

УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель генерального директора

по технологическому развитию и инновациям

ООО «РН-БашНИПИнефть», к.т.н.

М.С. Антонов



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу *Зо Аунга* «*Неравновесные свойства гидродинамических систем на основе обобщенного уравнения Навье – Стокса*», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Актуальность темы исследования связана с изучением движения малых частиц в жидкостях и газах, когда соответствующие поправки к уравнению Навье – Стокса становятся чрезвычайно важны в условиях соизмеримости длины свободного пробега молекул с размером частицы. При изучении физических свойств наносистем необходим учёт поправок к уравнению Навье – Стокса по числу Кнудсена в виде бигармонического слагаемого и слагаемых более высоких порядков по оператору Лапласа.

Целью работы является получение обобщённого уравнения Навье – Стокса с учётом следующих по оператору Лапласа слагаемых в его правой части с помощью методов теории неравновесной статистической физики для мезо- и макроскопических систем, а также вычисление силы сопротивления для шара, обтекаемого стационарным вязким потоком, с учётом найденного неоднородного бигармонического слагаемого в правой части обобщённого уравнения Навье – Стокса.

Научная новизна работы заключается в том, что с помощью теории неравновесного статистического распределения дан вывод обобщённого уравнения Навье – Стокса в виде ряда по степеням оператора Лапласа, предложен алгоритм решения задачи о вычислении поправок к силе сопротивления с учётом этих дополнительных неоднородных слагаемых и приведено подробное решение задачи о вычислении силы Стокса в виде ряда по числу Кнудсена. Таким образом, в диссертационной работе решены следующие задачи: 1) С помощью классического кинетического уравнения Больцмана найдены дополнительные неоднородные добавки к правой части уравнения Навье – Стокса, позволяющие впервые применять его для

наносистем; 2) Получено обобщение формулы Стокса в виде ряда по числу Кнудсена, играющей важную роль при описании физических свойств малых частиц; 3) Аналитически получена сила сопротивления, действующая на сферическую наночастицу с учетом дополнительных неоднородностей в уравнении Навье – Стокса.

Научная и практическая значимость связана с большим числом технических приложений, представляющих течение суспензий и газовзвесей, и состоит в учёте в уравнении Навье – Стокса дополнительных неоднородных слагаемых по оператору Лапласа, играющих важную роль при практическом изучении движения наночастиц в жидкостях и газах, когда соответствующие поправки нужно учитывать в условиях соизмеримости длины свободного пробега молекул с размерами тела. Полученные аналитические решения могут быть применены к конкретным технологическим процессам, в частности, в области нанотехнологии, где возникают потоки наночастиц сквозь газовый или жидкий континуум.

Степень достоверности полученных результатов диссертационной работы соответствует общепринятой в рамках специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы и гарантируется применением фундаментальных законов механики сплошных сред, статистической физики, а также хорошо проверенной на практике методикой решения, основанной на применении классического кинетического уравнения Больцмана. Этот подход имеет массу приложений и используется в большом числе оригинальных публикаций, как в РФ, так и за рубежом. Этим зарекомендовавшим себя апробированным методом неравновесного статистического распределения в диссертации решена задача вычисления неоднородных добавок к правой части уравнения Навье – Стокса.

Основное содержание диссертации изложено на 117 страницах машинописного текста, содержит 14 рисунков, состоит из введения, трёх глав, заключения и списка использованной литературы. Список литературы насчитывает 100 источников.

Во введении обоснована актуальность, научная новизна, практическая значимость, достоверность результатов. Поставлена цель исследования, перечислены методы исследования, публикации, основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения по апробации, изложено содержание разделов диссертационной работы.

Первая глава диссертации посвящена выводу гидродинамических уравнений из закона сохранения массы в лагранжевых переменных в главных осях тензора скоростей деформации и из теоремы об изменении кинетической энергии (теоремы «живых сил»). Также выполнен подробный вывод силы сопротивления Стокса на твёрдую сферу со стороны вязкой жидкости при ползущем течении.

Вторая глава диссертации посвящена нахождению с помощью метода кинетического уравнения Больцмана неоднородных поправок к уравнению Навье – Стокса, первая из которых представляет собой отрицательное

бигармоническое по оператору Лапласа слагаемое с коэффициентом порядка числа Кнудсена в квадрате. Найдены поправки к силе Стокса в виде знакопеременного ряда по числу Кнудсена, выполнен численный анализ полученной общей формулы для сопротивления и её графическая интерпретация. Обсуждается практическое приложение полученного результата и его применимость к наночастицам. Здесь же обсуждается и возможность учёта в уравнении Навье – Стокса бесконечного ряда неоднородных поправок по оператору Лапласа, где в качестве упрощающего фактора этот ряд аппроксимируется геометрической прогрессией, что позволяет сделать качественную оценку для силы Стокса и привести её обобщённое выражение с учётом всех возможных поправок по неоднородностям.

Третья глава диссертации включает в себя анализ важного в практическом отношении вопроса об исследовании установившегося течения жидкостей по каналам и трубам произвольного сечения при постоянном перепаде давления. Изложен общий подход к решению подобного рода задач в случае, когда сечение канала или трубы произвольное. Решена задача о вычислении распределения стационарных скоростей по перпендикулярным разрезам труб и каналов произвольного сечения. Приведена общая формула для вычисления расхода жидкости при её течении через произвольные сечения труб и каналов. Продемонстрирована «работа» общей формулы на конкретном примере канала, сечение которого имеет вид произвольного треугольника.

В конце второй и третьей глав приведены краткие выводы.

В *заключении* представлены основные выводы по диссертационной работе.

По диссертационной работе имеется ряд вопросов и замечаний:

1. Принципа сохранения полной мощности не существует (стр. 14), существует теорема об изменении кинетической энергии (теорема «живых» сил), которая является следствием уравнения импульсов и не является законом сохранения. При каких условиях её можно использовать в качестве закона сохранения?

2. В диссертации используется допущение, что изменение кинетической энергии равно изменению диссипативной функции (стр. 14). Нет объяснения, почему пренебрегается мощностью внешних массовых и внешних поверхностных сил. При каких условиях это возможно сделать?

3. Какой физический смысл имеют граничные условия 1-3 (стр. 37-41)? Каким реальным течениям они соответствуют?

4. При числах Кнудсена $Kn \ll 1$ обычно используется классическое приближение Навье – Стокса с условиями прилипания на границе. При числах Кнудсена порядка $Kn \sim 0,1-1$ используются приближение Навье – Стокса со скачками скорости и температуры на границе. В диссертационной работе нет оценки размера частиц, когда можно использовать классическое приближение Навье – Стокса и использовать условия прилипания на границе.

5. В случае бигармонического слагаемого в правой части уравнений Навье – Стокса (глава 2) порядок уравнений увеличивается на 2. Какие граничные условия в этом случае ставятся дополнительно, и какой их физический смысл? Чёткие граничные условия в главе 2 не поставлены, поэтому приходится получать константу C_1 из соображений размерности (стр. 73).

6. Имеется ряд опечаток и неточностей. Например, при выводе уравнения неразрывности на стр. 12 упущена зависимость радиус-векторов от лагранжевых координат; неверно записана диссипативная функция для несжимаемой функции (1.9) на стр. 14; формула (1.46) на стр. 23; формула, следующая за формулой (1.53); формула (2.5) на стр. 58 и т.д.

Указанные замечания не сказываются на общей положительной оценке диссертационной работы, а полученные результаты для силы сопротивления могут применяться при моделировании технологических процессов в химической технологии, пищевой промышленности и других отраслях производства, где возникают медленные течения дисперсных систем с частицами наноразмера.

Все выносимые на защиту положения и выводы аргументированы и соответствуют поставленным задачам.

Заключение по диссертационной работе.

Диссертационная работа Зо Аунга выполнена на хорошем научном уровне. Исследование выполнено на актуальную тему и представляет научный и практический интерес. Материалы диссертационной работы докладывались на 12 российских и международных научных конференциях. По результатам диссертации опубликовано 3 работы в российских и зарубежных изданиях, в том числе, одна работа в журнале, индексируемом в международной базе данных Scopus, две работы в журналах, входящих в базу данных RSCI, и 7 статей, индексируемых РИНЦ.

Материалы диссертации характеризуют автора как сложившегося исследователя, владеющего современными научными методами.

По своему содержанию диссертационная работа Зо Аунга соответствует паспорту научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Исследование выполнено в соответствии с пунктами паспорта специальности:

3. Гидравлические модели и методы расчёта течений в водоёмах, технологических устройствах и энергетических установках.

4. Ламинарные и турбулентные течения.

6. Динамика разреженных газов и молекулярная газодинамика.

8. Течение жидкостей и газов в пористых средах.

Автореферат составлен с соблюдением установленных требований, даёт правильное и полное представление о работе.

По актуальности, новизне, практической значимости диссертация соответствует требованиям п.п. 9-11 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской

Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор **Зо Аунг заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.**

Диссертационная работа Зо Аунга доложена автором и обсуждена на научном семинаре ООО «РН-БашНИПИнефть» (протокол №НС-2 от 21.11.2023).

Отзыв подготовлен главным специалистом ООО «РН-БашНИПИнефть», кандидатом физико-математических наук Ильясовым Айдаром Маратовичем.

Отзыв обсужден и утвержден на расширенном заседании бюро старших экспертов ООО «РН-БашНИПИнефть» 22.11.2023 г., протокол №5.

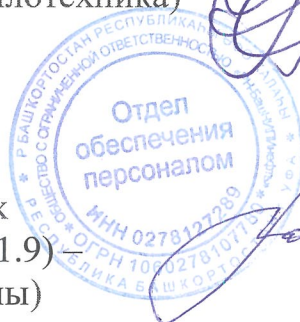
Старший эксперт
ООО «РН-БашНИПИнефть»,
доктор физико-математических
наук (специальность 01.01.03 –
Математическая физика)

В.А. Байков

Главный специалист
ООО «РН-БашНИПИнефть»,
кандидат физико-математических
наук (специальность 01.04.14 –
Теплофизика и теоретическая теплотехника)

А.М. Ильясов

Главный менеджер
ООО «РН-БашНИПИнефть»,
кандидат физико-математических
наук (специальность 01.02.05 (1.1.9) –
Механика жидкости, газа и плазмы)



Ю.А. Питюк

ООО «РН-БашНИПИнефть»
450006, г. Уфа, ул. Ленина, 86/1
тел. +7 (347) 262-43-40
E-mail: mail@bnipi.rosneft.ru
Электронный адрес официального сайта: <https://rn.digital/>