

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 28 декабря 2017 года публичной защиты диссертации Белкина Александра Анатольевича «Статистическая теория и моделирование процессов переноса в дисперсных жидкостях, включая наножидкости» по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Присутствовали 18 из 26 членов диссертационного совета, из них 6 докторов наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы:

1.	Христенко Юрий Федорович заместитель председателя диссертационного совета	д-р техн. наук	01.02.04
2.	Пикущак Елизавета Владимировна учёный секретарь диссертационного совета	канд. физ.-мат. наук	01.02.05
3.	Архипов Владимир Афанасьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
4.	Биматов Владимир Исмагилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
5.	Бубенчиков Алексей Михайлович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
6.	Бутов Владимир Григорьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
7.	Глазунов Анатолий Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
8.	Глазырин Виктор Парфирьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
9.	Зелепугин Сергей Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
10.	Крайнов Алексей Юрьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
11.	Люкшин Борис Александрович	д-р техн. наук	01.02.04
12.	Прокофьев Вадим Геннадьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
13.	Смоляков Виктор Кузьмич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
14.	Тимченко Сергей Викторович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
15.	Черепанов Олег Иванович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
16.	Шрагер Геннадий Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
17.	Шрагер Эрнст Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
18.	Якутенок Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05

**В связи с невозможностью присутствия на заседании председателя диссертационного совета, доктора физико-математических наук, профессора Гришина Анатолия Михайловича по его письменному поручению заседание провел заместитель председателя диссертационного совета, доктор технических наук, старший научный сотрудник Христенко Юрий Федорович.**

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить А. А. Белкину учёную степень доктора физико-математических наук.

**Заключение диссертационного совета Д 212.267.13,  
созданного на базе федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»  
Министерства образования и науки Российской Федерации,  
по диссертации на соискание ученой степени доктора наук  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_**

решение диссертационного совета от 28.12.2017 № 331

О присуждении **Белкину Александру Анатольевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация **«Статистическая теория и моделирование процессов переноса в дисперсных жидкостях, включая наножидкости»** по специальности **01.02.05** – Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 22.09.2017 (протокол заседания № 324) диссертационным советом **Д 212.267.13**, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012).

Соискатель **Белкин Александр Анатольевич**, 1969 года рождения.

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Статистическое описание процессов переноса в дисперсных средах» по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы защитил в 2002 году в диссертационном совете Томского государственного университета.

В 2007 году соискатель окончил докторантуру государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)».

Работает в должности доцента кафедры теоретической механики в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре теоретической механики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный консультант – доктор физико-математических наук, **Рудяк Валерий Яковлевич**, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)», кафедра теоретической механики, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

**Матвиенко Олег Викторович**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра теоретической механики, профессор

**Киселев Сергей Петрович**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория № 6 физики многофазных сред, ведущий научный сотрудник

**Кузнецов Гений Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кафедра теоретической и промышленной теплотехники, заведующий кафедрой

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Объединённый институт высоких температур Российской академии наук**, г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном **Стегайловым Владимиром Владимировичем** (доктор физико-математических наук, доцент, отдел компьютерной теплофизики, заведующий отделом), указала, что индустрия наносистем относится к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации, и актуальность темы

диссертации А. А. Белкина обусловлена интенсивным изучением свойств наножидкостей, перспективы применения которых связаны не только с их малой эрозионностью и седиментацией, но и с особыми свойствами переноса, которые не описываются классическими теориями, применяемыми для обычных дисперсных сред. В то же время получить достоверные экспериментальные результаты для наножидкостей непросто. Сегодня работы в данном предметном поле появляются достаточно интенсивно, и важно, что представленные в диссертации исследования стали одними из первых в мире. А. А. Белкиным разработана последовательная методика, включающая вывод уравнений переноса на основе развитой статистической теории и расчет методом молекулярной динамики коэффициентов переноса; впервые построены нелинейные уравнения гидромеханики для многожидкостного режима течения; установлена связь флуктуаций плотности и скорости в наножидкости с ее коэффициентами переноса; установлено, что сила сопротивления наночастиц в жидкостях не описывается законом Стокса, коэффициент диффузии – соотношением Эйнштейна–Стокса; показано, что коэффициенты вязкости и теплопроводности наножидкостей зависят от размера частиц и их материала; развита статистическая механика процессов переноса в стесненных условиях; проведен расчет эффективного коэффициента вязкости жидкостей в наноканале; показано, что вязкостью в наноканале можно управлять, меняя материал стенок канала. Теоретические положения автора можно квалифицировать как научное достижение в механике жидкости, газа и плазмы.

Соискатель имеет 68 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 35 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 18 работ (из них в зарубежных научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, опубликовано 4 работы; в российских научных журналах, переводные версии которых индексируются Web of Science, опубликовано 7 работ; в российских научных журналах, индексируемых Web of Science, Scopus и MathSciNet, опубликовано 7 работ), опубликована 1 коллективная монография, в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций и симпозиума опубликовано 13 работ, опубликовано 3 препринта. Общий объем работ – 26.73 п.л., авторский вклад – 9.46 п.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значительные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук:

1. Рудяк В. Я. К статистической теории процессов переноса наночастиц в газах и жидкостях (обзор) / В. Я. Рудяк, **А. А. Белкин**, С. Л. Краснолуцкий // Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – Т. 12, №. 4. – С. 525–544. – 1.19 / 0.39 п.л.

*Web of Science:* Rudyak V. Ya. The statistical theory of transport processes of nanoparticles in gases and liquids (review). (Russian. Russian summary) / V. Ya. Rudyak, **A. A. Belkin**, S. L. Krasnolutskiy // *Теплофизика и Аэромеханика*. – 2005. – Vol. 12, is. 4. – P. 525–544.

2. Рудяк В. Я. О коэффициенте теплопроводности наножидкостей / В. Я. Рудяк, **А. А. Белкин**, Е. А. Томилина // Письма в Журнал технической физики. – 2010. – Т. 36, вып. 14. – С. 49–54. – 0.38 / 0.13 п.л.

*в переводной версии журнала, индексируемой Web of Science:*

Rudyak V. Ya. On the Thermal Conductivity of Nanofluids / V. Ya. Rudyak, **A. A. Belkin**, E. A. Tomilina // *Technical Physics Letters*. – 2010. – Vol. 36, is. 7. – P. 660–662. – DOI: 10.1134/S1063785010070229

3. Rudyak V. Ya. Statistical mechanics of transport processes of fluids under confined conditions / V. Ya. Rudyak, **A. A. Belkin** // *Наносистемы : физика, химия, математика*. – 2015. – Т. 6, № 3. – С. 366–377. – DOI: 10.17586/2220-8054-2015-6-3-366-377. – 0.75 / 0.38 п.л.

*Web of Science:* Rudyak V. Statistical mechanics of transport processes of fluids under confined conditions / V. Rudyak, **A. Belkin** // *Nanosystems : physics, chemistry, mathematics*. – 2015. – Vol. 6, is. 3. – P. 305–453.

4. Рудяк В. Я. О коэффициенте теплопроводности наножидкостей / В. Я. Рудяк, **А. А. Белкин**, Е. А. Томилина // Письма в Журнал технической физики. – 2010. – Т. 36, вып. 14. – С. 49–54. – 0.38 / 0.13 п.л.

*в переводной версии журнала, индексируемой Web of Science:*

Rudyak V. Ya. On the Thermal Conductivity of Nanofluids / V. Ya. Rudyak, **A. A. Belkin**, E. A. Tomilina // Technical Physics Letters. – 2010. – Vol. 36, is. 7. – P. 660–662. – DOI: 10.1134/S1063785010070229

5. Рудяк В. Я. Моделирование течений в наноканалах методом молекулярной динамики / В. Я. Рудяк, **A. А. Белкин**, В. В. Егоров, Д. А. Иванов // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2011. – Т. 2, № 4. – С. 100–112. – 0.81 / 0.20 п.л.

*Web of Science:* Rudyak V. Ya. Simulation of flows in nanochannels by the molecular dynamics method / V. Ya. Rudyak, **A. A. Belkin**, V. V. Egorov, D. A. Ivanov // Nanosystems : physics, chemistry, mathematics. – Vol. 2, is. 4. – P. 366–377.

На автореферат поступило 11 положительных отзывов. Отзывы представили:

1. **Б. В. Бошнятов**, д-р. техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории физики химической механики перспективных технологий Института прикладной механики РАН, г. Москва, *с замечаниями:* имеются неточности в оформлении автореферата; в достоверности новых результатов больше убеждает их совпадение с классическими результатами в предельных случаях; обнаруженные зависимости коэффициентов переноса от размерных величин свидетельствуют скорее о наличии проблемы, чем о ее решении.
2. **К. П. Зольников**, д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник лаборатории компьютерного конструирования материалов Института физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, *с замечаниями:* в автореферате не указано, что качественно нового в изучении поведения наножидкостей могут дать непрерывные потенциалы; не учтено влияние реальных поверхностей и форм наночастиц на свойства наножидкостей и характеристики нанотечений.
3. **С. А. Кинеловский**, д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник лаборатории механики многофазных сред и кумуляции Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, *с замечаниями:* не приведены выражения для нескольких коэффициентов переноса, определяемых по второму и третьему приближениям неравновесной функции распределения; не обсуждается вопрос о применимости формулы Стокса для силы сопротивления для наночастицы, скорость которой при движении сильно меняется; отсутствуют оценки влияния

температуры (в частности, её снижения) на рассматриваемую модель процессов переноса в наножидкостях. 4. **В. А. Селезнев**, д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой инженерной математики Новосибирского государственного технического университета, *с замечаниями*: не показано различие характеристик моделируемой и реальной наножидкостей; желательно указывать более детальное разделение результатов авторов работ, полученных совместно с другими соавторами.

5. **Б. Р. Гельчинский**, д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией порошковых, композиционных и наноматериалов Института металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург, *с замечаниями*: не представлено сравнение результатов с аналогичными, полученными другими исследователями с использованием того же метода молекулярной динамики; не указано, что автор считал высотой наноканалов предельно малых размеров, и как определялась концентрация молекул.

6. **В. И. Терехов**, д-р. техн. наук, проф., заведующий отделом термогазодинамики Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, *с вопросами*: в чем заключается преимущество разрабатываемого пакета программ МД, названного SibMD и проводилось ли сопоставление с другими МД пакетами? каким образом верифицировались построенная теория и полученные уравнения гидромеханики, определяющие соотношения для многожидкостного режима течения дисперсных флюидов, и можно ли привести примеры реальных систем, представления о которых были расширены? и *с замечанием*: результаты молекулярно-динамического моделирования вязкости жидкости в наноканале могли бы быть подтверждены, например, моделированием течения Пуазейля в таком канале с последующим определением вязкости по гидравлическому сопротивлению канала.

7. **Т. А. Хантулева**, д-р. физ.-мат. наук, профессор кафедры физической механики Санкт-Петербургского государственного университета, *с замечаниями*: в автореферате отсутствуют уравнения переноса с учетом эффектов памяти и пространственной нелокальности; данные рисунка 5.5 описаны неверно.

8. **А. В. Номоев**, д-р. физ.-мат. наук, доц., доцент кафедры общей физики Бурятского государственного университета, г. Улан-Удэ, *с замечаниями*: в работе хотелось бы видеть данные, по крайней мере качественные, о влиянии на полученные результаты шероховатости поверхности в наноканале, ее дефектов; следовало бы оговорить, что

неоднозначный термин «флюид» в работе используется для обозначения газов, жидкостей, текучих сред. 9. **Т. Г. Елизарова**, д-р. физ.-мат. наук, главный научный сотрудник отдела 11 Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, г. Москва, *с вопросом*: следует ли считать опечаткой утверждения о том, что результаты первой главы и второй главы опубликованы только в двух работах [1, 31]? и *с замечанием*: уравнения переноса импульса для компонент смеси, приведенные в системе (1.3), выписаны в недивергентном виде, при этом не показаны преимущества для представленных далее исследований такого вида уравнений по сравнению с дивергентным, или потоковым видом уравнений. 10. **С. П. Бардаханов**, д-р. физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник лаборатории аэрофизических исследований дозвуковых течений Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, *с вопросом*: каковы числовые критерии, критерии подобия, и прочие, которые определяют основные трудности при разработке теоретических подходов к описанию процессов переноса в наножидкостях? и *с замечанием*: в автореферате присутствует только одно прямое сравнение с экспериментальными данными (по теплопроводности наножидкостей), поэтому возникает сомнение, насколько обоснованы полученные результаты сопоставлением с другими экспериментальными результатами. 11. **А. Г. Воронцов**, д-р. физ.-мат. наук, профессор кафедры компьютерного моделирования и нанотехнологий Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), г. Челябинск, *с замечаниями*: из автореферата непонятно, какие экспериментальные результаты удалось описать или что удалось предсказать при помощи разработанной аналитической теории; раздел «Основные научные положения, защищаемые автором» в основном содержит перечисление результатов работы, тогда как «положение» – это обобщение результатов, представленное как научное знание об исследуемом объекте; в разделе «Новизна научных положений» пункт 7 корректнее было бы говорить не о вязкости флюида, а «о силе сопротивления движению» или «эффективной вязкости»; на странице 16 непонятен смысл фразы «Установлено, что сила сопротивления, действующая на наночастицу, не является стационарной», так как не приведены условия, при которых получена указанная зависимость; имеются неточности

в подрисуночных надписях к рисункам 5.2, 5.5 и 6.1.; фраза «Моделирование позволило точно контролировать размер наночастиц, их концентрацию и другие параметры системы» на стр. 19 непонятна, так как в моделировании указанные параметры – это предмет не контроля, а преднамеренного выбора.

В отзывах отмечается, что актуальность темы исследования обусловлена широким распространением дисперсных жидкостей в природе и возможностью их практического применения в перспективных технологиях, в том числе в катализе, устройствах теплопередачи и теплоотвода, химических и других технологиях. А. А. Белкиным построены нелинейные уравнения гидромеханики дисперсных жидкостей; изучены особенности силы сопротивления, действующей на наночастицу; обнаружена вихревая структура, определяющая релаксацию корреляционной функции скорости наночастицы; установлены зависимости коэффициентов вязкости наножидкостей от размера частиц и свойств их материала; построена статистическая теория процессов переноса в стесненных условиях; разработаны рекомендации по управлению гидравлическим сопротивлением наноканалов. Исследование вносит значительный вклад в развитие такого приоритетного направления науки, как гидромеханика нанофлюидов, является востребованным как для развития фундаментальных теоретических положений механики жидкости, газа и плазмы, так и с прикладной точки зрения. Предложенные рекомендации могут быть использованы в разработке ряда критических технологий РФ, таких как создание энергосберегающих систем, компьютерное моделирование наноматериалов, наноустройств и нанотехнологий и др. Результаты исследования могут быть использованы в системах теплопередачи и теплоотвода, технологиях микроэлектромеханических систем и нанотехнологиях, включая катализ, при производстве лакокрасочных, смазочных материалов, нефте- и газодобыче и в других перспективных технологиях.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что в сферу интересов **О. В. Матвиенко** входит решение задач теплообмена, движения и горения частиц в закрученных потоках, компьютерное моделирование процессов переноса; **С. П. Киселев** является известным

специалистом в области изучения процессов переноса в многофазных системах, исследования волновых процессов в гетерогенных материалах, молекулярно-динамического моделирования движения наночастиц и их синтеза; **Г. В. Кузнецов** является известным специалистом в области разработки физических и теоретических основ процессов тепломассопереноса и горения, изучения свойств переноса антропогенных загрязнителей атмосферы, испарения и движения капель жидкостей в газовых потоках; **Объединённый институт высоких температур РАН** является ведущим российским институтом в области механики жидкости, газа и плазмы, в котором ведутся исследования в области изучения и молекулярно-динамического моделирования свойств переноса многофазных систем.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

*построены* нелинейные обобщенные уравнения гидромеханики для многожидкостных режимов течения дисперсных флюидов, обобщенные определяющие соотношения, связывающие потоки и межфазные силы с термодинамическими силами, формулы для коэффициентов переноса.

*установлено*, что сила сопротивления движению наночастиц диаметром до  $10 \div 15$  нанометров в жидкостях не описывается законом Стокса, коэффициент сопротивления является нестационарным. На начальном этапе релаксации скорости частицы его значения значительно превышают значения, предсказываемые формулой Стокса.

*изучены* механизмы релаксации автокорреляционной функции скорости наночастиц в плотных газах и жидкостях. *Показано*, что эта релаксация определяется как индивидуальными взаимодействиями частицы с молекулами, так и ее взаимодействием с микрофлуктуациями плотности и импульса базовой жидкости. *Установлено*, что поле концентрации молекул жидкости вблизи частицы анизотропно, наночастицы сильно структурируют жидкость, максимумы радиальной функции распределения увеличиваются на десятки процентов. *Обнаружена* вихревая структура, формируемая наночастицей и определяющая дальнейшую релаксацию ее скорости.

*установлено*, что классические теории Эйнштейна–Стокса и Энскога неприменимы для описания диффузии наночастиц в жидкостях и плотных газах, *предложена* корреляция для определения коэффициента диффузии;

*установлено*, что эффективные коэффициенты вязкости и теплопроводности наножидкостей зависят не только от объемной концентрации наночастиц, но и от их размера и материала;

*развита* неравновесная статистическая механика процессов переноса флюида в стесненных условиях на основе решения уравнения Лиувилля. *Показано*, что свойства переноса флюида в этом случае определяется не только его собственными свойствами, но и характеристиками всей системы флюид–поверхность;

*установлено*, что вязкостью флюида в наноканале можно управлять, изменяя материал стенок канала. Определяющим влиянием обладает глубина ямы потенциала взаимодействия молекул флюида и стенок: при ее увеличении эффективная вязкость возрастает, при уменьшении она может быть даже меньше вязкости флюида в свободном объеме.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

*в работе получены* результаты фундаментального характера, которые вносят вклад в расширение существующих представлений о процессах переноса в дисперсных жидкостях и методиках их описания;

*построен* метод получения нелинейных замкнутых уравнений переноса из первых принципов;

*выведены* уравнения многожидкостной гидродинамики дисперсных сред, в том числе с вращательными степенями свободы;

*развита* статистическая теория процессов переноса в стесненных условиях;

*изучены* механизмы влияния наночастиц на коэффициенты переноса несущей жидкости.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

*выведены* формулы для коэффициентов переноса широкого круга многофазных сред;

*определены* зависимости коэффициентов диффузии, вязкости, теплопроводности наножидкостей с частицами размером до 10 нанометров от характеристик наночастиц и жидкости;

*показано*, что для описания диффузии наночастиц малого размера в жидкостях соотношение Эйнштейна–Стокса необходимо заменить формулой, учитывающей двухстадийную релаксацию корреляционной функции скорости частицы;

*определена* возможность регулирования эффективной вязкости жидкости в наноканале и гидравлического сопротивления канала с помощью изменения материала его стенок.

**Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования.** Полученные результаты могут быть использованы при проведении научно-исследовательских работ в следующих ведущих академических институтах и университетах: Объединённый институт высоких температур РАН (г. Москва), Институт металлургии УрО РАН (г. Екатеринбург), Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск), Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск), Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск), Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (в частности в Научно-исследовательском институте механики), Национальный исследовательский Томский государственный университет (в частности в Научно-исследовательском институте прикладной математики и механики), Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск), Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (г. Москва), Санкт-Петербургский государственный университет, а также в других научно-исследовательских институтах и вузах, занимающихся изучением процессов переноса в многофазных системах, в том числе наножидкостях.

**Оценка достоверности результатов исследований выявила:**

*использованы* строгие методы статистической механики, позволяющие получать уравнения гидромеханики и соотношения для коэффициентов переноса без использования феноменологических моделей и предположений;

*применены* эффективные и теоретически обоснованные вычислительные алгоритмы, апробированные на тестовых задачах;

*получено* удовлетворительное согласие результатов исследований с данными моделирования других авторов и экспериментальными данными;

*использованы* апробированные методы статистической обработки и интерпретации данных моделирования.

**Новизна результатов** диссертационного исследования заключается в том, что в нём построены нелинейные уравнения гидромеханики и определяющие соотношения для многожидкостного режима течения дисперсных флюидов, в том числе с вращательными степенями свободы; выведены формулы для коэффициентов переноса; изучены флуктуации плотности и скорости базовой жидкости, создаваемые наночастицами; показано, что наночастицы структурируют жидкость; обнаружена вихревая структура, формируемая наночастицей и определяющая дальнейшую релаксацию ее скорости; методом молекулярной динамики установлено, что сила сопротивления движению наночастиц диаметром до  $10 \div 15$  нанометров в жидкостях не описывается законом Стокса, коэффициент сопротивления является нестационарным; изучена релаксация автокорреляционной функции скорости наночастицы; определены зависимости параметров ее аппроксимации от характеристик наножидкости; установлено, что коэффициент вязкости наножидкостей зависит от размера частиц и их материала; развита неравновесная статистическая механика процессов переноса флюида в стесненных условиях; установлено, что вязкостью флюида в наноканале можно управлять, изменяя материал стенок канала.

**Личный вклад автора состоит в:** совместном с научным консультантом выборе направлений исследования, постановке задач, анализе и обобщении результатов, а именно в получении уравнений переноса для слабонервновесных процессов в дисперсных средах, исследовании влияния наночастиц на фазовый переход жидкость–твердое тело, построении неравновесной статистической механики процессов переноса флюида в стесненных условиях; самостоятельном получении уравнений переноса для сильнонервновесных процессов и для систем с вращательными степенями свободы, получении формулы для коэффициентов

переноса, моделировании вязкости флюида в наноканале; самостоятельной разработке и верификации алгоритмов и программ молекулярно-динамического моделирования однофазных и нанодисперсных сред; самостоятельном изучении и исследовании микрофлуктуации плотности и скорости базовой жидкости, создаваемых наночастицами, изучении силы сопротивления движению наночастиц, коэффициентов вязкости; в совместном с кандидатом физико-математических наук доцентом Г. В. Харламовым исследовании релаксации скорости наночастиц и их коэффициента диффузии.

Диссертация отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней для диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, и, в соответствии с пунктом 9 Положения, является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований процессов переноса в дисперсных системах разработаны теоретические положения, включающие нелинейные обобщенные уравнения гидромеханики, механизмы влияния наночастиц на коэффициенты переноса наножидкостей, статистическую механику процессов переноса флюидов в стесненных условиях, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в механике жидкости, газа и плазмы.

На заседании 28.12.2017 диссертационный совет принял решение присудить **Белкину А. А.** ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя  
диссертационного совета



Христенко Юрий Федорович

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Пикушак Елизавета Владимировна

28 декабря 2017 г.