УДК 532.6

РАСЧЕТНЫЕ СЕТКИ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ОБТЕКАНИЯ

А. В. Бойко, С. В. Кириловский, Т. В. Поплавская

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия E-mails: boiko@itam.nsc.ru, kirilov@itam.nsc.ru, popla@itam.nsc.ru

Представлены результаты методической работы по оптимизации расчетов ламинарнотурбулентного обтекания на различных расчетных сетках с целью экономии вычислительных ресурсов. Исследование выполнено на основе данных расчета дозвукового обтекания стреловидного крыла в виртуальной аэродинамической трубе с использованием пакета вычислительной гидрогазодинамики ANSYS Fluent с подключаемым блоком для определения ламинарно-турбулентного перехода, разработанным в Институте теоретической и прикладной механики CO PAH на базе е^N-метода.

Ключевые слова: ламинарно-турбулентное обтекание, е^{*N*}-метод определения положения перехода, численное моделирование.

DOI: 10.15372/PMTF20220610

В последнее время широко распространено моделирование ламинарно-турбулентного обтекания (ЛТО) в трехмерных пограничных слоях (ПС) вблизи тел сложной геометрии [1]. При этом необходимо решить две задачи: 1) провести численное моделирование ламинарного обтекания тела; 2) определить положение ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) с помощью известных методов, например е^N-метода, на основе анализа устойчивости течения. Для применения этих методов, как правило, требуется обеспечить высокую точность расчета ламинарного участка ПС, причем для инженерных приложений — с минимальными затратами машинного времени. Вместе с тем при решении задач ЛТО зависимости скорости расчета и общих затрат времени от типа расчетных сеток ранее детально не анализировались. Поэтому в настоящей работе проведено сравнение результатов расчета ламинарного течения на различных расчетных сетках, а также характеристик ЛТП. При сравнении различных расчетных сеток учитывались трудозатраты при построении сетки и общее количество ячеек, необходимое для получения удовлетворительного результата.

В настоящей работе проводится численное моделирование обтекания стреловидного крыла, размещенного в "виртуальной" рабочей части аэродинамической трубы Т-324 Института теоретической и прикладной механики (ИТПМ) СО РАН, с помощью предложенной авторами вычислительной технологии [2], в которой использовался пакет вычислительной гидрогазодинамики (CFD-пакет) ANSYS Fluent с подключаемым модулем для

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

[©] Бойко А. В., Кириловский С. В., Поплавская Т. В., 2022



Рис. 1. Расчетная область с размещенным в ней стреловидным крылом и фрагменты блочной гексаэдральной расчетной сетки (вид сбоку, показана каждая 27-я ячейка)

определения ЛТП, разработанным на основе е^N-метода и оригинального программного комплекса LOTRAN 3 [3]. Расчетная область представляет собой параллеленинед и повторяет форму рабочей камеры аэродинамической трубы T-324 (рис. 1). Скользящее крыло с углом стреловидности 45° и длиной хорды крыла C = 0,7 м сконструировано на основе профиля NACA 67 1-215 и может располагаться под различными углами атаки α . Точка O, указанная на рис. 1, является началом отсчета системы координат (x, y, z). Расчет ЛТО этой модели выполняется для широкого диапазона определяющих параметров задачи: скорости набегающего потока $U_{\infty} = 10 \div 50$ м/с, угла атаки $\alpha = -5$; 0; 3°, степени турбулентности набегающего потока Tu = 0,10; 0,50; 0,76 %. Расчетная сетка вокруг исследуемой модели строится с выделением вблизи поверхности зоны, высота которой равна нескольким толщинам ПС. Это необходимо для того, чтобы в блок ЛТП передавать данные о течении только из этой зоны с целью экономии вычислительных ресурсов. Толщина ПС определялась по результатам предварительных расчетов.

Известно, что наиболее эффективными с точки зрения вычислительных затрат являются гексаэдральные сетки, в которых продольные ребра ячеек практически параллельны линиям тока вокруг тела [4]. На первом этапе для расчетов основного течения на стреловидном крыле была построена блочная гексаэдральная регулярная расчетная сетка с выделенной зоной (B3). Общее количество ячеек полностью гексаэдральной сетки составило $10,4 \cdot 10^6$, в том числе $7,1 \cdot 10^6$ вне B3 и $3,3 \cdot 10^6$ в B3. После этого была построена блочная гексаэдральная регулярная построена блочная гексаэдральной сетки составило $10,4 \cdot 10^6$, в том числе $7,1 \cdot 10^6$ вне B3 и $3,3 \cdot 10^6$ в B3. После этого была построена блочная гексаэдральная регулярная расчетная сетка (рис. 2,a) с меньшим количеством ячеек $5,4 \cdot 10^6$ за счет уменьшения количества ячеек вне B3 ($2,1 \cdot 10^6$ вне B3 и $3,3 \cdot 10^6$ в B3). Профили скорости, построенные по нормали к поверхности с использованием этих расчетных сеток, и экспериментальные данные, полученные в аэродинамической трубе T-324 с помощью инфракрасной термографии и термоанемометрии [5], различаются менее чем на 1 %.

Процедура построения криволинейной блочной регулярной гексаэдральной расчетной сетки требует значительных трудозатрат, вследствие того что блоки сетки строятся вручную. Нерегулярные сетки, в частности тетраэдральные, не имеющие упорядоченной структуры сеточных узлов, создаются автоматически с помощью встроенного в CFD-пакет генератора сеток. Поэтому далее в обеих зонах была построена нерегулярная тетраэдральная расчетная сетка (рис. $2, \delta$). Общее количество ячеек полностью тетраэдральной сетки



Рис. 2. Фрагменты расчетных сеток в центральной плоскости вблизи границы выделенной зоны (штриховая линия):

a — гексаэдральная блочная регулярная расчетная сетка, б — полностью тетраэдральная расчетная сетка, в — тетраэдральная сетка с призматическим подслоем, z — смешанная гексаэдральная в ВЗ и тетраэдральная вне ВЗ сетка

составило $14,4 \cdot 10^6$, во внешней области число тетраэдральных ячеек равно 10^6 , в ВЗ — $13,4\cdot 10^6$. При этом размер пространственных шагов вблизи поверхности модели существенно больше, чем на гексаэдральной сетке, но при сохранении размера пространственных шагов вблизи поверхности модели общее количество тетраэдральных ячеек превышает $40 \cdot 10^6$, поэтому такая "тяжелая" тетраэдральная сетка далее не рассматривалась.

Сравнение расчетных профилей скорости основного течения (рис. 3), полученных на различных сетках, с экспериментальными данными показало, что тетраэдральная сетка с количеством ячеек $14,4\cdot 10^6$ не разрешает в должной степени ПС. Этот вывод был получен для значений скорости набегающего потока $U_{\infty} = 10 \div 50$ м/с и углов атаки $\alpha = -5$; 0; 3°. Поэтому для лучшего разрешения ПС была построена тетраэдральная расчетная сетка с призматическим подслоем вблизи поверхности модели (рис. 2, ϵ). Общее количество ячеек такой сетки составило $11,2\cdot 10^6$, в том числе 10^6 вне ВЗ и $10,2\cdot 10^6$ в ВЗ.

Однако наиболее "легкой" сеткой, состоящей из необходимого количества узлов, является смешанная расчетная сетка, объединяющая регулярную гексаэдральную сетку в ВЗ с нерегулярной тетраэдральной во внешней зоне (рис. 2,*г*). Общее количество ячеек такой смешанной сетки составило $4,5 \cdot 10^6$, в том числе во внешней области — $1,2 \cdot 10^6$ тетраэдральных ячеек, в ВЗ — $3,3 \cdot 10^6$ гексаэдральных ячеек. Объединение регулярной сетки во внешней области осуществлялось с помощью интерфейса (специальной границы в ANSYS Fluent для соединения двух неконформных сеток). Для обеспечения стабильности решения добавлялся призматический слой над интерфейсом во внешней области с тетраэдральной расчетной сеткой.



Рис. 3. Профили скорости, построенные по нормали к поверхности крыла, в сечении x = 0,2 м, z = -0,5 м на нижней поверхности крыла (*a*) и распределение N-факторов в центральной плоскости (x, y) на верхней поверхности крыла (*б*) при $U_{\infty} = 10$ м/с, $\alpha = 0^{\circ}$:

1 — эксперимент, 2–5 — расчет с использованием различных сеток (2 — полностью тетраэдральная, 3 — тетраэдральная с призматическим подслоем (11,2 \cdot 10⁶ ячеек), 4 — гексаэдральная блочная регулярная расчетная сетка (5,4 \cdot 10⁶ ячеек), 5 — смешанная гексаэдральная в ВЗ и тетраэдральная вне ВЗ (4,5 \cdot 10⁶ ячеек))

С использованием описанных выше сеток проводились расчеты течения на стреловидном крыле. Следует отметить, что для каждой конфигурации ячеек проводился анализ сходимости: при измельчении расчетных сеток в 1,5 раза по всем направлениям скорость ламинарного течения и *N*-факторы изменялись менее чем на 1 %.

Сравнение расчетных профилей скорости с экспериментальными (см., например, рис. 3,*a*) при различных значениях угла атаки и скорости потока показало, что данные, полученные на полностью гексаэдральной, на тетраэдральной с призматическим подслоем и на смешанной гексаэдрально-тетраэдральной расчетных сетках хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Результаты расчетов нарастания N-факторов, полученные с использованием блока перехода LOTRAN 3 для данных о течении на этих трех сетках, практически идентичны (см. рис. 3, δ). Заметим, что тетраэдральная сетка с призматическим подслоем построена автоматически с помощью встроенного в CFD-пакет генератора сеток, но имеет общее количество ячеек $11,2 \cdot 10^6$. Смешанная гексаэдрально-тетраэдральная расчетная сетка имеет общее количество ячеек $4,5 \cdot 10^6$. При этом построение гексаэдральной сетки в B3 осуществляется вручную. Поэтому с точки зрения экономии вычислительных ресурсов и трудозатрат для дальнейшего использования в расчетах ЛТО следует выбирать либо смешанную гексаэдрально-тетраэдральную сетку с построением блоков сетки вручную, либо тетраэдральную с призматическим подслоем, которая может быть построена автоматически с помощью встроенного в CFD-пакет генератора сеток. Таким образом, эти две расчетные сетки являются оптимальными для всего цикла расчетов (ламинарное течение и определение положений ЛТП).

Следует отметить, что описанные подходы к разработке расчетных сеток для ЛТО можно использовать не только в случае стреловидного крыла, но и в случае других тел сложной геометрии (например, вытянутого сфероида и мотогондолы [2]).

ЛИТЕРАТУРА

- 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.
- Boiko A. V., Demyanko K. V., Kirilovskiy S. V., et al. Modeling of transmic transitional 3D flows with a general-purpose CFD code using the e^N-method // AIAA J. 2021. V. 59, N 9. P. 3598-3610.
- Boiko A. V., Demyanko K. V., Nechepurenko Y. M. On computing the location of laminarturbulent transition in compressible boundary layers // Russ. J. Numer. Anal. Math. Model. 2017. V. 32, N 1. P. 1–12.
- Baker T. J. Mesh generation: Art or science? // Progr. Aerospace Sci. 2005. V. 41. P. 29–63. DOI: 10.1016/j.paerosci.2005.02.002.
- Boiko A. V., Ivanov A. V., Borodulin V. I., Mischenko D. A. Quantification technique of transition to turbulence in boundary layers using infrared thermography // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2022. V. 183, Pt A, N 122065. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122065.

Поступила в редакцию 20/IV 2022 г., после доработки — 20/IV 2022 г. Принята к публикации 25/IV 2022 г.