекторы). В [9] показано, что они инициируют алгебраический механизм нарастания возмущений. В отличие от модального [11] для алгебраического механизма характерны линейное, а не экспоненциальное возрастание продольной компоненты возмущения скорости вниз по потоку и образование продольных вихрей, что приводит к изменению сценария ламинарно-турбулентного перехода [9]. Аналогичный процесс происходит в пограничных слоях [12].

Линейная теория устойчивости применяется при описании механизмов развития возмущений в предположении малости рассматриваемых возмущений. В работе [9] приведены результаты экспериментов с дефлекторами с относительными отклонениями формы выходного сечения от окружности  $\varepsilon = 0,05; 0,10$ . Показано, что законы нарастания продольной и поперечной компонент возмущения скорости соответствуют законам, полученным теоретически для оптимальных возмущений. Возникает вопрос, какие минимальные возмущения необходимо внести в струю, чтобы инициировать алгебраический механизм роста. Для получения ответа на этот вопрос азимутальное число было выбрано равным  $n = 3$  (при различных значениях  $n > 1$  характер развития возмущений одинаков [9]: на поперечном срезе наблюдаются парные противовращающиеся продольные вихри), а величина  $\varepsilon$  варьировалась. Также исследовалась зависимость амплитуды поперечного возмущения, при которой начинается переход к турбулентному режиму, от величины начального внесенного дефлектором возмущения.

**1. Экспериментальная установка и метод внесения стационарных возмущений.** Рассматривается ламинарное струйное осесимметричное течение воздуха. Устройство, формирующее это течение, представляет собой короткий диффузор с детурбулизирующими вставками в виде металлических сеток. Диаметр струи составляет  $D = 0,12$  м, скорость на оси  $U_c = 1,5$  м/с, число Рейнольдса, вычисленное по средней скорости и диаметру, равно  $Re = 5400$ . Подробное описание формирующего устройства приведено в работе [13].

Стационарные возмущения вносятся в струю с помощью тонких волнообразных дефлекторов высотой  $h = D/12$  и толщиной  $0,005D$ , входное сечение которых представляет собой окружность диаметром  $d = D/2$ , а выходное — гармонически деформированную окружность того же диаметра с азимутальным числом отклонения от окружности  $n = 3$  и относительной амплитудой этого отклонения  $\varepsilon = 0; 0,01; \dots; 0,09; 0,10$ .

Для определения характера изменения радиальной компоненты стационарного возмущения скорости  $u_r$ , вносимого данными дефлекторами, использовались два метода: визуализация лазерным ножом и PIV-измерения. В данной работе приводятся результаты, полученные только первым методом. На рис. 1 приведены 3D-модель дефлектора, результаты визуализации поперечного среза течения, распределение поперечной компоненты возмущения скорости  $u_{tr} = \sqrt{u_r^2 + u_\theta^2}$ , взятое из [9], и линии тока.

**2. Визуализация поперечного среза течения.** Эксперименты по визуализации поперечного сечения были проведены аналогично тому, как описано в [9]. Поток, текущий сверху вниз, засеивался мелкими частицами глицерина (для создания лазерного ножа использовался непрерывный лазер), портативная web-камера располагалась ниже плоскости лазерного ножа на расстоянии, равном  $3D$ . Лазер и web-камера крепились к координатному устройству и синхронно перемещались в вертикальном направлении. Съемка проводилась на расстояниях  $z/D = 1,00; 1,25; \dots; 4,25; 4,50$  при  $\varepsilon \leq 0,05$ . При  $\varepsilon \geq 0,06$  начальное измерение проводилось в сечении  $z/D = 0,50$ , а конечное — в сечении  $z/D = 2,75$ , так как на больших расстояниях струя турбулизуется и определить ее условный радиус не представляется возможным. Видеосъемка проводилась с частотой 30 кадр/с. Затем выделялись интервалы (приблизительно 5 с), соответствующие определенным значениям  $\varepsilon$  и  $z/D$ . Выбранные в этих интервалах кадры осреднялись по яркости пикселей. По осредненному

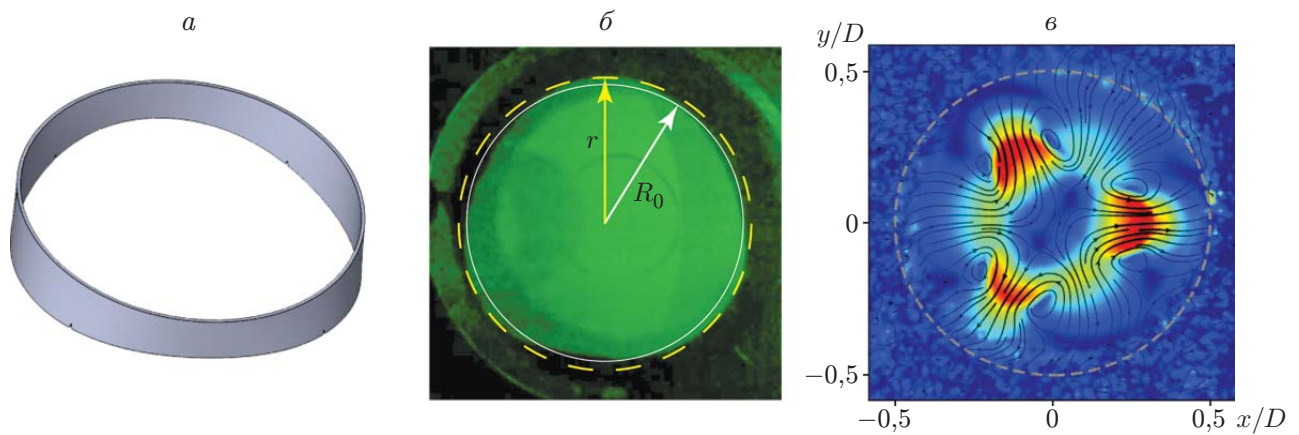


Рис. 1. 3D-модель дефлектора с  $n = 3$  и  $\varepsilon = 0,05$  (а), результаты визуализации поперечного среза течения, стационарно деформированного дефлектором (б), и распределение поперечной компоненты возмущения скорости, экспериментально полученное методом PIV на расстоянии от выходного сечения, равном диаметру струи (в)

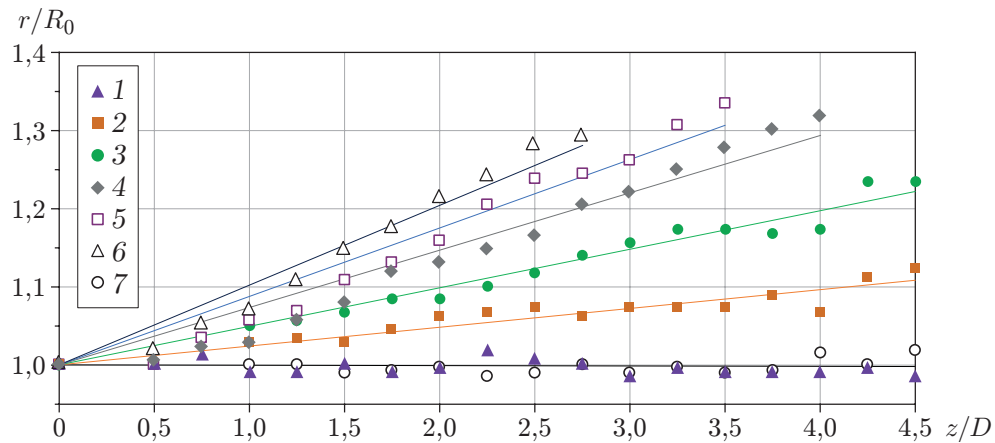


Рис. 2. Зависимость  $r/R_0$  от  $z/D$  при различных значениях  $\varepsilon$ :  
1 —  $\varepsilon = 0$ , 2 —  $\varepsilon = 0,02$ , 3 —  $\varepsilon = 0,04$ , 4 —  $\varepsilon = 0,06$ , 5 —  $\varepsilon = 0,08$ , 6 —  $\varepsilon = 0,10$ , 7 — в отсутствие дефлектора

кадру определялся радиус окружности, описывающей поперечный срез (см. рис. 1, б), а следовательно, и средний радиус  $r$  “лепестка” (возмущения). Полученные наборы значений  $r$  обезразмеривались на радиус  $R_0$  при  $z/D = 0,5$ . Зависимости полученных значений  $r/R_0$  вниз по потоку от координаты  $z/D$  приведены на рис. 2. Видно, что во всех экспериментах, в том числе при  $\varepsilon = 0$  и в случае отсутствия дефлектора, зависимость  $r/R_0(z/D)$  имеет линейный характер. При  $\varepsilon \leq 0,05$  экспериментальные точки более точно аппроксимируются линейной зависимостью, чем при больших значениях  $\varepsilon$ . Это объясняется, во-первых, необходимостью минимального расстояния, на котором формируются возмущения и выходят на линейный рост (при малых  $\varepsilon$  это расстояние меньше), во-вторых, большей степенью нелинейности вносимого возмущения. Методом наименьших квадратов для каждого  $\varepsilon$  определено значение коэффициента наклона прямой  $k$  (коэффициент постоянного нарастания, который пропорционален осредненной вниз по потоку радиальной компоненте возмущения скорости  $u_r$ ). Видно, что с увеличением  $\varepsilon$  величина  $k$  растет прак-

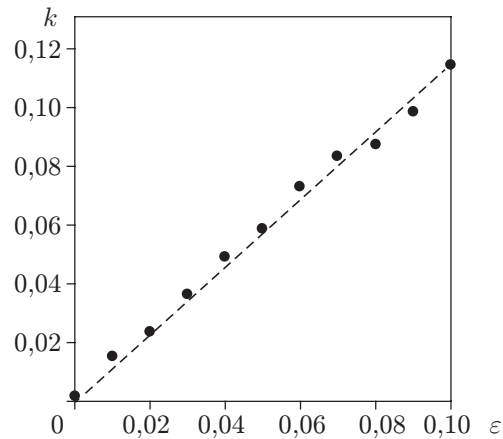
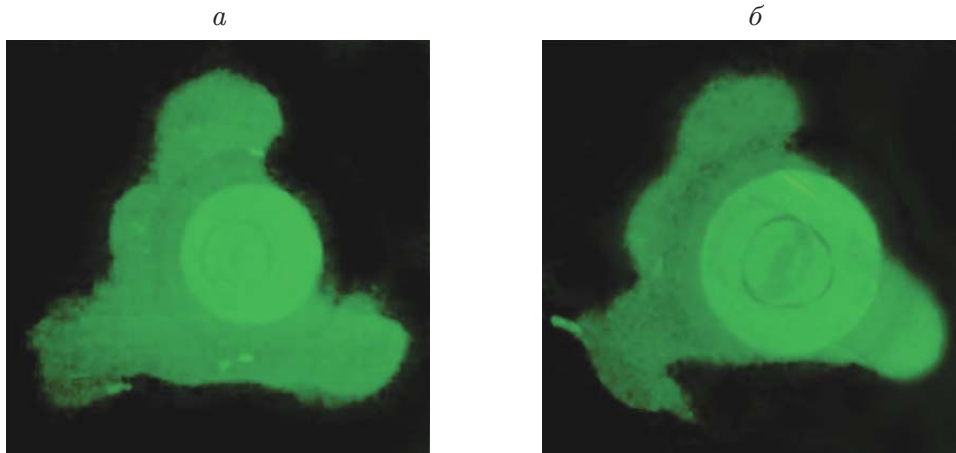
Рис. 3. Зависимость  $k$  от  $\varepsilon$ 

Рис. 4. Результаты визуализации поперечного сечения течения до перехода в турбулентный режим при внесении возмущений дефлектором ( $n = 3$ ):  
 а —  $\varepsilon = 0,05$ , б —  $\varepsilon = 0,10$

тически линейно (рис. 3). Следовательно, возмущения, которые вносят дефлекторы, при различных значениях  $\varepsilon$  подобны. Действительно, прежде чем струйное течение переходит в турбулентный режим при  $r/R_0 \approx 1,35$ , формы границ струи при  $\varepsilon = 0,05$ ,  $z/D = 4,5$  и  $\varepsilon = 0,1$ ,  $z/D = 2,75$  примерно одинаковы (рис. 4). При такой скорости увеличения размеров “лепестков” поперечное вихревое движение становится достаточно интенсивным, что приводит к переходу в турбулентный режим ниже по потоку.

**Заключение.** В результате экспериментов по визуализации поперечного среза течения при наличии стационарных возмущений, вносимых дефлекторами с фиксированным азимутальным числом  $n = 3$  и варьируемой амплитудой  $\varepsilon$ , установлено, что уменьшение  $\varepsilon$  не приводит к изменению картины течения, не предотвращает возникновение алгебраического механизма роста и вызывает пропорциональное уменьшение радиальной компоненты стационарного возмущения скорости. Кроме того, переход к турбулентному режиму во всех случаях, когда его удалось зафиксировать (при  $\varepsilon \geq 0,5$ ), происходит при достижении практически одного и того же уровня деформации поперечного среза струи (но на разных расстояниях вниз по потоку): размеры “лепестков” достигают порогового значения, после чего следует быстрый переход к турбулентному режиму.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Косорыгин В. С., Поляков Н. Ф., Супрун Т. Т., Эпик Э. Я.** Влияние турбулентности на структуру возмущений в ламинарном пограничном слое // Пристеночные турбулентные течения / Под ред. С. С. Кутателадзе. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1984. С. 79–83.
2. **Farrell B. F., Ioannou P. J.** Optimal excitation of three-dimensional perturbations in viscous constant shear flow // Phys. Fluids A: Fluid Dynamics. 1993. V. 5, N 6. P. 1390–1400.
3. **Liepmann D., Gharib M.** The role of streamwise vorticity in the near-field entrainment of round jets // J. Fluid Mech. 1992. V. 245. P. 643–668.
4. **Ball C. G., Fellouah H., Pollard A.** The flow field in turbulent round free jets // Progr. Aerospace Sci. 2012. V. 50. P. 1–26.
5. **Козлов В. В., Грек Г. Р., Лефдаль Л. Л. и др.** Роль продольных локализованных структур в процессе перехода к турбулентности в пограничных слоях и струях (обзор) // ПМТФ. 2002. Т. 43, № 2. С. 62–76.
6. **Литвиненко М. В., Козлов В. В., Козлов Г. В., Грек Г. Р.** Влияние продольных полосчатых структур на процесс турбулизации круглой струи // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 3. С. 50–60.
7. **Boronin S., Healey J., Sazhin S.** Non-modal stability of round viscous jets // J. Fluid Mech. 2013. V. 716. P. 96–119.
8. **Jiménez-González J. I., Brancher P., Martínez-Bazán C.** Modal and non-modal evolution of perturbations for parallel round jets // Phys. Fluids. 2015. V. 27. 044105.
9. **Ivanov O. O., Ashurov D. A., Gareev L. R., Vedeneev V. V.** Non-modal perturbation growth in a laminar jet: an experimental study // J. Fluid Mech. 2023. V. 963. A8.
10. **Tumin A., Reshotko E.** Spatial theory of optimal disturbances in boundary layers // Phys. Fluids. 2001. V. 13, N 7. P. 2097–2104.
11. **Gareev L., Zayko J., Chicherina A., et al.** Experimental validation of inviscid linear stability theory applied to an axisymmetric jet // J. Fluid Mech. 2022. V. 934. A3.
12. **Matsubara M., Alfredsson P. H.** Disturbance growth in boundary layers subjected to free-stream turbulence // J. Fluid Mech. 2001. V. 430. P. 149–168.
13. **Zayko J., Teplovodskii S., Chicherina A., et al.** Formation of free round jets with long laminar regions at large Reynolds numbers // Phys. Fluids. 2018. V. 30. 043603.

*Поступила в редакцию 2/VI 2023 г.,  
после доработки — 7/IX 2023 г.  
Принята к публикации 25/IX 2023 г.*

---