

УДК 532.517, 621.565.93/.95

А.И. ХАЙБУЛЛИНА, к.т.н., доцент (КГЭУ)

А.Р. ХАЙРУЛЛИН, аспирант (КГЭУ)

Р.Р. КАЙБЫШЕВА, студент гр. ЭОм-1-21 (КГЭУ)

г. Казань

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ

Последние десятилетия для расчетов теплообменного оборудования стали широко применяться численные методы, реализованные в различных программных продуктах вычислительной гидродинамики. Использование численных методов позволяет отказаться от дорогостоящих экспериментальных исследований. Позволяет рассчитать гидродинамические и теплообменные характеристики теплообменных оборудования, которые затруднительно получить при проведении эксперимента. Несмотря на продвижения в этой области, наиболее важной и сложной проблемой является поиск подходящих моделей турбулентности. Обычно выделяют DNS, LES, RANS методы моделирования турбулентных потоков [1, 2].

В данной работе исследованы различные RANS модели турбулентности для расчета теплообменных характеристик в кожухотрубных теплообменных аппаратах. Для расчета течений жидкости теплообмена в пучках труб была построена математическая модель в программе Ansys Fluent [3]. Для построения геометрии был выбран графический редактор Design Modeler. Модель представляла собой семирядный пучок труб, с диаметром трубок  $D=0,01$  м и с безразмерным продольным поперечным шагом трубок  $S/D$  равным 1.3 (рис.1).

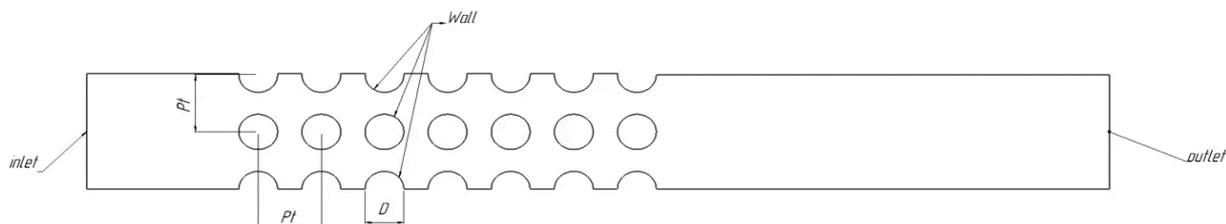


Рис.1. Расчетная область математической модели

В работе производится численное моделирование теплообмена для пучка труб и сравнение полученных данных с экспериментом [4]. Имитация потока производится для чисел  $Re$  от 1000 до 10200. Число  $Pr$  соответствует значению 7,22 для всех случаев моделирования. Теплофизические свойства

жидкости постоянны. Плотность  $\rho=996,6 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda=0,612 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$ , теплоемкость  $c_p=4176,3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ , динамическая вязкость  $\mu=8,5 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ . При моделировании использовались 4 модели турбулентности: SST, RNGk-eSWF, RNGk-eEWF и SSTk-omega. Моделирование проводилось на 5 сетках (рис.2 а, б) M1=50293 элементов, M2=96899 элементов, M3=192435 элементов, M4=155349 элементов, M5= 308447 элементов. Моделирование осуществляется с помощью метода моделирования URANS.

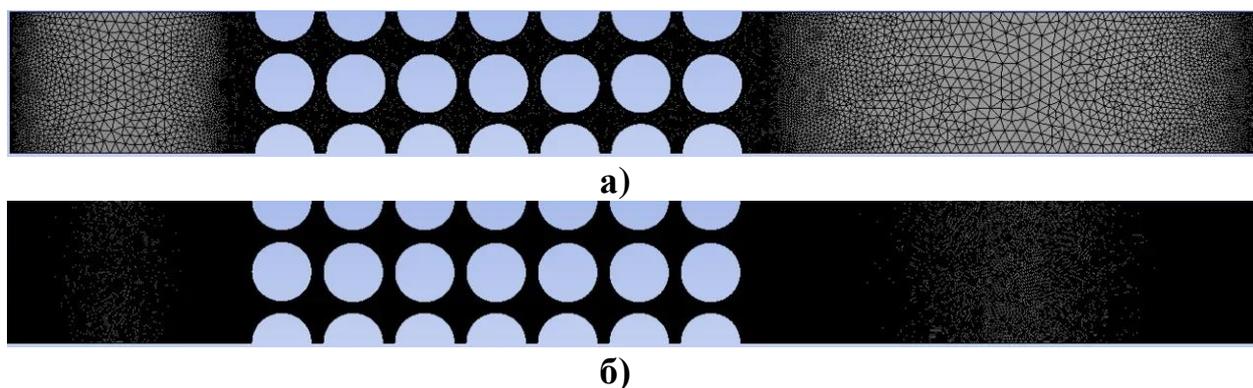


Рис. 2. Сетки для коридорного семирядного пучка  
а) грубая сетка (50293 элемента)  
б) мелкая сетка (308447 элементов)

При проверке сеточного решателя была выбрана сетка M2 с 96899 элементов. При дальнейшем увеличении разбиения сетки число Нуссельта изменяется в пределах 1%. Среди рассмотренных моделей турбулентности наилучшее совпадение с экспериментальными данными показала модель RNGk-eEWF (расхождение с экспериментальными данными составило менее 5%) (рис.2). Наибольшее расхождение с экспериментальными данными показала модель RNGk-eSWF (рис.3).

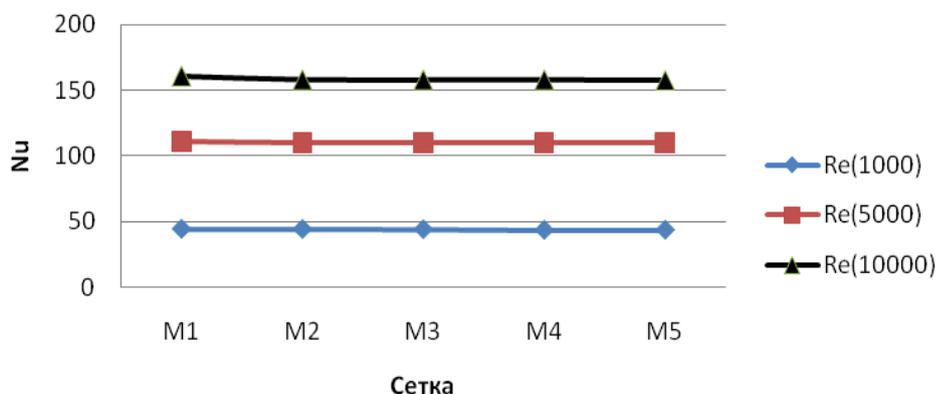


Рис. 2. Зависимость числа Нуссельта от 5 разных вариантов сеточного решателя для модели турбулентности RNGk-eEWF

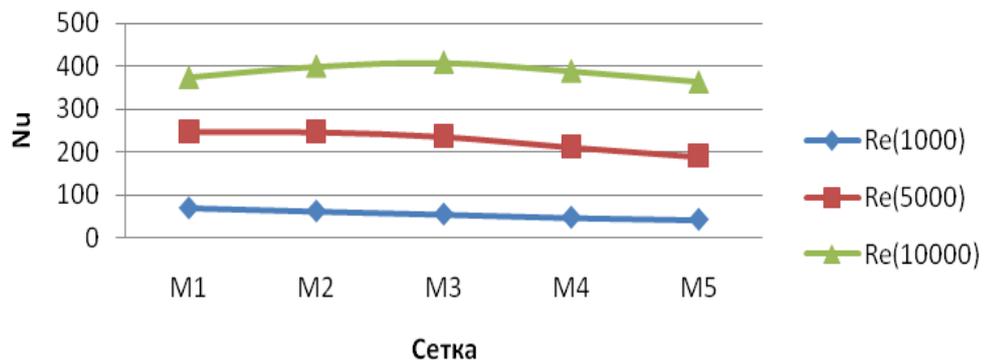


Рис.3. Зависимость числа Нуссельта от 5 разных вариантов сеточного решателя для модели турбулентности RNGk-eSWF

Были получены осредненные и локальные данные по теплоотдаче для SST, RNGk-eSWF, RNGk-eEWF и SSTk-omega моделей турбулентности на пяти сетках. При анализе данных по теплоотдаче по поверхности трубки можно сделать вывод, что наибольшие величины числа Nu наблюдаются в лобовой и кормовой части трубки. Самыми проблемными зонами является лобовая часть трубки, соответствующая углу  $0^\circ$ , а также кормовая область трубки, соответствующая значению  $180^\circ$ . Полученная качественная картина течения потока скорости и температурных полей отражает распределение скорости в межтрубном пространстве. Качественная картина течения согласуется с количественными значениями локальных характеристик теплообмена. Застойные зоны в межтрубном пространстве соответствуют минимальным значениям теплоотдачи по периметру трубки (рис. 4, 5).

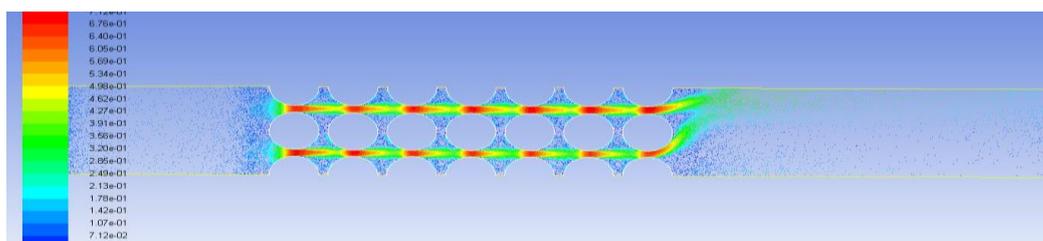


Рис.4. Вектор скорости для модели турбулентности RNGk-eEWF при  $Re=5000$

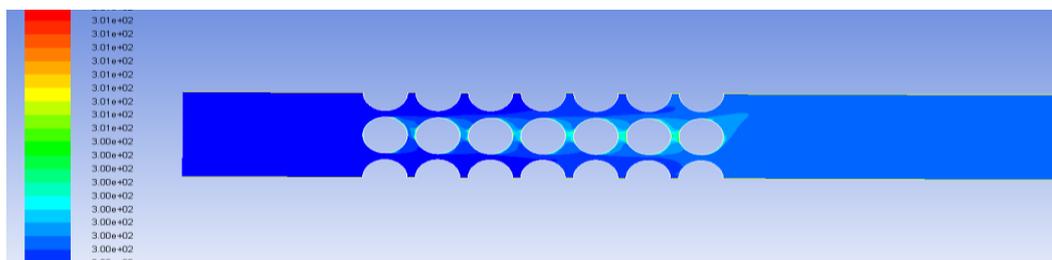


Рис. 5. Температурное поле для модели турбулентности RNGk-eEWF при  $Re=5000$

На рис. 6 представлены зависимости числа Nu от угла взаимодействия с потоком жидкости для чисел  $Re = 10200$  для 6 рядов.

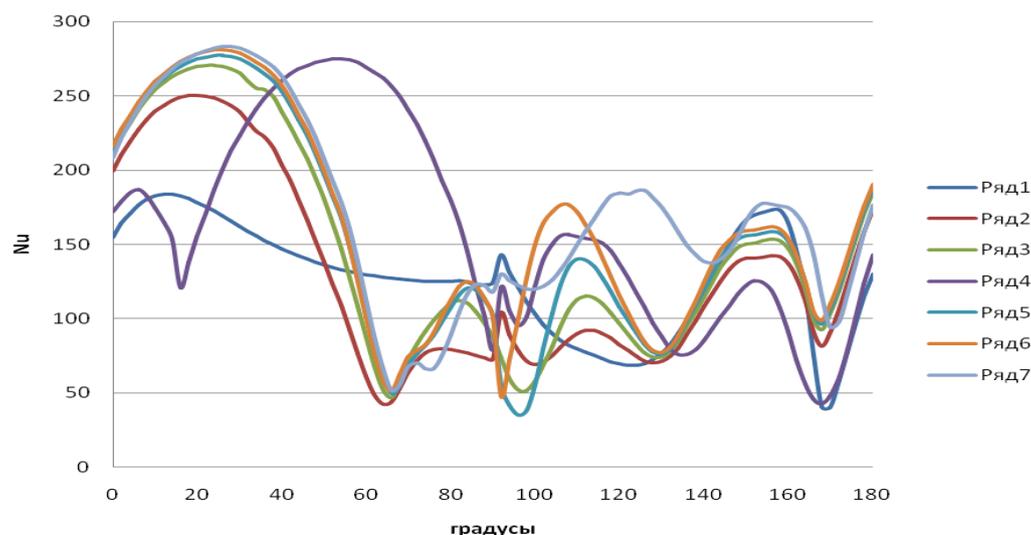


Рис.6. Зависимость числа Nu от угла соприкосновения с потоком для модели RNGk- $\epsilon$ EWF при числе Re=10200.

Из рис. 6 видно, что максимальные значения теплоотдачи наблюдаются при угле от  $10^\circ$  до  $28^\circ$ . Также число Nu увеличивается от  $160^\circ$ . Из этого можно сделать вывод, что максимальная теплоотдача происходит в лобовой и кормовой части трубки. Минимумы наблюдаются при угле  $0^\circ$ . Для этих зон для улучшения теплоотдачи необходимо применить различные средства интенсификации теплообмена.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10406, <https://rscf.ru/project/21-79-10406/>.*

#### Список литературы:

1. Волков К., Емельянов В. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. Litres, 2018. С 368.
2. Hayrullin A.R., Haibullina A.I. and Ilyin V.K. Large-Eddy Simulations of Heat Transfer in the Tube Bundle. 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 720 URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/720/1/012037](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/720/1/012037).
3. ANSYS FLUENT, ANSYS, Inc. Southpointe, 2018.
4. Современные теплообменные аппараты [Электронный ресурс] URL: [media.ls.urfu.ru/592/1610/3827/5173/](https://media.ls.urfu.ru/592/1610/3827/5173/)(дата обращения: 07.10.2021).

#### Информация об авторах:

Хайбуллина Айгуль Ильгизаровна, к.т.н., доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» КГЭУ, 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д.51, [haybullina.87@mail.ru](mailto:haybullina.87@mail.ru)

**VI Всероссийская научно-практическая конференция  
«ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»**

149-5

**8-10 декабря 2021г.**

---

Хайруллин Айдар Рафаэлевич, аспирант кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» КГЭУ, 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д.51, [kharullin@yandex.ru](mailto:kharullin@yandex.ru)

Кайбышева Рушания Радамировна, студент гр. ЭОм-1-21 кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» КГЭУ, 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д.51, [kalipco199@gmail.com](mailto:kalipco199@gmail.com)