

ТЕПЛООБМЕН ПРИ СЛОЖНОМ ДВИЖЕНИИ ГАЗА В КАНАЛАХ ПЕРЕМЕННОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

В настоящей работе численно исследуется теплообмен во внутренних системах с переменностью области движения рабочей среды в условиях турбулентного режима течения. Анализируется тепловая и динамическая структура потока в устройствах с внезапным расширением, конфузorno-диффузорными секциями. Достоверность расчета оценивается сравнениями локальных и интегральных параметров течения и теплообмена с опытными данными других авторов.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в расчетах сложных сдвиговых течений с пространственной и тепловой деформацией потока в энергетических устройствах, теплообменных аппаратах все большую популярность приобретают многопараметрические модели турбулентности с транспортными уравнениями для компонент полного тензора напряжений Рейнольдса и турбулентных потоков тепла и массы. Однако они сложны в реализации и нуждаются в предварительной оценке своих возможностей на ряде конкретных режимов работы технических устройств. В практике прикладных задач двухпараметрические тепловые и динамические модели турбулентности в сравнении с многопараметрическими выглядят предпочтительнее из-за широты области приложений, полноты апробаций, но не лишены трудностей в описании реальных процессов. В каналах переменного поперечного сечения выражены механизмы отрыва, присоединения, ламинаризации или турбулизации потока по мере продвижения по длине [1,2]. Их изучение позволяет не только апробировать оригинальные модели турбулентности, но и глубже понять особенности и механизмы переноса в турбулентных течениях с последующим восстановлением вихревой структуры.

В связи с вышесказанным в настоящей работе поставлена цель:

1) исследовать особенности течений, изменений турбулентной структуры в условиях отрыва и присоединения потока к стенке на базе двухпараметрических тепловых и динамических моделей турбулентности;

2) оценить влияние входных условий на интенсификацию теплообмена в каналах с участками скачка площади поперечного сечения, конфузorno-ми секциями.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА

Система дифференциальных уравнений к описанию турбулентного течения однородного инертного потока и теплообмена в трубах и каналах при отсутствии действия внешних сил, объемных источников тепла при переменных теплофизических свойствах рабочей среды, включающая уравнения неразрывности, осредненные уравнения Навье – Стокса, энергии, в тензорной форме имеет вид [3]:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0; \quad (1)$$

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right]; \quad (2)$$

$$\rho C_p U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho C_p \overline{u'_j t'} \right]. \quad (3)$$

Здесь $(-)$ – осреднение по Рейнольдсу, зависимость теплофизических свойств от температуры определяется зависимостью Саттерленда [3].

3. МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Для замыкания системы (1) – (3) при расчете напряжений Рейнольдса $\overline{\rho u'_i u'_j}$ и турбулентных потоков тепла $\overline{\rho C_p u'_j t'}$ используются двухпараметрические динамические и тепловые модели типа $K - L - t'^2 - \varepsilon_\theta$ [4, 5] по системе зависимостей:

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}; \quad (4)$$

$$-\rho C_p \overline{u'_j t'} = \lambda_t \frac{\partial T}{\partial x_j}; \quad (5)$$

$$\mu_t = \alpha \mu f(\text{Re}_t); \quad (6)$$

$$\lambda_t = \rho C_p C_\lambda f_\lambda K \sqrt{\tau \tau_\theta}; \quad (7)$$

$$\text{Re}_t = \frac{\sqrt{KL}}{v}; \quad (8)$$

$$\tau = \frac{L}{\sqrt{K}}; \quad \tau_\theta = \frac{L^2}{2\varepsilon_\theta}. \quad (9)$$

Заметим, что предварительные расчеты на классе развивающихся инертных течений в каналах с постоянной границей показали высокую эффективность модели и ее замыкающих соотношений в предсказании низкорейнольдсовых областей пристеночного течения. Последнее особенно важно в

прогнозе переходных процессов в случае возможной ламинаризации.

Численное интегрирование определяющих уравнений выполнено на неравномерных сетках с оригинальным способом нахождения поля давления, основанном на идеях Л.М.Симуни [6]. Используются экономичные неявные конечно-разностные схемы, схемы расщепления по физическим процессам и пространственным переменным с последующим применением методов прогонки и установления. Сгущение разностной сетки у стенки проводится по логарифмическому закону. Аппроксимация производных осуществляется со вторым порядком точности относительно шагов в осевом и радиальном направлениях.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Численное исследование течения и теплообмена в трубах со скачком сечения выполнено в широком диапазоне изменения определяющих параметров

$$Re = 5 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^5, h/R = 0.1 \div 0.5,$$

$$Tu = (0.01 \div 10)\%, L = (0.01 \div 0.4)R,$$

$$T_w/T_0 = 0.5 \div 2.0.$$

Некоторые представления о возможностях модели турбулентности в расчете пристеночных течений дают рис. 1, 2. Видно, что «тонкие» динамические и тепловые параметры в области непосредственной стенки хорошо предсказываются моделью.

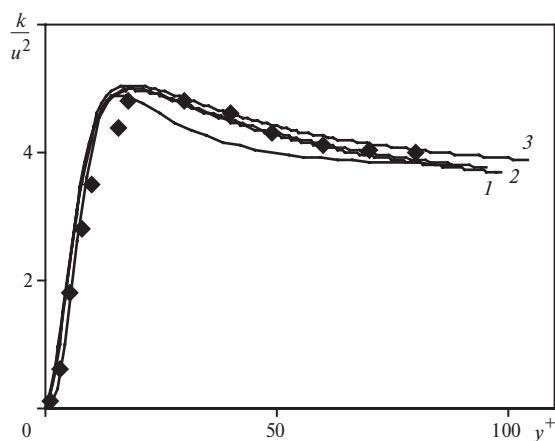


Рис.1. Распределение безразмерной кинетической энергии турбулентности k/u_*^2 в области стенки в зависимости от универсальной поперечной координаты $y^+ \lim_{x \rightarrow \infty}$ при различных значениях относительной осевой координаты x/D . Здесь линии – расчет, значки – опыт Лауфера ($Re = 4,25 \cdot 10^5$, $Tu=5\%$). Сплошная – настоящая модель ($1 - x/D = 80$, $2 - 100$, $3 - 120$), пунктир – k-L-модель ($x/D=160$)

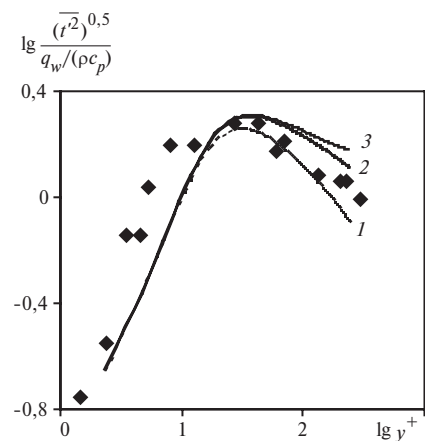


Рис.2. Безразмерные профили среднеквадратичных значений пульсаций температуры $\lg[(t'^2)^{0.5} / (q_w / (\rho c_p))]$ в зависимости от универсальной координаты $\lg y^+$ в различных сечениях по длине канала. Здесь значки – опыт Tanimoto S

($Re = 3,25 \cdot 10^4$), линии - расчет ($1 - x/D = 4$; $2 - 12$; $3 - 160$)

Данные расчета течения с уступом показывают, что модель вполне эффективна в оценке протяженности зоны обратных токов. В данных течениях локальная структура турбулентности в значительной степени зависит от того, что происходит в других частях потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование неізотермических низкорейнольдсовых течений во внутренних системах с замыкающими связями, включающими интегральный масштаб кинетической энергии турбулентности, уравнения интенсивности пульсаций температуры весьма корректно в предсказании механизмов смещения турбулентности, ее вырождения и последующего восстановления по длине канала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Launder R.E.** Heat and Mass Transport Turbulence – Topics in Applied Physics. Berlin: Springer, 1976.232p.
2. **Turbulent Shear Flows** I/F. Durst, B.E. Launder, F.W. Schmidt, J.H. Whitelaw. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York. 1979. 430 p.
3. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 668 с.
4. **Глушко П.С.** Некоторые особенности турбулентных течений несжимаемой жидкости с поперечным сдвигом // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1971. №4. С. 128-136.
5. **Харламов С.Н.** и др. Математические модели течения и теплообмена во внутренних задачах динамики вязкого газа. Томск: Изд-во Том ун-та, 1993. 178 с.
6. **Симуни Л.М.** Численное решение задачи при неізотермическом движении вязкой жидкости в плоской трубе // Инженерно-физический журнал 1966. Т.10. №1 С. 86-91.