

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАЛОЖЕННОЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ СЕТКИ (OBL) ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА НА КРЫЛЬЕВОМ ПРОФИЛЕ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Аксёнов А.А.¹, Жлуктов С.В.¹, Калашников С.В.²,
Митин А.Л.²

¹ ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия

² ФГУП «ЦАГИ», г. Жуковский, Россия

В связи с бурным развитием беспилотной авиации и ветроэнергетики становится крайне актуальным расширение возможностей исследования течений жидкости и газа при малых числах Рейнольдса с помощью численных методов. В силу значительного влияния положения точки ламинарно-турбулентного перехода пограничного слоя на результирующие интегральные и распределенные параметры течения точное моделирование ламинарно-турбулентного перехода является основной проблемой применения численных методов для исследования данного класса течений.

Ранее в работах [Жлуктов, Аксёнов, Карасёв, 2016] и [К вопросу применения модели турбулентности $k-\epsilon$ FlowVision для исследования обтекания профиля крыла при малых числах Рейнольдса, 2017] авторами с помощью вычислительного комплекса FlowVision и специализированной двухпараметрической модели турбулентности $k-\epsilon$ FlowVision [Жлуктов, Аксёнов, Карасёв, 2014] было получено приемлемое согласование с экспериментальными данными распределения коэффициента давления на поверхности профиля Eppler 387 при значении числа Рейнольдса $Re = 200000$. Данные результаты были получены в рамках стандартного для FlowVision подхода, подразумевающего последовательное разбиение расчетной сетки вблизи поверхности обтекаемого тела с целью надлежащего разрешения пограничного слоя.

Альтернативный подход заключается в использовании реализованной в FlowVision технологии наложенной приповерхностной сетки (OBL), позволяющей разрешать пограничный слой и обеспечивать нужные значения Y^+ при значительно меньшем уровне адаптации основной сетки. Это позволяет избежать ее чрезмерного сгущения в области

пограничного слоя и, соответственно, увеличения количества ячеек в пространственных задачах, а также повысить точность решения в области пограничного слоя.

В данном докладе представлены результаты применения технологии наложенной приповерхностной сетки (OBL) в расчете обтекания профиля Eppler 387 при значении числа Рейнольдса $Re = 200000$. Исследовано влияние особенностей реализации технологии OBL на получающееся в расчетах поле течения, рассмотрены соответствующие методические вопросы выбора параметров приповерхностной сетки при расчете течений с образованием ламинарного отрывного пузыря. Приведено сравнение с результатами экспериментальных исследований.

Технология наложенной приповерхностной сетки FlowVision состоит в том, что в расчет, помимо основной декартовой сетки, включается построенная вблизи стенки ортогональная сетка. Она не вырезается из основной сетки, а накладывается на неё, и уравнения движения жидкости решаются на каждой из сеток по отдельности, с передачей параметров течения между сетками в качестве соответствующих граничных условий.

При решении гидродинамических уравнений на приповерхностной сетке для задания граничных условий на её верхней границе используются параметры течения, интерполированные с основной сетки, а в качестве граничных условий на стенке – соответствующие граничные условия, установленные для основной сетки. Граничные условия на боковых гранях приповерхностной сетки на входе и на выходе задаются таким образом, чтобы обеспечивалась корректная постановка расчетной задачи. Полученные в результате решения гидродинамических уравнений на приповерхностной сетке касательные напряжения и тепловые потоки на стенке передаются на основную сетку, таким образом, формируя для неё скорректированные граничные условия.

Хорошо известно, что течение в пограничном слое обычно имеет более сложный характер, чем течение во внешнем потоке. В связи с этим захват наложенной приповерхностной сеткой всего пограничного слоя, а не какой-то его части, является более предпочтительным вариантом, т.к. теоретически может позволить избежать дополнительных ошибок при сращивании решений.

Однако, следует отметить важную особенность реализации технологии OBL, которая заключается в том, что столбцы приповерхностной сетки не соединены между собой по боковым граням. Это приводит к ограничению на разброс нормалей элементарных площадок, на которых строится приповерхностная сетка, а также к тому, что для обеспечения физически корректных результатов необходимо, чтобы количество перекрываемых приповерхностной сеткой ячеек основной сетки составляло не более одной-двух. Из последнего ограничения, очевидно, следует, что при увеличении толщины приповерхностной сетки необходимо увеличивать размер пристенных ячеек основной сетки, таким образом, уменьшая точность разрешения течения в этой области.

При расчете высокорейнольдсовых течений малая толщина пограничного слоя позволяет без нарушения последнего ограничения обеспечить как хорошее разрешение потока основной сеткой, так и захват всего пограничного слоя приповерхностной. При расчете течений при малых числах Рейнольдса, для которых характерны большие значения толщины пограничного слоя, попытка разрешить приповерхностной сеткой весь пограничный слой может привести к слишком большому размеру ячеек основной сетки вблизи стенки.

Теоретически это может свести на нет возможный положительный эффект от применения наложенной приповерхностной сетки, т.к. чем меньше разрешение основной сетки вблизи стенки, тем больше ошибка в расчете параметров потока в этой области. Следовательно, тем больше погрешность задания граничных условий на верхней границе приповерхностной сетки. Это, в свою очередь, может привести к возникновению дополнительных ошибок в решении на приповерхностной сетке, которые вернутся в основную сетку в виде ошибки в касательных напряжениях и в тепловых потоках на стенке. В рамках задачи, рассматриваемой в данной работе, эта проблема дополнительно усугубляется комплексным характером течения вблизи поверхности профиля, связанным с наличием отрывного пузыря и ламинарно-турбулентного перехода, а также тем фактом, что по мере увеличения толщины пограничного слоя его влияние на внешнее поле течения

усиливается - а, следовательно, увеличиваются и погрешности, связанные с его недостаточным разрешением.

В силу описанных выше затруднений, в случае малых чисел Рейнольдса выбор толщины наложенной приповерхностной сетки неочевиден и, следовательно, требует дополнительной проработки. Исследование влияния толщины приповерхностной сетки на корректность результатов расчета являлось основной целью данной работы.

Расчеты выполнялись с помощью программного комплекса FlowVision, постановка задачи в части геометрии профиля и расчетной области, параметров газа и задания граничных условий соответствовала постановке задачи в работе [К вопросу применения модели турбулентности $k-\epsilon$ FlowVision для исследования обтекания профиля крыла при малых числах Рейнольдса]. Форма исследуемого профиля Eppler 387 приведена на Рисунке 1, геометрия расчетной области и граничные условия приведены на Рисунке 2 (границы расчетной области отстоят от профиля на 30 длин его хорды, на рисунке они изображены ближе к профилю, чем на самом деле).



Рисунок 1 -Геометрия профиля Eppler 387

Расчеты выполнялись в псевдодвумерной постановке – расчетная область имела малый поперечный размер, а ее сеточное разрешение в поперечном направлении составляло всего лишь одну ячейку. В качестве модели вещества использовалась модель вязкого совершенного газа, параметры которого соответствовали параметрам стандартной атмосферы на уровне моря. Параметры турбулентности на входе в расчетную область были выбраны таким образом, чтобы степень турбулентности потока вблизи передней кромки профиля была равна степени турбулентности набегающего потока $Tu = 0.1\%$, реализуемой в эксперименте [McGhee, Walker, Millard, 1988]. Для этого на входе в расчетную область задавались степень турбулентности $Tu = 0.1\%$ и отношение турбулентной вязкости к молекулярной $\mu^+ = 10$.

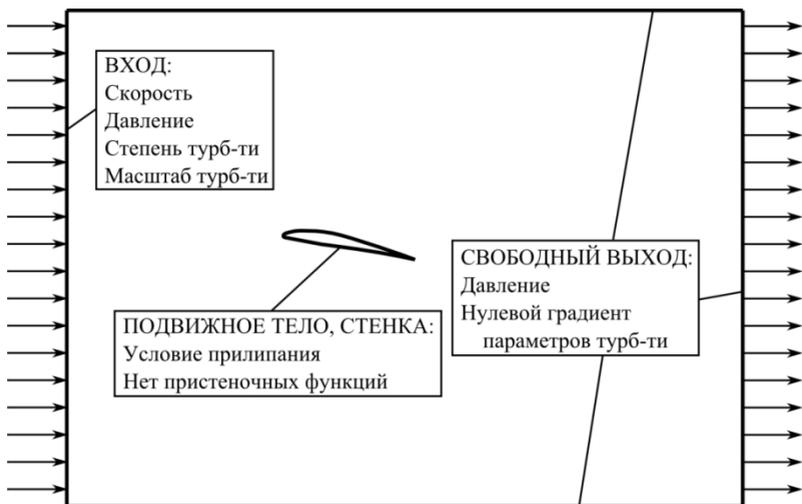


Рисунок 2 -Геометрия расчетной области и граничные условия

В качестве модели турбулентности в данной серии расчетов использовалась специализированная двухпараметрическая модель $k-\epsilon$ FlowVision. На текущий момент для предсказания ламинарно-турбулентного перехода с образованием отрывного пузыря в данной модели предусмотрен дополнительный механизм задания производства турбулентности в произвольной области ламинарного пограничного слоя [Жлуктов, Аксёнов, Карасёв, 2016], который представляет собой дополнительный генерационный член, зависящий от переменной $v_{t,gen}$. В ламинарной области течения $v_{t,gen} = 0$, в турбулентной $v_{t,gen} = \mu \div 2\mu$, где μ - молекулярная вязкость.

Для задания точки ламинарно-турбулентного перехода была использована следующая зависимость $v_{t,gen}$ от продольной координаты:

$$v_{t,gen} = \frac{\mu}{(1 + \exp[(\bar{x}_{tr} - \bar{x}) \times r^2])(1 + \exp[(\bar{x} - \bar{x}_{tr}) \times r^2])}, \quad (1)$$

где:

\bar{x} - относительная продольная координата (в долях хорды профиля);

\bar{x}_{tr} - относительная продольная координата точки ламинарно-турбулентного перехода;

γ - множитель, характеризующий степень размытия границ области течения, в которой происходит производство турбулентности.

В данной работе все расчеты выполнялись для одного значения угла атаки $\alpha = 4^\circ$ при числе Рейнольдса $Re = 200000$. Для данной расчетной точки значения настроечных параметров в выражении (1) составляют $\bar{x}_c = 0.6$ и $\gamma = 45$.

Толщина наложенной приповерхностной расчетной сетки для наглядности характеризовалась не своим абсолютным значением, а специальным параметром Y_e^+ , соответствующим значению Y^+ основной сетки, начиная с которого пограничный слой разрешался приповерхностной сеткой. Были исследованы две приповерхностных сетки: первой из них, захватывающей весь пограничный слой, соответствовало значение $Y_e^+ \approx 30$; второй - $Y_e^+ \approx 10$. Количество слоев приповерхностной сетки выбиралось таким образом, чтобы вне зависимости от её толщины выполнялось условие $Y^+ \leq 1$ и чтобы коэффициент роста ячеек составлял 1.05. Уровень адаптации основной сетки для каждого из вариантов приповерхностной сетки подбирался таким образом, чтобы приповерхностная сетка перекрывала примерно 1.5 ячейки основной сетки: для приповерхностной сетки с $Y_e^+ \approx 30$ основная сетка имела 2-й уровень адаптации, для сетки с $Y_e^+ \approx 10$ - 4-й. Количество слоев измельченных ячеек основной сетки на каждом из уровней адаптации выбиралось на основании результатов исследования сеточной сходимости, приведенных в Таблице 1.

Таблица 1

Параметры адаптации основной расчетной сетки

Уровень адаптации	Количество слоев
1	20
2	20
3	20
4	20

Таким образом, в рамках данной работы было исследовано две расчетных сетки: сетка №1, состоящая из основной сетки, имеющей уровень адаптации 2, и приповерхностной сетки, разрешающей зону $Y^+ \leq 30$ ($Y_e^+ \approx 30$); сетка №2, состоящая из основной сетки с уровнем адаптации 4 и приповерхностной сетки, разрешающей зону $Y^+ \leq 10$ ($Y_e^+ \approx 10$). С целью выделения

влияния сгущения основной сетки на решение, для каждой из них были также выполнены расчеты без приповерхностной сетки.

На Рисунке 3 приведено сравнение расчетного распределения коэффициента давления c_p по поверхности профиля, полученного на сетке №1 с приповерхностной сеткой и без нее, с экспериментальными данными [McGhee, Walker, Millard, 1988]. Аналогичное сравнение приведено на Рисунке 4 для сетки №2.

Из Рисунка 3 видно, что при использовании сетки №1 разрешения основной сетки хватает для получения физически корректного поля течения: об этом свидетельствует наличие в полученном на основной сетке распределении c_p характерного ступенчатого участка, обусловленного наличием отрывного пузыря. При этом в силу грубости основной сетки в области пограничного слоя количественно распределение давления отличается от эксперимента.

Однако, включение в расчет приповерхностной сетки дает физически некорректное распределение давления, свидетельствующее об отсутствии отрывного пузыря на верхней поверхности профиля. Т.к. на приповерхностной сетке решаются те же гидродинамические уравнения, что и на основной, и с использованием тех же численных схем, а сеточное разрешение поля течения в продольном направлении, как показывают результаты на основной сетке, является достаточным, то единственным возможным источником ошибки остается ошибка в вычислении граничных условий на верхней границе приповерхностной сетки, которая, очевидно, связана с недостаточным разрешением поля течения основной сеткой.

Результаты для сетки №2 (Рисунок 4) подтверждают это предположение, показывая, что сгущение основной сетки в ущерб толщине приповерхностной сетки приводит к более корректному решению не только с качественной, но и с количественной точки зрения.

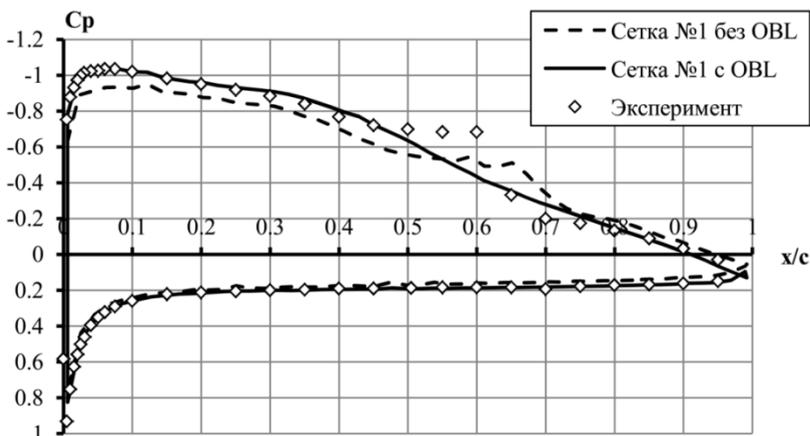


Рисунок 3 - Распределение коэффициента давления для сетки №1

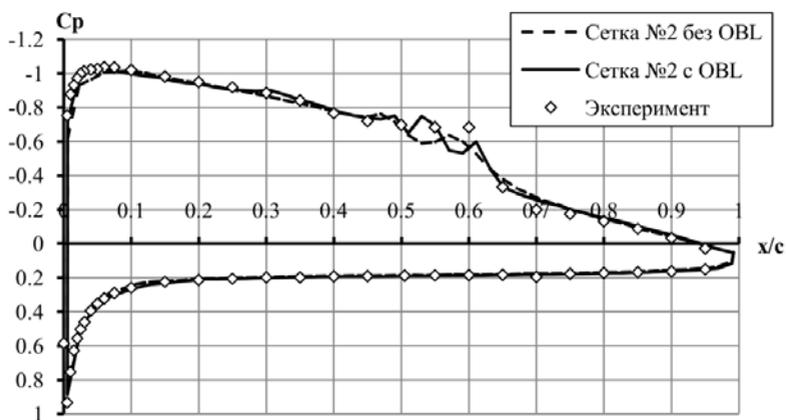


Рисунок 4 - Распределение коэффициента давления для сетки №2

Таким образом, результаты данной работы показывают, что применение технологии OBL в расчетах внешнего обтекания при малых числах Рейнольдса имеет ряд особенностей. В частности, в рамках рассмотренной в данной работе задачи расчета обтекания профиля при значении числа Рейнольдса $Re = 200000$ для разрешения приповерхностной сеткой всего пограничного слоя потребовалось значительно увеличивать ее толщину. В силу ограничения на количество перекрываемых приповерхностной сеткой ячеек основной сетки это вынуждало использовать грубую основную сетку, что привело к ошибкам в вычислении граничных условий на верхних гранях столбцов

приповерхностной сетки и, как следствие, к получению физически некорректного поля течения.

На основании полученных результатов авторы полагают, что в расчетах сложных течений при малых числах Рейнольдса замена хотя бы частичного разрешения пограничного слоя основной сеткой на модифицированные граничные условия, полученные в ходе решения на приповерхностной сетке, может приводить к более существенным ошибкам, чем в случае тонкого пограничного слоя при больших числах Рейнольдса. Поэтому при решении данного класса задач при рассмотренной реализации технологии OBL авторы рекомендуют обеспечивать достаточно хорошее разрешение основной сеткой верхней части пограничного слоя и, в особенности, области отрывного пузыря и ламинарно-турбулентного перехода. Такой подход позволяет получить значительно более точные граничные условия для решения на приповерхностной сетке и, следовательно, более точный конечный результат.

Список литературы

1. *С.В. Жлуктов, А.А. Аксёнов, П.И. Карасёв.* Моделирование отрывного течения с использованием двухпараметрической модели турбулентности // Компьютерные исследования и моделирование, Том 8, №1, 2016, с. 79-88.
2. *С.В. Жлуктов, А.А. Аксёнов, С.В. Калашиников, А.Л. Митин.* К вопросу применения модели турбулентности $k-\varepsilon$ FlowVision для исследования обтекания профиля крыла при малых числах Рейнольдса // Инженерные Системы-2017. Труды Международного форума, 2017, с. 82-89
3. *С.В. Жлуктов, А.А. Аксёнов, П.И. Карасёв.* Моделирование байпасного ламинарно-турбулентного перехода в камках $k-\varepsilon$ подхода // Компьютерные исследования и моделирование, Том 6, №6, 2014, с. 879-888.
4. *Robert J. McGhee, Betty S. Walker, Betty F. Millard.* Experimental results for the Eppler 387 airfoil at low Reynolds numbers in the Langley Low-Turbulence Pressure Tunnel. NASA TM-4062. 1988