

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ПОВОЛЖЬЯ

№11 2021

Направления:

**05.13.01 – СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ (технические науки)**

**05.13.06 – АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ
(технические науки)**

**05.13.11 – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ
СЕТЕЙ (физико-математические науки)**

**05.13.11 – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ
СЕТЕЙ (технические науки)**

**05.13.18 – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫЕ
МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ (технические науки)**

**05.13.19 – МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ,
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
(физико-математические науки)**

**Казань
2021**

УДК 60

ББК 30-1

Н-66

Н-66 Научно-технический вестник Поволжья. №11 2021г. – Казань: ООО «Рашин Сайнс», 2021. – 114 с.

ISSN 2079-5920

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (реестровая запись от 08.05.2019 серия ПИ № ФС 77 -75732)

Журнал размещен в открытом бесплатном доступе на сайте www.ntvprrt.ru, и в Научной электронной библиотеке (участвует в программе по формированию РИНЦ).

Журнал включен ВАК РФ в перечень научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» № E12025.

Главный редактор Р.Х. Шагимуллин

Редакционная коллегия

*С.В. Анаников – д.т.н., проф.; Т.Р. Дебердеев – д.т.н., проф.; Б.Н. Иванов – д.т.н., проф.;
В.А. Жихарев – д.ф.-м.н., проф.; В.С. Минкин – д.х.н., проф.; А.Н. Николаев – д.т.н., проф.;
В.Ф. Тарасов – д.ф.-м.н., проф.; Х.Э. Харламбиди – д.х.н., проф.; М.В. Шулаев – д.т.н., проф.*

В журнале отражены материалы по теории и практике технических, физико-математических и химических наук.

Материалы журнала будут полезны преподавателям, научным работникам, специалистам научных предприятий, организаций и учреждений, а также аспирантам, магистрантам и студентам.

УДК 60

ББК 30-1

ISSN 2079-5920

© Рашин Сайнс, 2021 г.

05.13.18

А.И. Хайбуллина, А.Р. Хайруллин, В.К. Ильин, А.А. Синявин, Д.С. БальзамовКазанский государственный энергетический университет,
Казань, haybullina.87@mail.ru**ВЫБОР МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ПУЧКАХ ТРУБ**

В настоящей работе приводятся результаты численного моделирования теплообмена в пучке труб при его поперечном обтекании. Математическая модель представлена в программе Ansys Fluent. Рассмотрены модели турбулентности: SST, RNG k-ε SWF, RNG k-ε EWF и SST k-ω с различным сеточным разбиением. Полученные результаты сравнены с экспериментальными данными.

Ключевые слова: математическое моделирование, модель турбулентности, теплообмен, пучок труб.

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 теплообменного оборудования, которые затруднительно получить при проведении эксперимента. Несмотря на продвижения в этой области, наиболее важной и сложной проблемой является поиск оптимальных моделей турбулентности. От выбора модели турбулентности зависит необходимая вычислительная мощность и точность расчета [1].

Целью работы является численное моделирование теплообмена в пучке труб при его поперечном обтекании с различными моделями турбулентности. Численное исследование проводится в Ansys Fluent [2].

В представленной работе проводилось численное 2D-моделирование стационарного течения однофазной несжимаемой ньютоновской среды в коридорном пучке труб. Коридорный пучок представлял собой семирядный пучок труб ограниченный половинками трубок сверху и снизу. Диаметр трубок составлял 0,01 м. Поперечный и продольный шаг составлял 0,013 м. Вязкость рабочей среды соответствовала $8,5 \cdot 10^{-3}$ Па·с, плотность 996,6 кг/м³, теплопроводность 0,612 Вт/м·°К, теплоемкость 4176,3 Дж/кг·°К.

Скорость на входе в пучок труб рассчитывалась в зависимости от числа Рейнольдса. Число Рейнольдса рассчитывалась по диаметру трубки и скорости в межтрубном пространстве. Температура центрального ряда трубок равнялась 301 К. Температура потока жидкости на входе соответствовала 300 К. Течение жидкости в пучке труб рассчитывалось на основе RANS моделей турбулентности [3]. При моделировании использовались 4 модели турбулентности (табл.1). Моделирование проводилось на 5 сетках: M1=50293 элементов, M2=96899 элементов, M3=192435 элементов, M4=155349 элементов, M5= 308447 элементов.

Таблица 1 – Модели турбулентности используемые в работе

№	Название
1	Модель переноса касательных напряжений SST
2	RNG k-ε модель со стандартной пристеночной функцией (RNG k-ε SWF)
3	RNG k-ε модель с расширенным пристеночным моделированием (RNG k-ε EWT)
4	SST k-ω модель

В таблицах 2–5 приведены значения числа Нуссельта, полученные в результате моделирования пяти различных сеток и экспериментальные данные. Значения числа Нуссельта получены для трубки шестого ряда пучка труб.

Таблица 2 – Значения числа Нуссельта для модели турбулентности SST

Re	M1	M2	M3	M4	M5	Nu(эксп.)[4]
1000	17,8	15,8	15,4	15,2	14,3	38
5000	93,3	92,7	92,3	91,9	–	104,7
10000	159,9	156,7	155,9	154,2	–	162,1

Таблица 3 – Значения числа Нуссельта для модели турбулентности RNG k-ε SWF

Re	M1	M2	M3	M4	M5	Nu(эксп.)[4]
1000	69,7	62,3	55,4	47,8	42,7	38
5000	247,2	246,4	235,8	211,5	189,7	104,7
10000	374,2	399,8	409,1	388,6	363,2	162,1

Таблица 4 – Значения числа Нуссельта для модели турбулентности RNG k-ε EWF

Re	M1	M2	M3	M4	M5	Nu(эксп.)[4]
1000	44,5	44,4	44,2	43,7	43,8	38
5000	111,5	110,3	110,5	110,2	110,4	104,7
10000	161,0	158,2	158,0	158,2	157,7	162,1

Влияние сеточного разбиения на теплоотдачу пучка не значительно для моделей SST, RNG k-ε EWT и SST k-ω. Значение числа Нуссельта при увеличении элементов сетки с M2 до M3 в основном меняется в пределах 1–2%. Для модели турбулентности RNG k-ε SWF с увеличением количества элементов сеточного разбиения стабилизации значений Нуссельта не происходит.

Таблица 5 – Значения числа Нуссельта для модели турбулентности SST k-ω

Re	M1	M2	M3	M4	M5	Nu(эксп.)[4]
1000	18,3	16,8	16,9	16,7	16,1	38
5000	87,3	87,6	87,4	86,7	–	104,7
10000	143,7	142,2	141,2	140,2	–	162,1

На рис. 1–4 приведены зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса для исследованных моделей турбулентности. Модель турбулентности SST (рис. 1) лучше совпадает с экспериментальными данными с увеличением числа Рейнольдса. При числе Рейнольдса 10000 различие с экспериментальными данными составило не более 5% для всех исследуемых сеток. Однако при числе Рейнольдса 1000 различие с экспериментальными данными более 100%.

Модель RNG k-ε SWF (рис. 2) существенно завишает интенсивность теплообмена по сравнению с экспериментальными данными. Среднее разиличие с экспериментальными данными во всем исследованном диапазоне составило более 100%. Данный результат очевиден поскольку k-ε модель со стандартной пристеночной функцией не предназначена для течений с переходными режимами и большими градиентами давления.

Модель RNG k-ε EWT (рис. 3) показала хорошее совпадение с экспериментальными данными во всем исследованном диапазоне. Отклонение с экспериментальными данными уменьшается с увеличением числа Рейнольдса. При числе Рейнольдса 1000 отклонение с экспериментальными данными составило не более 17% в зависимости от варианта сетки. При максимальном числе Рейнольдса отклонение с экспериментальными данными составило не более 3%.

Результаты полученные для модели турбулентности SST k- ω схожи с результатами полученными для модели SST. Модель SST k- ω лучше прогнозирует теплоотдачу с увеличением числа Рейнольдса. При максимальном числе Рейнольдса отклонение с экспериментальными данными составило не более 16%.

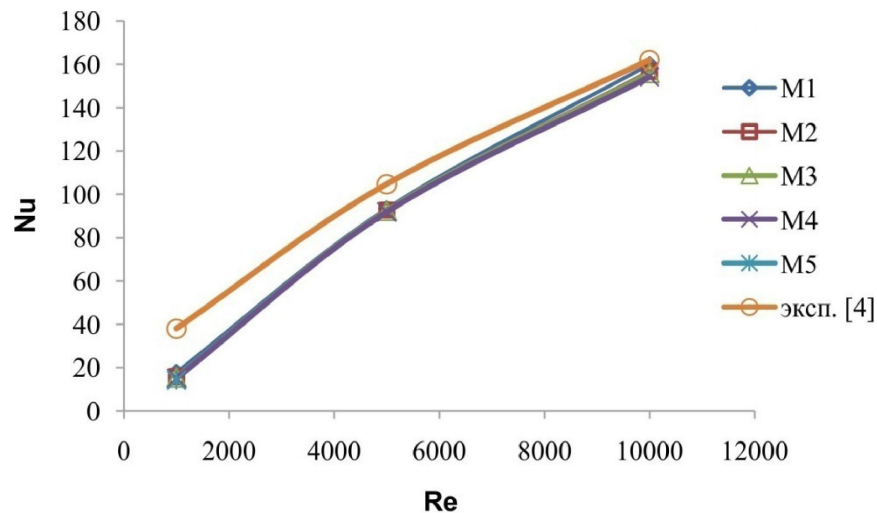


Рис.1 – Зависимость числа Nu от числа Re для модели турбулентности SST

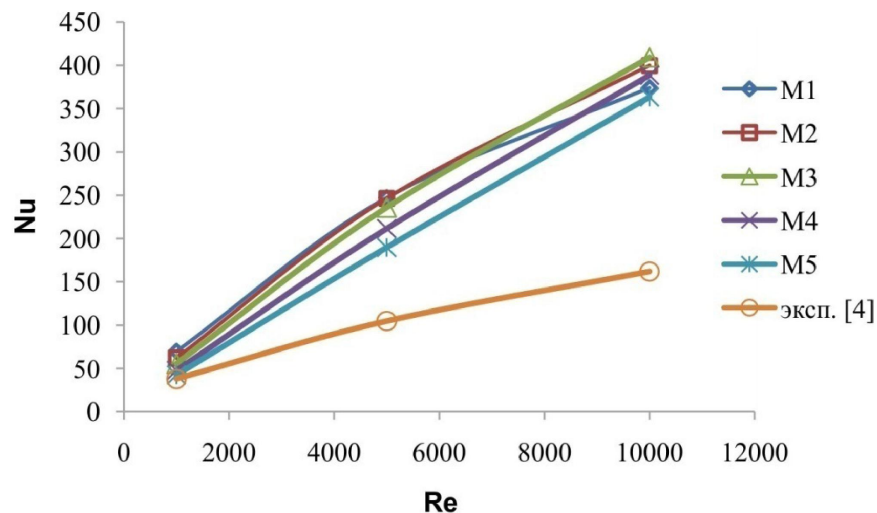


Рис.2. – Зависимость числа Nu от числа Re для модели турбулентности RNG k- ϵ SWF

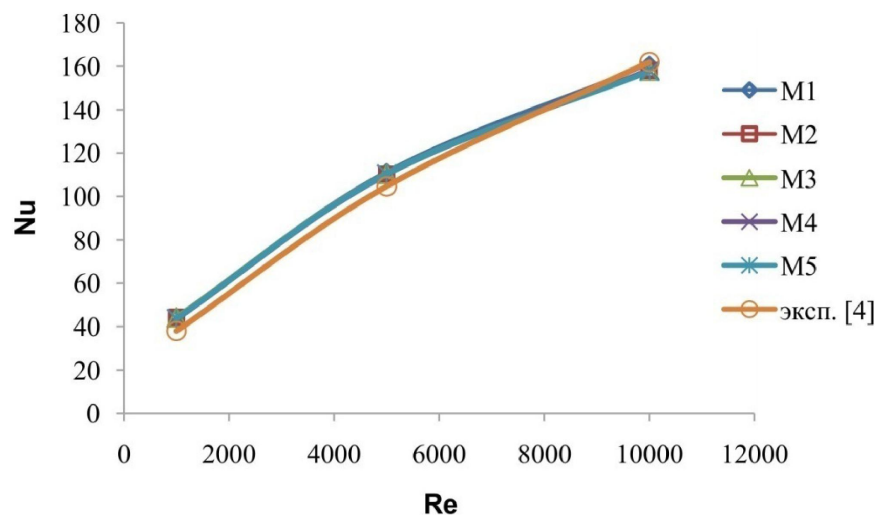


Рис. 3. – Зависимость числа Nu от числа Re для модели турбулентности RNG k- ϵ EWT

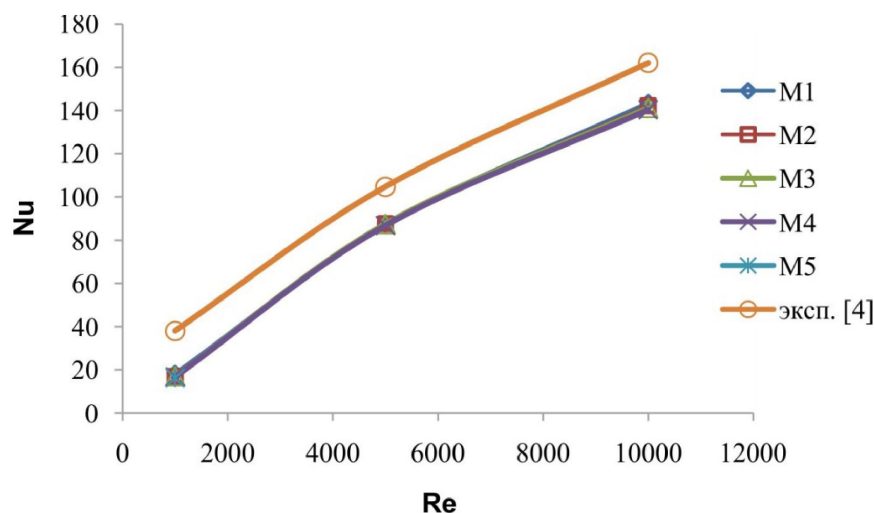


Рис. 4. – Зависимость числа Nu от числа Re для модели турбулентности SST k- ω

Среди рассмотренных моделей турбулентности наилучшее совпадение с экспериментальными данными показала модель RNG k- ϵ EWT (среднее расхождение с экспериментальными данными во всем исследованном диапазоне составило не более 7%). Наибольшее расхождение с экспериментальными данными показала модель RNG k- ϵ SWF.

Благодарности

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. ANSYS FLUENT, ANSYS, Inc. Southpointe, 2018.
3. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений. Санкт-Петербург: Изд. Политехнический университет, 2009. С. 143.
4. Жукаускас А., Макарявичюс В., Шланчяускас А. Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости. Вильнюс: Изд. Мокслас, 1968. С. 192.