

Моделирование сверхзвукового обтекания затупленного конуса в пакете ANSYS Fluent с использованием двух различных способов построения расчетной сетки

© А.Г. Голубев, О.И. Ремизова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Проведено сравнение результатов численного моделирования сверхзвукового обтекания затупленного конуса на гексаэдрической структурированной и тетраэдрической неструктурированной сетках в пакете ANSYS Fluent. Построение сеток выполнено в пакете ANSYS ICEM CFD. Для обоих вариантов расчета использовалась модель турбулентности Спаларта – Аллмареса. Расчетные значения распределенных и интегральных характеристик, полученные в результате моделирования на двух типах сеток, с достаточной степенью точности соотносятся с результатами физических экспериментов ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, а также с хорошо зарекомендовавшими себя эмпирическими зависимостями. По результатам выполненной работы сделаны выводы о достоинствах и недостатках рассмотренных типов сеток. Приведены рекомендации по более выгодному использованию структурированных сеток в задачах аэрогазодинамики.

Ключевые слова: аэродинамические характеристики, ANSYS Fluent, структурированная сетка, неструктурированная сетка, скачок уплотнения

Введение. Теория метода конечных объемов (МКО) подразумевает дискретизацию исследуемой области, т. е. построение расчетной сетки. Несмотря на длительное изучение и использование методов численного моделирования, выбор способа построения сетки до сих пор остается актуальной проблемой [1–6].

Известно, что в различных физических задачах, даже в рамках одного метода (например, МКО), предъявляются различные требования к созданию расчетных сеток (для учета особенностей физического процесса), а также допускаются различные способы их создания. Далее рассматриваются некоторые особенности построения сетки для задач гидро- и газодинамики с использованием программного модуля ANSYS ICEM CFD. Данный инструмент отлично подходит для создания сетки для CFD-приложений ANSYS, например ANSYS Fluent, однако общую логику построения сетки можно переносить и на другие генераторы сеток и решатели.

Главная цель построения сетки — дать такое разбиение счетной области на ячейки или элементы, чтобы полученное отображение узлов сетки из физической области в вычислительную давало наиболее точное решение дифференциальной задачи [7]. В указанном программном обеспечении предусмотрена возможность создания двух

типов сеток, различающихся упорядоченностью сеточных узлов: регулярной блочной (структурированной, условно гексаэдрической) и нерегулярной (неструктурированной) [8].

Структурированная сетка создается путем деления области на регулярные подобласти, которые в дальнейшем разбиваются регулярной четырехугольной сеткой. Данный способ универсален, так как с его помощью на любой поверхности можно создавать регулярные четырехугольные вычислительные сетки в задачах 2D-моделирования. Построение трехмерной регулярной сетки — еще более трудоемкий процесс. Даже при использовании такого специализированного программного обеспечения время, затрачиваемое на создание регулярной сетки, сопоставимо со временем постановки и непосредственного решения задачи [9].

Основной особенностью неструктурированных сеток, отличающих их от регулярных, являются произвольное расположение узлов в физической области и, как следствие, невозможность выделить сеточные направления или упорядочить узлы сетки, привязав ее к какой-либо системе координат (в том числе криволинейной) [10–13]. Топология неструктурированных сеток чаще всего формируется в процессе построения, поэтому она может значительно изменяться в пределах дискретизируемой области. Однородность или равномерность построенной сетки не может возникнуть случайно. Она достигается благодаря наложению неких ограничений на определенные геометрические характеристики сеточной структуры [14, 15]. Таким образом, существенным преимуществом неструктурированного подхода являются гибкость и относительная простота построения, позволяющая точно отобразить форму расчетной области и сгенерировать сетку с меньшими затратами человеческого ресурса.

Любая сетка должна обладать рядом свойств, например, таких как:

- однозначность отображения;
- гладкость (отображение, используемое для построения сетки, должно быть непрерывно дифференцируемо и якобиан не должен обращаться в нуль);
- адаптивность (сетка должна иметь сгущение в тех областях, где возможны большие градиенты искомых функций).

При этом сетки должны быть максимально близки к ортогональным (границы элементов сетки должны пересекаться под углами, близкими к 90°) и отношение сторон элемента сетки не должно быть слишком большим (в идеале оно должно быть близко к единице).

В задачах с разрывными решениями (в том числе в задачах сверхзвуковой газодинамики) расчетная область содержит разномасштабные элементы сложной неоднородной структуры. Достаточно большие зоны имеют малые или умеренные градиенты параметров решения.

При формировании расчетной сетки необходимо обеспечивать сгущение узлов в областях затуплений и в поперечном направлении к поверхности тела, а также определенным образом выделять зоны торможения, разгона и слияния потоков. Вместе с тем имеются сравнительно узкие области — ударные волны, контактные разрывы, пограничные слои, зоны отрыва потока, градиенты параметров решения в которых достигают больших значений [16]. Для получения достоверного численного решения в областях такого типа необходимо использовать расчетные сетки с малыми пространственными шагами.

В задачах, в которых рассматриваются области отрыва потока без фиксированной линии отрыва (например, на конусе при больших углах атаки), важнейшее значение придается правильному моделированию пограничного слоя (в том числе получению верных параметров в направлении, поперечном основному направлению). Для этого вводят специальную «пограничную» сетку, состоящую из тонких четырехугольных призм вблизи стенки [17, 18].

Объем памяти, требуемый для решения задачи, можно уменьшить путем моделирования половины расчетной области (для случая плоской симметрии) или ее сегмента (для случая осевой симметрии). При этом размеры расчетной области должны быть достаточно велики, чтобы исключить влияние границ области на исследуемое тело.

Постановка задачи. В рамках работы было проведено моделирование сверхзвукового обтекания затупленного конуса (рис. 1), аэродинамические характеристики (АДХ) которого хорошо изучены как экспериментально [19], так и теоретически (рис. 2).

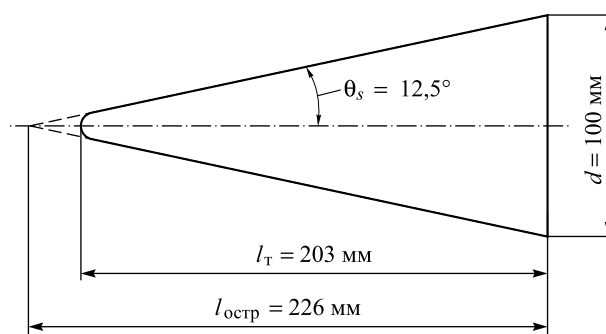


Рис. 1. Эскиз модели затупленного конуса

Значения АДХ получены без учета донной области. В качестве расчетных углов атаки для данной работы были выбраны $\alpha = 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40$ град. Расчет проводился в программе ANSYS Fluent (студенческая версия) на двух типах сеток (структурированная и неструктурированная), разработанных в ANSYS ICEM CFD в соответствии с заданной формой [20, 21].

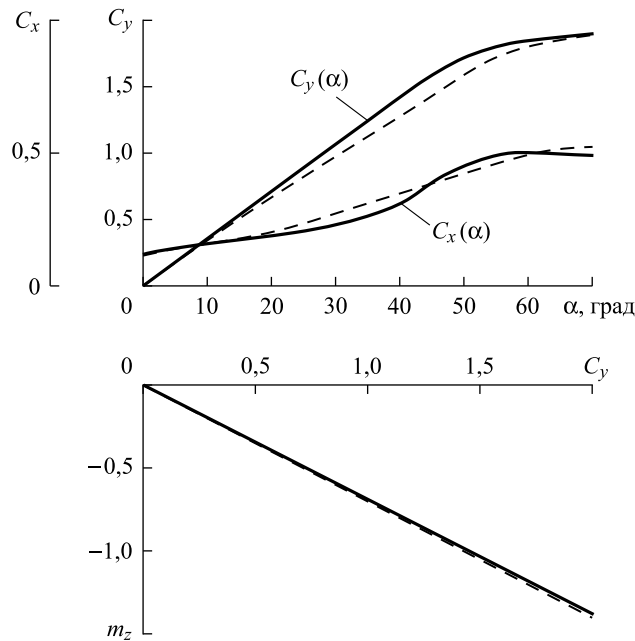


Рис. 2. График аэродинамических коэффициентов при $\theta_s = 12,5^\circ$, $\bar{\lambda} = l_T/l_{\text{остр}} = 0,9$ и числе Маха $M = 3,25$, полученных экспериментально в ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского (штриховой линией обозначены кривые, соответствующие ньютоновской теории):
 C_x, C_y, m_z — коэффициенты продольной, нормальной и поперечной сил соответственно

В соответствии с характеристиками набегающего потока (критериями подобия), приведенными в экспериментальной работе [19] (число Маха $M = 3,25$; число Рейнольдса $Re = 3 \cdot 10^6$ по диаметру донного среза), были подобраны исходные данные для численного моделирования: статическое давление $p_{\infty \text{ стат}} = 10^4$ Па; статическая температура невозмущенного набегающего потока $T_{\infty \text{ стат}} = 90$ К.

Значение числа Рейнольдса свидетельствует о том, что течение носит полностью турбулентный характер. Это было учтено при моделировании применением модели турбулентности Спаларта – Аллмареса (Spalart-Allmaras) — SA-модели.

SA-модель была разработана для аэрокосмической отрасли, а именно для решения задач аэрогидродинамики, и относится к так называемым низкорейнольдсовским моделям. Реализация SA-модели дает хорошие результаты для пограничных слоев при больших градиентах давления. Ввиду включения в модель пристеночных функций допускается некоторая «грубость» расчетной сетки вблизи поверхности тела. В соответствии с Руководством для пользователя

ANSYS Fluent для значений y^+ от 1 до 30 модель сохраняет целостность, обеспечивает постоянные трение и теплоотдачу. Рекомендуемое значение для пограничного слоя y^+ составляет ~ 1 . К недостаткам модели SA можно отнести плохое описание затухания турбулентности в сдвиговых и отрывных течениях. Использование данной модели турбулентности обусловлено ее вычислительной экономичностью (модель с одним дифференциальным уравнением), устойчивостью, надежностью и сходимостью результатов, полученных для широкого круга задач, в том числе задач сверхзвуковой аэродинамики.

Создание сетки. С учетом указанных особенностей построения расчетной сетки (габаритные размеры области, симметрия задачи, выделение пограничного слоя и участка донного следа) в SolidWorks была построена твердотельная модель (рис. 3).

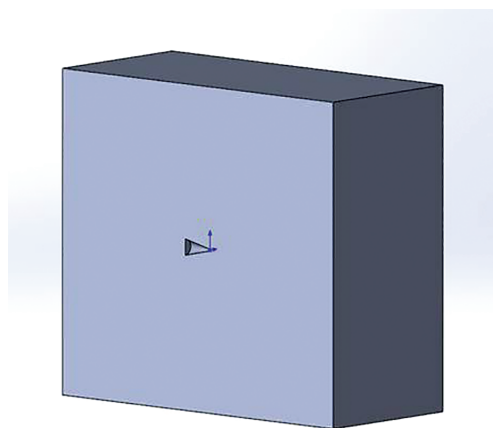


Рис. 3. Окончательный вид модели в SolidWorks

В процессе сеточной дискретизации были выделены следующие характерные области: INLET (вход), OUTLET (выход), OPENING (открытая граница), SYMMETRY (плоскость симметрии), BODY (конус без дна), BOTTOM (донный срез).

Необходимость обширной области перед телом конуса обусловлена тем, что в случае ее отсутствия качество ячеек заметно ухудшается (рис. 4) [11]. Характерным в процессе построения структурированной сетки является разбиение объема на блоки (рис. 5).

Для неструктурированной тетраэдрической сетки характерно выделение гексаэдрического пограничного слоя (рис. 6).

Была исследована сходимость численной задачи для сеток различного размера по критерию времени расчета (остановка счета проводилась при значениях невязок 10^{-5}). Результаты представлены на рис. 7 (N — общее количество ячеек в сетке).

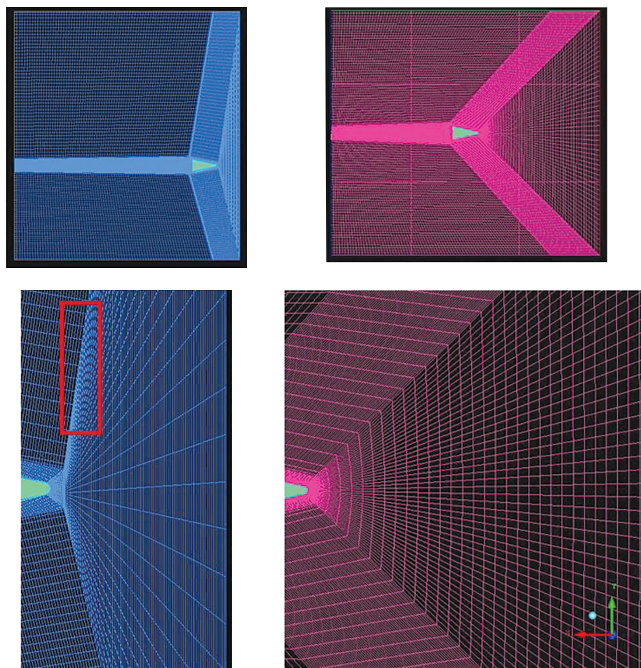


Рис. 4. Влияние размера области перед телом на качество сетки

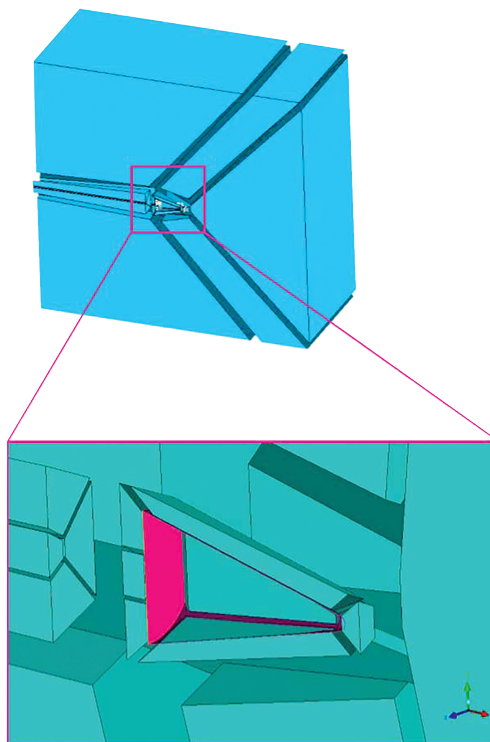


Рис. 5. Разбиение объема на блоки в случае структурированной сетки

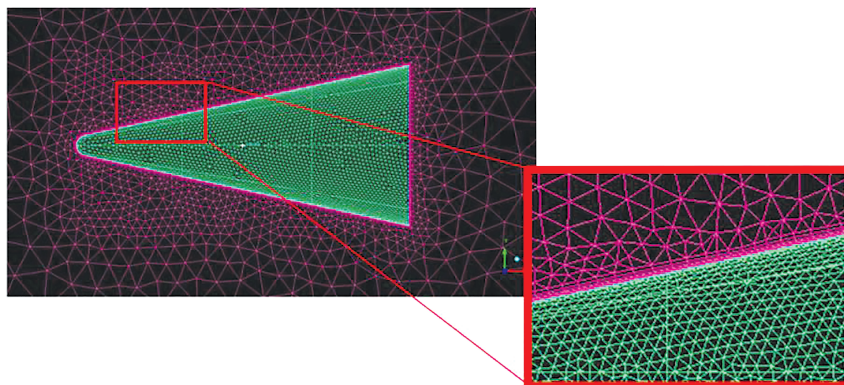


Рис. 6. Выделение гексаэдрического пограничного слоя для неструктурированной сетки

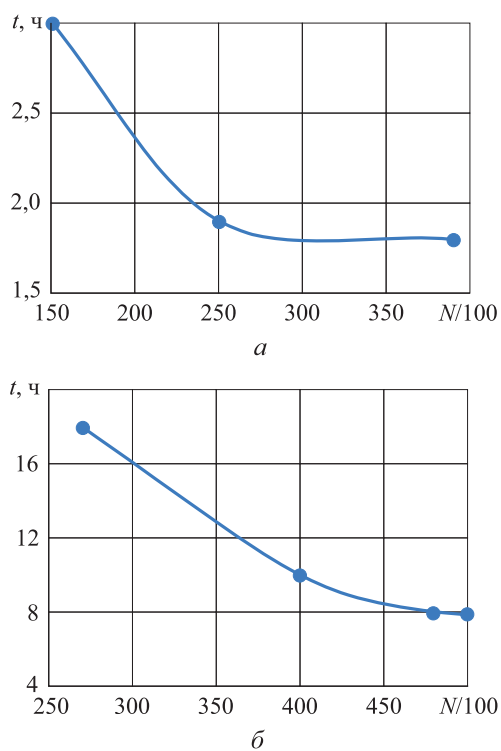


Рис. 7. Время решения задачи на структурированной (*a*) и неструктурированной (*б*) сетках

Варианты сеток, принятые для моделирования в ANSYS Fluent, представлены на рис. 8 (структурированная сетка — 250 164 ячейки, неструктурированная — 486 068 ячеек). На построение структурированной сетки в рамках данной задачи потребовалось в 8 раз больше времени, чем для создания неструктурированной.

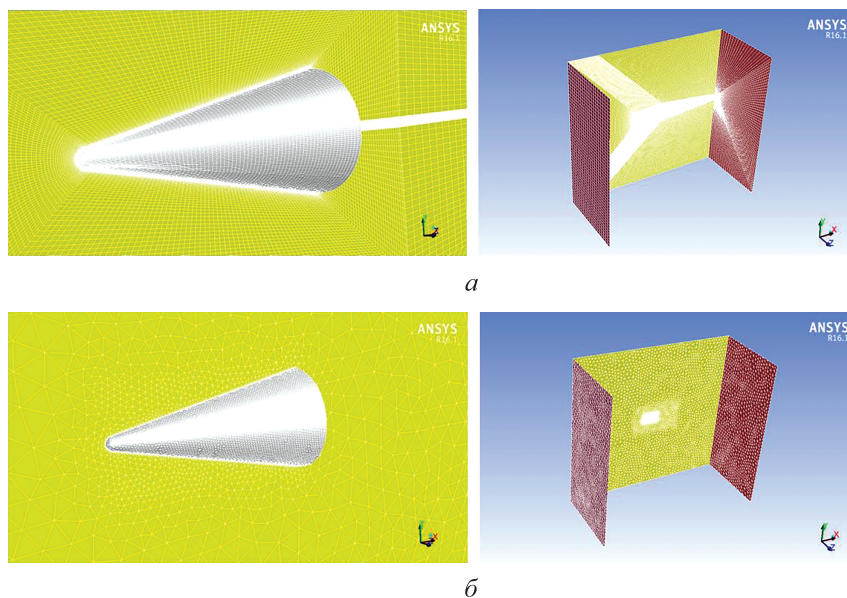


Рис. 8. Общий вид структурированной (а) и неструктурированной (б) сеток: (слева — вблизи поверхности конуса на плоскости симметрии; справа — на плоскостях INLET, OUTLET и SYMMETRY)

Проверка качества сеток проводилась в пакете ICEM CFD по критериям «Determinant 3×3×3» и «Quality». Было достигнуто соответствие данных показателей качества для двух типов сеток (рис. 9 и 10).

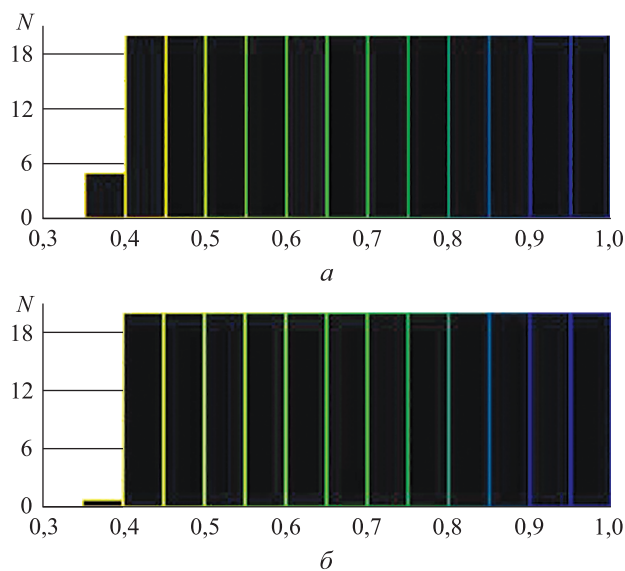


Рис. 9. Показатель критерия качества «Determinant» для структурированных (а) и неструктурированных (б) сеток

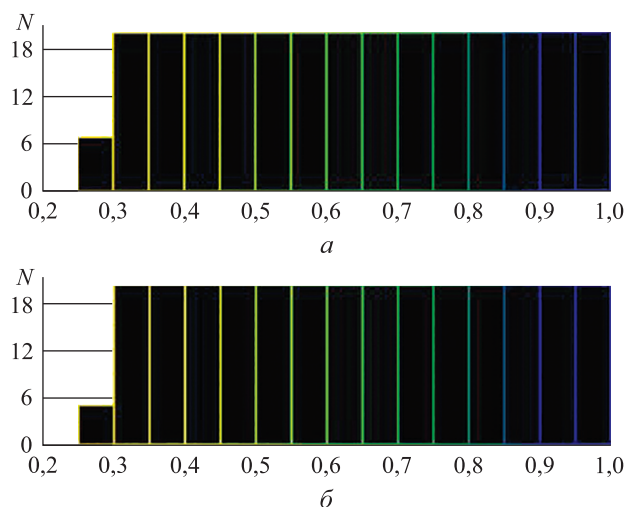


Рис. 10. Показатель критерия качества сеток «Quality» для структурированных (а) и неструктурированных (б) сеток

Результаты. Полученные сетки были интегрированы в ANSYS Fluent. Параметры, на основе которых проводился расчет, представлены на рис. 11.

The screenshot shows the 'Reference Values' dialog box in ANSYS Fluent. The 'Compute from' dropdown is set to 'inlet'. The 'Reference Values' section contains the following parameters:

Parameter	Value
Area (m ²)	0.007854
Density (kg/m ³)	0.3870955
Enthalpy (J/kg)	281874.8
Length (m)	0.2
Pressure (pascal)	10000
Temperature (K)	89.99998
Velocity (m/s)	614.8549
Viscosity (kg/m·s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

The 'Reference Zone' dropdown is set to 'fluid'. A 'Help' button is located at the bottom left of the dialog box.

Рис. 11. Параметры относительного расчета

Моделирование обтекания затупленного конуса воздушным потоком дало значения аэродинамических коэффициентов при различных углах атаки α (таблица).

Погрешности аэродинамических коэффициентов, %, относительно экспериментально полученных значений для структурированных (С) и неструктурированных (Н) сеток

α , град	C_x		C_y		m_z	
	С	Н	С	Н	С	Н
0	1,2	0,8	—	—	—	—
5	0	6,0	8,9	5,0	11,9	10,9
10	0,6	2,6	2,2	4,8	7,1	7,1
20	5,0	7,6	4,3	1,9	5,6	5,8
30	6,5	8,4	6,0	3,3	2,1	1,7
40	0,3	1,6	5,3	2,6	4,1	3,7

Результаты расчета оказались достаточно близки между собой (средняя относительная ошибка по значениям аэродинамических коэффициентов C_x , C_y , m_z составила 2 %). При этом длительность расчета на структурированной сетке в 4 раза меньше, чем на неструктурированной (см. рис. 7).

С помощью приближенных зависимостей для расчета параметров осесимметричного обтекания заостренного конуса [16] получены значения угла θ_c наклона скачка уплотнения и коэффициента \bar{p}_k давления на поверхности конуса:

$$\sin^2 \theta_c = \frac{1}{M_\infty^2} + \frac{k+1}{2} \sin^2 \theta_s,$$

$$\theta_c = 22^\circ 51';$$

$$\bar{p}_k = 2 \cdot 10^{-3} (0,8 + M_\infty^{-2}) \theta_s^{1,7},$$

$$\bar{p}_k = 0,129,$$

где $k = 1,4$ — показатель адиабаты; $\theta_s = 12,5^\circ$.

Вычисленные значения \bar{p}_k достаточно близки к значениям, полученным в результате моделирования: $\bar{p}_{k \text{ стр}} = 0,118$; $\bar{p}_{k \text{ нестр}} = 0,122$.

Угол наклона головного скачка уплотнения $\theta_c = 22^\circ 51'$ сравнивался со значением аналогичной величины, полученным в результате расчета для $\alpha = 0$ (рис. 12).

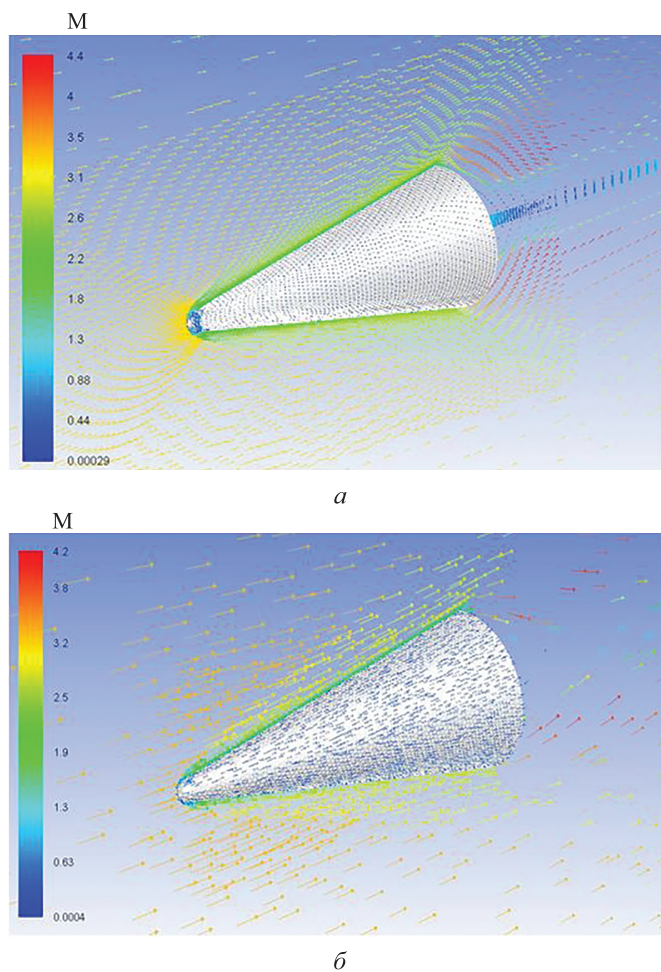


Рис. 12. Картины обтекания:

a — структурированная сетка; *б* — неструктурированная сетка

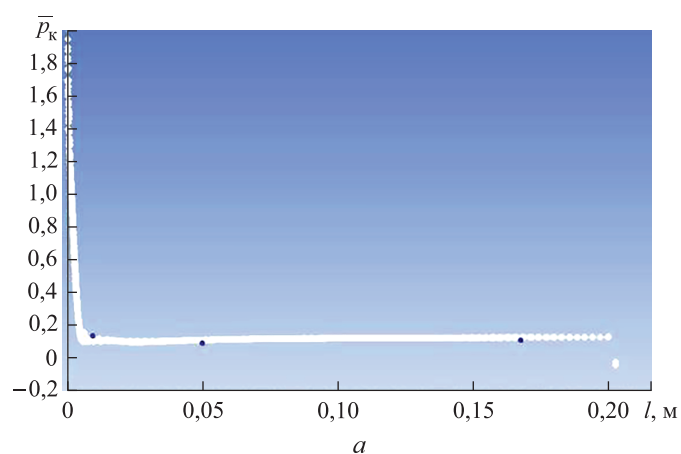


Рис. 13 (начало). Распределение коэффициента давления по длине l образующей конуса:

a — структурированная сетка

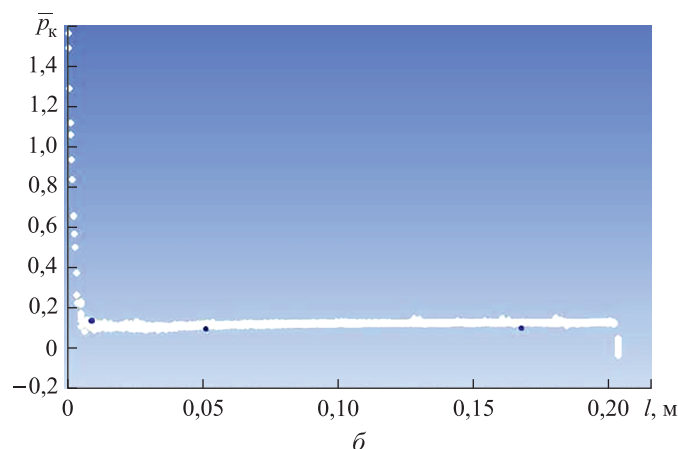


Рис. 13 (окончание). Распределение коэффициента давления по длине l образующей конуса:
 \bar{b} — неструктурированная сетка

Распределение коэффициента давления по образующей конуса, полученное в результате численных расчетов, совпадает с экспериментальными данными с высокой степенью точности (рис. 13).

Приведенные данные дают основание полагать, что численная схема расчета составлена верно.

Заключение. В ходе работы была решена типовая задача определения АДХ затупленного конуса при сверхзвуковом обтекании на двух типах сеток. Полученные численно интегральные характеристики совпадают с экспериментальными значениями с высокой степенью точности (кроме диапазона малых углов атаки, в котором адекватное сравнение с графическими данными затруднительно). Интегральные и распределенные АДХ для двух типов сеток хорошо согласуются друг с другом.

Для случая получения решения, не зависящего от размера сетки (расчетные значения не изменяются при дальнейшем измельчении сетки), количество элементов, а следовательно, и точек интегрирования решаемых уравнений для структурированной гексаэдрической сетки будет меньше, чем для неструктурированной. Использование структурированной сетки позволяет уменьшить продолжительность расчета и необходимый объем оперативной памяти вычислительного устройства. В то же время процедура построения криволинейной регулярной сетки представляет собой довольно сложную операцию и требует больших трудоресурсов, чем более автоматизированная процедура построения нерегулярной сетки.

Использование регулярной сетки оправдано для проектных и оптимизационных задач с большим количеством параметрических расчетов, например для расчета АДХ летательных аппаратов с одним

типом органов управления при его незначительных модификациях и различных параметрах набегающего потока [22]. При таком применении время на изучение физики процесса и построение качественной блочной структуры сетки затрачивается один раз и может быть получена экономия суммарного времени решения задачи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зубанов В.М., Кривцов А.В., Штрауб А.А. Исследование влияния параметров сетки и моделей турбулентности на результаты CFD-расчетов плоских турбинных решеток. *Вестник СГАУ им. академика С.П. Королева. Сер. Авиационная и ракетно-космическая техника*, 2012, № 3 (34), с. 185–191.
- [2] Матвеев С.Г., Орлов М.Ю., Абрашкин В.Ю. Моделирование аэродинамической структуры течения в камере сгорания малоразмерного ГТД с помощью САЕ-систем. *Вестник СГАУ им. академика С.П. Королева. Сер. Авиационная и ракетно-космическая техника*, 2011, № 2, с. 179–187.
- [3] Тусинин А.В., Шаламов С.А., Августиневич В.Г. Методика построения конечно-элементной сеточной модели на примере камеры сгорания газотурбинного двигателя. *Вестник ПНИПУ. Сер. Аэрокосмическая техника*, 2013, № 35, с. 31–48.
- [4] Бабаева Н.Н., Орлов И.В. Метод двух поверхностей построения расчетной сетки в задачах сверхзвукового обтекания. *Ученые записки ЦАГИ*, т. XXII, 1991, № 6, с. 37–44.
- [5] Батурич Н.В., Батурич О.В., Матвеев В.Н. Формирование структурной расчетной сетки межлопаточного канала осевой турбины в программе Gambit. *Вестник СГАУ им. академика С.П. Королева*, 2009, № 3 (19), с. 298–304.
- [6] Калугин В.Т., Голубев А.Г., Епихин А.С. Возможности применения открытого пакета OpenFOAM для численного моделирования отрывных течений при до- и сверхзвуковых скоростях обтекания летательных аппаратов. *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*, 2014, № 199 (1), с. 23–30.
- [7] Молчанов А.М., Щербаков М.А., Янышев Д.С., Куприков М.Ю., Быков Л.В. *Построение сеток в задачах авиационной и космической техники*. Москва, Изд-во МАИ, 2013, 260 с.
- [8] Ерофеев М.М. *Принцип построения структурированной гексаэдрической сетки в ANSYS*. URL: <http://sapr.ru/article/19894> (дата обращения 11.02.2018).
- [9] *Построение плоских и пространственных вычислительных сеток в ANSYS*. URL: <http://dolivanov.ru/node/134> (дата обращения 11.02.2018).
- [10] Волков К.Н., Емельянов В.Н. *Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа*. Москва, Физматлит, 2012, 468 с.
- [11] Богатырев В.В. Алгоритм построения экструзивных объемных расчетных сеток около крыла самолета. *Ученые записки ЦАГИ*, 2012, № 1. URL: http://www.tsagi.ru/institute/publications/memoirs/archive_annotations/1091/ (дата обращения 11.02.2018).
- [12] Данилов А.А. *Технология построения неструктурированных сеток и монотонная дискретизация уравнения диффузии*. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, 2002, 215 с.
- [13] Василевский Ю.В., Данилов А.А., Липников К.Н., Чугунов В.Н. *Автоматизированные технологии построения неструктурированных расчетных сеток*. Москва, Физматлит, 2013, 133 с.

- [14] Смелая Т.Г. Неструктурированные сетки и их применение при численном моделировании методом пробных частиц. *Техническая механика*, 2015, № 4, с. 155–168.
- [15] Карасёв П.И., Шишаева А.С., Аксенов А.А. Качественное построение расчетной сетки для решения задач аэродинамики в программном комплексе FlowVision. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Вычислительная математика и информатика*, 2012, № 47 (306), вып. 2, с. 46–58.
- [16] Голубев А.Г., Калугин В.Т., ред. *Аэродинамика*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, 687 с.
- [17] Димитриенко Ю.И., Котенёв В.П., Захаров А.А. *Метод ленточных адаптивных сеток для численного моделирования в газовой динамике*. Москва, Физматлит, 2011, 280 с.
- [18] Димитриенко Ю.И., Захаров А.А., Абакумов А.С., Коряков М.Н., Сыздыков Е.К. Численное моделирование газовых потоков в каналах воздухозаборников на основе уравнений Навье — Стокса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2011, № 4, с. 44–54.
- [19] Артонкин В.Г., Леутин П.Г., Петров К.П., Столяров Е.П. Аэродинамические характеристики острых и притупленных конусов при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях. *Тр. ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского*. Москва, Издательский отдел ЦАГИ, 1972, № 1413, 93 с.
- [20] Берендеев Н.Н., Любимов А.К., ред. *Применение системы ANSYS к решению задач механики сплошной среды*. Нижний Новгород, Изд-во Нижегородского гос. университета, 2006, 227 с.
- [21] Андрекайте А.А., Исаев В.К. Алгоритмы построения регулярных и нерегулярных сеток в односвязной плоской области. *Тр. XLIX науч. конф. МФТИ, Аэрофизика и космические исследования*. МФТИ. Москва – Долгопрудный, Изд-во МФТИ, 2006, с. 72–73.
- [22] Калугин В.Т. *Аэродинамика органов управления полетом летательных аппаратов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, 688 с.

Статья поступила в редакцию 30.03.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Голубев А.Г., Ремизова О.И. Моделирование сверхзвукового обтекания затупленного конуса в пакете ANSYS Fluent с использованием двух различных способов построения расчетной сетки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-11-1821>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLII Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, 23–26 января 2018 года

Голубев Алексей Геннадьевич — старший преподаватель кафедры «Динамика полета ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: golubevag@bmstu.ru

Ремизова Олеся Игоревна — студентка 6-го курса кафедры «Динамика полета ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: oi-remi@yandex.ru

Cones in ANSYS Fluent with the usage of two different methods for constructing a computational grid

© A.G. Golubev, O.I. Remizova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

In this paper, an attempt has been made to compare the results of numerical simulation of supersonic flow around a blunted cone on hexahedral structured and tetrahedral unstructured grids in the ANSYS Fluent package. The construction of grids was carried out in the ANSYS ICEM CFD package. For both variants of calculations, the turbulence model of Spalart and Allmaras (SA) was used. The calculated values of the distributed and integral characteristics obtained as a result of simulation on the two types of grids are correlated with a sufficient degree of accuracy with the results of physical experiments conducted at Zhukovsky Central AeroHydrodynamic Institute (TsAGI), as well as with well-established empirical dependencies. According to the results of the work done, conclusions were made about the advantages and disadvantages of the types of grids considered. Recommendations are given for the more advantageous use of structured grids in aerodynamic problems.

Keywords: aerodynamic characteristics, ANSYS Fluent, structured grid, unstructured grid, shock wave

REFERENCES

- [1] Zubanov V.M., Krivtsov A.V., Shtraub A.A. *Vestnik SGAU im. Akademika S.P. Koroleva. Ser. Aviatsionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika — Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2012, no. 3 (34), pp. 185–191.
- [2] Matveev S.G., Orlov M.Yu., Abrashkin V.Yu. *Vestnik SGAU im. Akademika S.P. Koroleva. Ser. Aviatsionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika — Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2011, no. 2, pp. 179–187.
- [3] Tusinin A.V., Shalamov S.A., Avgustinovich V.G. *Vestnik PNIPU. Ser. Aero-kosmicheskaya tekhnika (PNRPU Bulletin)*, 2013, no. 35, pp. 31–48.
- [4] Babaeva N.N., Orlov I.V. *Uchenye zapiski TsAGI — TsAGI Science Journal*, vol. XXII, 1991, no. 6, pp. 37–44.
- [5] Baturin N.V., Baurin O.V., Matveev V.N. *Vestnik SGAU im. Akademika S.P. Koroleva — Vestnik of Samara University*, 2009, no. 3 (19), pp. 298–304.
- [6] Kalugin V.T., Golubev A.G., Epikhin A.S. *Nauchny vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii — Civil Aviation High Technologies*, 2014, no. 199 (1), pp. 23–30.
- [7] Molchanov A.M., Scherbakov M.A., Yanyshv D.S., Kuprikov M.Yu., Bykov L.V. *Postroenie setok v zadachakh aviatsionnoy i kosmicheskoy tekhniki* [Building grids in the problems of aviation and space technology]. Moscow, MAI Publ., 2013, 260 p.
- [8] Erofeev M.M. *Printsip postroeniya strukturirovannoy geksaedricheskoy setki v ANSYS* [The principle of constructing a structured hexahedral grid in ANSYS]. Available at: <http://sapr.ru/article/19894> (accessed February 11, 2018).
- [9] *Postroenie ploskikh i prostranstvennykh vychislitelnykh setok v ANSYS* [Building flat and spatial computational grids in ANSYS]. Available at: <http://dolivanov.ru/node/134> (accessed February 11, 2018).

- [10] Volkov K.N., Emelyanov V.N. *Vychislitelnye tekhnologii v zadachakh mekhaniki zhidkosti i gaza* [Computational technologies in problems of fluid mechanics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, 468 p.
- [11] Bogatyrev V.V. *Uchenye zapiski TsAGI — TsAGI Science Journal*, 2012, no. 1. Available at: http://www.tsagi.ru/institute/publications/memoirs/archive_annotations/1091/ (accessed February 11, 2018).
- [12] Danilov A.A. *Tekhnologiya postroeniya nestruturirovannykh setok i monotonnaya diskretizatsiya uravneniya diffuzii*. Dis. kand. fiz.-mat. nauk [Technology for constructing unstructured grids and monotone discretization of the diffusion equation. Cand. phys.-math. sc. diss.]. Moscow, 2002, 215 p.
- [13] Vasilevskiy Yu.V., Danilov A.A., Lipnikov K.N., Chugunov V.N. *Avtomatizirovannye tekhnologii postroeniya nestruturirovannykh raschetnykh setok* [Automated technologies for constructing unstructured computational grids]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013, 133 p.
- [14] Smelaya T.G. *Tekhnicheskaya mekhanika (Engineering Mechanics)*, 2015, no. 4, pp. 155–168.
- [15] Karasev P. I. *Vestnik YuUrGU. Seriya Vychislitelnaya matematika i informatika — Bulletin of the South Ural State University*, 2012, no. 47, pp. 46–58.
- [16] Golubev A.G., Kalugin V.T., ed. *Aerodinamika* [Aerodynamics]. Moscow, BMSTU Publ., 2010, 687 p.
- [17] Dimitrienko Yu.I., Kotenev V.P., Zakharov A.A. *Metod lentochnykh adaptivnykh setok dlya chislennogo modelirovaniya v gazovoy dinamike* [The method of adaptive tape grids for numerical simulation in gas dynamics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2011, 280 p.
- [18] Dimitrienko Yu.I., Zakharov A.A., Abakumov A.S., Koryakov M.N., Syzdykov E.K. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2011, no. 4, pp. 44–54.
- [19] Artonkin V.G., Leutin P.G., Petrov K.P., Stolyarov E.P. *Aerodinamicheskie kharakteristiki ostrykh i prituplennykh konusov pri dozvukovykh i sverkhzvukovykh skorostyakh* [Aerodynamic characteristics of sharp and blunted cones at subsonic and supersonic speeds]. *Trudy Tsentralnogo aero-gidrodinamicheskogo instituta im. prof. N.E. Zhukovskogo* [Proceedings of Zhukovsky Central AeroHydrodynamic Institute (TsAGI)]. Moscow, TsAGI Publ., 1972, no. 1413, 93 p.
- [20] Berendeev N.N., Liubimov A.K., ed. *Primenenie sistemy ANSYS k resheniyu zadach mekhaniki sploshnoy sredy* [Application of the ANSYS system to solving problems of continuum mechanics]. Nizhny Novgorod, UNN Publ., 2006, 227 p.
- [21] Andreykayte A.A., Isaev V.K. *Algoritmy postroeniya regulyarnykh i neregulyarnykh setok v odnosvyaznoy ploskoy oblasti* [Algorithms for constructing regular and irregular grids in a simply connected flat domain]. *Trudy XLIX nauch. konf. MFTI, Aerofizika i kosmicheskie issledovaniya. MFTI, Moskva-Dolgoprudny* [Proceedings of the XLIX MIPT scientific. conf. Aerophysics and Space Research. MIPT, Moscow-Dolgoprudny]. MIPT Publ., 2006, pp. 72–73.
- [22] Kalugin V.T. *Aerodinamika organov upravleniya poletom letatelnykh apparatov* [Aerodynamics of aircraft flight controls]. Moscow, BMSTU Publ., 2004, 688 p.

Golubev A.G., Assist. Professor, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: golubevag@bmstu.ru

Remizova O.I., 6th year student, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: oi-remi@yandex.ru