

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.418.03,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОСССЙСКОГО ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 21.06.2022 № 5

О присуждении Быковских Дмитрию Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Моделирование течения газа Кнудсена в трехмерной области методом Монте-Карло» по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите 12 апреля 2022 года, протокол заседания № 3 диссертационного совета 24.2.418.03, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. Приказ Минобрнауки России от 09.11.2012 № 717/нк.

Соискатель Быковских Дмитрий Александрович, 30.05.1990 года рождения, в 2013 году окончил государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сургутский государственный университет Ханты-Мансийского автономного округа – Югры» (с 2015 г. БУ ВО ХМАО – Югры «Сургутский государственный университет») по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления». В период подготовки диссертации соискатель Быковских Дмитрий Александрович обучался в очной аспирантуре бюджетного учреждения высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Сургутский государственный университет» на кафедре прикладной математики по специальности

05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» с 2013 г. по 2016 г. и работал инженером и инженером-программистом в научном центре «междисциплинарных исследований», где активно занимался научными исследованиями, связанными с тематикой диссертационной работы с сентября 2014 года по декабрь 2017 год. Справка и удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выданы в 2022 г. бюджетным учреждением высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Сургутский государственный университет».

С января 2021 года и по настоящее время работает старшим преподавателем на кафедре прикладной математики политехнического института БУ ВО ХМАО – Югры «Сургутский государственный университет». Диссертация выполнена на кафедре прикладной математики БУ ВО ХМАО – Югры «Сургутский государственный университет» Департамента образования и молодежной политики Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры прикладной математики Галкин Валерий Алексеевич БУ ВО ХМАО – Югры «Сургутский государственный университет».

Официальные оппоненты: 1) **Лаврентьев Михаил Михайлович** – доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора по научной работе ФГБУН Институт автоматизации и электрометрии СО РАН; 2) **Пятков Сергей Григорьевич** – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры цифровых технологий ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет» дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Тюменский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ТюмФ ИТПМ СО РАН, г. Тюмень) в своем положительном отзыве, подписанным руководителем научного направления «Математическое моделирование в механике», доктором физико-математических наук, профессором **Губайдуллиным Амиром Анваровичем** и утвержденным директором ТюмФ ИТПМ СО РАН доктором физико-

математических наук, профессором Мусакаевым Наилем Габсалимовичем, указала, что диссертационная работа Быковских Дмитрия Александровича «Моделирование течения газа Кнудсена в трехмерной области методом Монте-Карло» по актуальности, научной новизне, основным положениям и выводам соответствует требованиям пунктов 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Быковских Дмитрий Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Соискатель имеет 20 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 18 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 5 работ; в периодических изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и системы цитирования Scopus, опубликована 1 работа; получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Общий объем научных изданий 11 п.л., из них вклад автора – 5,46 п.л.

Публикации полностью соответствуют теме диссертационного исследования и раскрывают ее основные положения. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значимые работы:

1. Егоров А. А., Гавриленко Т. В., Быковских Д. А. Оценка параметров фрактальных пористых сред // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. Науки. 2020. Т. 30, № 1. С. 87 – 96. *(Перечень ВАК)*

2. Быковских Д. А., Галкин В. А. Моделирование и визуализация течения идеального газа в пористой среде методом Монте-Карло // Научная визуализация. 2019. Т. 11. № 3. С. 27 – 42. (перевод Bykovskih D. A., Galkin V. A. An ideal gas flow modeling and visualization in porous medium by Monte Carlo method // Scientific Visualization. 2019. V. 11. N. 3. P. 27 – 42.) *(Scopus, перечень ВАК)*

3. Быковских Д. А., Галкин В. А. О вычислительном тесте для модели

адиабатического сжатия идеального бесстолкновительного газа // Вестник кибернетики. Электр. Журн. 2019. № 1 (33). С. 15 – 23. (Перечень ВАК)

4. Быковских Д. А., Галкин В. А. О вычислительном тесте для одной модели бесстолкновительного идеального газа // Вестник кибернетики. Электр. Журн. 2017. № 3 (27). С. 119 – 127. (Перечень ВАК)

5. Галкин В. А., Гавриленко Т. В., Быковских Д. А. Управление динамикой невзаимодействующих частиц в плоской области // Вестник кибернетики. Электр. Журн. 2015. № 3 (19). С. 148 – 159. (Перечень ВАК)

6. Быковских Д. А., Галкин В. А., Гавриленко Т. В. и др. Midge: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617287; правообладатель БУ ВО ХМАО – Югры «Сургутский государственный университет». – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.06.2016 г.

7. Быковских Д. А., Галкин В. А., Гавриленко Т. В. и др. Midge D3: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617145; правообладатель БУ ВО ХМАО – Югры «Сургутский государственный университет». – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 28.06.2016 г.

На автореферат поступили отзывы от:

1. Кандидата геолого-минералогических наук, советника генерального директора ООО «СибГеоПроект» **Шпильмана А.В.**, отзыв положительный, без замечаний.
2. Кандидата технических наук, директора ООО ЭНИМЦ «Моделирующие системы» **Левченко В.А.**, доктора технических наук, доцента, главного научного сотрудника ООО ЭНИМЦ «Моделирующие системы» **Кащеева М.А.** и кандидата технических наук, заведующего лабораторией ООО ЭНИМЦ «Моделирующие системы» **Зайцева А.А.**, отзыв положительный, с замечаниями:
  1. На рисунках 4-9 автореферата не указаны размерности физических величин (температуры, скорости, давления, объема), что затрудняет понимание представленной информации. Например, неясно, что значит температура  $T=0,04009$  на рисунке 5 (с. 13).
  2. В тексте автореферата с. 20 отмечено, что выполнена верификация разработанного комплекса программ на задачах газовой динамики с

аналитическими решениями. Однако сравнение результатов численного моделирования с аналитическим решением представляет собой тестирование, верификация же подразумевает сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.

3. Имеются погрешности редакционного характера. Например, на с. 9 читаем «расчет... вычисляется», на с. 16 «с полностью» вместо «с полностью».
3. Кандидата технических наук, ведущего научного сотрудника отдела гидродинамических исследований и моделирования в нефтегазовой отрасли ФГУ «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук» **Афанаскина И.В.**, кандидата технических наук, заведующего отделом гидродинамических исследований и моделирования в нефтегазовой отрасли ФГУ «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук» **Вольпина С.Г.**, отзыв положительный, с замечаниями:
  1. Выбранная математическая модель не учитывает столкновение частиц между собой. Для технологии керносимулятора учет таких столкновений важен в случае, когда длина свободного пробега молекулы газа существенно меньше диаметра порового канала, а этот случай весьма распространен на практике.
  2. В пятой главе представлено численное исследование задачи фильтрации идеального бесстолкновительного газа в пористой среде.
    - 2.1. Было бы интересно сравнить результаты определения коэффициента фильтрации ( $k/\mu$ , где  $k$  – проницаемость,  $\mu$  – вязкость газа) по предлагаемому в диссертации подходу для низкопроницаемого коллектора (когда длина свободного пробега молекулы газа больше диаметра поры) с результатами лабораторных экспериментов, интерпретированных с учетом эффекта Клинкенберга.
    - 2.2. Было бы интересно сравнить результаты расчета макроскопических параметров течения газа по предлагаемому в диссертации подходу для низкопроницаемого коллектора (когда длина свободного пробега молекулы газа больше диаметра поры) с результатами расчета с использованием других

подходов.

4. Доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры физики и математики ФГБОУ ВО «Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского» **Степовича М.А.**, отзыв положительный, с замечаниями:
  1. В автореферате отсутствует информация о сравнении рассмотренной в работе математической модели с результатами экспериментальных исследований.
  2. Превышен объем автореферата.
5. Доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры информатики ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова» **Нестерова А.В.**, отзыв положительный, без замечаний.
6. Доктора физико-математических наук, начальника Обнинского отделения Института интеллектуальных кибернетических систем ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» **Старкова С.О.**, отзыв положительный, с замечанием:
  1. В качестве замечания можно отметить, что из текста автореферата непонятно, каким образом находится точка пересечения траектории движения частицы и границы области.
7. Доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой «Высшая математика» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» **Нагорнова О.В.**, отзыв положительный, с замечанием:
  1. Известно, что одним из недостатков вычислительных методов, основанных на методе Монте-Карло, при моделировании течения разреженного газа является то, что для получения удовлетворительного результата требуется не только большое количество вычислительных ресурсов, но и памяти вычислительной системы. Автор диссертационной работы в своих результатах приводит оценку производительности разработанного комплекса проблемно-ориентированных программ, но при этом не упоминает об оценке требуемого объема памяти для хранения и обработки результатов моделирования рассматриваемых в работе задач.

8. Кандидата физико-математических наук, начальника отдела ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» **Огнева С.П.**, отзыв положительный, без замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются специалистами высокого уровня в области дифференциальных уравнений, математического моделирования, численных методов и комплексов программ, а ведущая организация известна своими достижениями в области механики жидкости, газа и плазмы, подземной гидромеханики и математического моделирования, что позволяет им оценить научную и практическую значимость диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработаны:**

- вычислительный метод, основанный на методе Монте-Карло, расчета течения газа Кнудсена в трехмерной области с подвижными и неподвижными границами;
- комплекс программ, предназначенный для моделирования течения газа Кнудсена в трехмерной области с подвижными и неподвижными границами;

**предложены:**

- эффективный алгоритм расчета траектории движения частиц газа в области с подвижными и неподвижными границами;
- класс точных решений для модели адиабатического сжатия газа Кнудсена в трехмерной области;

**показано** влияние геометрии пористой среды на параметры течения идеального бесстолкновительного газа вдоль оси канала.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

**предложен** вычислительный метод, предназначенный для моделирования течения газа Кнудсена в трехмерной области с подвижными и неподвижными границами;

**показаны:**

- сходимость вычислительного метода, предназначенного для моделирования течения газа Кнудсена в трехмерной области с подвижными и неподвижными границами, на задачах газовой динамики, имеющие аналитические решения;

- линейная зависимость между скоростью течения и скоростью фильтрации газа в пористой среде для идеального бесстолкновительного газа;

**использованы:**

- статистические методы оценки скорости сходимости разработанного вычислительного метода (правило трех сигм, теория вероятностей, статистика);

- аналитическое решение задачи о движущихся на встречу двух групп частиц газа для тестирования разработанного комплекса программ;

**изложен** класс новых точных решений для задачи об адиабатическом сжатии газа Кнудсена в трехмерной области, включая его доказательство и тестирование с результатами численных исследований;

**раскрыты** возможности численных алгоритмов по результатам серии вычислительных экспериментов на задачах газовой динамики, имеющих аналитические решения;

**изучено** влияние геометрии пористой среды на параметры течения идеального бесстолкновительного газа вдоль оси канала;

**проведена модернизация:**

- вычислительного метода, основанного на методе Монте-Карло, для расчета течения газа Кнудсена в трехмерной области методом Монте-Карло;

- алгоритмов расчета течения газа Кнудсена в трехмерной области методом Монте-Карло.

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

**разработан** комплекс проблемно-ориентированных программ, предназначенный для моделирования течения газа Кнудсена в трехмерной области методом Монте-Карло;

**определена** применимость полученных численных результатов к



исследованиям различных моделей при решении задач газовой динамики;

**создан** эффективный алгоритм расчета течения газа Кнудсена в трехмерной области с подвижными и неподвижными границами, предназначенный для высокопроизводительных вычислительных систем;

**представлены** результаты вычислительных экспериментов и обработки полученной информации для рассматриваемых математических моделей.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

**теория** построена на основе фундаментальных законов сохранения, кинетической модели газовой динамики;

**идея** базируется на обобщении методов аналитического и численного исследования задач газовой динамики;

**использованы:**

- сравнение результатов численных расчетов разработанного комплекса проблемно-ориентированных программ с аналитическими решениями задач газовой динамики;

- оценка отклонения значений случайной величины от ее математического ожидания в рамках анализа результатов обработки численных результатов расчетов задач газовой динамики;

**установлены** корректность и применение методов математического моделирования, численных методов и алгоритмов, на задачах газовой динамики, имеющих аналитические решения;

**верифицированы** результаты расчетов разработанного комплекса программ, на задачах газовой динамики, имеющих аналитические решения;

**использованы** современные средства вычислительной техники.

Личный вклад соискателя состоит в разработке алгоритмов и их реализации в виде комплекса проблемно-ориентированных программ, включая отладку и тестирование, и проведении вычислительных экспериментов. Автор самостоятельно отыскал класс точных решений задачи об адиабатическом сжатии газа Кнудсена в трехмерной области с подвижной границей. В совместных исследованиях автор принимал участие во всех этапах работы: в постановках задач, в выборе и

формулировке математической модели, в создании численного метода и анализе полученных результатов.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. Почему в модели течения газа Кнудсена сквозь пористую среду Вы используете уравнение Дарси, которое справедливо для механики сплошной среды, когда газ не является сильно разреженным? Как может быть динамическая вязкость для разреженного газа иметь такое значение, приведенное на слайде?

2. Почему для модели сжатия бесстолкновительного газа не было найдено точное решение до Вас?

3. На рисунке 9, где представлены графики сравнения точного и численных решений температуры в зависимости от времени, от нижней отметки значений до верхней разница составляет порядка 0,025%. Почему результаты выглядят как шум?

Соискатель Быковских Д.А. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1. На слайде все результаты, связанные с графиками различных величин, представлены в безразмерном виде. Цель исследования заключалась в исследовании влияния структуры пористой среды на параметры течения газа вдоль оси канала. С замечанием согласен. Доказательство правомочности использования уравнения Дарси не приведено.

2. Идея доказательства класса точных решений и их вывод основывается на теореме Лиувилля о сохранении объема фазового пространства, которая подробно описана в трудах К. Черчиньяни, включающих описание математической модели. Но конкретного точного решения не было представлено.

3. Рассматриваемые графики величин на этом рисунке представлены в безразмерном виде. Точность результатов этой задачи зависит только от числа частиц в эксперименте, поскольку в расчетах с применением вычислительных систем были использованы числа с плавающей запятой двойной точности, вычислительная погрешность которых ограничена 15-16 значащими десятичными цифрами.

На заседании 21.06.2022 диссертационный совет за решение научной задачи, имеющей важное теоретическое и практическое значение для аналитических и численных методов математического моделирования течения газа Кнудсена в трехмерной области с подвижными и неподвижными границами, принял решение присудить Быковских Д.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении электронного тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек (очно – 15 человек, дистанционно – 2 человека), из них 9 докторов наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки), участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – нет, не участвовал в голосовании – нет.

Председатель  
диссертационного совета



Захаров Александр Анатольевич

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Оленников Алексей Александрович

21.06.2022