

УДК 532.542.4

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ ЗАДАЧ ВНЕШНЕГО ОБТЕКАНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ FLOWVISIONП.Н.СУББОТИНА, инженер, ООО Nika Software
А.С.ШИШАЕВА, инженер, ООО ТЕСИС**Введение**

Турбулентные течения характеризуются флуктуациями поля скорости. При решении уравнений Навье-Стокса, описывающих такие течения, применяется подход, основанный на использовании осредненных по времени величин. В результате решение модифицированных уравнений требует меньше машинных ресурсов, но появляются дополнительные неизвестные. Для замыкания полученных уравнений используются различные модели турбулентности.

На сегодняшний день существует большое количество моделей турбулентности. Однако ни одна из известных моделей не является универсальной для всех существующих классов инженерных задач. Выбор оптимальной модели турбулентности зависит от типа течения, специфического класса задачи, требуемой точности решения, доступных вычислительных ресурсов и т.п. Из многообразия общепризнанных моделей турбулентности можно выделить класс наиболее употребительных – RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) модели, к которым: семейство k-ε моделей (стандартная k-ε модель (KES) [1], низкорейнольдсовая AKN k-ε модель (KEAKN) [2], квадратичная k-ε модель (KEQ) [3]), семейство k-w моделей (SST модель [1]) и модель Спаларта-Алмараса (SA модель [1]).

Модели дают различные результаты при моделировании отрывных течений, пограничных слоев и пр. Точность, обеспечиваемая различными моделями, также зависит от шага расчетной сетки в пристеночном слое ячеек (обычно характеризуется параметром y^+ , который можно рассматривать как локальное число Рейнольдса в ячейке)

SA модель является однопараметрической моделью и была разработана для аэрокосмических приложений. Эта модель дает хорошие результаты для пограничных слоев, характеризующихся положительными градиентами давлений. Традиционно эта модель эффективно работает в низкорейнольдсовом случае, т.е. когда вязкий пограничный слой достаточно разрешен расчетной сеткой (т.е. когда параметр y^+ мал).

Семейство k-ε моделей относится к двух параметрическим моделям турбулентности и представлено стандартной k-ε моделью, ее квадратичной и низкорейнольдсовой модификациями. Это семейство моделей давно и широко используется для самых разных классов задач. K-ε модели отличаются работоспособностью, экономичностью и приемлемой точностью. Традиционно считается, что стандартная k-ε модель турбулентности Лаундера-Соплдинга обеспечивает хорошие результаты при моделировании течений с малыми градиентами и с использованием расчетной сетки, разрешающей только логарифмический подслой (с большими значениями параметра y^+), низкорейнольдсовая AKN k-ε модель обычно применяется на сетках, разрешающих вязкий подслой.

Семейство k-w моделей представлено SST-моделью (shear-stress transport). Стандартная k-w модель учитывает низкорейнольдсовые эффекты, влияние сжимаемости и распространение сдвиговых возмущений, однако существенно уступает по широте применения моделями семейства k-ε. Модель переноса сдвиговых напряжений SST использует k-w модель в пристеночной области и преобразованную k-ε модель вдали от стенки.

Большое количество инженерных гидродинамических задач решается посредством коммерческих программных пакетов. Расчетная сетка создается непосредственно в пакете или импортируется из другого редактора. Вид расчетной сетки определяет дальнейший алгоритм расчета. Сейчас в программных пакетах используются два вида сетки: тетраэдрическая и декартова. Тетраэдрическая сетка позволяет создавать ячейки, близкие по форме границам расчетной области и зонам больших градиентов, что позволяет хорошо разрешать пограничные слои. В то же время, создание тетраэдрической сетки очень трудоемко. Декартова сетка позволяет создавать только прямоугольные ячейки, что может привести к худшему разрешению пограничного слоя. Но декартова сетка проста в создании. Также, существует ряд способов, позволяющих разрешать области пограничных слоев и высоких градиентов. Примерами таких способов являются технология АЛИС и технология подсеточного разрешения геометрии, реализованные в программном комплексе FlowVision. Технология АЛИС (адаптивная локально измельченная сетка) позволяет дробить выбранные ячейки по всем направлениям в заданное число раз (адаптировать до заданного уровня). При этом ячейки, находящиеся рядом с раздробленной, измельчаются таким образом, чтобы размер двух соседних ячеек не отличался более, чем в 2 раза. Измельчение ячеек можно задать как в объеме, так и на поверхности. Технология подсеточного разрешения геометрии позволяет автоматически точно воспроизводить форму поверхности.

Целью данной работы является исследование оптимальной применимости общепринятых моделей турбулентности на декартовой сетке. Сравнение проводится для задач турбулентного продольного обтекания пластины, поперечного обтекания параллелепипеда, поперечного обтекания цилиндра, трансзвукового обтекания крылового профиля.

Моделирование турбулентного обтекания пластины

Моделируется турбулентное обтекание пластины вязкой несжимаемой жидкостью при интегральном числе Рейнольдса $Re_L = 10^6$. Рассматривается моделирование обтекания пластины, сонаправленной с линиями расчетной сетки, и моделирование обтекания пластины, ориентированной под углом 15 градусов к линиям расчетной сетки. Используется двумерная неравномерная расчетная сетка, сгущенная к поверхности и к краям пластины. Рассматриваются варианты сетки, соответствующие $y^+ = 110; 41; 19; 9; 3,5$

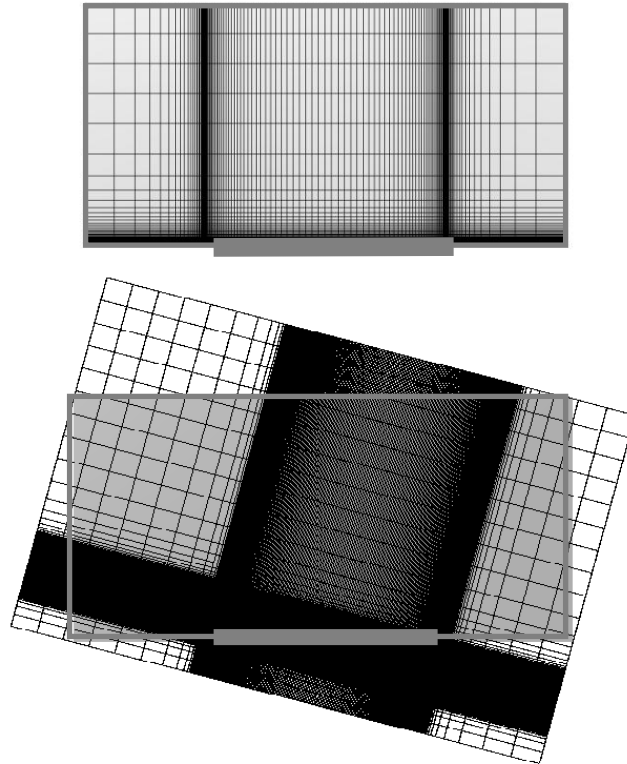


Рисунок 1 Расчетная сетка, используемая при моделировании обтекания пластины

Проводится сравнение с эмпирическими формулами для локального и интегрального коэффициента сопротивления пластины [5]. Локальный коэффициент сопротивления пластины вычисляется по формуле:

$$c'_{yf}(x) = \frac{0.0588}{\sqrt[5]{Re_x}}$$

Интегральный коэффициент сопротивления второй половины пластины вычисляется по формуле:

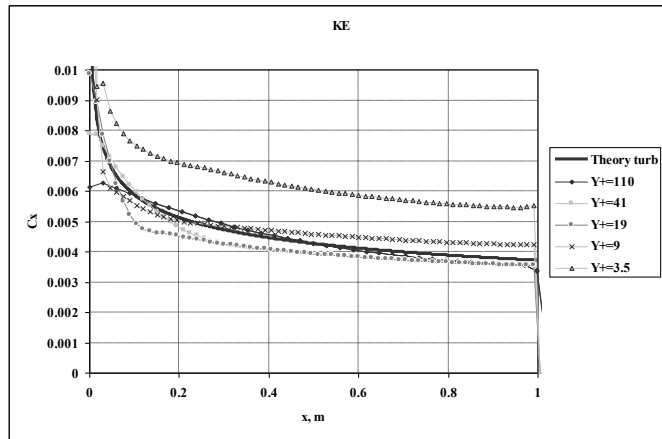
$$c_{yf} = \frac{0.0626}{\sqrt[5]{Re_l}}$$

Результаты сравнения показали, что на пластине, сонаправленной с сеткой, на $y^+ \geq 19$ (логарифмический погранслои) наилучшие результаты дает стандартная к-е модель (KES), на $y^+ = 9$ (буферный погранслои) – низкорейнольдсовая к-е AKN модель (KEAKN) и SST модель, а на $y^+ = 3,5$ (вязкий погранслои) – SA модель турбулентности (см. Табл.1).

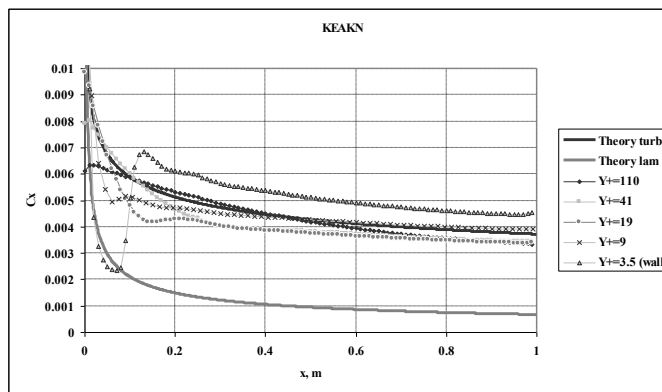
	$y^+=110$	$y^+=41$	$y^+=19$	$y^+=9$	$y^+=3.5$
KES	3.2%	6.4%	6.3%	-10%	-227%
KEAKN	6.6%	9.04%	10.8%	-2%	-19.5%
KEQ	3.7%	8.5%	7.9%	-8.1%	-39.8%
SST	1.2%	9.0%	8.9%	-0.4%	13.3%
SA	30%	10%	9.3%	-1%	-0.8%

Таблица 1. Погрешность величины коэффициента сопротивления $c_{yf}(0.5L)$ пластины, сонаправленной с сеткой

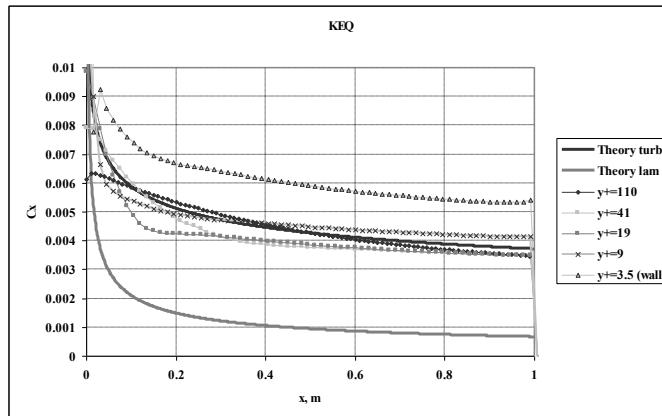
Основной причиной отклонения результатов моделирования от экспериментальной формулы является занижение силы сопротивления в районе середины пластины (Рис.2). Также, следует отметить, что ламинарно-турбулентный переход в начале пластины лучше всего воспроизводится посредством SA модели турбулентности (см. Рис.2д).



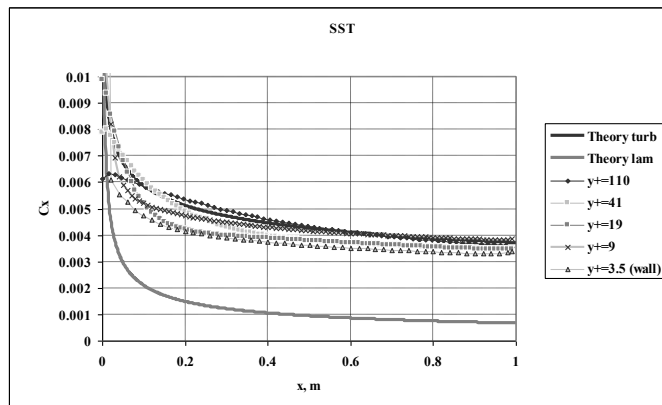
а



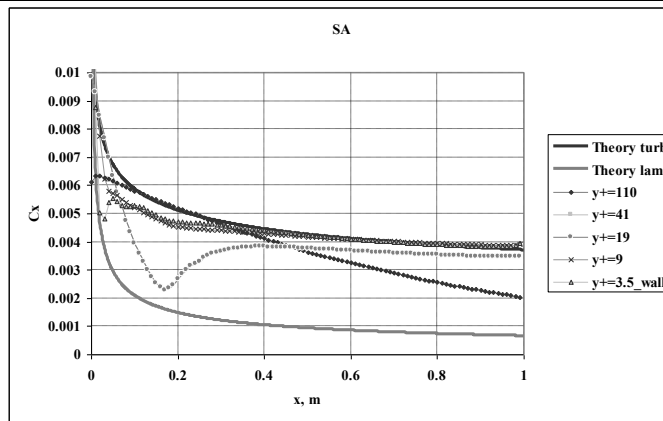
б



в



г



Д
Рисунок 2 Распределение локального коэффициента сопротивления $c'_{cf}(x)$

При моделировании обтекания пластины, ориентированной под углом 15 градусов к линиям сетки, было обнаружено, что при $y+=110$ все модели турбулентности дают погрешность от 24% до 26%, в то время как на $y+=41$ к-е модели дают погрешность не более 2%.(Табл.2).

	$y+=110$	$y+=41$
KES	-24.8%	-1.9%
KEAKN	-24.7%	-1.3%
KEQ	-24.8%	-1.9%
SST	-26.0%	-8.4%
SA	-26.0%	9.1%

Таблица 2 Погрешность величины коэффициента сопротивления $c_{cf}(0.5L)$ пластины, ориентированной под углом 15 градусов к сетке

Моделирование турбулентного обтекания параллелепипеда

Проводится моделирование поперечного обтекания параллелепипеда вязкой несжимаемой жидкостью при $Re = 13\ 000$. Используется неравномерная расчетная сетка, сгущенная и проадаптированная в районе параллелепипеда и возвратной зоны за параллелепипедом. Рассматриваются варианты сетки, соответствующие значениям $y+ = 6,8; 3,7; 1,85$.

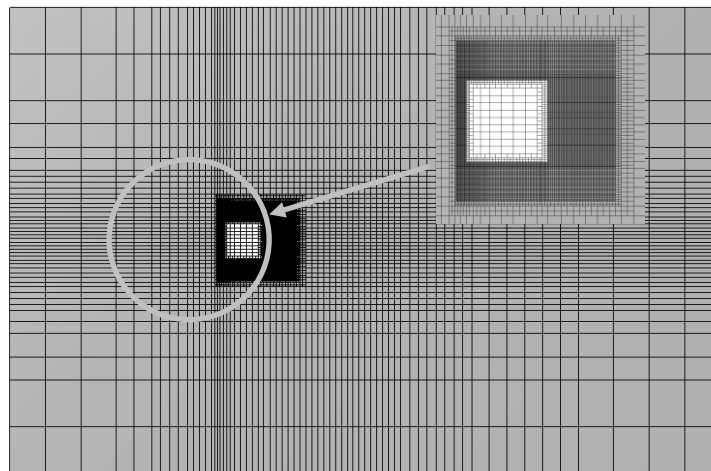


Рисунок 3 Расчетная сетка, используемая при моделировании обтекания параллелепипеда

Результаты моделирования сравниваются с экспериментом [6]. В качестве параметра для сравнения выбран коэффициент сопротивления параллелепипеда c_x и число Струхала St .

$$c_x = 2.15, St = 0.132$$

Сравнение результатов моделирования с экспериментом показало, что при всех значениях $y+$ наилучшие результаты дают квадратичная к-е модель турбулентности и SST модель турбулентности (см. Табл.3, Табл.4).

	y+=6.8	y+=3.7	y+=1.85
KES	25.9%	22.1%	22%
KEAKN	26%	23.9%	23%
KEQ	16.3%	2.6%	3.5%
SST	3.5%	0.5%	0.8%
SA	8.6%	7.2%	8.1%

Таблица 3 Погрешность величины коэффициента сопротивления.

	y+=6.8	y+=3.7	y+=1.85
KES	7.9%	16.2%	16.2%
KEAKN	6.8%	13.6%	14.4%
KEQ	5.8%	4.7%	0.2%
SST	12.1%	10.5%	7.9%
SA	16.2%	16.2%	20.4%

Таблица 4 Погрешность величины числа Струхала

Моделирование турбулентного обтекания цилиндра

Проводится моделирование турбулентного обтекания цилиндра вязкой несжимаемой жидкостью при значении числа Рейнольдса $Re = 10^7$. Для моделирования используется неравномерная расчетная сетка, сгущенная в районе цилиндра и возвратной зоны за цилиндром, и проадаптированная на поверхности цилиндра (Рис.3). Рассматриваются варианты сетки, соответствующие $y+=2600; 1500; 880; 440$.

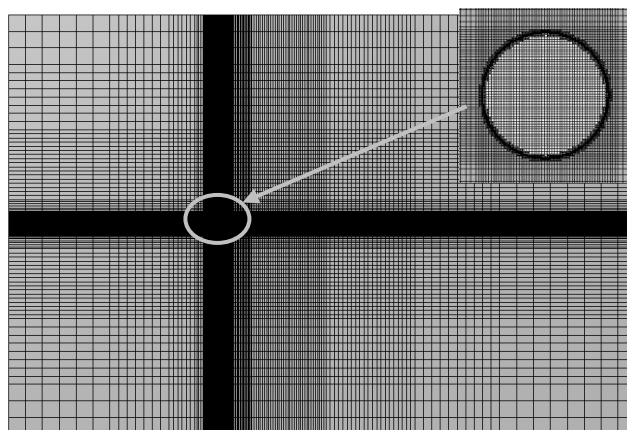


Рисунок 4 Расчетная сетка, используемая при моделировании обтекания цилиндра

Сила трения на поверхности вычисляется по формуле [4]: $\tau_{w,eff} = \rho u_\tau^2 + y \nabla P \phi$

где

ρ – плотность жидкости

u_τ – скорость в пристенной ячейке

y – размер пристенной ячейки

∇P - градиент давления

ϕ – демпфер градиента давления

Величина демпфера градиента давления подбирается в зависимости от задачи. В данной задаче рассматриваются значения демпфера градиента давления $d=1;2$. Результаты моделирования сравниваются с экспериментом [8]. В качестве параметра для сравнения выбран коэффициент сопротивления c_x .

$$c_x = 0.72$$

Согласно результатам сравнения наилучшие результаты получаются при использовании SST модели турбулентности и значении демпфера градиента давления 2 (см. Табл.6).

	y+=2600	y+=1500	y+=880	y+=440
KES	57.6%	42.5%	19.6%	-2%
KEAKN	11.66%			
KEQ	65.77%	40%	20.9%	-5.2%
SST	7%	35.8%	26%	
SA	93%	97%	92%	95%

Таблица 5 Погрешность коэффициента сопротивления цилиндра при $d=1$

	y+=2600	y+=1500	y+=880	y+=440
KES	2.2%	12.2%	20%	22.8%
KEAKN	-18%	-7.2%	-15.5%	-6.1%
KEQ	12.2%	13.9%	6%	8.3%
SST	-15.5%	-0.4%	-3%	8%
SA	92%	95%	96%	94%

Таблица 6 Погрешность коэффициента сопротивления цилиндра при d=2

Моделирование трансзвукового обтекания крылового профиля RAE 2822

Моделируется трансзвуковое обтекание крылового профиля RAE 2822 вязким газом при $Re=6 \cdot 10^6$, $M = 0.72$. При моделировании используется неравномерная двумерная расчетная сетка, сгущенная в районе профиля и проадаптированная на поверхности профиля (см. Рис.4). Рассматриваются варианты сетки, соответствующие $y+=661;331;143;68;33$.

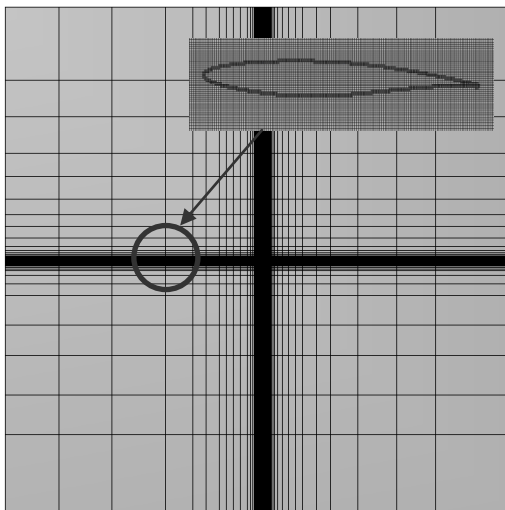


Рисунок 5 Расчетная сетка, используемая при моделировании обтекания профиля

Сравнение проводится с результатами эксперимента. В качестве параметров для сравнения выбраны величины c_x , c_y и распределение c_p на поверхности крыла, полученные в ходе эксперимента:

$$c_x = -0.017355, c_y = 0.74085$$

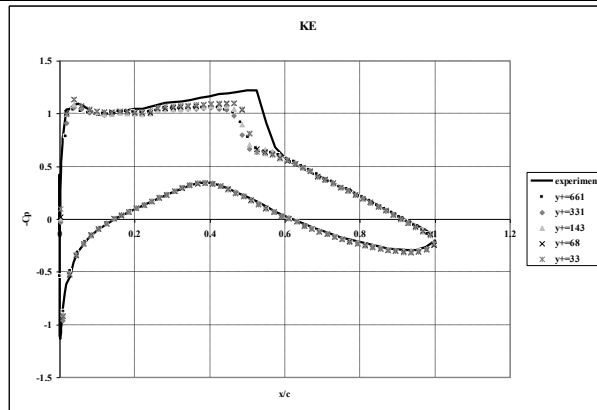
Согласно результатам моделирования наилучшие результаты для c_y получаются при использовании SA модели турбулентности (см. Табл.8). Причиной расхождения результатов моделирования для других моделей турбулентности является ошибка в определении положения ударной волны (см. Рис.6). Погрешность при определении c_x составляет от 8% до 35% (см. Табл.7).

	y+=661	y+=331	y+=143	y+=68	y+=33
KES	-8.7%	19.4%	16.8%	23.4%	30%
KEAKN	-10.5%	10.1%	18.7%	25.8%	34.6%
KEQ	-8.2%	10.6%	19.2%	25.2%	32.1%
SST	-8.7%	8.5%	18.3%	23.9%	30.7%
SA	17.5%	27.2%	24.4%	26.8%	29.5%

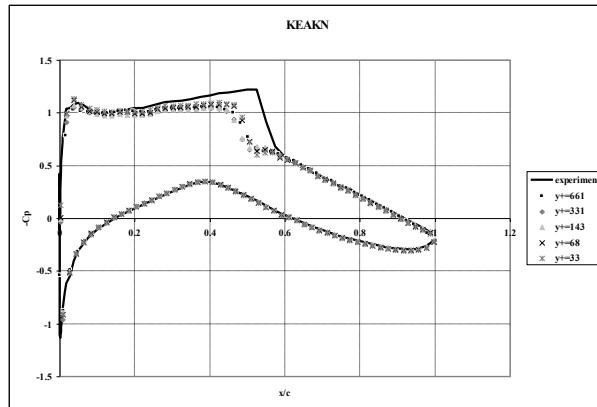
Таблица 7 Погрешность величины c_x

	y+=661	y+=331	y+=143	y+=68	y+=33
KES	7.2%	8.95%	7.5%	5.2%	5.1%
KEAKN	9%	10.2%	11%	7.9%	6.6%
KEQ	8.3%	11.7%	18%	7.9%	7.3%
SST	6.7%	8.3%	15%	12.4%	8.8%
SA	-4.6%	3.9%	14.7%	3.5%	2.3%

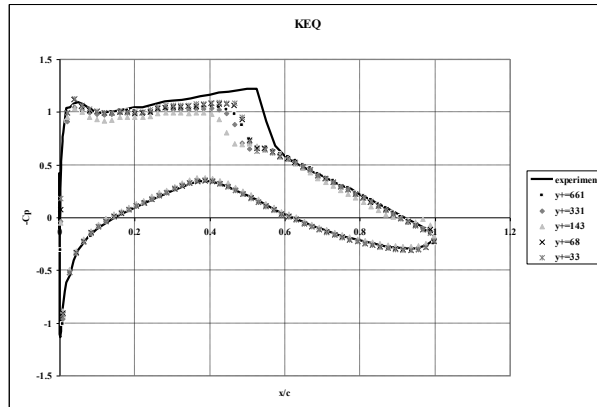
Таблица 8 Погрешность величины c_y



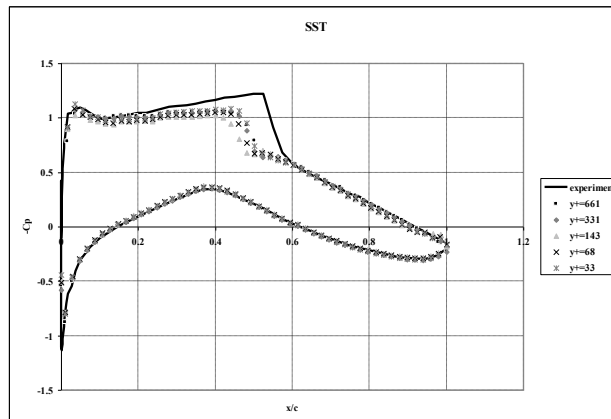
а



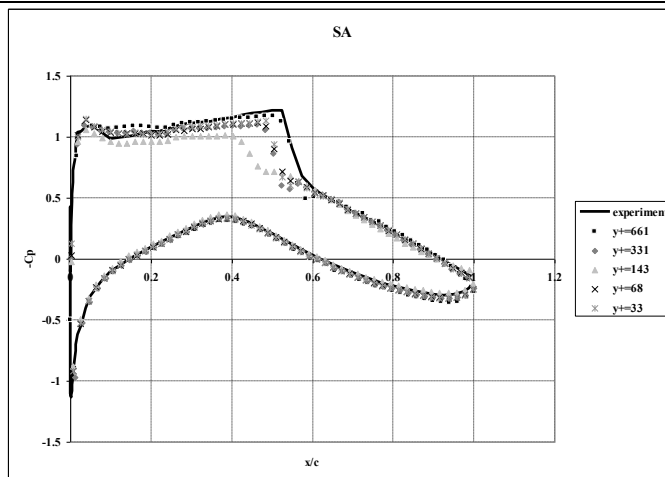
Б



В



Г



Д
Рисунок 6 Распределение c_p на поверхности профиля

Выводы

Проведенное исследование показало, что ортогональные сетки могут быть использованы при моделировании внешнего турбулентного обтекания. По результатам исследования можно дать следующие рекомендации по использованию моделей турбулентности на ортогональных сетках:

1. При моделировании обтекания пластины несжимаемой жидкостью при значениях $y^+ > 8$ следует использовать стандартную к-е модель турбулентности, а при $y^+ < 8$ – SA модель турбулентности.
2. При моделировании обтекания плохообтекаемого тела с фиксированной точкой отрыва следует использовать квадратичную к-е модель или SST модель турбулентности.
3. При моделировании обтекания плохообтекаемого тела с нефиксированной точкой отрыва следует использовать SST модель турбулентности. Также, рекомендуется проводить предварительные исследования влияния учета прямого и обратного градиента давления.
4. При моделировании трансзвукового обтекания крылового профиля следует использовать SA модель турбулентности.

Литература

1. *Bardina J.E., Huang P.G., Coakley T.J.*, Turbulence Modeling Validation, Testing and Development // NASA reports – April 1997.
2. *Jagadeesh P., Murali K.* Application of Low-Re Turbulence Models for Flow simulations past Underwater Vehicle Hull Forms// Journal of Naval Architecture and Marine Engineering – June 2005 – pp. 41-55.
3. *Lien F.S., Chen W.L., Leschziner M.A.* Low-Reynolds-Number Eddy-Viscosity Modelling Based on Non-Linear Stress-Strain/Vorticity Relations// Proc. 3rd Symp on Engineering Turbulence Modeling and Measurements – 1996 – Grete, Greece.
4. FlowVision Руководство пользователя, Версия 2.5.2 – 2008.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя — М.: Наука, 1974.
6. *Campoli T.L., Schetz J., Nee R.E.* Assessment of Incompressible Formulations for Numerical Solution of Unsteady Turbulent Flows over Bluff Bodies// 43rd AIAA AeroSpace Sciences Meeting and Exhibit – January 10 - 13 2005
7. *Cook, P.H., M.A. McDonald, M.C.P. Firmin*, "Aerofoil RAE 2822 - Pressure Distributions, and Boundary Layer and Wake Measurements,"// Experimental Data Base for Computer Program Assessment, AGARD Report AR 138, 1979.
8. С.И.Девнин, Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций, Справочник, Л., Судостроение, 1983