

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ КОММЕРЧЕСКИХ CFD-КОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

Низамутдинов В.Р., Осипов С.Л., Прокопцов И.С., Рогожкин С.А.
АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Россия

Введение

В моделях турбулентности, реализованных в большинстве Computational Fluid Dynamics (CFD) программных комплексах (ANSYS CFX, STAR-CCM+, FlowVision, Fluent и др.), для учёта теплопереноса используется аналогия Рейнольдса – аналогия между теплообменом и переносом количества движения в турбулентном потоке. В жидких металлах вследствие большой теплопроводности и малой вязкости, распределение полей скорости и температуры существенно различаются друг от друга. Таким образом, теплоперенос в средах с $Pr \ll 1$ (например, жидкие металлы) существенно отличается от механизма теплопереноса в средах с $Pr \sim 1$ (воздух, вода и др.) и использование моделей турбулентности с аналогией Рейнольдса для моделирования теплогидравлических процессов с натриевым теплоносителем может привести к некорректным результатам.

В данной работе представлены результаты численного моделирования течения натрия в круглой трубе с помощью коммерческих CFD-кодов: ANSYS CFX, STAR-CCM+, FlowVision и их сравнение с аналитическим решением.

Расчётная схема

В задаче моделируется развитое турбулентное течение жидкометаллического теплоносителя (натрия) в круглой трубе. Расчётная схема (рис. 1) состоит из двух участков. Первый участок – адиабатический (длина $l_1 = 40d$), принимается для формирования профиля скорости в трубе при численном моделировании течения, на втором участке (длиной $l_2 = 10d$) поддерживается постоянная температура стенки $t_c = 150^\circ\text{C}$. Температура теплоносителя на входе в трубу принимается равной $t_{\text{вх}} = 550^\circ\text{C}$. В результате решения определяется средняя температура теплоносителя на выходе из трубы $t_{\text{вых}}$ при варьировании критерия Пекле (Pe) от 300 до 10000 (путём изменения расхода на входе в трубу G), в соответствии с областью применения формулы для расчёта критерия Нуссельта $Nu = 5 + 0,025 \cdot Pe^{0,8}$ [1], используемой в аналитическом решении.

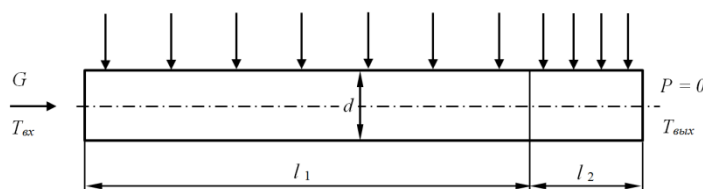


Рис. 1 – Расчётная схема задачи: течение теплоносителя в трубе с охлаждением

Аналитическое решение

Результаты аналитического решения по средней выходной температуре теплоносителя получены по нижеприведенной методике.

Средняя температура теплоносителя на выходе из трубы определяется по формуле [2]:

$$T_{OUT} = T_{IN} - (T_{IN} - T_w) \left(1 - e^{-\frac{K \cdot F}{W}}\right), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

где T_{IN} – температура на входе в трубу, $^\circ\text{C}$;
 T_w – наружная температура стенки трубы, $^\circ\text{C}$;
 K – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;
 F – площадь поверхности теплообмена, м^2 ;
 W – теплоёмкость массового расхода, $\text{Вт}/^\circ\text{C}$.

Теплоёмкость массового расхода определяется по формуле:

$$W = G \cdot C_p, \quad (2)$$

где G – массовый расход среды, $\text{кг}/\text{с}$;
 C_p – удельная теплоёмкость среды, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.

Площадь поверхности теплообмена определяется по формуле:

$$F = \pi \cdot l \cdot d_{IN}, \text{ } \text{м}^2 \quad (3)$$

Коэффициент теплопередачи определяется по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{d_{IN}}{2 \cdot \lambda_c} \cdot \ln\left(\frac{d_{OUT}}{d_{IN}}\right)}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}) \quad (4)$$

где d_{IN} – внутренний диаметр трубы, м;

d_{OUT} – наружный диаметр трубы, м;

λ_c – коэффициент теплопроводности трубы, Вт/(м·°C);

α – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к трубе для развитого турбулентного течения, Вт/(м²·°C).

Так как сопряженная задача не рассматривается и температура задается на внутренней поверхности стенки трубы, формула (4) принимает вид:

$$K = \alpha, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}) \quad (5)$$

Формулу для средней температуры на выходе (1) можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{aligned} T_{OUT} &= T_{IN} - (T_{IN} - T_W) \left(1 - e^{-\frac{K \cdot F}{W}}\right) = T_{IN} - (T_{IN} - T_W) \left(1 - e^{-\frac{\alpha \cdot \pi d l}{c_p \rho v \pi (d^2/4)}}\right) = \\ &= T_{IN} - (T_{IN} - T_W) \left(1 - e^{-4 \frac{\alpha d l}{\lambda} \frac{\lambda}{d} \frac{\mu}{c_p \mu} \frac{\mu}{\rho v d}}\right) = T_{IN} - (T_{IN} - T_W) \left(1 - e^{-4 \frac{l}{d} \frac{Nu}{Re \cdot Pr}}\right) = \quad \text{Критерий Нуссельта} \\ &= T_{IN} - (T_{IN} - T_W) \left(1 - e^{-4 \frac{l}{d} \frac{Nu}{Pe}}\right), \text{ °C} \quad (6) \end{aligned}$$

для турбулентного режима течения натрия в трубе при $Pe > 300$ определяется по формуле [1]:

$$Nu = (5 + 0,025 \cdot Pe^{0,8}) \cdot 1,72 \cdot \left(\frac{d_{IN}}{l}\right)^{0,16}, \quad (7)$$

где Pe – критерий Пекле;

l – длина трубы, м;

$1,72 \cdot (d_{IN} / l)^{0,16}$ – поправочный множитель при $l/d < 30$.

Критерий Пекле определяется по формуле:

$$Pe = Pr \cdot Re \quad (8)$$

Численное моделирование

Моделирование процесса тепломассопереноса в жидкометаллическом теплоносителе проводилось по трём программным комплексам: ANSYS CFX, STAR-CCM+ и FlowVision с применением к-ε модели турбулентности, при этом теплоперенос рассчитывался в рамках аналогии Рейнольдса. Также были выполнены расчёты по программе FlowVision с использованием специально разработанной модели турбулентного теплопереноса LMS (Liquid Metal Sodium) [3, 4], предназначенной для учёта специфики теплопереноса натриевого теплоносителя. Модель LMS включает в себя уравнения теплопереноса в турбулентном потоке, выражение для турбулентного числа Прандтля, поправку, учитывающую гравитационную анизотропию в тепловом потоке, тепловую пристеночную функцию. Модель совместима со всеми разработанными в программном комплексе FlowVision к – ε моделями турбулентности и применима как высокорейнольдсовых (с пристеночными функциями), так и в низкорейнольдсовых (без пристеночных функций) расчётах течения натрия.

Для решения данной задачи в программных комплексах созданы полномасштабные расчётные модели трубы. Сетки построены со сгущением к боковой поверхности. Среднее количество элементов в расчётных сетках ANSYS CFX, STAR-CCM+ и FlowVision составляют, соответственно, около 1 млн. ячеек. Фрагменты расчётных сеток представлены на рис. 2.



Рис. 2 – Фрагменты расчётных сеток

Результаты расчёта

Задача решается с натриевым теплоносителем. Теплофизические характеристики теплоносителя принимаются постоянными и соответствующими температуре 550 °С.

Изменение средней температуры натрия на выходе из трубы в зависимости от критерия Пекле представлено на рис. 3. Как видно из рисунка, результаты, полученные в ПК FlowVision с использованием специально разработанной для натриевого теплоносителя модели турбулентного теплопереноса LMS, существенно лучше согласуются с аналитическим решением.

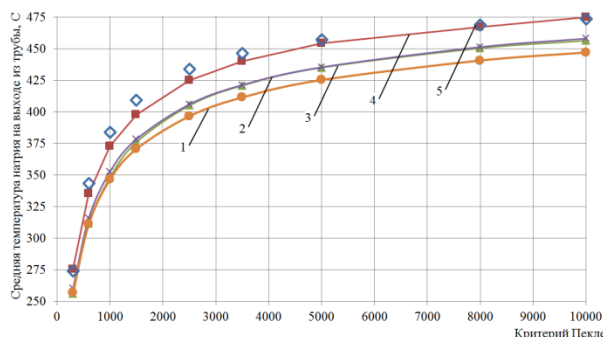


Рис. 3 – Средняя температура натрия на выходе из трубы:
ANSYS CFX (1), FlowVision (2), STAR-CCM+ (3), FlowVision с LMS (4), аналитическое решение (5)

На рис. 4 представлены зависимости погрешности средней температуры на выходе из трубы, полученные с помощью CFD-кодов, от критерия Пекле при сравнении с аналитическим решением.

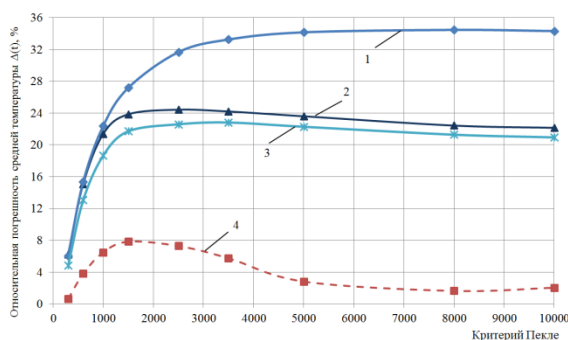


Рис. 4 – Относительная погрешность расчёта средней температуры натрия на выходе из трубы:
ANSYS CFX (1), FlowVision (2), STAR-CCM+ (3), FlowVision с LMS (4)

Оценка относительной погрешности средней температуры на выходе из трубы проводится по формуле:

$$\Delta = \frac{|T_a - T|}{|T_{a \max} - T_a|} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где T_a и T – значения температур, полученные по результатам аналитического расчёта и расчёта по кодам, соответственно;

$T_{a \max}$ – максимальное значение температуры во всей области задачи.

Как видно из приведённых графиков, использование CFD-кодов ANSYS CFX, STAR-CCM+ и FlowVision (без LMS) при моделировании течения натрия в трубе приводит к большим погрешностям средней выходной температуры (до 34 %); применение модели турбулентного теплопереноса LMS в FlowVision позволяет существенно улучшить результаты расчётов для данного класса задач и достичь погрешности расчёта по температуре не более 8 %.

Стоит отметить, что применение вышеперечисленных кодов для решения подобной задачи, но с использованием в качестве теплоносителя воды и сравнение с соответствующим аналитическим решением приводит к погрешности по выходной температуре не более 6 %.

Зависимости критерия Нуссельта от критерия Пекле представлены на рис. 5.

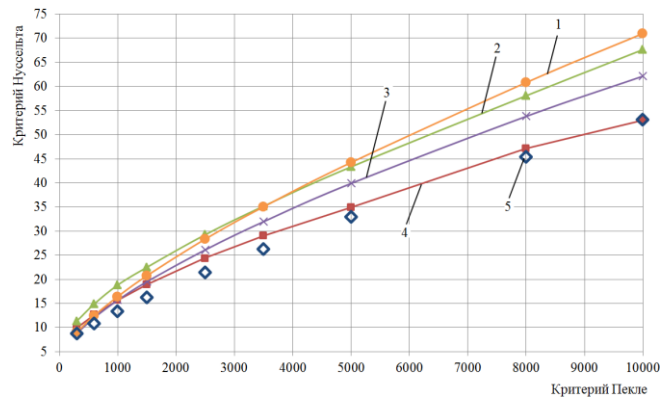


Рис. 5 – Зависимость критерия Нуссельта от критерия Пекле: ANSYS CFX (1), FlowVision (2), STAR-CCM+ (3), FlowVision с LMS (4), аналитическое решение (5)

Как видно из графиков на рис. 5, критерий Нуссельта, определенный по программе FlowVision с LMS, достаточно хорошо описывает аналитическое решение и с увеличением критерия Пекле точность расчётов растёт. Решение по ANSYS CFX, STAR-CCM+ и FlowVision без LMS даёт хорошие результаты лишь в диапазоне чисел Пекле от 300 до 1000, в дальнейшем, с ростом критерия Пекле точность расчётов существенно снижается.

На рис. 6 приведены результаты расчёта турбулентного числа Прандтля, полученные по программе FlowVision с использованием модели LMS. Из рисунка видно, что для натриевого теплоносителя турбулентное число Прандтля имеет переменное значение, которое значительно превышает величину 0,9, используемую по умолчанию в коммерческих CFD-кодах.

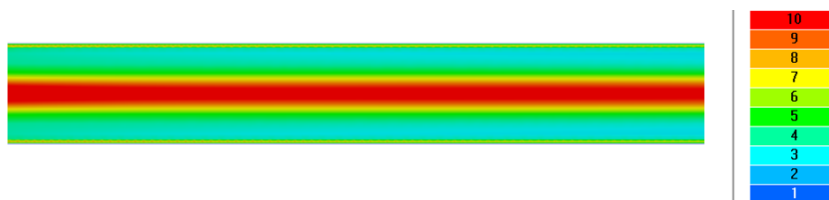


Рис. 6 - Расчётное значение турбулентного числа Прандтля по ПК FlowVision

Заключение

Выполнено исследование применимости коммерческих CFD-кодов для моделирования процесса теплопереноса в жидкометаллическом теплоносителе. Решение задачи течения натриевого теплоносителя в круглой трубе по кодам ANSYS CFX, STAR-CCM+, FlowVision, где используется аналогия Рейнольдса, даёт существенное отклонение от аналитического решения, как по температуре, так и по критерию Нуссельта. Учёт специфики теплопереноса для натриевого теплоносителя, с помощью специально разработанной модели LMS, позволяет существенно улучшить результаты расчётов для данного класса задач.

Список литературы

1. Боришанский В.М. Жидкометаллические теплоносители. М.: Атомиздат, 1967.
2. В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. Теплопередача. М., Энергоиздат, 1981 г.
3. Осипов С.Л., Рогожкин С.А., Фадеев И.Д. и др. Разработка модели LMS для учета турбулентного теплопереноса в натриевом теплоносителе и ее тестирование // Тезисы докл. межд. форума «Инженерные системы-2012». 2012. С. 21–22.
4. Осипов С.Л., Рогожкин С.А., Соболев В.А., Шепелев С.Ф., Аксенов А.А., Жлуктов С.В., Сазонова М.Л., Шмелев В.В.. Численное моделирование теплогидравлических процессов в верхней камере быстрого реактора // Атомная энергия. 2013. Т. 115, Вып. 5. С. 295–298.