

Научная статья

УДК 531/534: [57+61]

М.В. Матросова, Ю.А. Большакова

M.V. Matrosova, J.A. Bolshakova

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В КРЕСТООБРАЗНОЙ ТРУБЕ

NUMERICAL MODELING OF NON-ISOTHERMAL MIXING OF LIQUIDS IN A CROSS-SHAPED PIPE

Данное исследование является частью работы, направленной на изучение программного комплекса ANSYS Workbench и ANSYS FluidFlow (CFX). В работе проводится анализ характера смешивания холодной и горячей воды при столкновении в перекрестной трубе, а также рассмотрено влияние температуры жидкости на ее распределение в трубе.

Ключевые слова: численное моделирование, перекрестная труба, теплопроизводительность, программный комплекс ANSYS Workbench, программный комплекс ANSYS FluidFlow.

This research is part of work aimed at studying the ANSYS Workbench and ANSYS FluidFlow (CFX) software package. The work analyzes the nature of mixing of cold and hot water upon collision in a cross pipe, and also examines the influence of liquid temperature on its distribution in the pipe.

Keywords: numerical modeling, cross pipe, thermal performance, ANSYS Workbench software package, ANSYS FluidFlow software package.

Введение

В современном мире все большее внимание уделяется повышению точности расчетов при проведении научных исследований и выполнении проектных работ. Одним из способов повышения точности расчетов является применение метода конечных элементов [1], реализующего численными методами решение систем дифференциальных уравнений [2], описывающих сложные физические процессы [3]. Такие задачи встречаются в различных прикладных, научных и технических областях. Так, в статье [4] показана необходимость точного расчета энергетического баланса теплоэнергетической системы с тепловым аккумулятором. В статье [5] указывается необходимость корректной оценки тепловой производительности солнечных коллекторов с целью оптимизации автономных энергосистем, утилизирующих энергию солнечного излучения.

Аналогичные задачи появляются при имитационном моделировании различных технических систем, когда возникают задачи определения теплопроизводительности систем для различных внешних условий [6–8]. Подобные задачи возникают и при оптимизации параметров систем для различных внешних условий, например, при эксплуатации в суровых климатических условиях [9]. Еще одной областью применения систем численного моделирования методом конечных элементов являются задачи определения поведения и изменения свойств объектов, участвующих в сложных электрохимических процессах [10].

В данной статье приводится описание процесса выполнения гидродинамических расчетов на примере расчета смешивания горячей и холодной жидкостей в трубе с поперечным каналом. Программный комплекс ANSYS давно зарекомендовал себя как мощнейший инструмент при моделировании различных процессов и явлений в механике, электромагнетизме [11, 12, 14, 15].

Для примера в качестве объекта исследования был принят трубопровод в виде скрещенной трубы, в которую втекают два потока жидкости с разными температурами.

Расчет течения выполняется в программном комплексе ANSYS с использованием модулей Workbench и FluidFlow (CFX) [13]. Модуль Workbench предназначен для обеспечения удобства при работе с файлами проекта, позволяя пользователю сосредоточиться на подготовке исходных данных без вникания в этот процесс на уровне файловой системы. Модуль FluidFlow (CFX) предназначен для подготовки исходных данных для расчета методом конечных элементов, поиска решений дифференциальных уравнений, сформированных на основе этих исходных данных, а также визуализации полученных в результате решения полей скоростей, давлений и температур движущейся среды.

Цель работы – смоделировать две перекрестных трубы для рассмотрения смешивания горячей и холодной воды при столкновении.

Материалы и методы

В задаче рассматривается смешивание холодной и горячей жидкости в трубе с поперечным каналом.

1. *Геометрия.* На рис. 1 представлена геометрия трубы, которая используется в дальнейших расчетах.

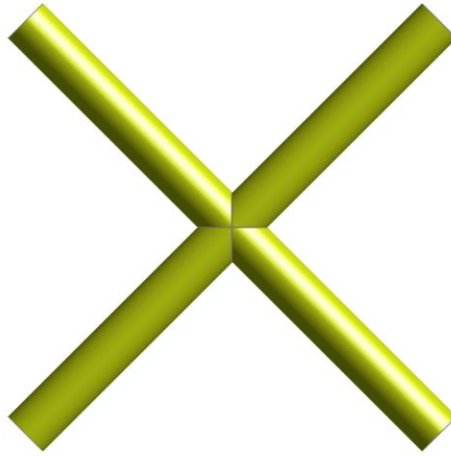


Рис. 1. Геометрия трубы

2. *Постановка задачи.* Распределение скорости и давления жидкости описывается с помощью уравнения Навье – Стокса.

Уравнение движения:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + f, \quad (1)$$

уравнение неразрывности:

$$\nabla v = 0, \quad (2)$$

где ρ – плотность; v – скорость; t – время; μ – коэффициент вязкости; ζ – динамическая вязкость (также называется «второй вязкостью»); f – другие силы, действующие на тело, такие как гравитация; ∇ – оператор Гамильтона, частная производная по координатам.

Для трехмерного пространства верна формула:

$$\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right\}, \quad (3)$$

∇^2 – скалярное произведение двух операторов Гамильтона:

$$\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla = \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2}, \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\}. \quad (4)$$

Распределение температуры описывается уравнением энергии:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla(\rho V h) = \frac{\partial P}{\partial t} + V \cdot \nabla P - \nabla \cdot J_{q, \text{eff}} + \sum_{i,j=1}^3 \tau_{ij} S_{ij} + \rho \varepsilon,$$

$$h = h_0 + \int_{298,15}^{T_{\text{abs}}} C_p(T) dT,$$

$$J_{q,\text{eff}} = -\left(\lambda + \frac{\mu_t C_p}{Pr_t}\right) \nabla T = -\left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t}\right) \nabla h,$$

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij},$$

где h – термодинамическая энтальпия, $\text{м}^2/\text{с}^2$; h_0 – энтальпия образования вещества при 298,15 К, $J_{q,\text{eff}}$ – эффективный тепловой поток; λ – коэффициент молекулярной теплопроводности вещества, $\text{кг м}/(\text{с}^3 \text{К})$; C_p – теплоемкость вещества, $\text{Дж}/(\text{кг К})$; $Pr_t = (\mu_t C_p)/\lambda$ – турбулентное число Прандтля; T_{abs} – абсолютная температура, К; $T = T_{\text{abs}} - 273$ – относительная температура, $^{\circ}\text{C}$; ε – скорость диссипации турбулентной энергии, $\text{м}^2/\text{с}^3$.

3. *Сходимость конечно-элементной сетки.* Для выбора оптимальной конечно-элементной сетки, рассмотрим сходимость решения на пяти вариантах конечно-элементной сетки. Параметры конечно-элементного разбиения и времени расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры разбиения

Номер численного эксперимента	Количество узловых неизвестных	Время расчета
1	38 457	2 мин 45 с
2	56 019	3 мин 26 с
3	87 159	5 мин 5 с
4	159 515	9 мин 10 с
5	378 384	21 мин 2 с

Самая грубая сетка включает в себя 38,45 тыс. узловых неизвестных, а самая уточненная более 350 тыс. узловых неизвестных. При увеличении количества узловых неизвестных результаты расчетов оставались неизменными, влияние происходило лишь на время проведения расчета. Поэтому для дальнейших расчетов возьмем сетку из численного эксперимента № 2.

4. *Экспериментальный расчет.* Рассмотрим, как будет происходить изменение скорости потока воды при разной длине труб с учетом начальных данных (рис. 2), представленных в табл. 2.

Таблица 2

Начальные параметры для эксперимента 1

	Inlet 1	Inlet 2
Скорость на входе, м/с	0,005	0,002
Температура, К	290	350

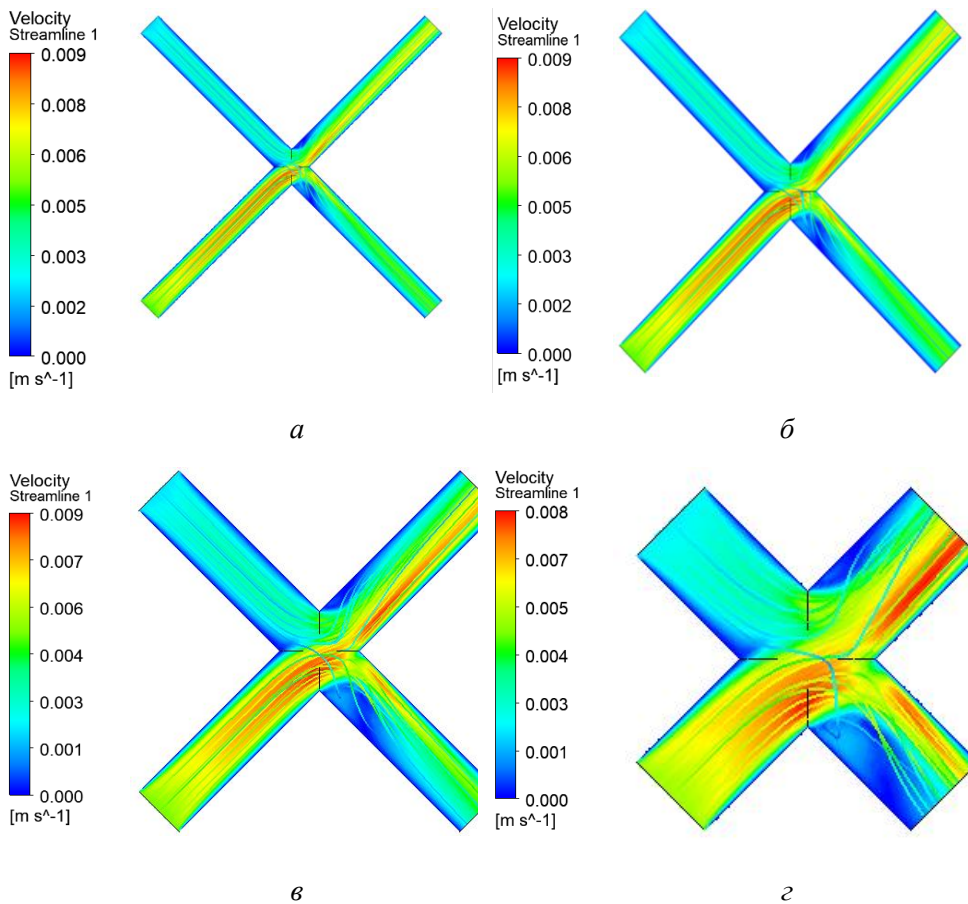


Рис. 2. Распределение скорости потока воды при длине труб: *a* – 400 мм;
б – 300 мм; *в* – 200 мм; *г* – 100 мм

Проведем такой же расчет, но примем значение скорости на всех входах 0,005 м/с (рис. 3).

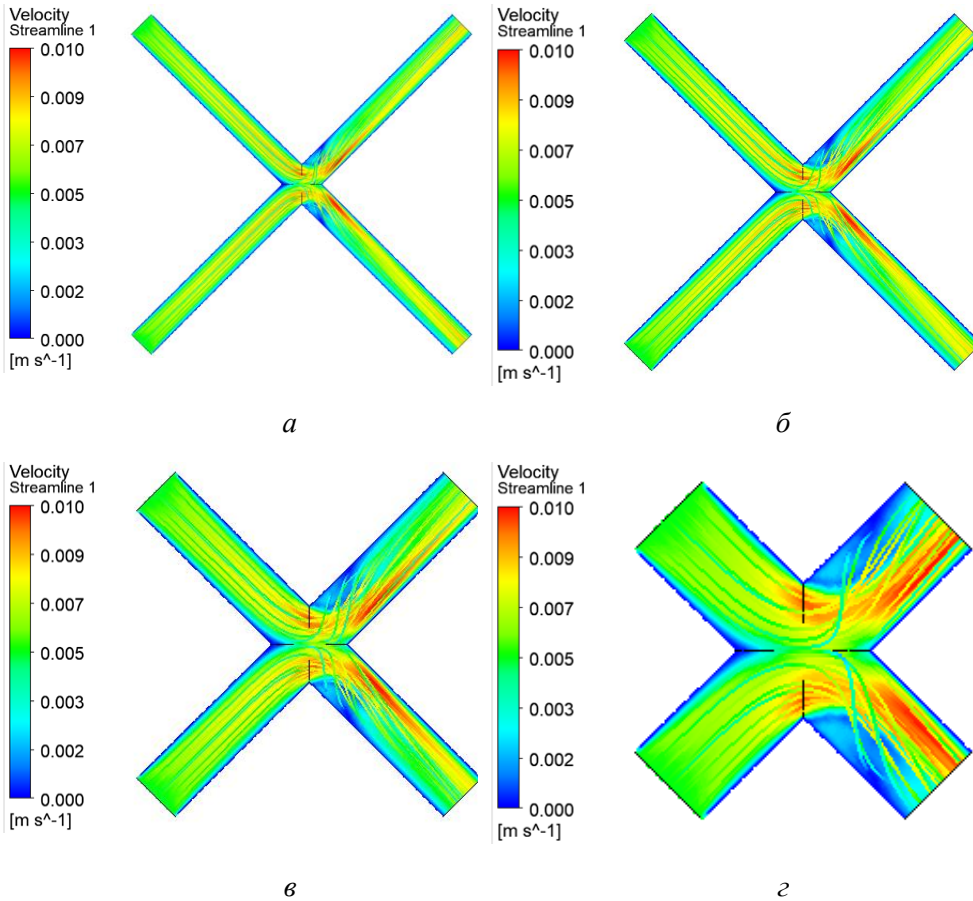


Рис. 3. Распределение скорости потока воды при длине труб:
a – 400 мм; *б* – 300 мм; *в* – 200 мм; *г* – 100 мм

На рис. 3 можно заметить, что при равной скорости жидкости на первом и втором входе, скорость распределения воды равномерно на двух выходах.

Анализ результатов

Проведя два расчета смешивания горячей и холодной воды в перекрестных трубах, можем заметить, что температура жидкости не влияет на скорость ее распределения после смешивания. Также отметим, что при столкновении скорость воды максимальна, нежели уже на выходе из трубы, поэтому чем короче труба, тем выше скорость жидкости на выходе.

Заключение

В данной работе были смоделированы две перекрестных трубы, приведено описание процесса выполнения гидродинамических расчетов на примере расчета смешивания горячей и холодной жидкостей в трубе с поперечным каналом.

Список литературы

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
2. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. – М.: Физматлит, 1994. – 448 с.
3. Кирпичникова И.М., Мартьянов А.С., Соломин Е.В. Vertical Axis Wind Turbines. New Aspects // Альтернативная энергетика и экология. – 2013 – № 01/2 (118). – С.55–58.
4. Мартьянов А.С., Соломин Е.В. Система отопления на основе ветроэнергетической установки и теплового аккумулятора // Альтернативная энергетика и экология. – 2011 – № 2. – С.30–33.
5. Abdulridha Z.S., Martyanov A.S., Martyanov N.A. Simulation Model of Hybrid Renewable Energy System // Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020. – 2020. – P. 9111998.
6. Martyanov A.S., Korobotov D.V., Solomin E.V. Simulation Model of Public Street Lighting Provided by a Photovoltaic Converter and Battery Storage // Proceedings – 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017. Electronic Edition. – 2017. – P. 8076213.
7. Emergency braking system for the wind turbine / E.A. Sirotkin [et al.] // Proceedings – 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016. – 2016. – P. 7911451.
8. Электротепловая система противообледенения солнечного модуля / В.В. Долгошеев [и др.] //Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2017. – № 10-12 (222-224). – С. 24–32.
9. Сравнительный анализ эксплуатации солнечных модулей в арктическом климате России и Канады / Е.С. Бодрова [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2017. – № 28-30 (240-242). – С. 12–24.
10. Martyanov A.S., Korobotov D.V., Sirotkin E.A. Modelling of Battery Charging Algorithms // Proceedings – 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016. – 2016. – P. 7911469.
11. Мартьянов А.С., Неустроев Н.И. Анализ электромеханических систем с помощью ANSYS MAXWELL // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2014. – № 19 (159). – С. 47–52.
12. Мартьянов А.С. Решение задач оптимизации в ANSYS MAXWELL // Наука ЮУрГУ: материалы 67-й науч. конф.

13. Bayraktar E., Mierka O., Turek S. Benchmark computations of 3D-laminar flow around a cylinder with CFX, OpenFOAM and FeatFlow // *International Journal of Computational Science and Engineering*. – 2012. – Vol. 7, no. 3. – P. 253–266.

14. Камалтдинов М.Р., Кучумов А.Г. Применение математической модели системного кровообращения для определения параметров кровотока после операции шунтирования у новорожденных // *Российский журнал биомеханики*. – 2021. – № 3. – С. 313–330.

15. Кучумов А.Г. Математическое моделирование перистальтического течения литогенной желчи через проток при рубцовом стенозе, рассматриваемый в виде трубки с сужающимися стенками конечной длины // *Российский журнал биомеханики*. – 2016. – № 2. – С. 96–115.

Сведения об авторах

Научный руководитель – **Лохов Валерий Александрович**, доцент кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: valeriy.lokhov@yandex.ru

Матросова Мария Владимировна – магистрант кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики факультета прикладной математики и механики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: marymatry@yandex.ru

Большакова Юлия Алексеевна – магистрант, магистрант кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики факультета прикладной математики и механики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: bolshakova107510@gmail.com

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы и научный руководитель заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 26.01.2024.

Одобрена: 26.01.2024.

Принята к публикации: 29.01.2024.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Матросова, М.В. Численное моделирование неизотермического перемешивания жидкостей в крестообразной трубе / М. В. Матросова, Ю. А. Большакова // *Master's Journal*. – 2024. – № 1. – Art. № 08.

Please cite this article in English as: Matrosova M.V., Bolshakova J.A. Numerical modeling of non-isothermal mixing of liquids in a cross-shaped pipe. *Master's Journal*, 2024, no. 1, art. no. 08.