ТЕПЛОВОЙ ПОТОК В ОБЛАСТИ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ ИЗ-ПОД СКАЧКА УПЛОТНЕНИЯ НА ПЛОСКОЙ ОСТРОЙ ПЛАСТИНЕ С УСТАНОВЛЕННЫМ НА НЕЙ ВЕРТИКАЛЬНЫМ КЛИНОМ

С.М. Босняков, С.В. Матяш, **А.И. Трошин**
ФАУ «ЦАГИ», г. Жуковский, bosnyakov@tsagi.ru

Данная работа выполнена в рамках Семинара по валидации и верификации вычислительных кодов. Метод, использованный для расчёта, базируется на решении дифференциальных уравнений для напряжений Рейнольдса (DRSM — Differential Reynolds Stress Model). Используется современная модель SSG/LRR-ω, описанная в [1]. Из-за того, что, несмотря на явное преимущество перед буссинесковыми моделями турбулентности, в некоторых случаях при описании отрывных течений она недостаточно точна, для данного тестового случая используется собственная модификация модели SSG/LRR-ω, выполненная специально для улучшения описания отрывных течений. Подробная формулировка модели SSG/LRR-ω и её модификации, результаты тестирования и валидации приведены в работе [2].

Модели, описанные в [2], реализованы в программе *zFlare* [3] из пакета прикладных программ EWT-ЦАГИ (Electronic Wind Tunnel) [4]. Решались уравнения RANS. Расчёты проводились методом установления с локальным шагом по времени, применялась неявная схема. Использовалась аппроксимация второго порядка по пространству. Для получения потоковых величин на гранях ячеек был выбран метод WENO5. При расчёте потоков на гранях решалась задача Римана о распаде произвольного разрыва. Распараллеливание расчётов обеспечивалось средствами библиотеки MPI.

Для проведения расчётов была выбрана структурированная расчётная сетка, рекомендованная для использования в Семинаре. Единственным отличием от оригинала было изменение сгущения к поверхности пластины. Размер первой ячейки был уменьшен в 10 раз, что привело к условию на высоту первой ячейки $y^+ < 0.1$.

Параметры, использованные для задания набегающего потока, следующие: число Маха $M = 5$, температура стенки,

отнесенная к температуре торможения набегающего потока, $T_w/T_0 = 0.574158$, параметры турбулентности задавались в соответствии со стандартными рекомендациями для модели SSG/LRR-ω.

На рис. 1 приведён общий вид течения в районе клина. Показано сечение поля числа Маха при $x/L_{\text{ref}} = 0.3133$ (координата отсчитывается от передней кромки клина и обезразмерена на характерный размер клина) и линии тока в пристеночном слое. Хорошо виден отрыв из-под косого плоского скачка (вертикальная красная линия), который представляет из себя λ-структуру.

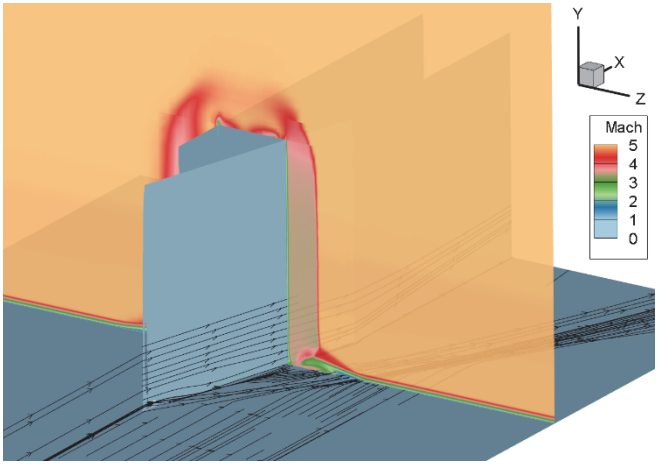

Рис. 1. Общий вид обтекания клина и λ-структура отрыва

Поле числа Стантона St_0, отнесенного к максимальному значению этого параметра в эксперименте $\text{St}_{0\text{ref}}$, приведено на рис. 2. Значения теплового потока в отдельных областях завышены в расчете на величину до 60%. На рис. 3 показаны распределения $\text{St}_0/\text{St}_{0\text{ref}}$ вдоль сечений $z/L_{\text{ref}} = \text{const}$, из которых видно, что завышение теплового потока наиболее сильно выражено в областях пиковых значений, но не в зоне невозмущенного пограничного слоя на пластине.

Рис. 2. Поле нормированного числа Стантона, полученное в расчёте

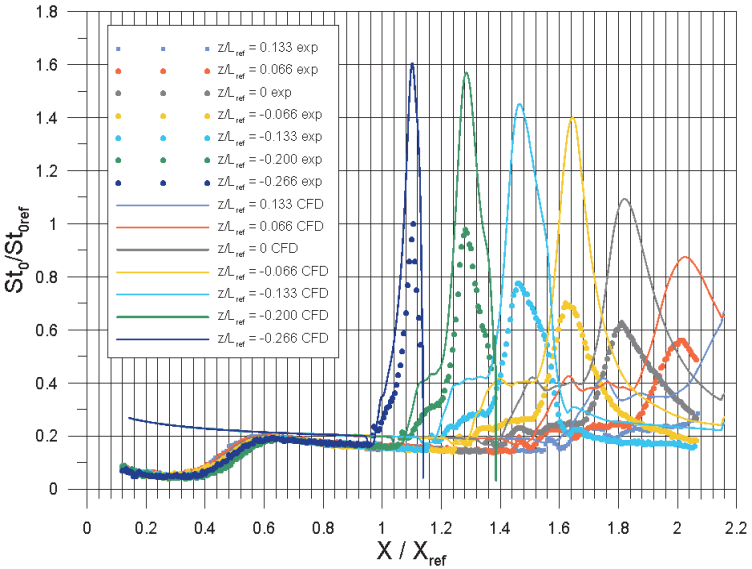

Рис. 3. Распределение St_0/St_{0ref} вдоль экспериментальных сечений: точки – экспериментальные значения, сплошные линии – расчётные данные

С учетом оценки ошибки экспериментальных данных в 10%, среднее превышение тепловых потоков в расчёте на величину 30–40% следует считать расхождением с экспериментальными данными на треть.

Литература

1. R.-D. Cécora, R. Radespiel, B. Eisfeld, A. Probst. Differential Reynolds-stress modeling for aeronautics. AIAA Journal, v.53, 2015, pp.739–755.
2. Трошин А.И., Матяш И.С., Матяш С.В., Михайлов С.В. Применение и настройка дифференциальной модели для напряжений Рейнольдса в задачах с отрывами потока. Труды ЦАГИ, №2810, 2022, с.99–128.
3. Трошин А.И., Молев С.С., Власенко В.В., Михайлов С.В., Бахнэ С., Матяш С.В. Моделирование турбулентных течений на основе подхода IDDES с помощью программы *zFlare*. Выч. мех. сплош. сред, т.16, 2023, с.203–218.
4. Практические аспекты решения задач горения и аэродинамики с применением новых решателей пакета прикладных программ EWT-ЦАГИ. Сборник статей под ред. С.М. Боснякова. Труды ЦАГИ, №2810, 2022.