УЧЁТ ВЛИЯНИЯ ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА В РАМКАХ ПОДХОДА RANS

А.А. Савельев, **Р.А. Штин**

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, Жуковский, shtin.ra@gmail.com

Целью работы является повысить точность предсказания положения ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) при моделировании естественного сценария перехода в случае благоприятного градиента давления.

В настоящее время для предсказания положения ЛТП широко применяются методы, принадлежащие семейству локальных корреляционных моделей ЛТП (Local Correlation-based Transition Modeling, LCTM). Свойство локальности заключается в том, что в рамках конечно-объёмного подхода к решению уравнений переноса вычисления внутри каждой ячейки не требуют обращения к остальным ячейкам расчётной области. Это свойство способствует практической реализации данных моделей.

Одним из новейших представителей семейства LCTM является алгебраическая корреляционная модель ЛТП SST-γ-alg [2]. Эта модель по своей сути является модификацией оригинальной модели турбулентности SST [1]. Отличие заключается в том, что в SST-γ-alg в дифференциальном уравнении для кинетической энергии турбулентности k слагаемое P_k, отвечающее за производство k, умножено на коэффициент перемежаемости γ:

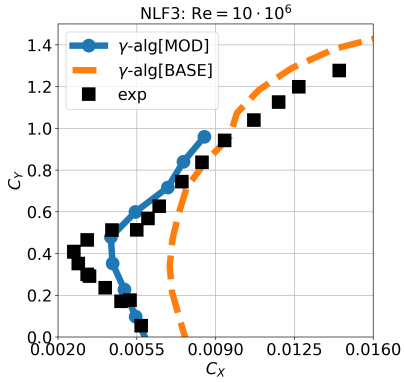
$$P_k \to \gamma P_k, \qquad \gamma = \tanh\left(\left(\frac{\mathrm{Re}_\theta}{\mathrm{Re}_{\theta c}}\right)^2\right). \tag{1}$$

Коэффициент перемежаемости γ варьируется от 0 до 1, отключая производство P_k на ламинарном участке пограничного слоя и активируя его после ЛТП. Для вычисления γ используются алгебраические корреляционные формулы. Здесь Re_θ — это число Рейнольдса, определённое по толщине потери импульса θ (оно определяет состояние пограничного слоя), а $\mathrm{Re}_{\theta c}$ — это критическое значение для Re_θ (оно определяет значение Re_θ, при котором наступает ЛТП). Гиперболический тангенс в формуле играет роль гладкой функции активации. В рамках модели SST-γ-alg числа Re_θ и $\mathrm{Re}_{\theta c}$ вычисляются с помощью локальных алгебраических формул. Для Re_θ используется его корреляция с числом Рейнольдса завихренности.

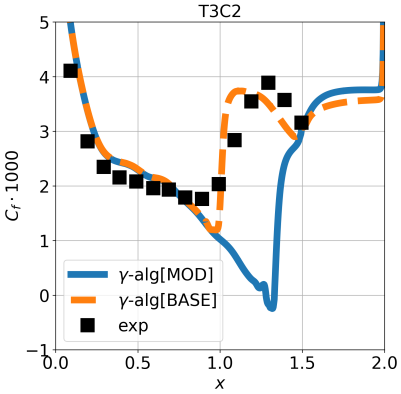
Для вычисления критического числа Рейнольдса используется его корреляция с безразмерным градиентом давления λ_θ и со степенью турбулентности Tu [3]:

$$\mathrm{Re}_{\theta c} = \mathrm{FTu}(\mathrm{Tu}) \cdot \mathrm{FPG}(\lambda_\theta). \tag{2}$$

При обтекании гладких аэродинамических профилей при среднем и высоком числе Рейнольдса набегающего потока имеет место эффект ламинарной корзины («Laminar drag bucket phenomenon»). Это явление заключается в снижении сопротивления профиля из-за ламинаризации пограничного слоя на обеих его поверхностях. Затянутое положение ЛТП в данном случае объясняется стабилизирующим влиянием благоприятного градиента давления на устойчивость пограничного слоя. Модель SST-γ-alg и другие модели семейства LCTM не воспроизводят этот эффект, что продемонстрировано на рис. 1а.



а) Зависимость коэффициента подъёмной силы C_Y от коэффициента сопротивления C_X при обтекании аэродинамического профиля NLF(1)-0414F.



б) Распределение безразмерного коэффициента трения C_f вдоль поверхности пластины в тесте T3C2 из серии тестов ERCOFTAC.

Рис. 1: Сравнение результатов, полученных базовой моделью SST-γ-alg (оранжевая линия) и её модификацией, учитывающей стабилизирующее влияние благоприятного градиента давления (синяя линия). Чёрными квадратами отмечены экспериментальные значения.

Для учёта стабилизирующего влияния благоприятного градиента давления в уравнение для критического числа Рейнольдса (2)

был добавлен множитель, принимающий значения больше 1 при благоприятном градиенте давления и равный 1 при неблагоприятном градиенте давления:

$$\mathrm{Re}_{\theta c} = \mathrm{FTu} \cdot \mathrm{FPG} \cdot (1 + \mathrm{HPG}). \tag{3}$$

Слагаемое HPG вычисляется как функция активации от градиента давления вдоль линии тока $\frac{dC_p}{ds}$ (изображена на рис. 2), включающая поправку при благоприятном градиенте давления вне вязкого подслоя.

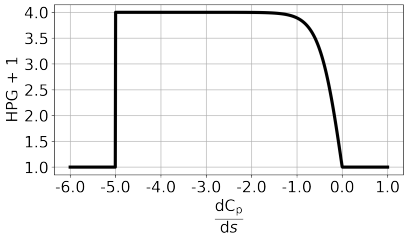


Рис. 2: Зависимость модифицирующего множителя HPG от безразмерного градиента давления $\frac{dC_p}{ds}$ вдоль линии тока.

На рис. 1а видно, что введение поправки позволяет учесть эффект ламинарной корзины. В то же время модифицированная модель ошибочно определяет положение ЛТП при сочетании благоприятного градиента давления с обходным сценарием перехода (рис. 1). Таким образом, область применения предлагаемой модификации ограничена естественным сценарием ЛТП.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00660.

Литература

1. F.R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. J. Heat and Mass Transfer, 2003.
2. F.R. Menter, A. Matyushenko, R. Lechner, A. Stabnikov, A. Garbaruk. An Algebraic LCTM Model for Laminar-Turbulent Transition Prediction. J. Flow, Turbulence and Combustion, 2022.
3. B.J. Abu-Ghannam, R. Shaw. Natural Transition of Boundary Layers — The Effects of Turbulence, Pressure Gradient, and Flow History. Journal of Mechanical Engineering Science, 1980.