УДК 536.24; 544.773

ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ НАНОЖИДКОСТЕЙ

Гузей Д.В.[1,2], Минаков А.В.[1,2], Жигарев В.А.[1]

[1]Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, Россия
[2]Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Новосибирск, Россия

Работа выполнена в СФУ в рамках госзадания Минобрнауки Российской Федерации на 2014-2016 годы (проект № 3100) и при частичной финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации (Соглашение 14.607.21.0104)

АННОТАЦИЯ

В данной работе было проведено экспериментальное исследование ламинарного теплообмена наножидкостей в цилиндрическом канале в условиях постоянной плотности теплового потока на стенках, в диапазоне чисел Рейнольдса от 100 до 2000. И турбулентного теплообмена в диапазоне чисел Рейнольдса от 3000 до 10000. В качестве базовой жидкости использовалась дистиллированная вода. В качестве наночастиц порошки оксида алюминия, кремния, меди и титана. Диаметр наночастиц варьировался от 25 до 100 нм. Объемная концентрация наночастиц варьировалась в диапазоне от 0 до 2 объемных процентов. В результате экспериментов измерены средние и локальные величины коэффициента теплоотдачи на стенках канала и величина перепада давления на входе и выходе из канала.

ВВЕДЕНИЕ

Термин «наножидкость» был впервые предложен в работе [1] для обозначения двухфазной системы, состоящей из несущей жидкости и наночастиц высокотеплопроводного материала. Типичными несущими жидкостями являются вода, органические жидкости (этиленгликоль, масло), полимерные растворы. Материалом для наночастиц служат металлы, оксиды металлов, углеродные нанотрубки. Одним из интенсивно развивающихся направлений в области наножидкостей является исследование процессов теплообмена в условиях вынужденной конвекции (ламинарные и турбулентные течения наножидкостей через каналы различного диаметра, тепловые трубки, микротеплообменники и др.) Первые эксперименты показали, что даже очень малые добавки наночастиц к жидкости (доли процента по объему) могут приводить к росту теплопроводности и теплоотдачи наножидкости на десятки процентов, а критический тепловой поток может увеличиваться в разы. В этой области за последние два десятилетия появилось огромное число работ. В большинстве работ отмечается увеличение теплоотдачи при использовании наночастиц. Повышение коэффициента теплопередачи по отношению к базовым жидкостей может находиться в диапазоне от нескольких процентов до 350% для углеродных нанотрубок. Вместе с тем имеются публикации, где демонстрируется уменьшение теплоотдачи при добавлении наночастиц. Большинство из этих работ посвящено исследованию конвекции наножидкостей в ламинарном режиме [2-3]. Турбулентная конвекция исследована существенно хуже. Анализ литературы показывает, что среди работ нет ни количественного, ни качественного консенсуса в области турбулентного теплообмена наножидкостей. Между тем практически все ученые отмечают, что влияние наночастиц на теплообмен в турбулентном режиме существенно более значительное, чем в ламинарном, и гораздо более сложное.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном изучении коэффициента теплоотдачи наножидкостей в ламинарном и турбулентном режимах течения.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема установки по изучения коэффициента теплоотдачи показана на рисунке 1. Установка представляет собой замкнутый контур, с циркулирующим теплоносителем. С помощью насоса рабочая жид-

© Гузей Д.В., Минаков А.В., Жигарев В.А.

кость прокачивается через измерительный обогреваемый участок после прохождения, которого, поступает в теплообменник, в котором отдает тепло термостату. Расход рабочей жидкости в контуре регулируется с помощью изменения мощности насоса. Мощность насоса регулируется ЛАТРом. Измерение мощности подводимой к насосу осуществлялось при помощи измерителя Omix.

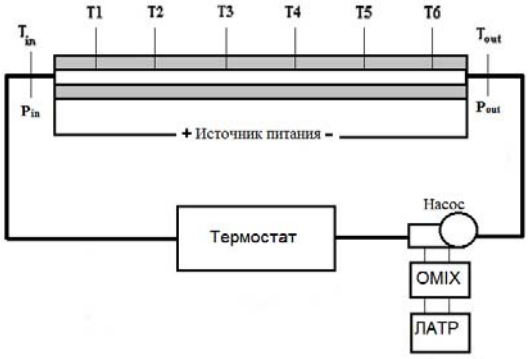

Рис. 1 Схема измерительной установки.

Обогреваемой участок представляет собой трубку из нержавеющей стали диаметром 6мм и длинной 1м. Толщина стенки трубки 0,5мм. Нагрев трубки осуществляется путем подачи электрического тока непосредственно на стенку трубку. Такой способ нагрева позволяет получить нагрев с постоянной плотностью теплового потока на стенке трубки. Кроме того, такой способ обогрева является универсальным и легко применим к трубкам любого поперечного сечения. Трубка теплоизолирована, многослойной изоляцией. Мощность нагрева регулируется при помощи трансформатора. Для измерения локальной температуры трубки на ее стенках на равном расстоянии друг от друга закреплено 6 медь-константановых термопар. Измерения температуры осуществлялось измерителями ТРМ-200. Помимо этого при помощи термопар измерялась температура на входе и выходе из обогреваемого участка. При этом термопара, предназначенная для измерения температуры среды на выходе из контура, располагалась на значительном удалении от конца обогреваемого участка для обеспечения однородности температуры среды в месте измерения. Участок от контура обогревателя до места измерения температуры среды был также теплоизолирован. Измерения перепада давления проводились при помощи дифференциального манометра ОВЕН ПД200.

Созданная экспериментальная установка была протестирована на известных эмпирических данных и данных численного расчета для теплообмена чистой воды. Вначале была проведена серия измерений в ламинарном режиме течения. Значение числа Рейнольдса варьировалось в диапазоне от 400 до 1000. На рис. 2 приведено сравнение распределения локального числа Нуссельта по длине трубки полученного экспериментально и аналитической корреляцией Shah [4], для числа Рейнольдса равного 520. В экспериментах мощность нагрева задана равной 90 Вт.

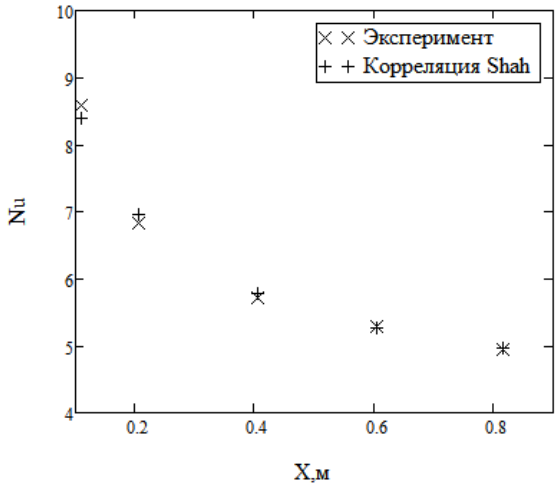

Рис. 2 Распределение локального числа Нуссельта по длине трубки, Re=520

Как видно из приведенных выше результатов, наблюдается очень хорошее согласие экспериментов, результатов расчетов и теоретической корреляцией. Отклонение экспериментального значения коэффициента теплоотдачи в ламинарном режиме от корреляции Shah не превышает 2%.

Следующая серия экспериментов была проведена для турбулентного режима течения. Расход варьировался в диапазоне от 0,65 л/мин до 2 л/мин, что соответствует диапазону числа Рейнольдса от 2000 до 7000. В экспериментах мощность нагрева задана равной 270 Вт.

Кроме этого было проведено сравнение экспериментальной зависимости среднего числа Нуссельта от числа Рейнольдса с результатами численного моделирования и эмпирической корреляцией А. Михеева [5] (см. рисунок 3).

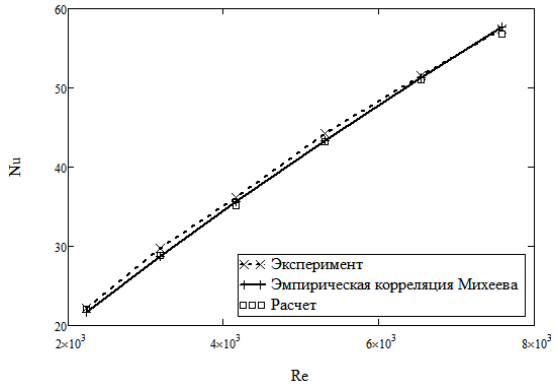

Рис. 3 Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса

Как видно из графика, представленного на рисунке 3, экспериментальные данные, полученные в турбулентном режиме течения, хорошо коррелируют с расчетной и эмпирической зависимостями. Расхождения не превышают 5%.

Помимо теплоотдачи для воды также было проведено измерение перепада давления.

На рисунке 4 приведена измеренная зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для чистой воды. Коэффициент сопротивления определялся следующим образом:

$$\lambda = \frac{2d \cdot \Delta P}{\rho U^2 L},$$

где U – среднерасходная скорость; d – диаметр; L – длина измерительного участка; ΔP – измеренный перепад давления.

Для сравнения на графике приведены теоретические зависимости Пуазейля $\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}$ для ламинарного течения и Блазиуса $\lambda = 0.316\,\mathrm{Re}^{-0.25}$ для турбулентного. Видно, что, в диапазоне чисел Рейнольдса от 2300-3000 наблюдается ламинарно-турбулентный переход. Значения измеренного перепада давления с точностью 5% согласуются с теоретическими значениями.

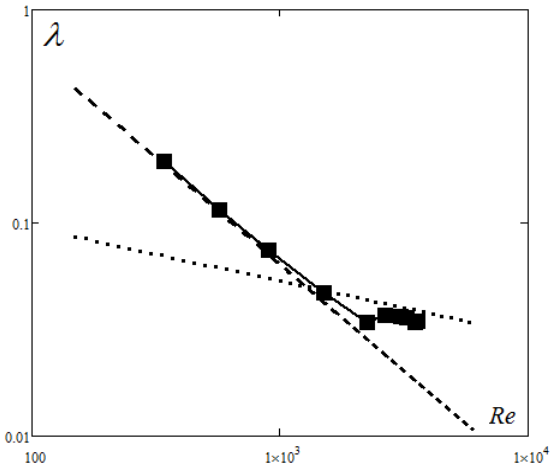

Рис. 4 Зависимость коэффициента сопротивления для чистой воды от числа Рейнольдса. Штриховая линия – формула Пуазейля, точки – корреляция Блазиуса

Таким образом, созданная экспериментальная установка позволяет измерять локальный и средний коэффициент теплоотдачи и перепад давления с точностью порядка 5% в ламинарном и турбулентном режиме.

ЛАМИНАРНАЯ ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

Далее проведено экспериментальное исследование ламинарного теплообмена наножидкостей в цилиндрическом канале в условиях постоянной плотности теплового потока на стенках. В качестве базовой жидкости использовалась дистиллированная вода. В качестве наночастиц порошки оксидов меди, титана. Диаметр наночастиц варьировался от 5 до 100нм. Размер частиц определен с помощью электронной микроскопии. Объемная концентрация наночастиц варьировалась в диапазоне от 0 до 2 объемных процентов. Полученные суспензии подвергались получасовой обработке ультразвуком в ванне "Сапфир". ПАВы в наножидкость не добавлялись. Вязкость наножидкостей была измерена при помощи ротационных вискозиметров DV2T и OFITE-900. Измерения вязкости были проведены в диапазоне скорости сдвига от 10 до 1000 1/с при температуре 25˚С. Перед измерениями вискозиметры были прокалиброваны на дистиллированной воде и этиленгликоле. Полученные результаты хорошо согласовывались с эталонными данными.

В результате экспериментов измерены средние и локальные величины коэффициента теплоотдачи на стенках канала и величина перепада давления на входе и выходе из канала.

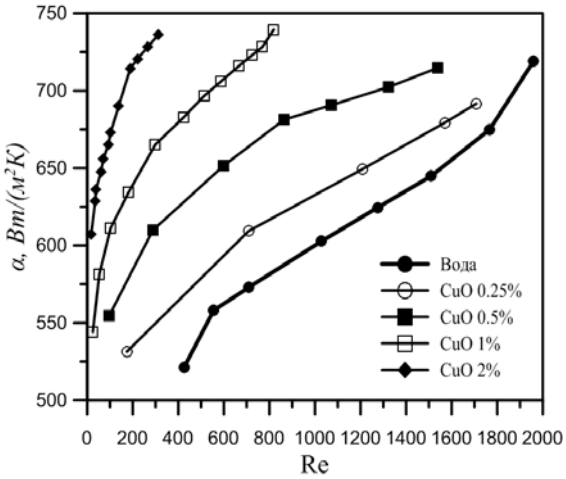

Рис. 5 Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса, для наножидкости с частицами Cu

Интенсификация теплообмена при использовании наножидкостей при фиксированном числе Рейнольдса оказывается весьма значительной. Так коэффициент теплоотдачи для однопроцентной наножидкости, на основе оксида меди, более чем на 40% выше аналогичного значения для воды практически при всех

Re. Аппроксимируя зависимость коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса для двухпроцентной наножидкости, можно с уверенностью сказать, что превышение коэффициента теплоотдачи оказывается двукратным или даже больше. Естественно, с уменьшением концентрации наночастиц этот эффект монотонно снижается (см. рисунок 5). При значении числа Рейнольдса выше 2000 для воды имеет место ламинарно-турбулентный переход, что интенсифицирует ее теплообмен. Показана сильная зависимость коэффициента теплоотдачи от материала наночастиц. Так, например, 2-х % концентрация наночастиц оксида железа увеличивает среднее значение коэффициента теплоотдачи на 5%, алмаза на 15%, оксида титана на 35%, а оксида меди на 40% по сравнению с базовыми жидкостями. Также была установлена зависимость наблюдаемой интенсификации теплообмена от свойств базовой жидкости, для одних и тех же наночастиц и при одинаковых объемных концентрациях интенсификация теплообмена для наножидкостей приготовленных на основе этиленгликоля оказывается в среднем выше, чем для наножидкостей приготовленных на основе воды. Так например 1% концентрация наночастиц алмаза в воде увеличивает среднее значение коэффициента теплоотдачи на 7%, а в этиленгликоле на 12%. Похожая тенденция сохраняется и для других наночастиц.

ТУРБУЛЕНТНАЯ ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

Проведено экспериментальное исследование турбулентного теплообмена наножидкостей в цилиндрическом канале в условиях постоянной плотности теплового потока на стенках. В качестве базовой жидкости использовалась дистиллированная вода. В качестве наночастиц – порошки оксидов кремния и алюминия. Диаметр наночастиц варьировался от 10 до 100нм. Размер частиц определен с помощью электронной микроскопии. Объемная концентрация наночастиц варьировалась в диапазоне от 0 до 2 объемных процентов. Нанопорошки были приобретены в ОАО "Плазмотерм", г.Москва. Полученные суспензии подвергались получасовой обработке ультразвуком в ванне "Сапфир". ПАВы в наножидкость не добавлялись. Вязкость наножидкостей была измерена при помощи ротационного вискозиметра DV2T. Измерения вязкости были проведены в диапазоне скорости сдвига от 10 до 200 1/с при температуре 25 ˚С.

В результате экспериментов измерены средние и локальные величины коэффициента теплоотдачи на стенках канала и величина перепада давления на входе и выходе из канала.

В результате работы было показано, что добавление наночастиц в теплоноситель оказывает существенное влияние на величину коэффициента теплоотдачи в турбулентном режиме течения. С увеличением концентрации наночастиц локальный и средний коэффициенты теплоотдачи при фиксированном значении числа Рейнольдса возрастают. Максимально зафиксированное в экспериментах увеличение коэффициента теплоотдачи по сравнению с чистой жидкостью составило около 30% (наножидкость на основе воды и 2-х процентной концентрации частиц оксида алюминия).

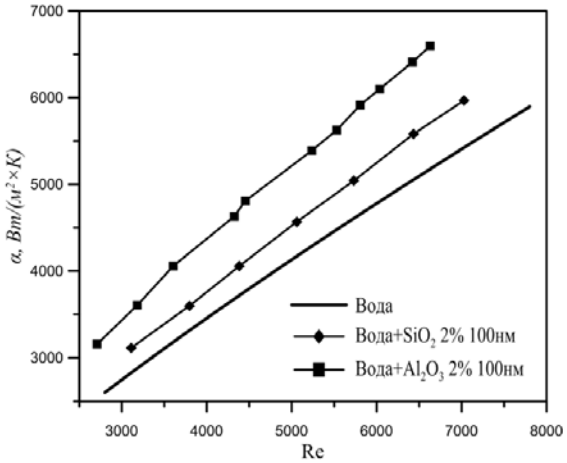

Рис. 6 Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса, для наножидкости с частицами CuO

В отличие от ранее исследованного ламинарного режима течения, в котором добавление наночастиц однозначно приводит к росту коэффициента теплоотдачи, в турбулентном режиме течении были отмечены случаи его снижения. Это связано с тем, что в турбулентном режиме коэффициент теплоотдачи зависит не только от теплопроводности теплоносителя, но и от его вязкости. Если рост теплопроводности теплоносителя за счет наночастиц существенно меньше роста его вязкости, то может иметь место ухудшение теплообмена. Таким образом, было показано ключевое влияние вязкости наножидкости на характеристики ее турбулентного теплообмена.

ВЫВОДЫ

В данной работе было проведено экспериментальное исследование ламинарного теплообмена наножидкостей в цилиндрическом канале в условиях постоянной плотности теплового потока на стенках, в диапазоне чисел Рейнольдса от 100 до 2000. И турбулентного теплообмена в диапазоне чисел Рейнольдса

от 3000 до 10000. В качестве базовой жидкости использовалась дистиллированная вода. В качестве наночастиц порошки оксида алюминия, кремния, меди и титана. Диаметр наночастиц варьировался от 25 до 100 нм. Объемная концентрация наночастиц варьировалась в диапазоне от 0 до 2 объемных процентов. Эксперименты показали:

- В общем случае коэффициент теплоотдачи наножидкости существенно выше соответствующего значения для базовой жидкости.
- Показано, что получаемый эффект зависит и от концентрации наночастиц, и от их размера и материала.
- Коэффициент теплоотдачи так же, как и для обычных жидкостей, зависит и от теплопроводности, и от вязкости флюида.
- Поэтому могут появляться ситуации, когда коэффициент теплоотдачи наножидкости окажется ниже, чем у базовой жидкости

ЛИТЕРАТУРА

1. Choi S.U.S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. // Developments and applications of non-newtonian flows, ASME FED. – 1995. – Vol. 66. – P. 3408 – 3416.
2. Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы. Ч. 2. Конвективный теплообмен // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – № 2. – С. 173.

   Terekhov V.I., Kalinina S.V., Lemanov V.V.(2010). “The mechanism of heat transfer in nanofluids: state of the art. Part 2. Convective heat transfer.” Thermophysics and Aeromechanics Vol. 17. № 2.
3. Minakov A.V., Lobasov A. S., Guzei D.V., Pryazhnikov M. I., Rudyak V. Ya.. The experimental and theoretical study of laminar forced convection of nanofluids in the round channel. // Applied Thermal Engineering. – 2014.doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.11.041.
4. Shah R.K., London A. Laminar flow forced convection in ducts. // Supplement 1 to Andvances in Heat Transfer, Academic press, New York. – 1978. – P. 128–129.
5. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен. – М.: МЭИ, 2005. – 550 С.

   Tsvetkov F.F., Grigorev B.A. (2005). Heat and Mass Transfer. Moscow, Russia.