

УДК 536.24+544.773

ТУРБУЛЕНТНАЯ ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ НАНОЖИДКОСТЕЙ В КРУГЛОМ КАНАЛЕ

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

Аннотация

В работе проведены измерения коэффициента теплоотдачи и перепада давления турбулентного течения в круглом канале наножидкостей на основе дистиллированной воды с частицами оксидов алюминия и кремния различного размера. Объемная концентрация частиц варьировалась от 0.25% до 2%. Изучена зависимость коэффициента теплоотдачи от концентрации наночастиц, их размера и материала. Показано, что коэффициент теплоотдачи зависит и от размера наночастиц, и от их материала. Поэтому в определенных ситуациях коэффициент теплоотдачи наножидкости может оказаться ниже, чем у базовой жидкости. Установлено, в каких ситуациях это может произойти. Экспериментально показано, что коэффициент наножидкости зависит не только от размеров наночастиц, но и от их материала.

Ключевые слова: вынужденная конвекция, турбулентный теплообмен, наножидкость, круглый канал, падение давления.

Введение

Проблема интенсификации конвективного теплообмена и связанные с ней задачи экспериментального и теоретического исследований приобретают в настоящее время значение самостоятельной, важной и быстро развивающейся области учения о теплообмене. Во всех машинах, оборудовании и технологиях возникает потребность интенсивного отведения тепла, для чего используется различного рода теплообменное оборудование. Актуальность этой проблемы определяется стремлением к повышению интенсивности работы теплообменных устройств в сочетании с желанием сократить затраты энергии и добиться максимальной компактности при минимальной материалоемкости. Одним из путей решения проблемы интенсификации процессов теплообмена может стать применение жидкостей с примесью наночастиц различного состава, получивших название «наножидкости». 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 [1–5]. В этой области за последние два десятилетия появилось огромное число работ. Большая часть из них была направлена на изучение теплопроводности и вязкости наножидкостей. Исследованию собственно теплообмена посвящено сравнительно немного работ, и представленные там результаты крайне противоречивы (см. обзор [5]). В большинстве работ отмечается увеличение теплоотдачи при использовании наночастиц. Повышение коэффициента теплопередачи по отношению к базовым жидкостям 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 [6, 7]. Турбулентная конвекция исследована существенно

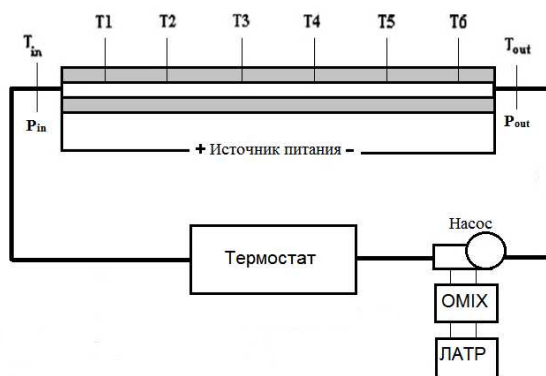


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

хуже. Анализ литературы показывает, что имеются существенные разногласия не только количественного, но и качественного характера в исследованиях 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 турбулентном режиме.

1. Описание экспериментальной установки

Схема установки по изучению коэффициента теплоотдачи показана на рис. 1. Установка представляет собой замкнутый контур с циркулирующим теплоносителем. С помощью насоса рабочая жидкость прокачивается через измерительный обогреваемый участок, после прохождения которого поступает в теплообменник, в котором отдает тепло термостату. Расход рабочей жидкости в контуре регулируется путем изменения мощности насоса. Мощность насоса регулируется лабораторным автотрансформатором (ЛАТР). Измерение мощности подводимой к насосу осуществлялось при помощи измерителя Omix.

Обогреваемый участок представляет собой трубку из нержавеющей стали диаметром 6 мм и длиной 1 м. Толщина стенки трубки равна 0.5 мм. Нагрев трубки осуществляется путем подачи электрического тока непосредственно на стенку трубки. Такой способ нагрева позволяет получить нагрев с постоянной плотностью теплового потока на стенке трубки. Кроме того, описанный способ обогрева является универсальным и легко применим к трубкам любого поперечного сечения. Трубка теплоизолирована, имеет многослойную изоляцию. Мощность нагрева регулируется при помощи трансформатора. Для измерения локальной температуры трубки на ее стенках на равном расстоянии друг от друга закреплено шесть медь-константановых термопар. Измерения температуры осуществлялись измерителями ТРМ-200. Помимо этого при помощи термопар измерялась температура на входе и выходе 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 точке измерения. Участок от контура от обогревателя до точки 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 для теплообмена чистой воды. Расход воды варьировался

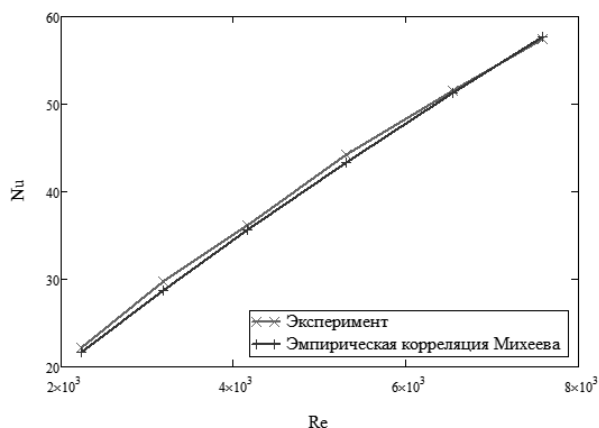


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса

в диапазоне от 0.65 до 2 л/мин, что соответствует диапазону числа Рейнольдса от 2300 до 7000. На рис. 2. приведено сравнение экспериментальной зависимости среднего числа Нуссельта от числа Рейнольдса с известной эмпирической корреляцией [17] $Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.43}$, где $Nu = \alpha d / \lambda$ — число Нуссельта, $\alpha = GC_p (T_i - T_0) S^{-1} (T_w - \bar{T})^{-1}$ — средний коэффициент теплоотдачи; C_p — теплоемкость теплоносителя; S — площадь боковой поверхности канала; T_0 , T_i — температура жидкости на выходе и на входе в канал; T_w — средняя температура жидкости; $\bar{T}$ — средняя арифметическая температура стенки канала, полученная усреднением по данным шести термпар; Pr — число Прандтля, $Re = \rho U d / \mu$ — число Рейнольдса, λ и μ — коэффициенты теплопроводности и вязкости жидкости, U — среднерасходная скорость; d — диаметр трубки. Как видно из рис. 2, экспериментальные данные, полученные в турбулентном режиме течения, хорошо согласуются с эмпирической зависимостью [8]. Расхождения не превышают 5%, что сопоставимо с точностью самой корреляции.

Помимо теплоотдачи для воды также было проведено измерение перепада давления. На рис. 3 приведена измеренная зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для чистой воды. Коэффициент сопротивления определялся следующим образом: $\lambda = 2d\Delta P / \rho U^2 L$, где L — длина измерительного участка; ΔP — измеренный перепад давления. Для сравнения на графике приведены теоретические зависимости Пуазеля $\lambda = 64/Re$ для ламинарного течения и Блазиуса $\lambda = 0.316 Re^{-0.25}$ для турбулентного. Видно, что в диапазоне чисел Рейнольдса от 2300 до 3000 наблюдается ламинарно-турбулентный переход. Значения измеренного перепада давления с точностью 5% согласуются с теоретическими значениями.

2. Результаты экспериментов

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 100 нм. Размер частиц определялся с помощью электронной микроскопии. Объемная концентрация наночастиц варьировалась в диапазоне от 0 до 2 об.%. Нанопорошки были приобретены ОАО «Плазмотерм», г. Москва. Полученные суспензии подвергались получасовой обработке ультразвуком в ванне «Сапфир». ПАВы в наножидкость не добавлялись.

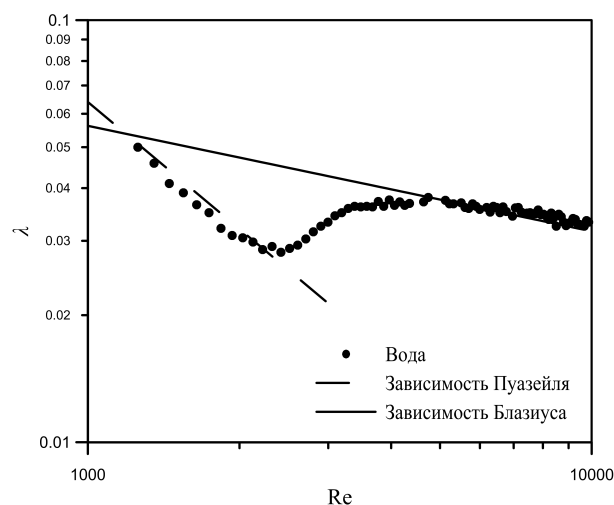


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления для чистой воды от числа Рейнольдса

Вязкость наножидкостей была измерена при помощи ротационного вискозиметра DV2T. Измерения вязкости были проведены в диапазоне скорости сдвига от 10 до 200 с^{-1} при температуре 25°C . Перед измерениями вискозиметр был прокалиброван на дистиллированной воде и этиленгликоле. Полученные результаты хорошо согласовывались с эталонными данными.

В результате проведенных экспериментов измерены средние и локальные величины коэффициента теплоотдачи на стенках канала и величина перепада давления на входе и на выходе из канала. Сначала была исследована зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от концентрации наночастиц. Указанное исследование было проведено для наножидкости на основе частиц оксида кремния со средним размером частиц 25 нм. В большинстве работ, посвященных исследованию вынужденной конвекции наножидкостей, анализируется поведение коэффициента теплоотдачи в зависимости от числа Рейнольдса. Полученная нами зависимость приведена на рис. 4. Видно, что средний коэффициент теплоотдачи существенно зависит от концентрации наночастиц. С ростом концентрации наночастиц при фиксированном значении числа Рейнольдса коэффициент теплоотдачи растет. Значение коэффициента теплоотдачи для 2%-ной концентрации наночастиц более чем на 15% выше аналогичного значения для воды. С уменьшением концентрации наночастиц величина коэффициента теплоотдачи также монотонно стремится к значению, соответствующему чистой воде.

Представляет также интерес зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от расхода теплоносителя (см. рис. 5). Видно, что коэффициент теплоотдачи при фиксированном значении расхода также зависит от концентрации наночастиц. Однако, в отличие от графика на рис. 4, при одинаковом значении расхода значение коэффициента теплоотдачи для 2%-ной наножидкости примерно на 10% ниже аналогичного значения для воды. С уменьшением концентрации наночастиц величина коэффициента теплоотдачи монотонно стремится к значению, соответствующему чистой воде. Для 0.25%-ной концентрации частиц коэффициент теплоотдачи превосходит значения для чистой воды. Наблюдаемая интенсификация теплообмена при фиксированном числе Рейнольдса существенно превосходит интенсификацию при фиксированном расходе жидкости. Такое немонотонное поведение связано с влиянием наночастиц не только на теплопроводность, но и на вязкость наножид-

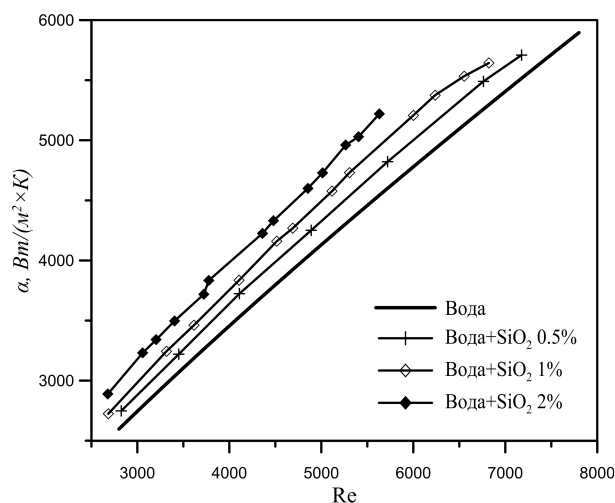


Рис. 4. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса для различных концентраций наночастиц SiO_2 размером 25 нм

кости. Для развитого турбулентного течения коэффициент теплоотдачи, согласно формуле Михеева $Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.43}$, при фиксированном расходе пропорционален комплексу $\mu^{-0.37} \lambda^{0.57}$. В случае, если рост теплопроводности теплоносителя за счет наночастиц существенно меньше роста его вязкости, может иметь место снижение коэффициента теплоотдачи. В этом и состоит ключевое для наножидкостей отличие турбулентного теплообмена от ламинарного. При установившемся ламинарном режиме течения коэффициент теплоотдачи пропорционален теплопроводности среды и не зависит от вязкости. Поскольку теплопроводность теплоносителя из-за наличия в нём наночастиц всегда возрастает, в ламинарном случае мы имеем однозначную интенсификацию теплообмена вне зависимости от того, насколько увеличилась вязкость [7]. В турбулентном случае ситуация намного сложнее, так как коэффициент теплоотдачи нелинейно зависит не только от теплопроводности теплоносителя, но и от его вязкости. Здесь, если рост теплопроводности теплоносителя за счет наночастиц существенно меньше роста его вязкости, может иметь место ухудшение теплообмена, что и было получено в данном эксперименте.

Итак, можно заключить, что интенсификация теплообмена за счет применения наножидкостей в турбулентном режиме является нетривиальной задачей. Положительный для интенсификации теплообмена эффект зависит от соотношения между вязкостью и теплопроводностью наножидкости, а значит, от материала частиц и их размера. Этим по-видимому и объясняется столь широкий разброс и противоречивость данных по турбулентному теплообмену у различных авторов.

Для этой же наножидкости исследована зависимость перепада давления в канале от концентрации наночастиц. На рис. 6 приведены данные измерений перепада давления в рабочем участке для наножидкости на основе оксида кремния (с размерами частиц 25 нм) в зависимости от числа Рейнольдса. Как видно, с увеличением концентрации наночастиц величина потерь давления в канале возрастает. Так, например, при фиксированном значении числа Рейнольдса 2%-ная концентрация наночастиц повышает перепад давления на 75%.

Таким образом, показано, что использование наножидкости увеличивает потери давления в каналах. Это и понятно, поскольку наножидкости имеют более высокую вязкость. Данные измерений вязкости для наножидкости в зависимости

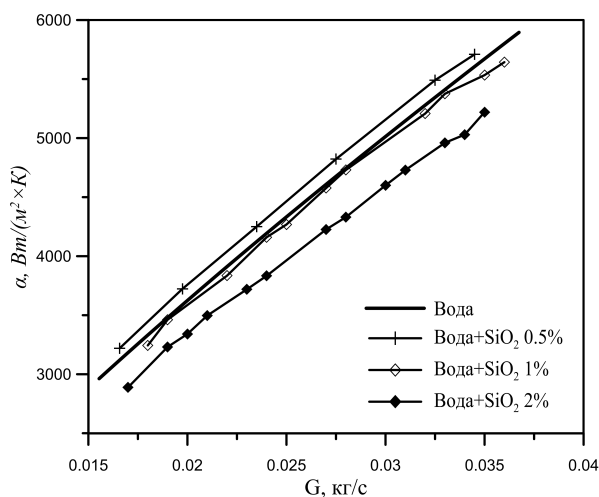


Рис. 5. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от расхода для различных концентрации наночастиц SiO₂ размером 25 нм

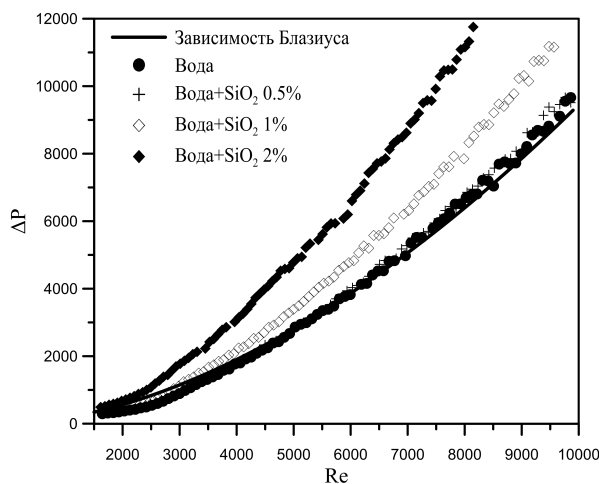


Рис. 6. Зависимость перепада давления от числа Рейнольдса для концентрации наночастиц SiO₂ размером 25 нм

от концентрации частиц приведены на рис. 7. Как видно, вязкость 2%-ной наножидкости примерно на 40% выше вязкости чистой воды. На рис. 6 черной линией показана хорошо работающая для броуновских частиц формула Эйнштейна $\mu_H/\mu_B = 1 + (5/2)\varphi$. Вязкость наножидкости лежит существенно выше классической формулы Эйнштейна. Такое поведение свойственно именно наножидкостям, в отличие от классических коллоидных растворов.

Далее было исследовано влияние диаметра наночастиц на характеристики турбулентного теплообмена наножидкости на основе частиц оксида кремния. Диаметр частиц варьировался от 10 до 100 нм, в остальных условиях экспериментов были полностью идентичны друг другу. На рис. 8. приведена зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса для частиц различного размера и объемной концентрации, равной 2%.

Видно, что при фиксированном числе Рейнольдса коэффициент теплоотдачи имеет максимум при размере частиц 25 нм. Это, по-видимому, обусловлено двумя

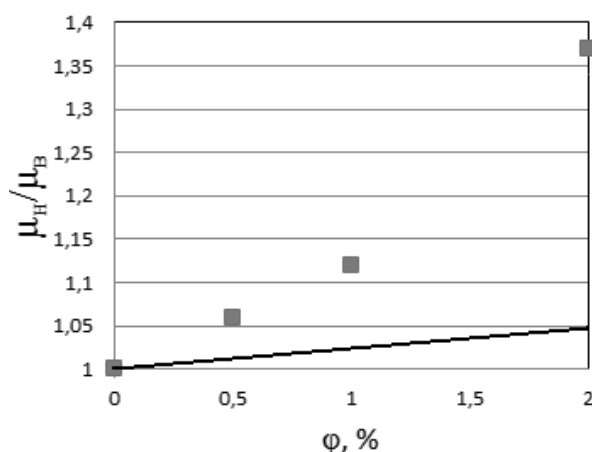


Рис. 7. Зависимость вязкости наножидкости от концентрации наночастиц SiO₂ размером 25 нм

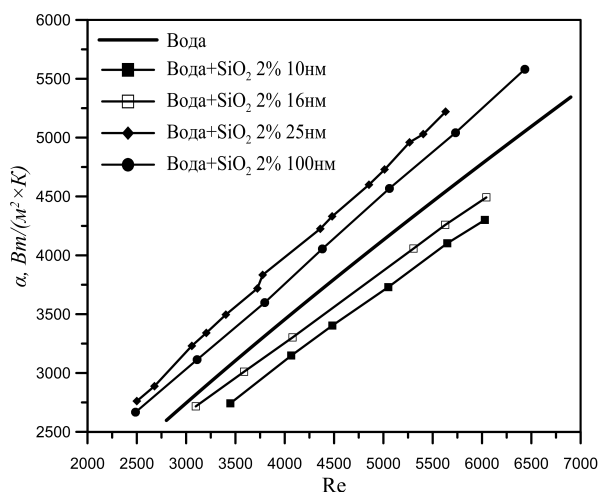


Рис. 8. Зависимость коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса для различных размеров наночастиц SiO₂ при концентрации частиц 2%

причинами. Во-первых, зависимостью коэффициента теплопроводности от размера частиц. Во многих работах (см., например, [9–11]) указывается, что коэффициент теплопроводности растет с ростом размера частиц. Соответственно, с ростом размера частиц растет теплоотдача. Второй причиной является зависимость вязкости наножидкости от размера частиц. Измеренная зависимость вязкости от размера частиц приведена на рис. 9, откуда видно, с ростом размера частиц вязкость падает. Это хорошо согласуется с имеющимися в литературе экспериментальными данными.

Согласно формуле Михеева при фиксированном числе Рейнольдса коэффициент теплоотдачи пропорционален комплексу $\mu^{0.43} \lambda^{0.57}$. В этом случае с ростом размера частиц мы имеем две конкурирующие тенденции – вязкость падает, теплопроводность растет, поэтому зависимость коэффициента теплоотдачи от размера частиц имеет максимум. В данном случае он приходится на размер частиц 25 нм. Такое немонотонное поведение коэффициента теплоотдачи, вероятно, и является основной причиной столь широко разброса и противоречивости встречающихся

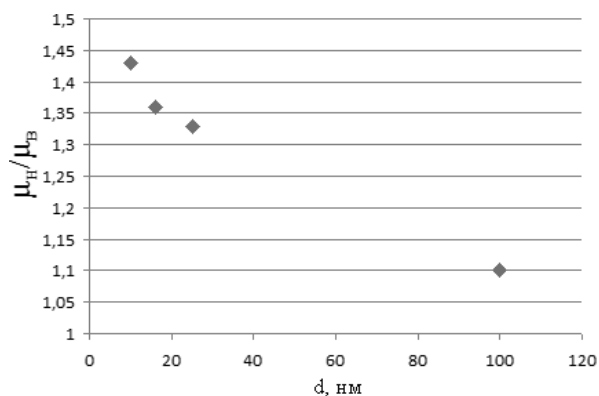


Рис. 9. Зависимость вязкости наножидкости от размера частиц SiO_2 при объемной концентрации 2%

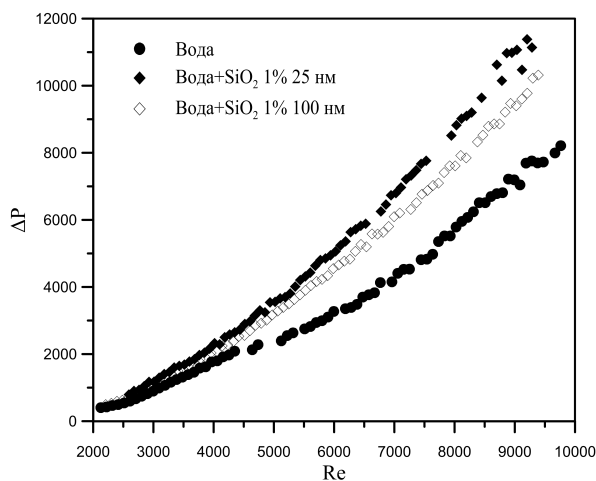


Рис. 10. Зависимость перепада давления от числа Рейнольдса для различных размеров наночастиц SiO_2 при концентрации частиц 1%

в литературе данных по турбулентному теплообмену наножидкостей, поскольку коэффициент теплоотдачи зависит не только от концентрации частиц, но и сложным образом от их размера и критерия, согласно которому происходит сравнение. Зависимость свойств наножидкостей от размеров наночастиц проявляется и в поведении перепада давления. Данные по перепаду давления для двух размеров частиц SiO_2 и объемной концентрации 1% приведены на рис. 10. Как видно, с увеличением размеров наночастиц величина перепада давления падает, что обусловлено более низкой вязкостью.

Поскольку вязкость оказывает значительное влияние на величину коэффициента теплоотдачи, а вязкость, в свою очередь, значительно зависит от температуры, очевидно, что коэффициент теплоотдачи также должен зависеть от температуры теплоносителя, что подтверждает рис. 11. На рисунке для наножидкости на основе частиц оксида кремния (100 нм) и объемной концентрацией 2% представлены зависимости коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса для двух различных температур на входе в обогреваемый участок. Как видно, с ростом температуры теплоносителя коэффициент теплоотдачи повышается. Повышение температуры на входе с 15°C до 25°C приводит к 30%-ному росту теплоотдачи. Это связано

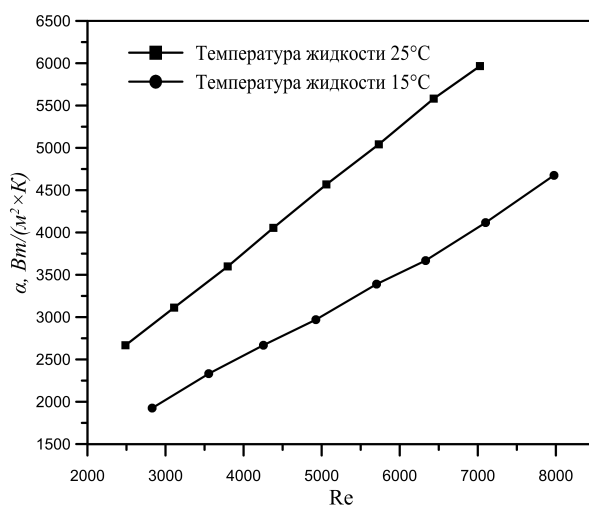


Рис. 11. Зависимость коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса от входной температуры теплоносителя для наночастиц SiO_2 при концентрации 2% и размере 100 нм

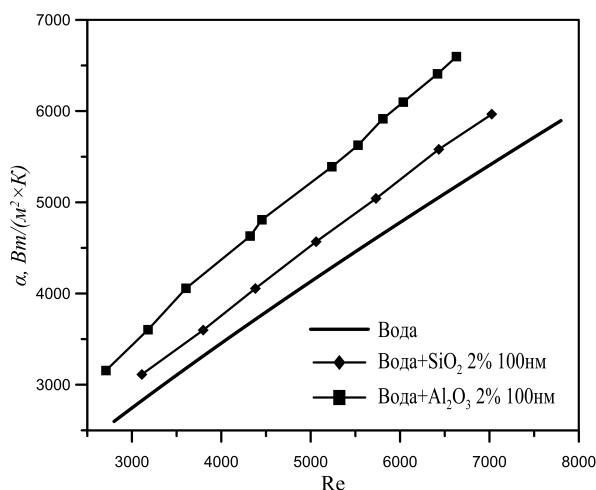


Рис. 12. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса для различных материалов наночастиц с размерами частиц 100 нм

с тем, что с ростом температуры коэффициент теплопроводности растет, а вязкость напротив падает. Поэтому более эффективно использовать наножидкости при более высоких температурах теплоносителя. Таким образом, показано, что температура является еще одним фактором, имеющим существенное влияние на турбулентный теплообмен наножидкостей.

Проведено также исследование влияния свойств материала наночастиц на величину коэффициента теплоотдачи и перепада давления в канале. На рис. 12 приведены данные измерений коэффициента теплоотдачи для 2%-ной концентрации наночастиц оксидов кремния и алюминия для диаметра наночастиц 100 нм. Видим, что коэффициент теплоотдачи для наножидкостей на основе частиц оксида алюминия при прочих равных условиях существенно выше, чем для наножидкостей на основе оксида кремния. Максимальное увеличение коэффициента теплоотдачи для 2%-ной концентрации частиц оксида алюминия составляет порядка 30%.

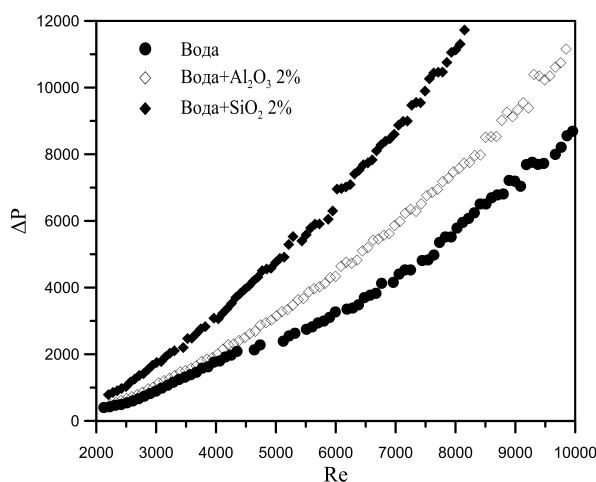


Рис. 13. Зависимость перепада давления от числа Рейнольдса для различных материалов наночастиц с размерами частиц 100 нм

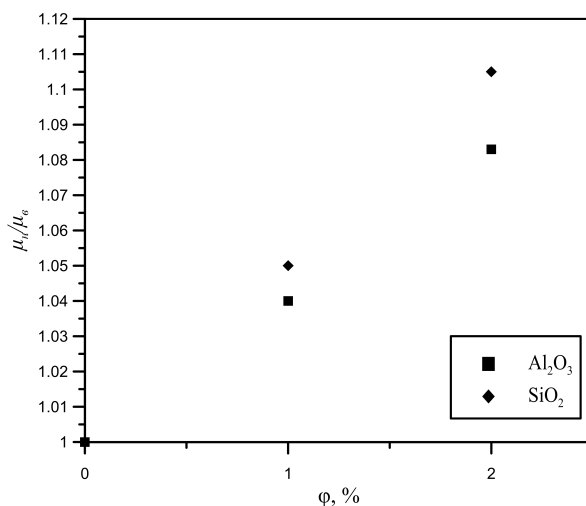


Рис. 14. Зависимость вязкости наножидкости от материала частиц при различных объемных концентрациях и размере частиц 100 нм

Зависимость от материала частиц также проявляется и в поведении перепада давления, которое показано на рис. 13. Как видно, для наножидкости на основе оксида алюминия потери давления значительно ниже. Это обусловлено тем, что при прочих равных условиях наножидкость на основе частиц оксида алюминия имеет более низкую вязкость по сравнению с наножидкостью на основе частиц кремния (см. рис. 14), что само по себе является интересным фактом, поскольку для классических коллоидных растворов зависимости от вязкости быть не должно.

Таким образом, применение наножидкости на основе оксида алюминия при прочих равных условиях существенно выгоднее применения наножидкости на основе оксида кремния, поскольку существенно выше коэффициент теплоотдачи и значительно ниже потери давления. Это дает возможность управления процессом теплообмена при помощи выбора нужной концентрации частиц и их размера и материала.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование турбулентного теплообмена наножидкостей в цилиндрическом канале в условиях постоянной плотности теплового потока на стенках. Число Рейнольдса варьировалось от 3000 до 8000. В качестве базовой жидкости использовалась дистиллированная вода, в качестве наночастиц – порошки оксида алюминия и кремния. Диаметр наночастиц варьировался от 10 до 100 нм. Объемная концентрация наночастиц варьировалась в диапазоне от 0 до 2 об.%. В результате экспериментов измерены средние и локальные величины коэффициента теплоотдачи на стенках канала и величина перепада давления на входе и выходе из канала. Показано, что добавление наночастиц в теплоноситель оказывает существенное влияние на величину коэффициента теплоотдачи при 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%-ной концентрации частиц оксида алюминия).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-19-00312).

Summary

A.V. Minakov, D.V. Guzei, V.A. Zhigarev. Turbulent Forced Convection of Nanofluids in a Circular Channel.

The heat transfer coefficient and pressure drop for the turbulent flow of nanofluids based on distilled water with differently sized particles of aluminum oxide and silicon are measured in a circular duct. The volume concentration of these particles ranged from 0.25% to 2%. Dependence of the heat transfer coefficient on the concentration of nanoparticles, as well as their size and material, is investigated. It is shown that the heat transfer coefficient is determined by the size of nanoparticles and their material. Therefore, there are certain situations when the heat transfer coefficient of nanofluids may be lower than that of the base fluid. Conditions, under which it occurs, are revealed. It is experimentally shown that the coefficient of nanofluids depends not only on the size of nanoparticles, but also on their material.

Keywords: forced convection, turbulent heat transfer, nanofluid, circular channel, pressure drop.

Литература

1. *Ahuja A.S.* Augmentation of heat transport in laminar flow of polystyrene suspensions. II. Analysis of the data // *J. Appl. Phys.* – 1975. – V. 46, No 8. – P. 3417–3425.
2. *Das S.K., Choi S.U.S., Patel H.E.* Heat transfer in nanofluids – A review // *Heat Transfer Eng.* – 2006. – V. 27, No 10. – P. 3–19.
3. *Das S.K., Choi S.U.S., Yu W., Pradeep T.* Nanofluids: Science and Technology. – New Jersey: Wiley-Interscience, 2007. – 416 p.
4. *Wang X.-Q., Mujumbar A.S.* Heat transfer characteristics of nanofluids: A review // *Int. J. Therm. Sci.* – 2007. – V. 46, No 1. – P. 1–19.
5. *Yu W., France D.M., Choi S.U.S., Routbort J.L.* Review and Assessment of Nanofluid Technology for Transportation and Other Applications: ANL/ESD/07-9. – Argonne National Laboratory, 2007. – 78 p.

6. Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В. Механизм теплопереноса в наножидах: современное состояние проблемы. Ч. 2. Конвективный теплообмен // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17, № 2. – С. 173–188.
7. 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 // Appl. Therm. Eng. – 2014. – doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.11.041.
8. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 550 с.
9. Timofeeva E.V., Yu W., France D.M., Singh D., Routbort J.L. Base fluid and temperature effects on the heat transfer characteristics of SiC in ethylene glycol/H₂O and H₂O nanofluids // J. Appl. Phys. – 2011. – V. 109, No 1. – P. 014914-1–014914-5.
10. Ali F.M., Yunus W.M.M., Talib Z.A. Study of the effect of particles size and volume fraction concentration on the thermal conductivity and thermal diffusivity of Al₂O₃ nanofluids // Int. J. Phys. Sci. – 2013. – V. 8, No 28. – P. 1442–1457.
11. Beck M.P., Yuan Y., Warrior P., Teja A.S. The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids // J. Nanopart. Res. – 2009. – V. 11, No 5. – P. 1129–1136.

Поступила в редакцию
10.06.15

Минаков Андрей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры теплофизики, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия.

E-mail: tov-andrey@ya.ru

Гузей Дмитрий Викторович – аспирант кафедры теплофизики, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия.

E-mail: gudimas@yandex.ru

Жигарев Владимир Алексеевич – аспирант кафедры теплофизики, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия.

E-mail: zhigarev.vladimir@yandex.ru