



УТВЕРЖДАЮ

Ректор

ФГБОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»

М.В. Румянцев

06 2021г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

Диссертация на соискание степени доктора физико-математических наук «Изучение многофазных потоков в микроканалах и теплофизических характеристик наножидкостей» выполнена в ФГБОУ ВО СФУ. В период подготовки диссертации с 2009 по 2021 гг. соискатель Минаков Андрей Викторович работал в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет», Институт инженерной физики и радиоэлектроники, кафедра теплофизики, доцент. В 2005 г. с отличием окончил Красноярский государственный технический университет по направлению «Техническая физика». В 2008 г. после окончания аспирантуры СФУ защитил диссертацию кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». В период с 2013 по 2016 гг. проходил обучение в докторантуре СФУ. Научным консультантом по работе является доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» Рудяк Валерий Яковлевич.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность работы обусловлена бурным развитием микрофлюидных технологий и методов интенсификации теплообмена для охлаждения различного электронного оборудования. В настоящее время значительная часть микросистемного оборудования так или иначе связана с течениями жидкостей и газов в микроканалах. В связи с этим возникло новое междисциплинарное научное направление – микрофлюидика, описывающее поведение течений в микроканалах. На основе микрофлюидики было разработано множество новых устройств и технологий, превосходящих свои макроскопические аналоги. Однако, несмотря

на большое число работ, посвященных изучению течений в микроканальных устройствах, систематических данных об имеющих здесь место режимах течения и факторах, влияющих на них, все еще недостаточно. Еще одной важной проблемой, связанной с развитием микро- и нанoeлектроники, является проблема интенсификации теплообмена для охлаждения различного радиоэлектронного оборудования. Уже сегодня тепловые потоки в горячих точках оборудования приближаются к 1000 Вт/см^2 . Проблема теплоотвода является одной из ключевых в современной электронике, и от ее решения во многом зависит дальнейший рост производительности микропроцессоров. В связи с этим большие надежды в области интенсификации теплообмена возлагаются на применение наножидкостей. Исследование свойств и применения наножидкостей в различных приложениях стало одним из ключевых трендов в науке двух последних десятилетий. Однако, несмотря на огромное число работ в этой области, теплофизические свойства наножидкостей и характеристики их течений все еще до конца не изучены. Помимо большой практической значимости, микроканальные течения и течения наножидкостей представляют значительный интерес и для фундаментальной науки. Для механики жидкости и газов этот интерес обусловлен прежде всего широким многообразием несвойственных для каналов большого диаметра режимов течения, которые могут реализоваться в микроканалах, а также влиянием на характеристики течения наножидкостей не только концентрации, но и размера, и материала наночастиц, что не характерно для классических течений суспензий с крупнодисперсными частицами. Таким образом, тематика диссертации чрезвычайно актуальна не только с практической точки зрения, но и для развития фундаментальной науки.

Целью диссертационной работы является систематическое моделирование и изучение течений и теплообмена многофазных потоков в мини- и микроканалах, а также экспериментальное изучение коэффициентов переноса и теплообмена наножидкостей.

Для достижения этой цели автором были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработка и тестирование численной методики моделирования течений и теплообмена одно- и многофазных потоков в микроканалах с учетом межфазного натяжения и динамического контактного угла.
2. Изучение режимов течений и оптимизация течений в микромиксерах.
3. Исследование двухфазных и двухжидкостных течений в микроканалах.
4. Экспериментальное изучение вязкости и теплопроводности наножидкостей.
5. Разработка и тестирование математических моделей течений и теплообмена наножидкостей.
6. Исследование конвективного теплообмена при течении наножидкостей в круглых каналах.
7. Изучение кризиса кипения наножидкостей.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые с помощью численного моделирования изучены основные режимы течения в типичных микромиксерах, установлены факторы, влияющие на эти режимы, и сформулированы критерии оптимизации их работы.
2. Численная методика расчета двухфазных и двухжидкостных течений в микроканалах с учетом межфазного натяжения и динамического контактного угла.
3. Исследованы и установлены механизмы повышения коэффициента извлечения нефти при ее вытеснении наножидкостью из микропористой среды.
4. Экспериментально показано, что вязкость наножидкостей зависит от материала наночастиц.
6. Показано, что переход от ньютоновской реологии к неньютоновской в наножидкостях может происходить не только при увеличении концентрации наночастиц, как это имеет место для крупнодисперсных суспензий, но и при уменьшении средних размеров наночастиц.
7. Экспериментально установлена зависимость коэффициента теплопроводности наножидкости от плотности материала наночастиц. Показано, что при одинаковой концентрации и размере наночастиц коэффициент теплопроводности наножидкости возрастает пропорционально плотности материала наночастиц.
8. Установлена зависимость коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции наножидкостей в ламинарном и турбулентном режимах течения от размера наночастиц и реологии наножидкостей.
9. Экспериментально показано, что ламинарно-турбулентный переход в наножидкостях происходит при меньших числах Рейнольдса, чем в базовой жидкости, а критические числа Рейнольдса падают с уменьшением размера наночастиц.
10. Математическая модель теплообмена наножидкостей с учетом их реологии и термодиффузии частиц.
11. Обнаружено, что критическая плотность теплового потока при кипении наножидкостей зависит от длительности процесса кипячения, и установлены физические механизмы этого влияния.

Теоретическая и практическая значимость результатов. Полученные новые знания расширяют представление о режимах многофазных течений в наиболее распространенных микромиксерах и факторах, влияющих на эти режимы, а также о механизмах влияния добавки наночастиц различного размера и состава на характеристики течений и тепломассообмена наножидкостей. Для практики высокой значимостью обладают сформулированные в диссертации рекомендации по управлению эффективностью перемешивания жидкостей в микрофлюидных миксерах, рекомендации по управлению характеристиками течения и теплообмена наножидкостей, которые могут быть использованы для повышения

эффективности теплообменного оборудования. Результаты исследования процесса вытеснения нефти с помощью наножидкости могут быть использованы для интенсификации нефтеотдачи. Разработанные в работе математические модели и численные методики могут найти применение при исследовании и оптимизации многофазных потоков, включая наножидкости, в различных микрофлюидных и теплообменных устройствах.

На защиту выносятся следующие положения:

- Установленные с помощью численного моделирования режимы течения в наиболее распространенных микромиксерах и факторы, влияющие на эти режимы.
- Численная методика моделирования двухфазных и двухжидкостных потоков в микроканалах с учетом межфазного натяжения и динамического контактного угла.
- Установленные механизмы повышения коэффициента извлечения нефти при ее вытеснении наножидкостью из микропористой среды.
- Экспериментальные данные по реологическому поведению и коэффициентам вязкости и теплопроводности нескольких десятков наножидкостей.
- Экспериментальные корреляции для коэффициентов вязкости и теплопроводности наножидкостей.
- Данные о характеристиках теплообмена и ламинарно-турбулентном переходе при течении наножидкостей в круглых каналах.
- Математическая модель для описания течений и теплообмена наножидкостей с учетом их реологии и термодиффузии частиц на основе экспериментально измеренных коэффициентов переноса.
- Экспериментально установленные зависимости КТП при кипении наножидкостей на цилиндрических нагревателях от концентрации, размера и материала частиц, диаметра нагревателя, длительности процесса кипячения, добавок ПАВ и полимеров.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных экспериментальных и численных методов исследования, а также систематическим сопоставлением полученных результатов с известными аналитическими решениями, экспериментальными данными и результатами расчетов других авторов.

Личный вклад автора. Научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены автором лично. Выбор направлений исследований осуществлялся как лично диссертантом, так и совместно с научным консультантом профессором В. Я. Рудяком. Часть экспериментальных исследований вынужденной конвекции наножидкостей проводилось совместно с Д. В. Гузей под руководством автора настоящей диссертации. Часть экспериментальных исследований вязкости и теплопроводности наножидкостей с оксидными наночастицами проводилось совместно с М. И. Пряжниковым под руководством автора

настоящей диссертации. Часть расчетных исследований по моделированию однофазных течений в Т-образном микроканале выполнена совместно с А. С. Лобасовым также под научным руководством автора диссертации.

Результаты диссертационной работы в полном объеме опубликованы в 48 рецензируемых российских и международных изданиях, трех монографиях и представлены на более чем 35 всероссийских и международных конференциях и семинарах.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации.

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Гаврилов А. А., Дектерев А. А. Моделирование течений в микромиксерах // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17. – № 4. – С. 601–612.
2. Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Gavrilov A. A., Dekterev A. A. On Optimization of Mixing Process of Liquids in Microchannels // Журнал СФУ, серия: математика и физика. – 2010. – Т. 3. – № 2. – С. 146–156.
3. Минаков А. В., Рудяк В. Я., Гаврилов А. А., Дектерев А. А. Смешение в микромиксере Т-типа при умеренных числах Рейнольдса // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19. – № 5. – С. 577–587.
4. Минаков А. В., Лобасов А. С., Дектерев А. А. Моделирование гидродинамики и конвективного теплообмена в микроканалах // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т. 5. – № 4. – С. 481–488.
5. Лобасов А. С., Минаков А. В. Компьютерное моделирование тепломассообменных процессов в микроканалах с использованием CFD-пакета SigmaFlow // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. – Т. 4. – № 4. – С. 781–792.
6. Минаков А. В., Ягодницына А. А., Лобасов А. С., Рудяк В. Я., Бильский А. В. Расчетно-экспериментальное исследование перемешивания жидкостей в Т-образном микроканале // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – Т. 152. – № 3. – С. 18–21.
7. Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Dekterev A. A., Gavrilov A. A. Investigation of slip boundary conditions in the T-shaped microchannel // Int. J. Heat Fluid Flow. – 2013. – Vol. 43. – P. 161–169.
8. Minakov A. V., Yagodnitsina A. A., Lobasov A. S., Rudyak V. Ya., Bilsky A. V. Study of fluid flow in micromixer with symmetrical and asymmetrical inlet conditions // La Houille Blanche. – 2013. – № 5. – P. 12–21.
9. Minakov A. V., Yagodnitsina A. A., Lobasov A. S., Rudyak V. Y., Bilsky A. V. Micro-LIF and Numerical Investigation of Mixing in Microchannel // Журнал СФУ, серия: техника и технологии. – 2013. – Т. 6. – № 1. – С. 15–27.

10. Минаков А. В., Лобасов А. С., Рудяк В. Я., Пряжников М. И. Расчетное исследование вынужденной конвекции наножидкости на основе наночастиц Al_2O_3 // Тепловые процессы в технике. – 2013. – Т. 5. – № 5. – С. 194–200.
11. Rudyak V. Ya., Minakov A. V. Modeling and optimization of Y-type micromixers // Micromachines. – 2014. – Vol. 5. – № 4. – P. 886–912.
12. Минаков А. В. Численный алгоритм решения задач гидродинамики с подвижными границами и его тестирование // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2014. – Т. 54. – № 10. – С. 1618–1629.
13. Минаков А. В., Лобасов А. С., Рудяк В. Я., Гузей Д. В., Пряжников М. И. Измерение критической плотности теплового потока при кипении наножидкостей на цилиндрическом нагревателе // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40. – № 13. – С. 44–51.
14. Минаков А. В., Гузей Д. В., Дектерев Д. А., Лобасов А. С., Пряжников М. И. Расчетно-экспериментальное исследование вынужденной конвекции наножидкости на основе оксида алюминия в прямоточном теплообменнике // Журнал СФУ, серия: техника и технологии. – 2014. – Т. 7. – С. 32–47.
15. Ryzhkov I. I., Minakov A. V. The effect of nanoparticle diffusion and thermophoresis on convective heat transfer of nanofluid in a circular tube // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol. 77. – P. 956–969.
16. Minakov A. V., Lobasov A. S., Pryazhnikov M. I., Guzei D. V. Experiment-calculated investigation of the forced convection of nanofluids using single fluid approach // Defect Diffusion Forum. – 2014. – Vol. 348. – P. 123–138.
17. Минаков А. В., Рудяк В. Я., Гузей Д. В., Лобасов А. С. Измерение коэффициента теплоотдачи наножидкости на основе воды и частиц оксида меди в цилиндрическом канале // Теплофизика высоких температур. – 2015. – Т. 53. – № 2. – С. 256–264.
18. 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. – 2015. – Vol. 88. – P. 140–148.
19. Пряжников М. И., Минаков А. В., Рудяк В. Я. Влияние диаметра, материала наночастиц и размера нагревателя на критическую плотность теплового потока при кипении наножидкостей // Письма в Журнал технической физики. – 2015. – Т. 41. – № 18. – С. 53–59.
20. Гузей Д. В., Минаков А. В., Пряжников М. И., Дектерев А. А. Численное моделирование газожидкостных потоков в мини и микроканалах // Теплофизика и аэромеханика. – 2015. – Т. 1. – С. 61–72.

21. Минаков А. В., Гузей Д. В., Жигарев В. А. Турбулентная вынужденная конвекция наножидкостей в круглом канале // Ученые записки Казанского университета, серия: Физико-математические науки. – 2015. – Т. 157. – № 3. – С. 85–96.
22. Минаков А. В., Рудяк В. Я., Гузей Д. В., Пряжников М. И., Лобасов А. С. Измерение коэффициента теплопроводности наножидкостей методом нагреваемой нити // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88. – № 1. – С. 148–160.
23. Лобасов А. С., Минаков А. В., Рудяк В. Я. Влияние вязкости на режимы течения в микромиксере Т-типа // Известия РАН: механика жидкости и газа. – 2016. – № 3. – С. 89–98.
24. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Гузей Д. В., Жигарев В. А., Пряжников М. И. О ламинарно-турбулентном переходе в течениях наножидкостей // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23. – № 5. – С. 807–810.
25. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Краснолуцкий С. Л. Физика и механика процессов теплообмена в течениях наножидкостей // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19. – № 1. – С. 75–83.
26. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Пряжников М. И. Теплофизические свойства наножидкостей и критерии подобия // Письма в Журнал технической физики. – 2016. – Т. 42. – С. 9–16.
27. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Сметанина М. С., Пряжников М. И. Экспериментальные данные о зависимости вязкости наножидкостей на основе воды и этиленгликоля от размера и материала частиц // Доклады академии наук. – 2016. – Т. 467. – № 3. – С. 289–291.
28. Minakov A. V., Guzei D. V., Pryazhnikov M. I., Zhigarev V. A., Rudyak V. Ya. Study of turbulent heat transfer of the nanofluids in a cylindrical channel // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 102. – P. 745–755.
29. Minakov A. V., Guzei D. V., Meshkov K. N., Popov I. A., Shchelchikov A. V. Experimental study of turbulent forced convection of nanofluid in channels with cylindrical and spherical hollows // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 115. – P. 915–925.
30. Минаков А. В., Шебелева А. А., Ягодницына А. А., Ковалев А. В., Бильский А. В. Расчетно-экспериментальное исследование снарядного режима течения смеси касторового и парафинового масел в микроканале Т-типа // Письма в Журнал технической физики. – 2017. – Т. 43. – № 18. – С. 82–89.
31. Пузырь А. П., Минаков А. В., Буров А. Е., Жарков С. М., Максимов Н. Г., Пряжников М. И. Влияние электролитически введенных ионов серебра на вязкость и теплопроводность коллоидного раствора наноалмаза // Коллоидный журнал. – 2017. – Т. 79. – № 2. – С. 206–211.

32. Pryazhnikov M. I., Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Guzei D. V. Thermal conductivity measurements of nanofluids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 104. – P. 1275–1282.
33. Minakov A. V., Pryazhnikov M. I., Guzei D. V., Zeer G. M., Rudyak V. Ya. The experimental study of nanofluids boiling crisis on cylindrical heaters // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2017. – Vol. 116. – P. 214–223.
34. Лобасов А. С., Минаков А. В., Рудяк В. Я. Изучение режимов смешения жидкости и наножидкости в Т-образном микромиксере // *Инженерно-физический журнал*. – 2018. – Т. 91. – № 1. – С. 133–145.
35. Lobasov A. S., Minakov A. V. Analyzing mixing quality in a T-shaped micromixer for different fluids properties through numerical simulation // *Chemical engineering and processing*. – 2018. – Vol. 124. – P. 11–23.
36. Lobasov A. S., Minakov A. V., Kuznetsov V. V., Rudyak V. Y., Shebeleva A. A. Investigation of mixing efficiency and pressure drop in T-shaped micromixers // *Chemical engineering and processing*. – 2018. – Vol. 134. – P. 105–114.
37. Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Pryazhnikov M. I. Rheological behavior of water and ethylene glycol based nanofluids containing oxide nanoparticles // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2018. – Vol. 554. – P. 279–285.
38. Rudyak V. Y., Minakov A. V. Thermophysical properties of nanofluids // *The European Physical Journal E*. – 2018. – Vol. 41. – № 15. – URL: <https://doi.org/10.1140/epje/i2018-11616-9>.
39. Минаков А. В., Михиенкова Е. И., Неверов А. Л., Бурюкин Ф. А. Экспериментальное исследование влияния добавки наночастиц на реологические свойства суспензии // *Письма в ЖТФ*. – 2018. – Т. 44. – № 9. – С. 3–11.
40. Лобасов А. С., Шебелева А. А., Минаков А. В. Изучение режимов смешения воды и этанола в Т-образных микромиксерах // *Журнал СФУ, серия: математика и физика*. – 2019. – Т. 12. – № 2. – С. 202–212.
41. Minakov A. V., Shebeleva A. A., Yagodnitsyna A. A., Kovalev A. V., Bilsky A. V. Flow Regimes of Viscous Immiscible Liquids in T-Type Microchannels // *Chemical Engineering and Technology*. – 2019. – Vol. 42. – № 5. – P. 1037–1044.
42. Guzei D. V., Minakov A. V., Rudyak V. Ya. On efficiency of convective heat transfer of nanofluids in laminar flow regime // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – Vol. 139. – P. 180–192.
43. Минаков А. В., Гузей Д. В., Жигарев В. А., Пряхников М. И., Шебелева А. А. Экспериментальное исследование транспорта магнитных наночастиц в круглом миниканале в

постоянном магнитном поле // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92. – № 5. – С. 2277–2285.

44. Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Pryazhnikov M. I. Systematic Experimental Study of the Viscosity of Nanofluids // Heat Transfer Engineering. – 2020. – Vol. 41. – No. 5. – P. 457–460.

45. Minakov A. V., Pryazhnikov M. I., Suleymana Y. N., Meshkova V. D. An experimental study of the effect of the addition of silicon oxide nanoparticles on the wettability characteristics of rocks with respect to oil // Technical Physics Letter. – 2020. – Vol. 46. – No. 2. – P. 1238–1240.

46. Minakov A. V., Pryazhnikov M. I., Suleymana Y. N., Meshkova V. D., Guzei D. V. Experimental study of nanoparticle size and material effect on the oil wettability characteristics of various rock types // Journal of Molecular Liquids. – 2020. – V. 321. – No. 114906. – 10 p.

47. Minakov A. V., Lobasov A. S., Shebeleva A. A., Shebelev A. V. Analysis of Hydraulic Mixing Efficiency in Widespread Models of Micromixers // Fluids. – 2020. – Vol. 5(4). – No. 211. – URL: <https://doi.org/10.3390/fluids5040211>

48. Minakov A. V., Pryazhnikov M. I., Zhigarev V. A., Rudyak V. Y., Filimonov S. A. Numerical Study of the Mechanisms of Enhanced Oil Recovery Using Nanosuspensions // Theor. Comput. Fluid Dyn. – 2021. – URL: <https://doi.org/10.1007/s00162-021-00569-9>

Монографии:

1. Рудяк В. Я., Анискин В. М., Кузнецов В. В., Маслов А. А., Минаков А. В., Миронов С. Г. Моделирование микро- и нанотечений. – М.: НГАСУ, 2014. – 340 с.

2. Рудяк В. Я., Минаков А. В. Современные проблемы микро- и нанофлюидики. – М.: Наука, 2016. – 296 с.

3. Rudyak V. Ya., Aniskin V. M., Maslov A. A., Minakov A. V., Mironov S. G. Micro- and Nanoflows. Modeling and Experiments. Fluid Mechanics and its Applications. – Amsterdam: Springer Int. Publishing, 2018. – 241 p.

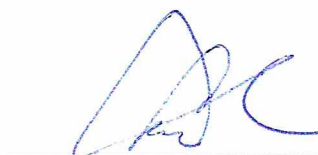
Соответствие содержания диссертации паспорту специальности.

Диссертация Минакова А. В. посвящена изучению многофазных потоков в микроканалах и теплофизических характеристик наножидкостей и соответствует паспорту специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» для физико-математических наук.

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация «Изучение многофазных потоков в микроканалах и теплофизических характеристик наножидкостей» Минакова Андрея Викторовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Заключение принято на заседании расширенного семинара кафедры теплофизики Института инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (СФУ). На заседании присутствовали 18 человек, в том числе 5 докторов наук и 10 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» – 18 человек, «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 7 от «31» мая 2021 года.



Председатель семинара кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой Теплофизики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

Дектерев Александр Анатольевич



Секретарь семинара кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Теплофизики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

Финников Константин Андреевич

