

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ
ЗАДАЧ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

Л.И. Лиинтин

Научный руководитель - профессор, д. физ-мат. н. С.Н. Харламов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Введение. Отрывные течения являются широко распространенным типом течений как в природе, так и в технике. Экспериментальные и теоретические исследования структуры потока при течении различных типов выступов и впадин на оригинальных гладких поверхностях представляют значительный практический интерес, поскольку углубления и полости структурного или случайного происхождения встречаются на многих поверхностях, промышленных установок. При обтекании неровностей отрыв пограничного слоя, его присоединение часто сопровождается специфическими процессами, которые оказывают существенное влияние на интегральные параметры течения и теплопередачу [1-6]. Широкое распространение таких потоков в природе объясняет интерес инженеров-механиков к их анализу на протяжении многих лет. Поэтому рассматриваемая проблематика имеет множество публикаций. В частности, отмечается, что у специалистов популярны модели с двумя дифференциальными уравнениями для свойств турбулентности. Хотя им присущи некоторые недостатки, которые можно обойти введением нелинейных членов в соотношении Буссинеска для напряжений Рейнольдса [1-6]. Также отмечается, что одним из наиболее распространенных подходов моделирования пристеночных течений является использование метода пристеночных функций, демпфирующих функций, например, как в нелинейной низкорейнольдсовой модели вихревой вязкости (NLEVM).

Цель – анализ современного состояния исследования динамических и тепловых характеристик отрывных течений при обтекании неровностей типа прямоугольного одиночного выступа. Предполагается, что турбулентный поток воздуха обтекает поверхность плоской пластины и нагревается стенкой (подобно $q_{ст} = \text{const}$ в [6].)

Особенности моделирования. Для проведения численного исследования необходимо определить параметры, которые характеризуют гидродинамику и теплообмен путем решения системы дифференциальных уравнений, которые описывают процессы переноса массы, импульса и энергии с соответствующими краевыми условиями. Исследователи часто пользуются пакетом ANSYS FLUENT 15.0. Точность результатов следует оценивать путем сравнений с имеющимися экспериментальными данными, подобно методологии авторов [1, 2], где опыты сравниваются с результатами расчетов, полученных путем решения усредненных по Навье-Стоксу уравнений Рейнольдса. Последние замыкаются рядом моделей с двумя параметрами, относящимися к свойствам турбулентности, а также моделью для напряжений Рейнольдса. В такой постановке исследователи преследуют целью - исследовать особенности гидродинамики и тепломассопереноса. Для нас интересны сведения о гидродинамике и теплообмене при обтекании турбулентным потоком вязкой жидкости одиночного прямоугольного выступа, выполненные в [3] по схеме (см. ниже рис.1).

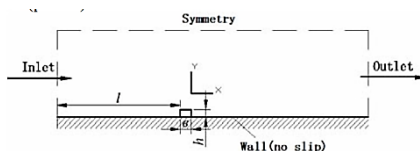


Рис.1 Схема расчетной области для прямоугольного выступа [3]

Замечание. Для решения проблемы замыкания уравнений движения необходимо связать тензор рейнольдсовых напряжений с тензором скоростей деформаций (* - соотношение Буссинеска).

$$-\overline{u_i' u_j'} = 2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k. (*)$$

Граничные условия: на входе в расчетную область (Inlet) задаются скорость и температура: $U_\infty = 15,3$ м/с, $T_\infty = 297,15$ К. они являются постоянными. Интенсивность турбулентности в невозмущенном потоке — 1 %. На выходе из расчетной области (Outlet) - условия непрерывности течения. На нижней стенке и поверхности выступа задается условие прилипания и постоянства теплового потока: $q_{ст} = 350$ Вт/м². На верхней границе - условие симметрии, стенка адиабатная. Для описания процессов в пристеночной области по высокорейнольдсовым моделям используется модифицированная пристеночная функция (Enhanced wall treatment). В таких положениях получены результаты [1-5], интересные для приложений решения задач НГО.

Так, для анализа поля температуры за выступом (рис. 2) рассмотрим данные [3]. Видно, что экспериментально полученные профили температуры за выступом в зоне смешения на границе между основным потоком и пристеночным течением (в зоне рециркуляции) имеют явно выраженный излом. В целом результаты расчетов основных профилей температуры, выполненных с помощью трех моделей турбулентности хорошо совпадают с экспериментальными данными [4].

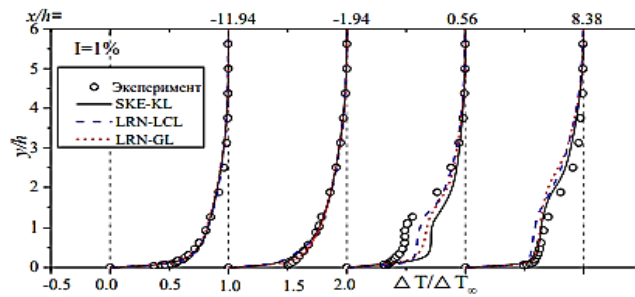


Рис. 2. Распределение средней температуры при обтекании одиночного прямоугольного выступа [3]

Для поля скоростей диапазон взаимного расположения выступа и сечений замера составляет $-11,94 < x/h < 20,88$. В [3] исследуемые характеристики рассчитывались в 11 сечениях. Экспериментальные и численные профили средних скоростей в исследованных сечениях показаны на рис. 3. Нетрудно видеть, что результаты расчетов основных динамических характеристик, выполненных с помощью всех моделей турбулентности, хорошо совпадают с экспериментальными данными [5]. Кроме того, за выступом в релаксационной зоне низкорейнольдсовая модель LRN-LCL обеспечивает более точное описание рассматриваемого режима течения, чем другие модели.

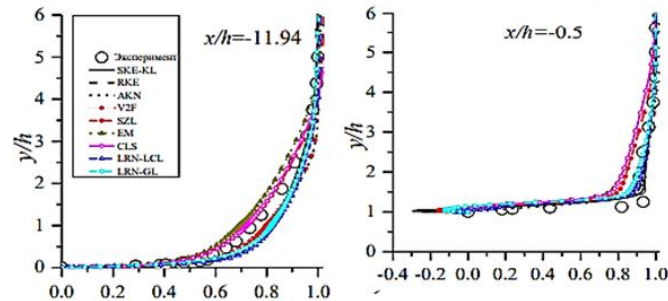


Рис. 3. Распределение средней скорости при обтекании одиночного прямоугольного выступа [3]

Заключение. Проведенный анализ результатов [1-5] показывает, что использование в расчетах нелинейных моделей турбулентности (особенно низкорейнольдсовой версии нелинейной модели — LRNLCL модель) и Гибсона—Лаундера (низкорейнольдсовой модификации) обеспечивает приемлемую для практики точность расчета динамических и тепловых характеристик отрывного течения. Профили температуры за выступом в зоне смещения на границе между основным потоком и пристеночным течением (в зоне рециркуляции) имеют явно выраженный излом. Это учитывается моделированием. Данные модели представляется опробовать при решении задач НГО о течении УВС в трубопроводах.

Литература

1. Afanasiev V.N., Kong D.H. Rectangular ribs in turbulent boundary layer on the initially smooth surface // Proc. of Intern. Conf. «Problems of Thermal Physics and Power Engineering», 2017. JPCS891. P. 1–7.
2. Афанасьев В.Н., Трифонов В.Л., Гетя С.И., Кон Д. Выступ в турбулентном пограничном слое // Машиностроение и компьютерные технологии. 2017. № 10. С. 13–35.
3. Афанасьев В.Н., Дехай Кон. Численное исследование гидродинамики и теплообмена при обтекании прямоугольного выступа с использованием нелинейной k-ε модели турбулентности // Труды Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену: 2018. — 454 с.
4. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. СПб.: БГТУ, 2001. -107 с
5. Craft T.J., Launder B.E., Suga K. Development and application of a cubic eddy-viscosity model of turbulence // Int. J. Heat and Fluid Flow. -1996. No. 17. P. 108–115.
6. Кон Дехай Влияние геометрии турбулизирующих пористых вставок на фактор аналогии Рейнольдса: диссертация . кандидата технических наук : 01.04.14 - Москва 2019