

УДК 532.6

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОРОГОВЫХ N -ФАКТОРОВ ПОЛОЖЕНИЯ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА В ДОЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ВЫТЯНУТОГО СФЕРОИДА

А. В. Бойко*, К. В. Демьянко*,**, С. В. Кириловский*,
Ю. М. Нечепуренко*,**, Т. В. Поплавская*

* Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

** Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН,
119333 Москва, Россия

E-mails: boiko@itam.nsc.ru, kirill.demyanko@yandex.ru, kirilov@itam.nsc.ru,
yumnech@yandex.ru, popla@itam.nsc.ru

Представлены результаты численного исследования ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое вытянутого сфероида с помощью газодинамического пакета ANSYS Fluent с подключаемым оригинальным модулем ламинарно-турбулентного перехода, разработанным на базе e^N -метода. На основе экспериментальных данных предложен метод определения раздельных пороговых N -факторов для различных механизмов перехода.

Ключевые слова: ламинарно-турбулентное обтекание, методы определения положения перехода, e^N -метод, пороговые N -факторы, численное моделирование.

DOI: 10.15372/PMTF20210601

Проводится валидация предложенного авторами данной работы метода прогнозирования ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) для трехмерного потока вокруг вытянутого сфероида [1]. Численное моделирование обтекания вытянутого сфероида выполняется с помощью вычислительной технологии [2], в которой используется газодинамический пакет ANSYS Fluent с подключаемым оригинальным модулем ЛТП, разработанным на основе программного комплекса LOTRAN 3 [3]. Этот модуль предназначен для анализа аэродинамической устойчивости и расчета ЛТП в трехмерных аэродинамических пограничных слоях (ПС) с использованием e^N -метода [4]. Для определения пороговых N -факторов, необходимых для прогнозирования положения ЛТП, предлагается метод нахождения раздельных для различных видов неустойчивости пороговых N -факторов с использованием экспериментальных данных.

Рассматривается дозвуковое обтекание модели вытянутого сфероида длиной $L = 2,4$ м и диаметром 0,4 м при единичном числе Рейнольдса $Re_1 = 3 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, числе Маха набегающего потока $M_\infty = 0,13$ и значении угла атаки $\alpha = 10^\circ$. Для этой модели имеются

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 18-19-00460).

© Бойко А. В., Демьянко К. В., Кириловский С. В., Нечепуренко Ю. М., Поплавская Т. В., 2021



Рис. 1. Алгоритм определения N -факторов и положения ЛТП на аэродинамических конфигурациях

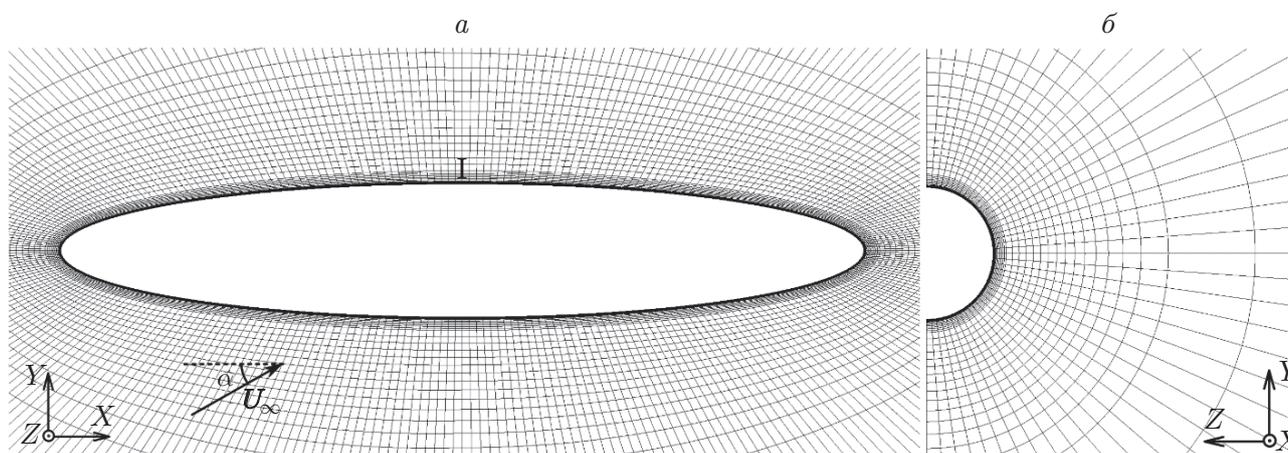


Рис. 2. Фрагменты расчетной сетки (каждая восьмая ячейка) в плоскости симметрии (а) и в сечении, где диаметр вытянутого сфероида максимален (б):
 I — выделенная зона с более мелкой сеткой

экспериментальные данные о положении начала ЛТП, полученные в трехметровой низкоскоростной аэродинамической трубе DFVLR (г. Геттинген, Германия) [1, 5]. В дальнейшем данный метод предполагается применять с использованием экспериментальных данных, полученных в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН на скользящем крыле [6].

Алгоритм расчета пороговых N -факторов на вытянутом сфероиде с использованием экспериментальных данных заключается в следующем (рис. 1). Сначала строится расчетная область с блочной гексагональной расчетной сеткой (рис. 2), при этом вблизи поверхности выделяется зона I (высота которой составляет не менее пяти толщин пограничного слоя) с более мелкой сеткой. Затем с помощью пакета ANSYS Fluent рассчитывается обтекание модели [2] при указанных выше условиях потока.

Далее в модуль ЛТП передаются данные о ламинарном течении в выделенной зоне I. Основным результатом работы модуля является распределение N -факторов нарастания возмущений вдоль построенных линий тока в ПС модели отдельно для каждого механизма ЛТП, а именно волн Толлмина — Шлихтинга и вихрей поперечного течения. После этого с использованием распределений N -факторов и экспериментальных данных о положении ЛТП определяются отдельные пороговые N -факторы для волн Толлмина — Шлихтинга и вихрей поперечного течения. Данная процедура включает следующие этапы.

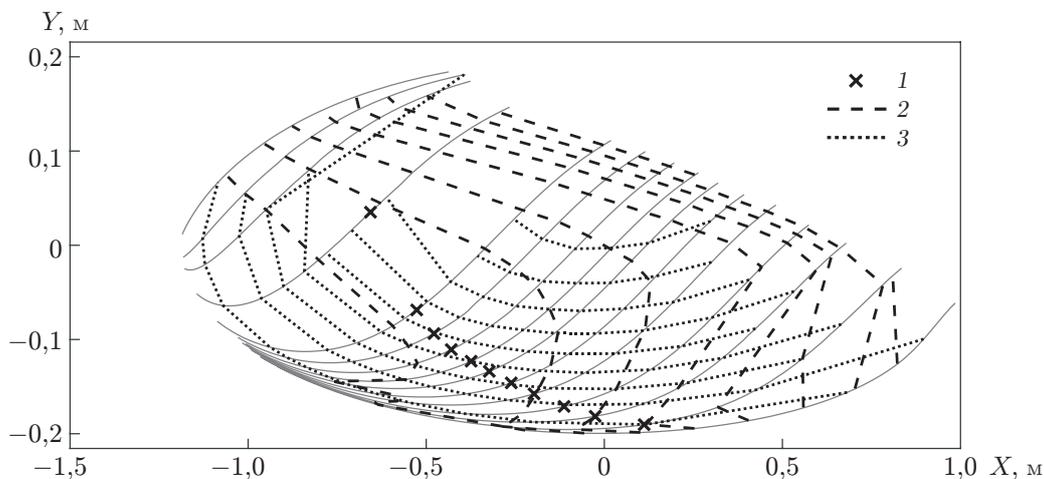


Рис. 3. Экспериментальное положение начала ЛТП (1) и уровни N -факторов для волн Толлмина — Шлихтинга (2) и для вихрей поперечного течения (3) при $Re_1 = 3 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $M_\infty = 0,13$, $\alpha = 10^\circ$:

сплошные линии — проекции линий тока на поверхность модели

1. В проекции на плоскость (X, Y) имеющиеся экспериментальные данные о положении начала ЛТП интерполируются на линии тока, для которых были рассчитаны распределения N -факторов (рис. 3). Также для каждого вида неустойчивости строятся расчетные линии перехода, каждая из которых соответствует определенному значению N -фактора. В качестве примера на рис. 3 приведены уровни N -факторов для волн Толлмина — Шлихтинга, изменяющиеся в диапазоне $0,01 \div 10,96$ с шагом 1,22, и уровни N -факторов для вихрей поперечного течения, изменяющиеся в диапазоне $0,01 \div 11,83$ с шагом 1,32.

2. С помощью метода наименьших квадратов находится пара (N_{TS}, N_{CF}) пороговых N -факторов, минимизирующая сумму квадратов расстояний между расчетными и экспериментальными положениями перехода на линиях тока (N_{TS} для неустойчивости волн Толлмина — Шлихтинга и N_{CF} для неустойчивости вихрей поперечного течения). При этом необходимо, чтобы реализовалось одно из условий: 1) либо N -фактор неустойчивости волн Толлмина — Шлихтинга равен N_{TS} , а N -фактор неустойчивости вихрей поперечного течения меньше или равен N_{CF} ; 2) либо N -фактор неустойчивости вихрей поперечного течения равен N_{CF} , а N -фактор неустойчивости волн Толлмина — Шлихтинга меньше или равен N_{TS} .

Найденные N -факторы N_{TS} , N_{CF} полагаются пороговыми и соответствуют расчетному положению ЛТП. Для указанного варианта обтекания $N_{TS} = 2,41$, $N_{CF} = 4,06$. Полученные данные о начале перехода сравниваются с экспериментальными данными (рис. 4).

Использование предложенного метода позволяет дать обоснование механизма неустойчивости, вызывающей ЛТП на каждой линии тока. Затруднение может возникнуть только для линий тока, вблизи которых наблюдается равенство пороговых значений обоих N -факторов. Знание таких проблемных мест важно при планировании исследований неклассических сценариев ЛТП.

Результат расчета положения начала ЛТП для указанного варианта обтекания показан на рис. 4 штриховой линией, полученной с учетом двух механизмов перехода. Видно, что для указанных условий обтекания вытянутого сфероида на боковой поверхности при переходе к турбулентности доминируют вихри поперечного течения, а вблизи верхней и нижней поверхностей модели преобладает неустойчивость волн Толлмина — Шлихтинга.

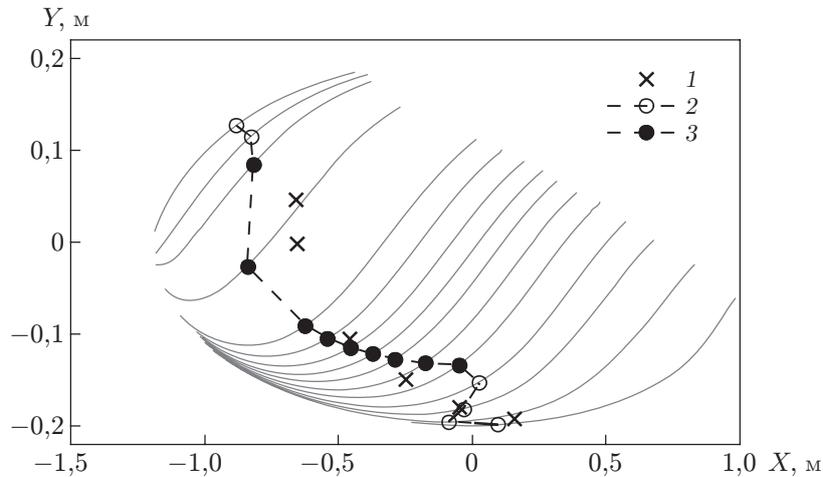


Рис. 4. Экспериментальное (1) и расчетные (2, 3) положения начала ЛТП при $N_{TS} = 2,41$, $N_{CF} = 4,05$, $Re_1 = 3 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $M_\infty = 0,13$, $\alpha = 10^\circ$: 2 — волны Толлмина — Шлихтинга, 3 — вихри поперечного течения; сплошные линии — проекции линий тока на поверхность модели

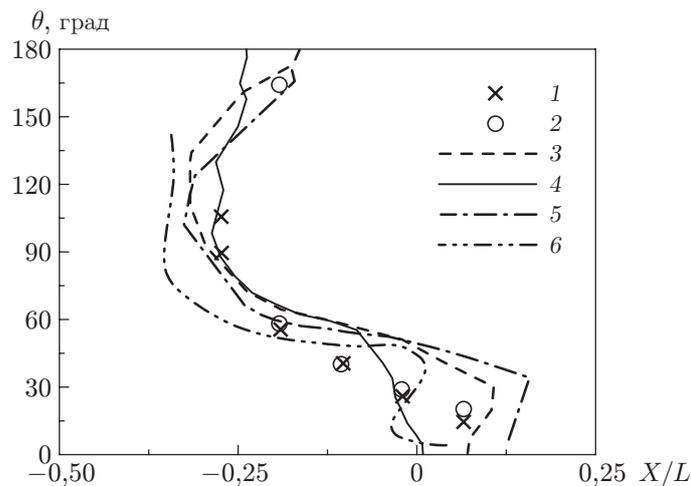


Рис. 5. Зависимость положения начала ЛТП от азимутального угла θ в ПС вытянутого сфероида при $Re_1 = 3 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $M_\infty = 0,13$, $\alpha = 10^\circ$: точки — эксперимент (1 — работа [1], 2 — работа [5]), линии — расчет (3 — работа [7], 4 — работа [8], 5 — работа [2], 6 — настоящая работа ($N_{TS} = 2,41$, $N_{CF} = 4,05$))

Для количественного сравнения полученных данных (рис. 5) использовались также расчетные данные для указанного режима, полученные в работах [2, 7, 8] с помощью e^N -метода в сочетании с диаграммой устойчивости [7]. Диаграмма устойчивости — зависимость между N_{TS} и N_{CF} , полученная путем осреднения большого количества данных при различных режимах обтекания сфероида с целью обеспечить наибольшую точность прогноза ЛТП. Вместе с тем приведенные результаты, полученные с помощью предлагаемого метода, дают основания полагать, что использование отдельных N -факторов способно обеспечить достаточную точность. В рассмотренном случае положение перехода определяется с погрешностью, не превышающей 10 % по длине модели, что сравнимо с результатами расчетов, в которых используется диаграмма устойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Meier H. U.** Experimental investigation of the boundary layer transition and separation on a body of revolution // *Z. Flugwiss. Weltraumforsch.* 1980. Bd 4, N 2. S. 65–71.
2. **Boiko A. V., Demyanko K. V., Kirilovskiy S. V., et al.** Modeling of transonic transitional 3D flows with a general-purpose CFD code using the e^N -method // *AIAA J.* 2021. V. 59, N 9. P. 3598–3610.
3. **Boiko A. V., Demyanko K. V., Nechepurenko Y. M.** On computing the location of laminar-turbulent transition in compressible boundary layers // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Model.* 2017. V. 32, N 1. P. 1–12.
4. **Бойко А. В., Кириловский С. В., Маслов А. А., Поплавская Т. В.** Инженерное моделирование ламинарно-турбулентного перехода: достижения и проблемы (обзор) // *ПМТФ.* 2015. Т. 56, № 5. С. 30–49.
5. **Kreplin H. P., Vollmers H., Meier H. U.** Wall shear stress measurements on an inclined prolate spheroid in the DFVLR 3M×3M low speed wind tunnel: Rep. / DFVLR-AVAIB. N 222-84/A33. Göttingen, 1985.
6. **Иванов А. В., Мищенко Д. А., Бойко А. В.** Методика количественного описания положения ламинарно-турбулентного перехода на скользящем крыле при повышенной степени турбулентности набегающего потока // *ПМТФ.* 2020. Т. 61, № 2. С. 109–116.
7. **Stock H. W.** e^N transition prediction in three-dimensional boundary layers on inclined prolate spheroids // *AIAA J.* 2006. V. 44, N 1. P. 108–118.
8. **Krimmelbein N., Radespiel R., Nebel C.** Numerical aspects of transition prediction for three-dimensional configurations. Reston, 2005. (Paper / AIAA; N 2005-4764).

*Поступила в редакцию 25/VI 2021 г.,
после доработки — 25/VI 2021 г.
Принята к публикации 28/VI 2021 г.*
