

Численный анализ теплопередачи в конфигурации с несколькими трубами для различных смесей жидкостей

М.В. Поклонская, А.А. Сеньченко, А.В. Палий, Ю.Г.

Чернега

Донской государственный технический университет

Аннотация: В данной статье мы исследуем эффективность использования нескольких труб для отвода тепла. Исследование предполагает ламинарный поток в стационарных условиях. Численно исследованы различные смеси при разных расходах.

Различные наножидкости, протекающие по нескольким параллельным трубам, были численно исследованы для изучения эффектов повышения температуры. Благодаря преимуществам, которые они приносят в процесс охлаждения, наножидкости открыли новый способ улучшения характеристик тепловых систем. Типичная наножидкость состоит из базовой жидкости, которая обычно представляет собой воду, и наночастиц.

Ключевые слова: теплообменник, проточная труба, наножидкость, нижнее отопление, коэффициент трения, падение давления.

Введение

Наножидкости недавно появились как инновационный подход к влиянию на тепловые системы. В результате это привлекло внимание многих исследователей. Было проведено множество экспериментов, чтобы можно было проанализировать улучшение наножидкостей по сравнению с составляющими их базовыми жидкостями. В этих экспериментах были изменены различные параметры (например, объемная концентрация наножидкостей), чтобы можно было определить оптимальные теплофизические свойства. В этих экспериментах в основном использовался турбулентный поток, так как это был наиболее подходящий поток с учетом экспериментальных условий. Аналогичным образом в этой статье изучались наножидкости, протекающие через круглые трубы, чтобы оценить их тепловое поведение. Наножидкости – это класс жидкостей, которые содержат нанометаллические частицы с другой базовой жидкостью. Наиболее часто используемая базовая жидкость – это вода. Такая жидкость будет иметь улучшенную теплопроводность [1–3].

Описание исследования

Теплообменники по своей природе обеспечивают решение для передачи тепла между двумя (или более) жидкостями или средами. Они очень важны в процессах отопления и охлаждения, таких, как системы кондиционирования воздуха и отопления дома. Для улучшения теплопередачи в теплообменнике используются различные смеси жидкостей. Наножидкости состоят из базовой жидкости (обычно воды) и наночастиц размером от 1 до 100 нм (нанометров). Эти металлические наночастицы, используемые в нашем анализе, при концентрации 1% по объему. Теплообменник, состоящий из нескольких труб в металлическом блоке, используемый в этом эксперименте, изготовлен из алюминия и его можно увидеть на рисунке 1. Пять различных жидкостей перемещались через теплообменник с четырьмя разными расходами. Эти жидкости включают воду, этиленгликоль, 1 об. % Al_2O_3 /вода, 1 об. % $(\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu})$ /вода и 1 об.% TiO_2 /вода. Каждая жидкость поступает из впускного сопла (крайний левый цилиндр) через передний канал и разделяется на 18 различных направлений (18 труб). Каждая из 18 труб имеет диаметр 3 мм и длину 37,5 мм. Поскольку длина каждой трубы составляет 37,5 мм, для сбора данных вдоль пути прохождения жидкости использовалось приращение 3,75 мм. Теплообменник соединен с алюминиевым блоком аналогичных размеров и толщины, который затем нагревается снизу, как показано на рисунке 1. После выхода из труб жидкость поступает в заднюю камеру и выходит из выходного сопла (крайний правый цилиндр). Измерения температуры производятся на 1 мм ниже границы раздела между блоком теплообменника и нагреваемым алюминиевым блоком, а радиус впускной и выпускной трубы составляет 0,005 м [4–6].

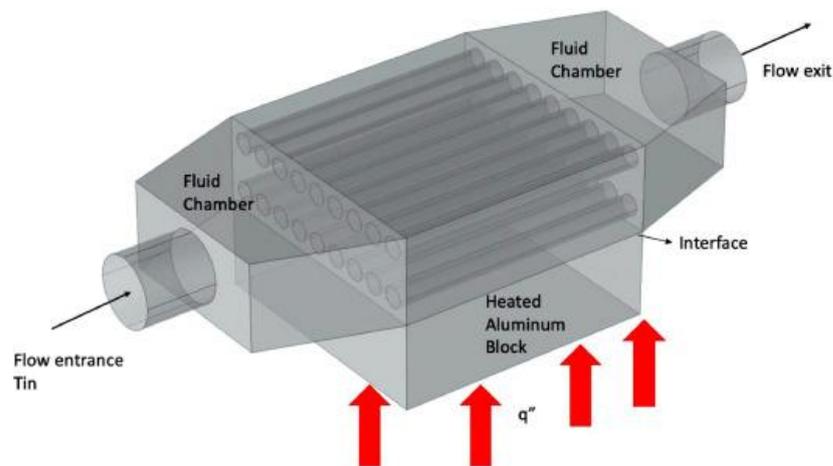


Рисунок 1 – Физическая модель многотрубного теплообменника в трех измерениях

В проведенном исследовании мы определили поток и теплоперенос во всей области модели путем решения стационарных полных уравнений Навье-Стокса и энергии с использованием подхода конечных элементов.

Уравнения Навье-Стокса состоят из множества дифференциальных уравнений, которые характеризуют течение жидкости. Уравнения аналогичны уравнениям в [3], где индекс m представляет смесь флюидов. Индексы x, y, z используются для обозначения трех направленных ординат.

Уравнение неразрывности:

$$u_x + v_y + w_z = 0 \quad (1)$$

Уравнение x-импульса:

$$\rho_m(uu_x + vv_y + ww_z) = -p_x + \mu_m(u_{xx} + u_{yy} + u_{zz}) \quad (2)$$

Уравнение y-импульса:

$$\rho_m(uv_x + vv_y + ww_z) = -p_y + \mu_m(v_{xx} + v_{yy} + v_{zz}) \quad (3)$$

Уравнение z-импульса:

$$\rho_m(uw_x + vw_y + ww_z) = -p_z + \mu_m(w_{xx} + w_{yy} + w_{zz}) + \rho_m g \quad (4)$$

где μ_m и ρ_m - соответственно динамическая вязкость и плотность смеси. Давление обозначается буквой p , а ускорение свободного падения – g .

Уравнение энергии в декартовых координатах:

$$(p_{cp})_m (uT_x + vT_y + wT_z) = k_m (T_{xx} + T_{yy} + T_{zz}) \quad (5)$$

где k_m и cp_m – теплопроводность и удельная теплоемкость смеси.

Как видно на рисунке 1, на входе было применено граничное условие на входе. Граничное условие на входе включает скорость жидкости на входе и температуру на входе, которые представлены u_{in} и T_{in} (равными 18 градусам Цельсия) соответственно. Значение скорости на входе зависит от расхода, используемого в расчетах. Для расхода $Q = 21 \text{ см}^3/\text{с}$ скорость на входе задавалась равной 0,271 м/с. При изменении расхода до 42 $\text{см}^3/\text{с}$, 63 $\text{см}^3/\text{с}$ и 84 $\text{см}^3/\text{с}$, скорость на входе становится 0,542 м/с, 0,813 м/с и 1,084 м/с соответственно. На выходе применялось открытое граничное условие. Также применялся общий поток тепла внутрь ($q'' = 75 \text{ 000 Вт/м}^2$), как показано на Рисунке 1. Стрелки указывают вверх, указывая на то, что тепло передается от нагревателя к алюминиевому блоку.

В таблице 1 можно увидеть уровни сетки, используемые в последующем анализе. На рисунке 2 показано, что среднее число Нуссельта на уровнях сетки, грубого и грубее почти идентичны друг другу, что означает, что экспериментальные результаты точны. Окончательные размеры ячеек представлены на рисунке 3. В этом исследовании уровень сетки, используемый для получения численных результатов, был грубым.

Таблица 1 – Элементы сетки относительно уровня сетки

Уровень сетки	Элементы сетки
Чрезвычайно грубый	34909 доменных элементов, 6318 граничных элементов и 1080 граничных элементов
Очень грубый	77209 доменных элементов, 11252 граничных элемента и 1474 граничных элемента
Грубее	129532 доменных элемента, 17634 граничных элемента и 1834 краевых элемента
Грубый	221476 доменных элементов, 25712 граничных элементов и 2218 граничных элементов.

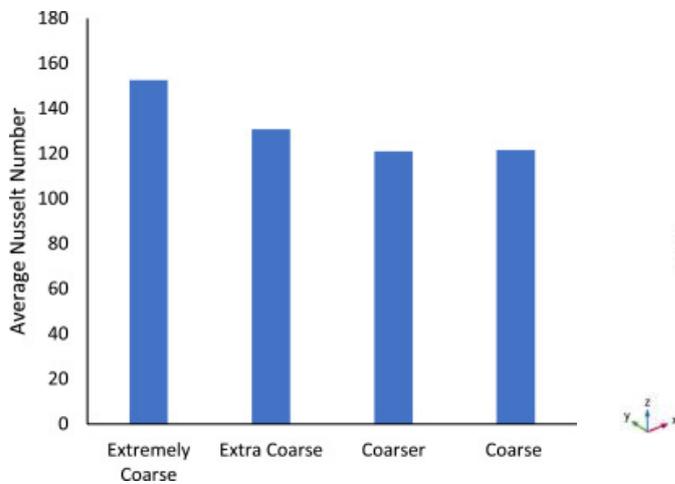


Рисунок 2 – Чувствительность сетки

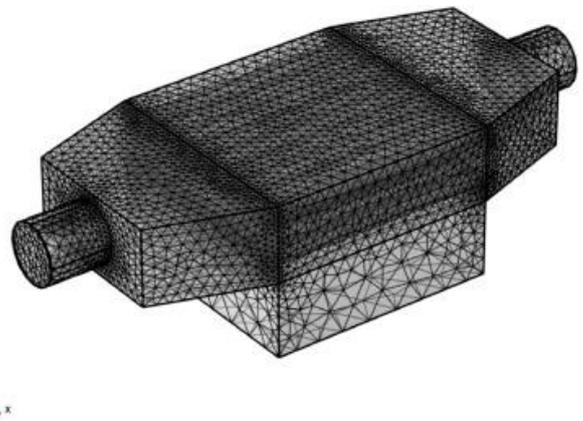


Рисунок 3 – На теплообменнике нанесена крупная сетка

Понимание лучшей жидкости для отвода тепла в предлагаемой конфигурации – основная цель данной статьи. Как указывалось ранее, 18 трубок равномерно распределены в алюминиевом блоке. Из предыдущих экспериментов, проведенных автором, тонкая проводящая пленка нанесена на границу раздела между блоком теплообменника и нагретым блоком. Численно мы применили тепловое сопротивление на границе раздела.

Мы намеренно выбрали смесь, состоящую из 1% металлических наночастиц на водной основе. Эти наночастицы представляют собой Al_2O_3 , TiO_2 и комбинацию наночастиц $Al_2O_3(90\%) - Cu(10\%)$. Эти наночастицы смешаны в растворе дистиллированной воды и имеют диаметр 31 нм. Дополнительно были изучены две отдельные жидкости, вода и этиленгликоль. Научная причина использования этих смесей заключается в 1) хороших теплоотводящих свойствах и 2) существовании измеренных физических свойств. Таким образом, авторы хотят избежать использования эмпирических физических свойств, чтобы быть близкими к реальным значениям.

Постоянный тепловой поток из $75000 \frac{W}{m^2}$ температура на входе $18^\circ C$ использовались в качестве граничных условий для всех случаев. Расход жидкостей изменялся каждый раз, всего применялось 4 расхода. Эти скорости потока составляют $21 \text{ см}^3/\text{с}$, $42 \text{ см}^3/\text{с}$, $63 \text{ см}^3/\text{с}$ и $84 \text{ см}^3/\text{с}$. В результате поток в этом эксперименте был строго ламинарным, поскольку число Рейнольдса на каждой отдельной трубе было меньше 2300 для всех пяти жидкостей. В таблице 2 показаны физические свойства, использованные в нашем анализе.

Таблица 2 – Теплофизические свойства жидкости для различных концентраций наночастиц

Жидкость	μ_n (кг / мс)	ρ_n (кг / м ³)	c_{p_n} (Дж / кг · К)	κ_n (Вт / м · К)	Pr
Воды	0,001002	998,2	4182	0,613	6,83
Этиленгликоль	0,0191	1127,966	2470,212	0,2463	191,56
0,01Al ₂ O ₃ -0,99 Вода	0,00107	1024,317	4061,896	0,6322	6,89
0,01 (Al ₂ O ₃ -Cu) - 0,99 воды	0,0016025	1023,75	4067,415	0,65727	9,92
0,01TiO ₂ -0,990 Вода	0,001019	1030	4040	0,835	4,93

В этом исследовании основное внимание уделяется выявлению жидкости, способной извлекать максимальное количество тепла. Были исследованы пять различных смесей при одинаковых условиях нагрева. Поток поддерживали постоянным и устанавливали равным 75000 Вт/м^2 , а температуру на входе устанавливали равной $T_{in} = 18^\circ C$. Такое ограничение возможно, исходя из предыдущего экспериментального исследования, проведенного Alhajaj et al. На рис. 4 показано изменение температуры на 1 мм ниже границы раздела двух блоков по направлению потока [7–9].

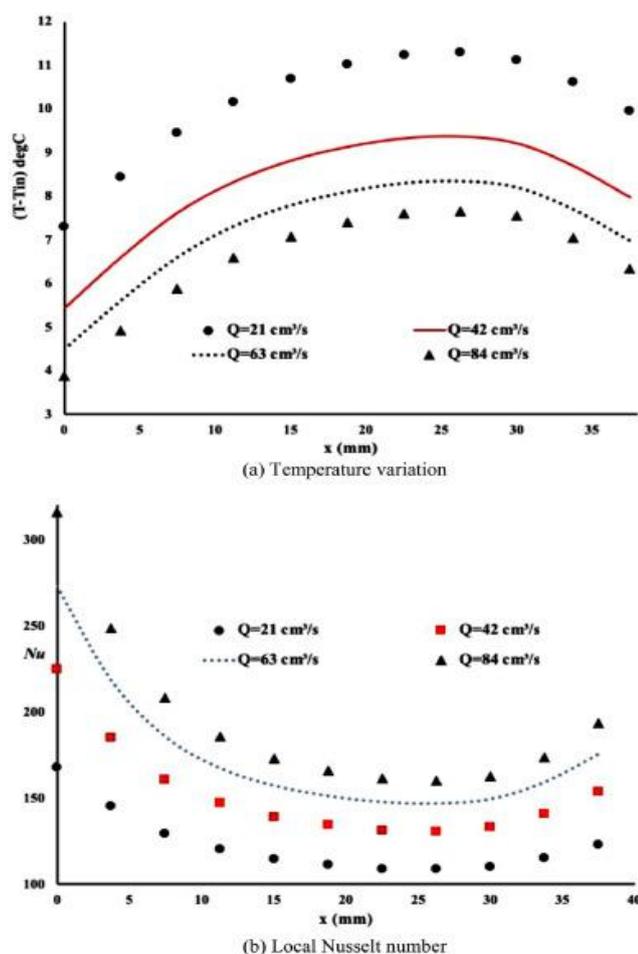


Рисунок 4. – Тепловые характеристики воды при различных расходах

Заключение

В этой статье было проведено исследование пяти различных смесей, чтобы определить, какая из них наиболее способна обеспечить улучшение теплопередачи. Вставка из алюминиевого блока содержала 18 равномерно распределенных труб. Эта вставка соединена с нагреваемым алюминиевым блоком. Цель состоит в том, чтобы исследовать лучшую жидкость, способную отводить наибольшее количество тепла, не увеличивая перепад давления между входом и выходом устройства. Для этого хорошим показателем является тепловой КПД, сочетающий теплопередачу, представленную числом Нуссельта, и распределение жидкости,

представленное перепадом давления. Различные смеси жидкостей, состоят из одной жидкости, такой, как вода и этиленгликоль, и наножидкостей, таких как 1% об. Al_2O_3 в воде и 1% об. TiO_2 в воде. Кроме того, в этой статье также изучается гибридная жидкость 1% об. (Al_2O_3 -Cu) в воде [10]. В анализе и сравнении используются четыре различных скорости потока. Обнаружены следующие результаты:

1. По мере увеличения расхода становится заметным поглощение тепла жидкостью, которое выражается числом Нуссельта.
2. Среднее число Нуссельта для всех смесей оказалось выше, чем для воды, что позволяет сделать вывод о том, что наножидкости и гибридные жидкости способны увеличивать отвод тепла.
3. Об образовании пограничного слоя можно судить по уменьшению местного числа Нуссельта вдоль направления потока. Включение скрученной ленты может уменьшить образование пограничного слоя.
4. Тепловой КПД демонстрирует важность отвода тепла с учетом падения давления между входом и выходом. Результаты показали, что 1% об. TiO_2 /вода является наиболее эффективной смесью, за которой следует смесь 1% об. Al_2O_3 /вода.
5. Установлено, что 1% об. TiO_2 /вода является подходящей смесью для повышения температуры.

Литература

1. Кудинов А., Тепломассообмен. Учебное пособие. Инфра-М. 2021. С. 14
2. Новиков И., Термодинамика. Лань. Санкт-Петербург, 2018. С.35.
3. Квасников И., Термодинамика и статистическая физика. Том 2. Теория равновесных систем. Статистическая физика. Учебное пособие. М. Едиториал УРСС. 2016. С. 96

4. Khoshvaght-Aliabadi M., Hormozi F., Zamzamian A., Effects of geometrical parameters on performance of plate-fin heat exchanger: Vortex-generator as core surface and nanofluid as working media, *Appl. Therm.* 2014. pp. 565–579.
5. Pourhoseini S.H., Naghizadeh N., Hoseinzadeh H., Effect of silver-water nanofluid on heat transfer performance of a plate heat exchanger: An experimental and theoretical study. *Powder Technol.* 2018. pp. 279–286.
6. Bhattad A., Sarkar J., Ghosh P., Discrete phase numerical model and experimental study of hybrid nanofluid heat transfer and pressure drop in plate heat exchanger, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 2018. pp. 262–273.
7. Pantzali M.N., Kanaris A.G., Antoniadis K.D., Mouza A.A., Paras S.V., Effect of nanofluids on the performance of a miniature plate heat exchanger with modulated surface, *Int. J. Heat Fluid Flow.* 2009. pp. 691–699.
8. Pandey S.D., Nema V.K., Experimental analysis of heat transfer and friction factor of nanofluid as a coolant in a corrugated plate heat exchanger, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2012. pp. 248–256.
9. Huang D., Wu Z., Sunden B., Pressure drop and convective heat transfer of Al₂O₃/water and MWCNT/water nanofluids in a chevron plate heat exchanger, *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2015. pp. 620–626.
10. Tiwari A.K., Ghosh P., Sarkar J., Heat transfer and pressure drop characteristics of CeO₂/water nanofluid in plate heat exchanger, *Appl. Therm. Eng.* 2013. pp. 24–32.

References

1. Kudinov A., *Teplomassoobmen.* [Heat and mass transfer]. Uchebnoe posobie. Infra-M. 2021. p. 14.
2. Novikov I., *Termodinamika.* [Thermodynamics]. Sankt-Peterburg. Lan`. 2018. p. 35.



3. Kvasnikov I., Termodinamika i statisticheskaya fizika. Tom 2. Teoriya ravnovesny`x sistem. Statisticheskaya fizika. [Thermodynamics and Statistical Physics. Volume 2. Theory of equilibrium systems. Statistical physics]. Uchebnoe posobie. M. Editorial URSS. 2016. p. 96.
4. Khoshvaght-Aliabadi M., Hormozi F., Zamzamian A., Vortex-generator as core surface and nanofluid as working media, Appl. Therm. 2014. pp. 565–579.
5. Pourhoseini S.H., Naghizadeh N., Hoseinzadeh H., An experimental and theoretical study. Powder Technol. 2018. pp. 279–286.
6. Bhattad A., Sarkar J., Ghosh P., Int. Commun. Heat Mass Transf. 2018. pp. 262–273.
7. Pantzali M.N., Kanaris A.G., Antoniadis K.D., Mouza A.A., Paras S.V., Int. J. Heat Fluid Flow. 2009. pp. 691–699.
8. Pandey S.D., Nema V.K. Exp. Therm. Fluid Sci. 2012. pp. 248–256.
9. Huang D., Wu Z., Sunden B. Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. pp. 620–626.
10. Tiwari A.K., Ghosh P., Sarkar J. Appl. Therm. Eng. 2013. pp. 24–32.