

УДК 62-022.532 620.3

**Механизм теплопереноса в наножидкостях:
современное состояние проблемы (обзор).
Часть 2. Конвективный теплообмен***

В.И. Терехов, С.В. Калинина, В.В. Леманов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Во второй части обзора* рассмотрены проблемы, связанные с переносом импульса и тепла в наножидкостях. Представлен анализ результатов по гидродинамическому трению, вынужденной и свободной конвекции в ламинарном и турбулентном режимах течения, рассмотрена теплоотдача при кипении. Проанализированы существующие модели, описывающие интенсификацию и подавление теплопереноса в наножидкостях. Показано, что в некоторых задачах конвективного теплообмена существует противоречие между данными разных авторов, анализируются возможные причины этих расхождений.

Ключевые слова: наножидкость, теплопроводность, теплообмен, свободная и вынужденная конвекция.

1. ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ТРЕНИЕ В НАНОЖИДКОСТЯХ

Первое, с чем сталкиваются на практике при работе с наножидкостями, это вопрос о нахождении вязкости среды и возможности применения закона Ньютона для внутреннего трения. Современное состояние проблемы определения вязкости наножидкостей представлено в работах (Wang, Zhou, 2004, Wang, Mujumdar, 2008, Chen, Ding, 2009, Рудяк, 2009). Широко известные зависимости для расчета эффективной вязкости суспензий Эйнштейна, Бринкмана и др. практически не подходят для многих наножидкостей (Chen, Ding, 2009, Рудяк, 2009). Большинство авторов отмечает, что наножидкости сохраняют ньютоновские свойства (Pak, 1998, Wang, Xu, 1999, Das, 2003,а, Prasher, 2006, Liao, 2009). К основным факторам, влияющим на вязкость наносуспензии, относят: объемную концентрацию, температуру, состав и размер наночастиц. Так (Wang, Xu, 1999) отмечает 30 % увеличение вязкости среды Al_2O_3/H_2O при увеличении объемной концентрации частиц окиси алюминия до 3 % и отсутствие реологических свойств суспензии. Неньютоновские свойства некоторых наножидкостей обсуждаются в работах (Kwak, 2005, Ding, Alias, 2006, Prasher, 2006, Chen, 2007, Namburu, 2007, Chen, 2009).

* Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). Часть 1. Синтез и свойства наножидкостей // Теплофизика и аэромеханика, 2010, Т. 17, № 1. С. 1–15.

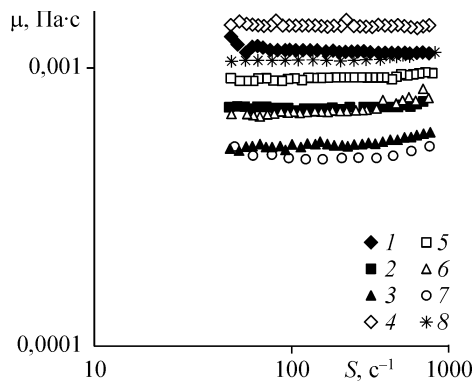


Рис. 1. Вязкость наножидкости ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$) при различной температуре (20 (1, 4, 8), 40 (2, 5), 60 (3, 6, 7) °C) и объемной концентрации 1 (1–3), 4 (4–6) %, H_2O (7, 8), (Das, 2003,a).

Так, для углеродных нанотрубок с большим отношением длины к диаметру обнаружены реологические свойства наножидкостей (Ding, Alias, 2006).

Опытные данные (Das, 2003,a) для наножидкости $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$ при вариации температуры и объемной

концентрации ϕ показаны на рис. 1. Измерения вязкости выполнены методом вращающегося диска. Как следует из рисунка, наблюдается увеличение вязкости суспензии при уменьшении температуры среды и увеличении концентрации частиц. Отсутствие зависимости вязкости μ от скорости сдвига S демонстрирует наличие ньютоновских свойств наножидкости.

Важным вопросом для практики применения наножидкостей является гидродинамическое трение на стенке канала. Так, коэффициент трения для движения наножидкости в капилляре диаметром 1,02 мм и длиной 221 мм представлен на рис. 2. (Liao, 2009). В качестве частиц использовались многостеночные углеродные нанотрубки (Multi-Walled Carbon Nanotube — MWCNT) диаметром $d = 10\text{--}20$ нм и длиной 1–2 мкм, базовая жидкость — деионизованная вода, материал стенки канала — сталь, скорость потока 0,5–8 м/с. Температура жидкости менялась в пределах 29–58 °C, объемная концентрация частиц 0,5–2 %. Измерения показали, что вязкость наножидкости (MWCNT/ H_2O) зависит от температуры и концентрации и обладает ньютоновскими свойствами.

В базовой жидкости коэффициент трения f хорошо согласуется с известными зависимостями как для ламинарного (1), так и для турбулентного (2) режимов течения в трубе (Идельчик, 1960):

$$f = 64/\text{Re}, \quad \text{Re} < 2200, \quad (1)$$

$$f = 0,3164/\text{Re}^{0,25}, \quad \text{Re} > 2200. \quad (2)$$

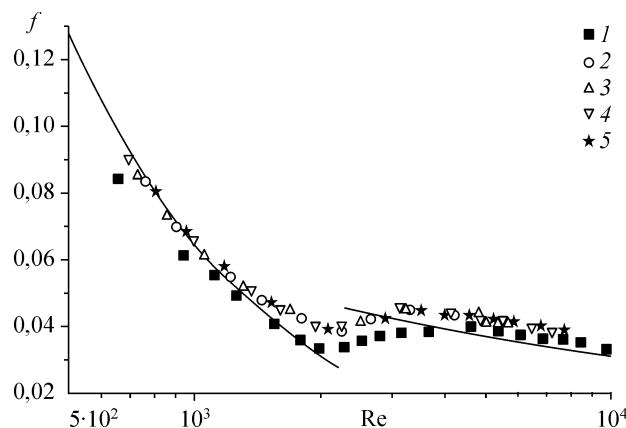


Рис. 2. Трение в трубе при различной температуре (29 (1–4), 58 (5) °C) и концентрации MWCNT/ H_2O (H_2O (1), 0,5 (2), 1 (3, 5), 2 (4) %) (Liao, Liu, 2009).

Наблюдается незначительное влияние добавок нанотрубок на коэффициент трения в капилляре в ламинарном, переходном и турбулентном потоке при различной температуре среды.

Таким образом, по данным разных авторов (Ko, 2007, Williams, 2008, Liao, 2009) наблюдается незначительное влияние добавки наночастиц на гидродинамическое трение (при этом погрешность измерения трения составляет 1–3 %). Добавки нановолокон полимерного состава могут вызывать снижение трения на стенке (Zhang, 2009), однако такие наночастицы не приводят к повышению эффективного коэффициента теплопроводности среды и, соответственно, не могут вызвать интенсификацию теплообмена. Наножидкости с высокой теплопроводностью и реологическими свойствами, по мнению (Chen, 2009), также могут приводить к изменению гидродинамического трения. Изучение еще одного эффекта — снижения трения при течении наножидкостей в микроканалах с супергидрофобными стенками только начинается (Тео, 2009).

2. ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

Экспериментальное изучение теплообмена наножидкостей предъявляет дополнительные требования к установкам и технологии проведения эксперимента по сравнению с чистыми средами. Главной сложностью является получение стабильной среды с контролируруемыми свойствами. Практика многих исследователей показывает сложность получения стабильных наножидкостей с заданными свойствами (Peterson, 2006).

На рис. 3 показана схема типичной установки, используемой для исследования теплоотдачи при течении наножидкости в трубе (Wen, 2004). Основные элементы установки для исследования теплоотдачи в конвективном потоке: гидродинамический контур, насос, с помощью которого осуществляется движение жидкости, оборудованный термодарами опытный теплообменный участок и участок восстановления, где температура потока возвращается к изначальному значению.

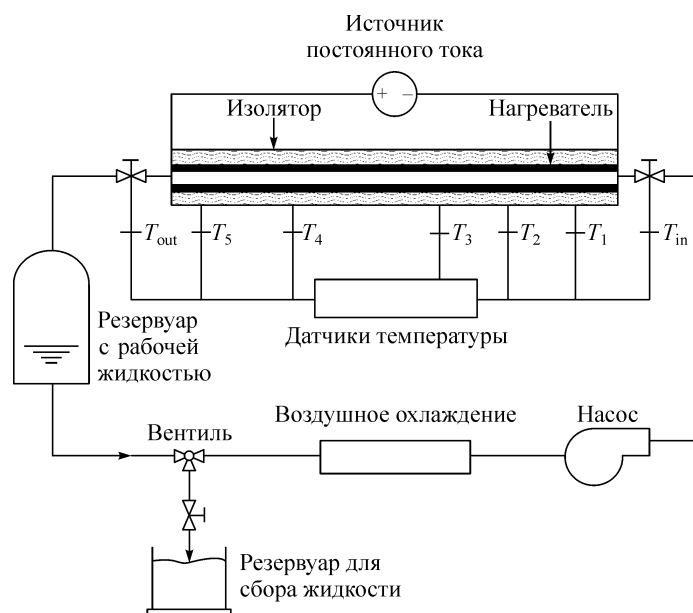


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования вынужденной конвекции ($q = \text{const}$) (Wen, Ding, 2004).

К этим элементам необходимо добавить комплексы для измерения скорости наножидкости, ее вязкости, теплопроводности и размера частиц.

Большой объем опытных данных по теплоотдаче при вынужденной конвекции в наножидкости приведен в обзоре (Yu, 2008). В качестве базовой жидкости используется вода, трансмиссионная жидкость, синтетическое масло; применяются наночастицы размером 13–130 нм, их объемная концентрация составляет 0,05–4,4 %, материал частиц — Al_2O_3 , TiO_2 , CuO , Cu , графит, MWCNT. Графит и многостеночные углеродные нанотрубки (MWCNT) имеют форму нити длиной до 1–2 мкм. Число Рейнольдса охватывает диапазон от ламинарных ($\text{Re} = 2$ –10) до развитых турбулентных течений ($\text{Re} = 10^5$).

На рис. 4 представлены экспериментальные данные по теплоотдаче при вынужденной конвекции в ламинарном потоке наножидкости ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$). Размер частиц 20 и 42 нм, концентрация 0,6–1,6 % для зависимости $\text{Nu} = f(\text{Re})$ и 0,2–3 % для зависимости $\text{Nu} = f(\text{Pe})$ соответственно. Из рис. 4, *a* следует, что увеличение концентрации до 1,6 % приводит к увеличению теплоотдачи до 40 %, при этом увеличение коэффициента теплопроводности наножидкости не превышает 15 %. Таким образом, при вынужденном течении наножидкости в каналах увеличение теплопроводности не всегда является доминирующим фактором, определяющим повышение теплоотдачи. Сопоставление двух рисунков (4, *a* и 4, *b*) демонстрирует, что теплоотдача существенно зависит от объемной концентрации частиц, слабо зависит от числа Рейнольдса и практически монотонно возрастает при увеличении числа Пекле (Pe). Такая зависимость числа Нуссельта от числа Пекле на рис. 4, *b* объясняется тем, что в этом критерии учтено изменение свойств наножидкости при изменении концентрации частиц.

Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции в ламинарном потоке другого состава наножидкостей (многостеночные углеродные нанотрубки MWCNT–вода и графит–синтетическом масле) представлен на рис. 5 (Ding, Alias, 2006, Yang, 2005). Размер частиц MWCNT порядка 30–50 нм, концентрация

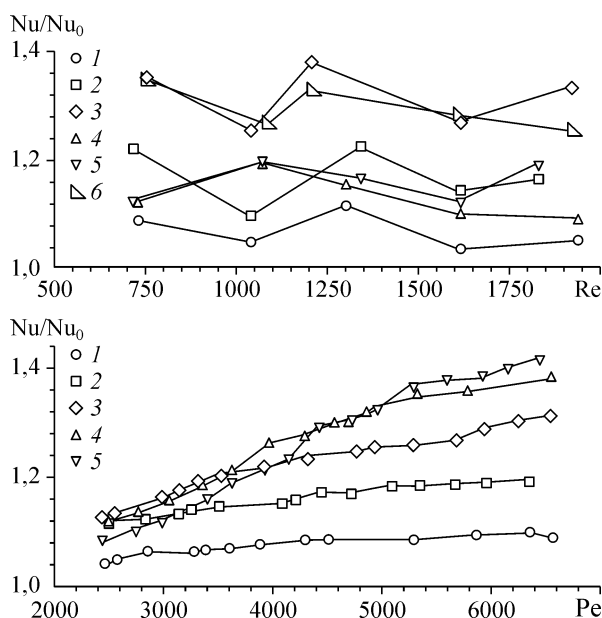


Рис. 4. Теплообмен в ламинарном потоке наножидкости ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$).

a — Wen, Ding, 2004, 42 нм, объемная концентрация частиц $\phi = 0,6$ (1, 4), 1 (2, 3, 5, 6) %, $x/D = 63$ (1–3), 116 (4–6); *b* — Heris, 2006, 20 нм, $\phi = 0,2$ (1), 1 (2), 2 (3), 2, 5 (4), 3 (5).

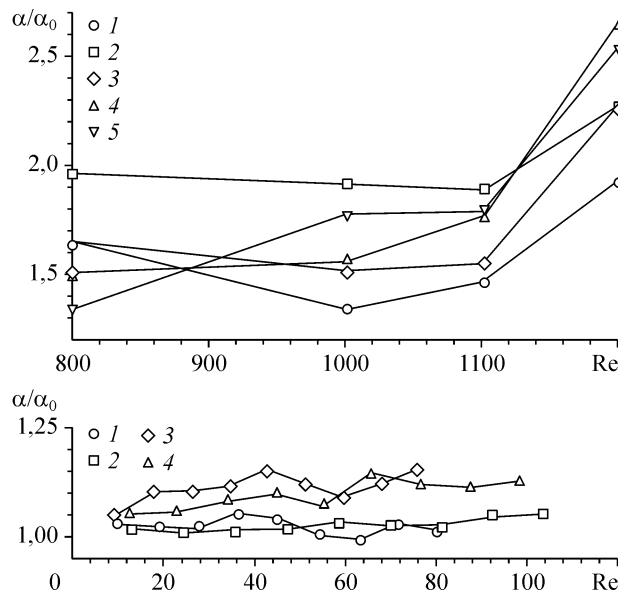


Рис. 5. Теплообмен в ламинарном потоке наножидкости.

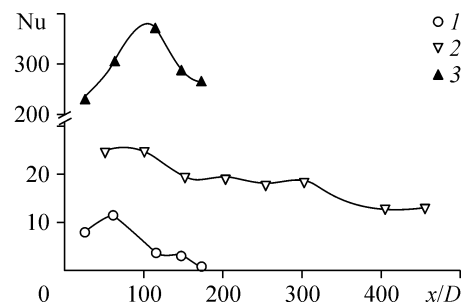
a — Ding, 2006, MWCNT/H₂O, $\phi = 0,048\%$, $x/D = 26$ (1), 63 (2), 116 (3), 147 (4), 174 (5); *b* — Yang, 2005, графит/масло, $\phi = 0,75\%$, $t = 50$ (1, 3), 70 (2, 4) °C.

0,048 %, размер частиц графита (20–40)×(2000–3000) нм, концентрация 0,75 %. Как видно из рисунка, в обоих случаях наблюдается интенсификация теплообмена: для MWCNT в воде она составляет 40–260 %, а графита в синтетическом масле — 5–20 % соответственно. Таким образом, максимальная интенсификация теплоотдачи в ламинарном потоке зафиксирована в работе (Ding, Alias, 2006) для многостеночных углеродных нанотрубок в воде (MWCNT/H₂O) и составляет 260 %.

Известно, что на начальном участке трубы коэффициент теплоотдачи снижается по длине трубы. Такие данные (Ding, Chen, 2007) для ламинарного режима течения показаны на рис. 6. Здесь число Нуссельта представляет функцию от безразмерной координаты x/D (x — продольная координата вдоль оси, D — диаметр трубы). Авторы использовали пять типов наноматериалов: Al₂O₃, TiO₂, титановые нанотрубки (TiNT), углеродные нанотрубки (CNT) и алмазные наночастицы. В качестве базы для приготовления большинства наножидкостей использована дистиллированная вода, для TiNT дополнительно применялся этиленгликоль. Эксперименты выполнены на установках с горизонтальным и вертикальным расположением трубы. Коэффициент теплоотдачи имеет наибольшее значение на входе, далее вниз по потоку он уменьшается и достигает постоянного значения в области полностью развитого течения. Однако для среды CNT/H₂O имеется значительный максимум теплоотдачи при $x/D = 110$, объяснения такого поведения авторы работы не приводят. Длина входного участка

Рис. 6. Теплоотдача при ламинарном течении по длине трубы для разных наножидкостей. (Ding, 2007).

H₂O/Al₂O₃ (1), H₂O/TiNT (2), H₂O/CNT (3), Re = 1600 (1), 1700 (2), 800 (3), $\phi = 0,6$ (1, 2), 0,42 (3) %.



зависит от свойств наножидкости. Для фиксированной наножидкости длина начального участка при низких расходах больше, чем при высоких.

При заданной концентрации частиц и фиксированных характеристиках потока, наножидкость CNT/H₂O дает самое большое повышение коэффициента теплоотдачи, далее в порядке убывания — TiNT/H₂O, TiO₂/H₂O, Al₂O₃/H₂O. Для наножидкостей TiO₂/этиленгликоль и алмазные наночастицы/вода теплоотдача была такой же, как у базовых жидкостей. Важная роль базовой жидкости обнаружена в опытах с наночастицами TiO₂, замена этиленгликоля на воду привела к заметному увеличению теплоотдачи. Для наножидкостей Al₂O₃, TiO₂, CNT + H₂O коэффициент теплоотдачи в общем случае повышается с ростом расхода и концентрации частиц, причем это увеличение превышает рост коэффициента теплопроводности, указывая на то, что это не всегда является доминирующим механизмом повышения теплообмена.

Для практики большое значение имеет исследование конвективного теплообмена при больших числах Рейнольдса. Такие экспериментальные данные (Pack, 1998) по интенсификации теплообмена для турбулентного режима течения наножидкости представлены на рис. 7. Использовались две наножидкости: Al₂O₃/H₂O и графит/синтетическое масло, размер частиц соответственно 13 и 27 нм, максимальная концентрация 3,16 %. Как видно из рисунка, для Al₂O₃/H₂O наблюдается устойчивый рост теплоотдачи при увеличении объемной концентрации наночастиц, при этом максимальная интенсификация для заданного числа Re составляет 25–35 %. Зависимость Nu/Nu₀ от числа Рейнольдса носит немонотонный характер. Для наножидкости графит/синтетическое масло увеличение теплоотдачи наблюдается только при концентрации большей 2 %. При меньшей концентрации есть результаты с уменьшением теплоотдачи.

Таким образом, как при ламинарном режиме течения, так и при турбулентном зафиксирована интенсификация теплообмена при вынужденной конвекции для различного состава наножидкостей. Максимально теплоотдача возрастает в 3–4 раза по сравнению с базовой жидкостью для среды MWCNT/H₂O в ламинарном потоке и на 25–30 % для Al₂O₃/H₂O в турбулентном потоке. Основными факторами, влияющим на управление теплопереносом, является состав наножидкости и объемная концентрация. Вопрос о влиянии размера, формы и дисперсного состава наночастиц требует дальнейших исследований.

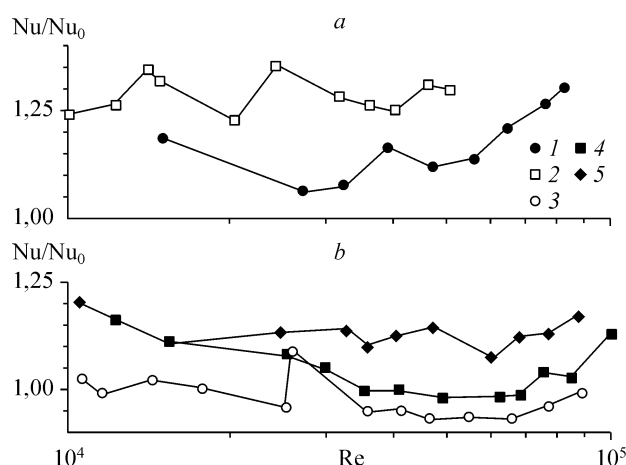


Рис. 7. Теплообмен в турбулентном потоке наножидкости (Pack, Cho, 1998).

Al_2O_3/H_2O (a), графит/масло (b), $d = 13$ нм (a), 27 нм (b), $\phi = 1,34$ (1), $2,78$ (2), $0,99$ (3), $2,04$ (4), $3,16$ (5).

ОБОБЩЕНИЕ И АНАЛИЗ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ ПО ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

В настоящее время теплообмен в наножидкостях исследуется преимущественно экспериментально (Beskok, 1999, Eastman, 2004, Phelan, 2005). Численные исследования осложнены отсутствием надежной теоретической базы по процессам переноса (Das, Choi, 2007, Какас, 2009). Как правило, для расчета эффективных коэффициентов теплопроводности, вязкости и диффузии используются эмпирические данные.

В ряде работ предпринята попытка обобщения опытных данных с помощью критериальных формул по вынужденной конвекции. Так, на рис. 8. представлены данные (Xuan, Li, 2004, Wen, 2004, Li, 2005) по конвективной теплоотдаче в трубе при ламинарном и турбулентном режимах течения охлаждающей жидкости. Как видно из рисунка, наибольший массив опытных данных получен для ламинарного режима течения. При этом максимальная интенсификация теплоотдачи достигает 4 раз. В экспериментах (Li, 2005) исследовалась конвективная теплоотдача для условия $q_{ст} = \text{const}$ и развитого турбулентного течения на входе в теплообменный участок. Использовались наножидкости на основе деионизированной воды и медных частиц размером менее 100 нм. Объемная концентрация наночастиц изменялась от 0 до 2 %. Результаты измерений теплоотдачи при использовании базовой жидкости описывались известной формулой (Dittus, 1930) для турбулентного течения

$$\text{Nu} = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4}. \quad (3)$$

При увеличении концентрации наночастиц теплоотдача увеличивалась, причем тем сильнее (до 40 %), чем выше концентрация частиц. Результаты опытов показывают, что корреляционная формула (3) становится неприменимой, когда величина объемной концентрации наночастиц становится больше чем 0,5 %.

Исследования (Wen, 2004), также представленные на рис. 8, посвящены изучению конвективного теплообмена на входном участке трубы для условий ламинарного течения ($\text{Re} = 6 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^3$). Использовались наножидкости, приготовленные на основе воды и частиц окисла алюминия (Al_2O_3). Частицы — сферической

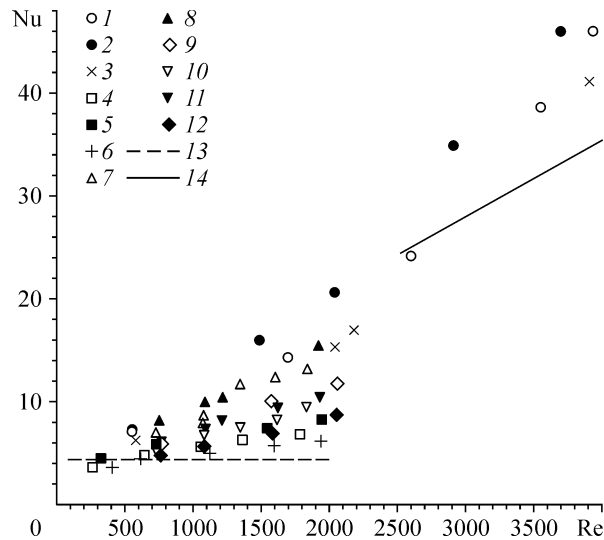


Рис. 8. Зависимость числа Nu от Re для ламинарного и турбулентного потока в трубе. Li, 2005, (1–3), Xuan, Li, 2004 (4–6), Wen, Ding, 2004 (7–14), $\phi = 1$ (1, 4, 7, 10), 2 (2, 5), 1,6 (8, 11), $\text{Cu}/\text{H}_2\text{O}$ (1, 2, 4, 5), H_2O (3, 6, 9, 12), $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$ (7, 8, 10, 11), $q_{ст} = \text{const}$ (13), Dittus-Boelter (14).

формы, размером 27–56 нм, объемная концентрация варьировалась в пределах 0,6–1,6 %. Результаты измерений показали, что добавление наночастиц в базовую жидкость в целом приводит к росту теплоотдачи и удлинению участка тепловой стабилизации течения. Эффект интенсификации теплообмена уменьшается с расстоянием от входного сечения. Кроме этого, он зависит от объемной концентрации частиц и числа Рейнольдса. Так, при $Re = 10^3$ и $\phi = 1,6$ % прирост коэффициента теплоотдачи на расстоянии от входной плоскости $x/D = 63$ составлял 40 %, а при тех же условиях, но при $Re = 1,6 \cdot 10^3$ — соответственно 47 %.

Варианты обобщения опытных данных по вынужденной конвекции с помощью критериальных формул предпринимались различными авторами, эти зависимости представлены ниже:

(Pak, 1998) Al_2O_3/H_2O ; TiO_2/H_2O , турбулентное течение,

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,5},$$

(Xuan, Roetzel, 2000), турбулентное течение,

$$Nu = f(Re, Pr, \phi, k_p/k_b, (\rho C)_p/(\rho C)_b),$$

(Das, 2003a) Al_2O_3/H_2O с, $m = f(\phi)$,

$$Nu = c Re_b^m Pr^{0,4},$$

(Xuan, 2003) CuO/H_2O , турбулентное течение,

$$Nu = 0,0059 (1 + 7,6286 \phi^{0,6886} Re^{0,001}) Re^{0,9238} Pr^{0,4},$$

(Yang, 2005) графит/масло; с, $m = f(T)$, ламинарное течение,

$$Nu = c Re^m Pr^{1/3} (D/L)^{1/3} (\mu_b/\mu)^{0,14},$$

(Buongiorno, 2006) турбулентное течение,

$$Nu = f/8(Re_b - 1000) Pr_b / (1 + \delta^+ (f/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)),$$

(Maiga, 2006) Al_2O_3/H_2O ; турбулентное течение, $10^4 < e < 5 \cdot 10^5$, $6,6 < Pr < 13,9$, $0 < \phi < 10$ %

$$Nu = 0,085 Re^{0,71} Pr^{0,35}.$$

Здесь $Re = uD/\nu$ — число Рейнольдса, $Pr = \nu/a$ — число Прандтля наножидкости, f — безразмерный коэффициент трения, u — средняя скорость наножидкости, D — диаметр трубы, ϕ — объемная концентрация наночастиц, k_p/k_b и $(\rho C)_p/(\rho C)_b$ — отношение теплопроводностей и произведений плотности и теплоемкости (ρC) наночастиц (индекс p) и базовой жидкости (индекс b), $Re_p = ud/a$ — число Пекле, d — диаметр наночастиц, a , ν — температуропроводность и кинематическая вязкость наножидкости, T — температура, δ^+ — эмпирический параметр.

Как видно из вышеприведенных формул, они предложены для конкретных жидкостей и обобщают, как правило, данные собственных опытов. Тем не менее, эти формулы дают возможность сделать оценки уровня теплоотдачи в наносuspensions.

Многие авторы (Peterson, 2006, Ding, Chen, 2007, Какас, 2009 и др.) отмечают, что проблема теплообмена при вынужденной конвекции остается открытой из-за некоторой противоречивости имеющихся результатов. Большинство опубликованных работ показывает интенсификацию теплоотдачи при использовании наночастиц. Но есть публикации, где демонстрируется уменьшение конвективной теплоотдачи при добавлении наночастиц к базовым жидкостям (Pak, 1998, Yang, 2005). По мнению авторов (Eastman, 2004, Peterson, 2006, Какас, 2009), наряду с объемной концентрацией другой основной параметр, влияющий на процессы переноса тепла, — это материалы наночастиц и базовой жидкости. В работах других авторов обсуждается вопрос о влиянии размера, формы и дисперсного состава наночастиц (Chandrasekar, 2009, Аноор, 2009). Так, для TiO_2 -наножидкости не обнаружено ясной тенденции во влиянии размера частиц (10–210 нм) на

коэффициент конвективной теплоотдачи (Ding, Chen, 2007, He, 2007). Важную роль в повышении теплообмена может играть форма частиц (Ding, Chen, 2007, Yang, 2005). Для некоторых сред, сделанных из частиц с большим отношением размеров, например, углеродных нанотрубок, обнаружены реологические свойства наножидкостей. Предложена корреляция между реологическим поведением и характеристиками теплоотдачи (Ding, Alias, 2006, Chen, 2009).

Почему имеет место повышение теплоотдачи в одних случаях и ухудшение в других? В работе (Ding, Chen, 2007) предложен качественный анализ, в котором автор выделяет макроскопический и микроскопический уровни. С макроскопических позиций теории размерности конвективный коэффициент теплоотдачи α можно выразить как $\alpha = k_f/\delta_t$, где δ_t и k_f — локальная толщина теплового пограничного слоя и эффективная теплопроводность жидкости у стенки. На входном участке трубы толщина теплового пограничного слоя при течении любой жидкости наименьшая и, соответственно, теплоотдача там наибольшая. Если в результате добавления в базовую жидкость наночастиц ее эффективная теплопроводность увеличится, то увеличится и коэффициент теплоотдачи.

С микроскопической точки зрения наножидкости всегда существенно неоднородны и эта неоднородность влияет на макроскопические параметры k_f и δ_t . Одна из причин неоднородности связана с высокой поверхностной активностью наночастиц и их стремлением к агрегации. Второй причиной неоднородности наножидкости может явиться миграция частиц в результате влияния вязкости и градиентов скорости. Экспериментальное доказательство миграции частиц содержится в более длинном входном участке при течении наножидкости в канале (см. выше) и в экспериментах (Merhi, 2005). Имеется также множество теоретических исследований о перемещении частиц (Phillips, 1992, Frank, 2003, Ding, 2005). Если частицы очень малы, броуновское перемешивание сильное, и эффекты от вышеупомянутого перемещения и неоднородности распределения частиц незначительны. Наоборот, если частицы достаточно большие, например, составляют 100 нм и более, эффект броуновского движения мал и вблизи стенки возникает область с пониженной концентрацией частиц. В свою очередь пониженная концентрация частиц в области стенки приводит к более тонкому тепловому пограничному слою.

В соответствии с формулой $\alpha = k_f/\delta_t$, это может вести к трем возможным сценариям: α уменьшается, если рост δ_t превышает рост k_f , α остается неизменным, если рост δ_t равен росту k_f , α увеличивается, если рост δ_t меньше, чем рост k_f . Предложенный механизм качественно объясняет экспериментальные данные. Тем не менее, количественное объяснение требует понимания того, как наночастицы ведут себя в условиях сдвигового напряжения и как они взаимодействуют друг с другом и с жидкостью в пограничном слое.

3. ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

Естественная конвекция суспензий с ультратонкими частицами применяется в химической и пищевой промышленности, в солнечных коллекторах (Okada, 1997) и многих других технических устройствах. Конвекция в суспензии существенно отличается от конвекции в чистой жидкости из-за неоднородного распределения плотности благодаря температурной стратификации и седиментации частиц (Kang, 2001). Работ по теплообмену в условиях естественной конвекции с приме-

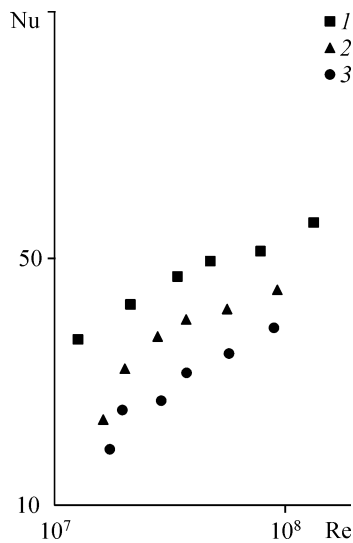


Рис. 9. Влияние материала наночастиц на теплообмен в условиях естественной конвекции (Putra, 2003). H_2O (1), Al_2O_3 /(2), CuO (3), $L/D = 1$ (1–3), $\phi = 4$ (2, 3) %.

нением наножидкостей мало (Khanafar, 2003, Putra, 2003, Wen, 2005,b, 2006, Nnanna, 2005, Hwang, 2007, Aminossadati, 2009).

Экспериментальные исследования естественной конвекции двух наножидкостей (Al_2O_3 , 131 нм и CuO , 87 нм в воде, концентрация до 4 %) в горизонтальном цилиндре, нагретом с одного конца и охлажденном с другого, представил (Putra, 2003). В стационарных условиях исследовалось влияние концентрации, материала частиц и геометрии цилиндра. Опыты показали, что в наножидкости отсутствовали градиент концентрации частиц и явление седиментации. На рис. 9 представлено влияние материала частиц на

теплообмен в условиях естественной конвекции при больших числах Рэлея. При одинаковом соотношении длины цилиндра к диаметру ($L/D = 1$) теплоотдача в наножидкости ниже, чем в базовой жидкости, при этом данные для CuO лежат систематически ниже, чем для Al_2O_3 .

На рис. 10 представлены эксперименты (Wen, 2006) по теплоотдаче в условиях естественной конвекции между двумя горизонтальными дисками диаметром 240 мм и расстоянием между ними 10 мм. Использовалась наножидкость (TiO_2/H_2O) с размерами частиц 30–40 нм и объемной концентрацией до 3 %. Как следует из рисунка, увеличение концентрации частиц до 2,4 % приводит к существенному снижению теплоотдачи в широком диапазоне чисел Рэлея. Эти данные совпадают с измерениями (Putra, 2003), где также наблюдалось снижение числа Нуссельта при увеличении концентрации наночастиц.

В противоположность (Putra, 2003, Wen, 2006) в численном (Khanafar, 2003), аналитическом (Kim, 2004) и экспериментальном (Nnanna, 2005) исследованиях было показано, что с увеличением концентрации наночастиц теплоотдача увеличивается. В работе (Hwang, 2007) обнаружено, что при численном моделировании, в зависимости от модели расчета эффективной вязкости, может получаться как интенсификация теплообмена, так и его подавление. Таким образом, в случае есте-

ственной конвекции существует противоречие между данными различных авторов, и вопрос об интенсификации или подавлении теплообмена остается открытым. В работах (Kim, 2004, Tzou, 2008, Donzelli, 2009) обсуждается вопрос о неустой-

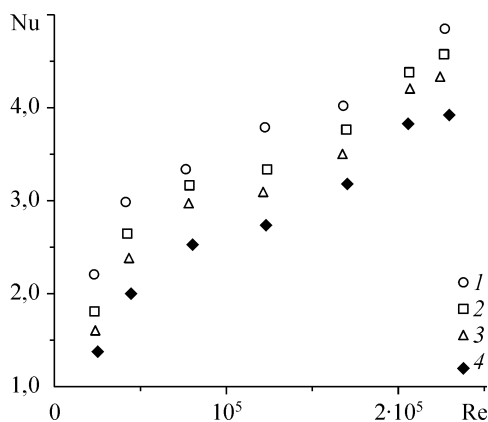


Рис. 10. Влияние концентрации наночастиц на теплообмен в условиях естественной конвекции (Wen, 2006).

H_2O (1), TiO_2 (2–4), $\phi = 0,8$ (2), 1,5 (3), 2,4 (3).

чивости в условиях естественной конвекции: приложение наножидкостей к проблемам охлаждения представлено в (Aminossadati, 2009).

4. ТЕПЛОТДАЧА ПРИ КИПЕНИИ

Применение наножидкостей для управления процессами теплопереноса при кипении уже достаточно широко апробировано. Большой объем опытных данных по рассматриваемой проблеме представлен в обзоре (Yu, 2008). В качестве базовой жидкости используется вода, материал частиц — Al_2O_3 , SiO_2 , CuO , применяются наночастицы размером 10–60 нм, объемная концентрация составляет 0,08–4 %. В качестве исследуемой используют горизонтальные и вертикальные, плоские и цилиндрические поверхности из различных материалов с контролируемой шероховатостью.

Главный вопрос при использовании наночастиц — это интенсификация теплообмена при кипении. Как отмечается в обзоре (Yu, 2008), в основном наблюдается снижение уровня теплообмена для наиболее изученной наножидкости ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$) (Das, 2003,a, b, Bang, 2005, Wen, 2005,a) в широком диапазоне концентраций 0,05–4 %. Только в опытах (Wen, 2005,a) для наножидкости ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$) при малых концентрациях (0,08–0,32 %) наблюдалась интенсификация теплообмена.

На рис. 11 представлено две группы данных по кипению наножидкости ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$) на горизонтальной поверхности. Для первой группы данных (Bang, 2005) с частицами 47 нм характерно снижение коэффициента теплоотдачи на 10–30 %. Для второй группы данных (Wen, 2005,a) с частицами 30 нм получена интенсификация теплообмена на 20–40 %. Во всех результатах характерно влияние объемной концентрации на теплообмен.

Основные экспериментальные данные по критическому тепловому потоку при кипении наножидкости приведены в таблице. Здесь представлены авторы, состав наножидкости, концентрация и размер наночастиц, степень повышения критического теплового потока по сравнению с базовой жидкостью. Как следует из таблицы, в качестве основной базовой жидкости применяется вода, используются частицы размером 10–50 нм, для SiO_2 — до 3000 нм, концентрация составляет 0,13–4 %, материал частиц Al_2O_3 , SiO_2 , CuO . Рабочие поверхности — горизонтальные и вертикальные поверхности, проволочки в покоящейся жидкости, варьируется материал стенки. В работе (Liu, 2007) применялась импактная струя, взаимодействующая с горизонтальной поверхностью. Как видно из таблицы, для всех опытных данных наблюдается повышение критического теплового потока при

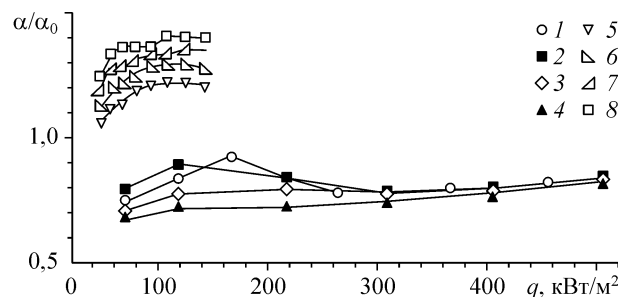


Рис. 11. Теплообмен при кипении наножидкости ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$) на горизонтальной поверхности. 1–4 — Bang, Chang, 2005, 47 нм, $\phi = 0,5$ (1), 1 (2), 2 (3), 4 (4) %; 5–8 — Wen, Ding, 2005, 30 нм, $\phi = 0,08$ (5), 0,18 (6), 0,24 (7), 0,32 (8) %.

Таблица

Критический тепловой поток при кипении наножидкости

Авторы	Наножидкость	Объемная концентрация, %	Размер частиц, нм	Отношение критических тепловых потоков
You, 2003	Al ₂ O ₃ /H ₂ O, горизонт. поверхность	0–0,13		1,24–3,11
Vassallo, 2004	SiO ₂ /H ₂ O, горизонт. поверхность	0,5	15	1,6
	NiCr проволока	0,5	50	3
		0,5–4	3000	1,5
Bang, 2005	Al ₂ O ₃ /H ₂ O, горизонт. поверхность	0,5–4	47	1,32–1,52
	Al ₂ O ₃ /H ₂ O, вертик. поверхность	0,5–4	47	1,13
Milanova, 2005	SiO ₂ /H ₂ O, горизонт. поверхность, NiCr проволока			
	pH = 10,2	0,5	10	4,52
	pH = 9,22	0,5	20	2,39
	pH = 10	0,5	10	3,16
	pH = 10	0,5	20	2,3
Liu, 2007	CuO/H ₂ O, Импактная струя, горизонт. поверхность	0–0,32	50	1,16–1,25

кипении наножидкости на 13–450 % по сравнению с базовой жидкостью. Причем максимальный эффект интенсификации в 3–4,5 раз авторы (Milanova, 2005, SiO₂/H₂O, 0,5 %, 10–20 нм, pH = 9,22–10,2) связывают с высоким значением водородного показателя (pH) наножидкости. Сопоставление опытных данных для SiO₂/H₂O при одинаковой концентрации 0,5 % на горизонтальной NiCr проволочке (Vassallo, 2004, 15–3000 нм) и (Milanova, 2005, 10–20 нм) показывает максимальное увеличение критического теплового потока в 3–4 раза для 50 нм частиц. Таким образом, результаты (Milanova, 2005) демонстрируют немонотонную зависимость теплового потока от размера наночастиц.

На рис. 12 представлено влияние концентрации частиц Al₂O₃ на критический тепловой поток в воде при кипении в покоящейся жидкости. Также представлено две группы данных при малой и большой объемных концентрациях. Увеличение теплового потока наблюдаются во всем диапазоне концентрации. Однако максимальный эффект 200–300 % наблюдается только для малых объемных концентраций 10⁻⁴–10⁻³.

Таким образом, по теплообмену при кипении наножидкостей с малыми концентрациями наночастиц (до 0,4 %) характерно снижение уровня теплообмена на 10–30 %, для более высоких концентраций (более 0,4 %) получена интенсификация теплообмена на 20–40 %.

Критический тепловой поток возрастает в наножидкостях, а его максимальное увеличение составляет 3–4,5 раза.

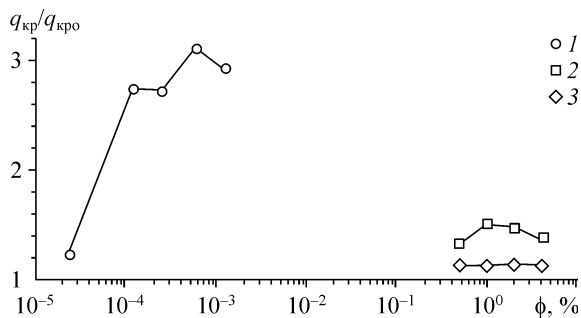


Рис. 12. Критический тепловой поток в наножидкости (Al₂O₃/H₂O), горизонтальный; You, 2003 (1), Bang, Chang, 2005, 47 нм (2, 3).

В результате рассмотрения современного состояния конвективного теплообмена с применением наножидкостей, за пределами обзора осталась большая часть работ, особенно в области приложений. В частности, интенсификация теплообмена исследовалась: в микроканалах (Jung, 2009, Wu, 2009, Cheng, 2009), в отрывных течениях (Abu-Nada, 2008), во вращающихся потоках (Serre, 2007), в стекающих жидких пленках (Ali, 2004, Craster, 2009), вопросы управления массопереносом рассмотрены (Krishnamurthy, 2006, Cheng, 2009). Также отметим отечественные публикации, имеющие отношение к обсуждаемой теме (Рудяк, 2009, Фокин, 2009, Turanov, 2009, Bardakhanov, 2009, Bozhko, 2009). Много других ссылок можно получить из многочисленных обзоров, цитируемых в настоящей работе (Eastman, 2004, Phelan, 2005, Peterson, 2006, Das, Choi, 2007, Wang, 2007, 2008, Schoch, 2008, Yu, 2008, Chandrasekar, 2009, Chen, 2009, Cheng, 2009, Choi, 2009, Craster, 2009, Какас, 2009). В процессе обсуждения и написания настоящей статьи постоянно появлялись новые данные, и это не удивительно, т. к. данное направление развивается чрезвычайно бурно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С учетом того, что использование наночастиц может существенно повышать теплопроводность базовой жидкости, имеет хорошие перспективы метод интенсификации теплоотдачи за счет использования стабильных наножидкостей с высокой теплопроводностью.

2. Большинство известных наносuspензий не имеет реологических свойств, однако определение эффективной вязкости таких сред, в основном, происходит опытным путем. Наблюдается незначительное влияние добавки наночастиц на увеличение гидравлического сопротивления наножидкости: так, увеличение объемной концентрации до 4 % приводит к увеличению трения на стенке на 1–3 %. Во многих опытах при низкой концентрации частиц (10^{-3} – 10^{-2} %), когда есть существенная интенсификация теплообмена, изменение трения на стенке лежит в пределах погрешности эксперимента.

3. Как при ламинарном, так и при турбулентном режимах течения зафиксирована интенсификация теплообмена при вынужденной конвекции для различного состава наножидкостей. При вынужденном течении наножидкости в каналах увеличение теплопроводности не всегда является основным фактором, определяющим повышение теплоотдачи.

4. В случае естественной конвекции, в отличие от вынужденной, существует противоречие между опытными данными разных авторов, и вопрос о повышении или снижении теплообмена при добавке наночастиц остается открытым и требует дальнейших исследований.

5. Для теплообмена при кипении наножидкостей существует две группы опытных данных. При малой добавке наночастиц характерно повышение уровня теплообмена на 20–40 %, при более высоких концентрациях получено снижение теплообмена на 10–30 %. Данные по критическому тепловому потоку хорошо коррелируют между собой, во всех опытах наблюдается повышение критического теплового потока в наножидкостях, причем максимальное увеличение составляет 300–450 %.

6. Проведенный обзор показал, что даже для одинакового состава наножидкостей получаются разные данные, порой противоречивые. Это объясняется многофакторностью и сложностью рассматриваемой проблемы. Все это требует дальнейших комплексных исследований гидродинамики и теплопереноса в наножидкостях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. (Idelchik I.E. Handbook of hydraulic resistance. Washington. Hemisphere, 1986.).
- Рудяк В.Я., Белкин А.А., Егоров В.В.** Об эффективной вязкости наносuspензий // ЖТФ. 2009. Т. 79, вып. 8. С. 18–25. (Rudyak V.Y., Belkin A.A., Egorov V.V. On the effective viscosity of nanosuspensions // Tech. Phys. 2009. Vol. 54, No. 8. P. 1102–1109.).
- Фокин Б.С., Беленький М.Я., Альмяшев В.И. и др.** Критический тепловой поток при кипении водной дисперсии наночастиц // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, вып. 10. С. 1–5.
- Abu-Nada E.** Application of nanofluids for heat transfer enhancement of separated flows encountered in a backward facing step // Inter. J. Heat Fluid Flow. 2008. Vol. 29. P. 242–249.
- Ali A., Vafai K., Khaled A.R.A.** Analysis of heat and mass transfer between air and falling film in a cross flow configuration // Inter. J. Heat Mass Tran. 2004. Vol. 47. P. 743–755.
- Aminossadati S.M., Ghasemi B.** Natural convection cooling of a localised heat source at the bottom of a nanofluid-filled enclosure // Eur. J. Mech. B-Fluid. 2009. Vol. 28. P. 630–640.
- Anoop K.B., Sundararajan T., Das S.K.** Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region // Inter. J. Heat Mass Tran. 2009. Vol. 52. P. 2189–2195.
- Bang I.C., Chang S.H.** Boiling heat transfer performance and phenomena of Al_2O_3 -water nano-fluids from a plain surface in a pool // Inter. J. Heat Mass Tran. 2005. Vol. 48. P. 2407–2419.
- Bardakhanov S.P., Joo S.W.** Hot-wire anemometry for velocity measurements in nanopowder flows // J. Fluid Engng. 2009. Vol. 131. 034501. 4 p.
- Beskok A., Karniadakis G.E.** A model for flows in channels, pipes, and ducts at micro and nano scales // Microscale Therm. Engng. 1999. Vol. 3. P. 43–77.
- Bozhko A., Putin G.** Thermomagnetic convection as a tool for heat and mass transfer control in nanosize materials under microgravity conditions // Microgravity Sci. Technol. 2009. Vol. 21. P. 89–93.
- Buongiorno J.** Convective transport in nanofluids // J. Heat Transfer. 2006. V. 128. P. 240–250.
- Chandrasekar M., Suresh S.** A review on the mechanisms of heat transfer in nanofluids // Heat Transfer Engng. 2009. Vol. 30, No. 14. P. 1136–1150.
- Chen H., Ding Y.** Heat transfer and rheological behaviour of nanofluids a review // Advances in Transport Phenomena. Springer-Verlag. 2009. Vol. 1. P.135–177.
- Chen H.S., Ding Y.L., Tan C.Q.** Rheological behaviour of nanofluids // New J. Phys. 2007. Vol. 9. No. 367. 25 p.
- Cheng P., Choi S., Jaluria Y., et al.** Special issue on micro/nanoscale heat transfer — Part I // J. Heat Transfer. 2009. Vol. 131, No. 3. 030301. 1 p.
- Choi S.U.S.** Nanofluids: from vision to reality through research // J. Heat Transfer. 2009. Vol. 131. 033106. 9 p.
- Craster R.V., Matar O.K.** Dynamics and stability of thin liquid films // Rev. Mod. Phys. 2009. Vol. 81. P. 1131–1198.
- Das S.K., Choi S.U.S., Yu W., Pradeep T.** Nanofluids science and technology. Wiley-Interscience, New Jersey. 2007. 397 p.
- Das S.K., Putra N., Roetzel W.** Pool boiling characteristics of nano-fluids // Inter. J. Heat Mass Tran. 2003,a. Vol. 46. P. 851–862.
- Das S.K., Putra N., Roetzel W.** Pool boiling of nano-fluids on horizontal narrow tubes // Inter. J. Multiphas. Flow. 2003,b. Vol. 29. P. 1237–1247.
- Ding Y., Chen H., Wang L., et al.** Heat transfer intensification using nanofluids // KONA. 2007. No. 25. P. 23–36.
- Ding Y.L., Wen D.** Particle migration in a flow of nanoparticle suspensions // Powder Technol. 2005. Vol. 149. P. 84–92.
- Ding Y.L., Alias H., Wen D.S., et al.** Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids) // Inter. J. Heat Mass Tran. 2006. Vol. 49. P. 240–250.
- Dittus F., Boelter L.** Heat transfer in automobile radiators of the tubular type // Univ. of California Publ. in Engng. 1930. Vol. 2. P. 443–461.
- Donzelli G., Cerbino R., Vailati A.** Bistable heat transfer in a nanofluid // Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 102. 104503. 4 p.
- Eastman J.A., Phillpot S.R., Choi S.U.S., Keblinski P.** Thermal transport in nanofluids // Annu. Rev. Mater. Res. 2004. Vol. 34. P. 219–246.
- Fokin B.S., Belenkiy M.Y., Almjashev V.I., et al.** Critical heat flux in a boiling aqueous dispersion of nanoparticles // Tech. Phys. Lett. 2009. Vol. 35, No. 5. P. 440–442.)
- Frank M., Anderson D., Weeks E.R. et al.** Particle migration in pressure-driven flow of a Brownian suspension // J. Fluid Mech. 2003. Vol. 493. P. 363–378.

- He Y.R., Jin Y., Chen H.S., et al.** Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe // *Inter. J. Heat Mass Tran.* 2007. Vol. 50. P. 2272–2281.
- Heris S.Z., Etemad S.G., Esfahany M.N.** Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer // *Inter. Commun. Heat Mass Trans.* 2006. Vol. 33. P. 529–535.
- Hwang K.S., Lee J.H., Jang S.P.** Buoyancy-driven heat transfer of water-based Al₂O₃ nanofluids in a rectangular cavity // *Inter. J. Heat Mass Tran.* 2007. Vol. 50. P. 4003–4010.
- Jung J.Y., Oh H.S., Kwak H.Y.** Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels // *Inter. J. Heat Mass Tran.* 2009. Vol. 52. P. 466–472.
- Kakac S., Pramuanjaroenkij A.** Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids // *Inter. J. Heat Mass Tran.* 2009. Vol. 52. P. 3187–3196.
- Kang C., Okada M., Hattori A., Oyama K.** Natural convection of water–fine particle suspension in a rectangular vessel heated and cooled from opposing vertical walls // *Inter. J. Heat Mass Tran.* 2001. Vol. 44. P. 2973–2982.
- Khanafar K., Vafai K., Lightstone M.** Buoyancy driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids // *Inter. J. Heat Mass Tran.* 2003. Vol. 46. P. 3639–3653.
- Kim J., Kang Y.T., Choi C.K.** Analysis of convective instability and heat transfer characteristics of nanofluids // *Phys. Fluids.* 2004. Vol. 16. P. 2395–2401.
- Ko G.H., Heo K., Lee K. et al.** An experimental study on the pressure drop of nanofluids containing carbon nanotubes in a horizontal tube // *Inter. J. Heat Mass Tran.* 2007. Vol. 50. P. 4749–4753.
- Krishnamurthy S., Lhattacharya P., Phelan .PE. et al.** Enhanced mass transport in nanofluids // *Nano Lett.* 2006. Vol. 6. P. 419–423.
- Kwak K., Kim C.** Viscosity and thermal conductivity of copper oxide nanofluid dispersed in ethylene glycol // *Korea-Australia Rheol. J.* 2005. Vol. 17. P. 35–40.
- Li Q., Xuan Y., Jiang J., et al.** Experimental investigation on flow and convective heat transfer feature of a nanofluid for aerospace thermal management // *J. Astronaut.* 2005. Vol. 26. P. 391–394.
- Liao L., Liu Z.H.** Forced convective flow drag and heat transfer characteristics of carbon nanotube suspensions in a horizontal small tube // *Heat Mass Transfer.* 2009. Vol. 45. P. 1129–1136.
- Liu Z.H., Qiu Y.H.** Boiling heat transfer characteristics of nanofluids jet impingement on a plate surface // *Heat Mass Transfer.* 2007. Vol. 43. P. 699–706.
- Maiga S.E., Nguen C.T., Galanis N., et al.** Heat transfer enhancement in turbulent tube flow using Al₂O₃ nanoparticle suspension // *Inter. J. Num. Method. Heat Fluid Flow.* 2006. Vol. 16. P. 275–292.
- Merhi D., Lemaire E., Bossis G., et al.** Particle migration in a concentrated suspension flowing between rotating parallel plates: Investigation of diffusion flux coefficients // *J. Rheol.* 2005. Vol. 49. P. 1429–1448.
- Milanova D., Kumar R.** Role of ions in pool boiling heat transfer of pure and silica nanofluids // *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 87. 233107. 3 p.
- Namburu P.K., Kulkarni D.P., Misra D., et al.** Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2007. Vol. 32. P. 397–402.
- Nanna A.G.A., Fistrovich T., Malinski K., et al.** Thermal transport phenomena in buoyancy-driven nanofluids // *Proc. 2005 ASME Int. Mech. Engng. Cong., 15-17 November 2004, Anaheim, California, USA.* 2005.
- Okada M., Suzuki T.** Natural convection of water-fine particle suspension in a rectangular cell // *Int. J. Heat Mass Tran.* 1997. Vol. 40. P. 3201–3208.
- Pak B., Cho Y.I.** Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particle // *Exp. Heat Transfer.* 1998. Vol. 11. P. 151–170.
- Peterson G.P., Li C.H.** Heat and mass transfer in fluids with nanoparticle suspensions // *Adv. Heat Transfer.* 2006. Vol. 39. P. 257–376.
- Phelan P.E., Bhattacharya P., Prasher R.S.** Nanofluids for heat transfer applications // *Annu. Rev. Heat Transfer.* 2005. Vol. 14. P. 255–275.
- Phillips R.J., Armstrong R.C., Brown R.A., et al.** A constitutive equation for concentrated suspensions that accounts for shear-induced particle migration // *Phys. Fluids.* 1992. Vol. 4. P. 30–40.
- Prasher R., Song D., Wang J.** Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 89. 133108. 3 p.
- Putra N., Roetzel W., Das S.K.** Natural convection of nano-fluids // *Heat Mass Transfer.* 2003. Vol. 39. P. 775–784.
- Schoch R.B., Han J.Y., Renaud P.** Transport phenomena in nanofluidics // *Rev. Mod. Phys.* 2008. Vol. 80. P. 839–883.
- Serre E., Bontoux P.** Vortex breakdown in a cylinder with a rotating bottom and a flat stress-free surface // *Inter. J. Heat Fluid Flow.* 2007. Vol. 28. P. 229–248.
- Teo C.J., Khoo B.C.** Analysis of Stokes flow in microchannels with superhydrophobic surfaces containing a periodic array of micro-grooves // *Microfluid. Nanofluid.* 2009. Vol. 7. P. 353–382.
- Turanov A.N., Tolmachev Y.V.** Heat- and mass-transport in aqueous silica nanofluids // *Heat Mass Transfer.* 2009. Vol. 45. P. 1583–1588.

- Tzou D.Y.** Thermal instability of nanofluids in natural convection // *Inter. J. Heat Mass Tran.* 2008. Vol. 51. P. 2967–2979.
- Vassallo P., Kumar R., D’Amico S.** Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nano-fluids // *Inter. J. Heat Mass Tran.* 2004. Vol. 47. P. 407–411.
- Wang B.X., Zhou L.P., Peng X.F.** Viscosity, thermal diffusivity and Prandtl number of nanoparticle suspensions // *Prog. Nat. Sci.* 2004. Vol. 14. P. 922–926.
- Wang X., Xu X., Choi S.U.S.** Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture // *J. Thermophys. Heat Trans.* 1999. Vol. 13, No. 4. P. 474–480.
- Wang X.Q., Mujumdar A.S.** Heat transfer characteristics of nanofluids: a review // *Inter. J. Therm. Sci.* 2007. Vol. 46. P. 1–19.
- Wang X.Q., Mujumdar A.S.** A review on nanofluids // *Brazil. J. Chem. Eng.* 2008. Vol. 25. P. 613–648.
- Wen D.S., Ding Y.L.** Experiment investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. // *Inter. J. Heat Mass Tran.* 2004. Vol. 47. P. 5181–5188.
- Wen D.S., Ding Y.L.** Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based γ -alumina nanofluids // *J. Nanopart. Res.* 2005,a. Vol. 7. P. 265–274.
- Wen D.S., Ding Y.L.** Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications // *Inter. J. Heat Fluid Flow.* 2005,b. Vol. 26. P. 855–864.
- Wen D.S., Ding Y.L.** Natural convective heat transfer of suspensions of TiO_2 nanoparticles (nanofluids) // *Trans. IEEE Nanotechnol.* 2006. No. 5. P. 220–227.
- Williams W., Buongiorno J., Hu L.W.** Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water and zirconia/water nanoparticle colloids (nanofluids) in horizontal tubes // *J. Heat Transfer.* 2008. Vol. 130. 042412.
- Wu X.Y., Wu H.Y., Cheng P.** Pressure drop and heat transfer of Al_2O_3 - H_2O nanofluids through silicon microchannels // *J. Micromech. Microeng.* 2009. Vol. 19. 105020.
- Xuan Y., Li Q.** Flow and heat transfer performances of nanofluids inside small hydraulic diameter flat tube // *J. Eng. Thermophys.* 2004. Vol. 25, No. 2. P. 305–307.
- Xuan Y., Li Q.** Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids. // *J. Heat Transfer.* 2003. Vol. 125. P. 151–155.
- Xuan Y., Roetzel W.** Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids // *Inter. J. Heat Mass Tran.* 2000. Vol. 43. P. 3701–3707.
- Yang Y., Zhang Z.G., Grulke E.A., et al.** Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow // *Inter. J. Heat Mass Tran.* 2005. Vol. 48. P. 1107–1116.
- You S.M., Kim J.H., Kim K.H.** Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer // *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 83. P. 3374–3376.
- Yu W.H., France D.M., Routbort J.L., et al.** Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements // *Heat Transfer Engng.* 2008. Vol. 29, No. 5. P. 432–460.
- Zhang K., Park B.J., Fang F.F., et al.** Sonochemical preparation of polymer nanocomposites // *Molecules.* 2009. Vol. 14. P. 2095–2110.

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2009 г.