

«Утверждаю»

Заместитель директора ОИВТ РАН

д. ф.-м. н. Гавриков А.В.



## ОТЗЫВ

ведущей организации, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), на диссертацию Опрышко Ольги Владимировны «Численное моделирование придонных частей торнадо и тропического циклона в стационарном случае», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертация Опрышко Ольги Владимировны посвящена теоретическому исследованию восходящих закрученных потоков в газовой среде, находящейся под действием сил тяжести и Кориолиса.

**Актуальность темы исследования.** Изучение вихрей вызывает немалый интерес, но из-за разрушительных качеств подобные явления достаточно опасно наблюдать и изучать в природе. Численное моделирование является наиболее безопасным способом для изучения физических процессов, происходящих в вихре, позволяющим приблизительно оценить силу потока. Исследование физических процессов в придонной области восходящих закрученных потоков и механизмов возникновения вихрей является актуальным вопросом на сегодняшний день. Диссертационное исследование Опрышко О.В. направлено на моделирование придонной области потока, определение газодинамических параметров торнадо по данным натурных наблюдений и приблизительный расчет кинетической энергии потока. В работе производится математическое и численное моделирование, позволяющее делать выводы об эффективных способах борьбы с разрушительными последствиями такого природного явления, как торнадо. Разработаны математические и численные методы, комплекс программ, верифицированы полученные результаты. Для торнадо на сегодняшний день известны данные только о ширине следа и скорости ветра. Исследуемое природное явление, торнадо, сложно повторить практически. К тому же сложность представляет получение измерений большего числа характеристик в связи с опасностью

данного природного явления. Численное моделирование, которое было проведено в рамках данной работы, дает возможность смоделировать восходящие закрученные потоки, имитирующие данные природных торнадо, в безопасных условиях.

**Общая характеристика работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и двух приложений. Общий объем диссертационной работы – 136 страниц печатного текста.

Во введении определены актуальность и степень разработанности темы, сформулированы цели и задачи исследования. Представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные результаты и положения, выносимые на защиту, апробация работы и публикации по теме диссертации. Описаны методы исследования, личный вклад и достоверность полученных результатов.

В первой главе диссертации описана математическая модель – система уравнений газовой динамики, в рамках которой проводится постановка задачи исследования, – и доказана ее однозначная разрешимость. Описаны математический метод для определения газодинамических параметров потока и способ расчета кинетической энергии торнадо. Представлен алгоритм валидации математической модели для моделирования течения газа в придонной части торнадо на основе данных натурального эксперимента.

Во второй главе диссертации описаны разработанные численные методы получения газодинамических параметров потока и кинетической энергии. Представлена система компьютерного и имитационного моделирования, в которой учтено формирование торнадо от поверхности Земли и определены газодинамические параметры потока, повторяющие данные натуральных наблюдений, а затем рассчитана кинетическая энергия вихря при варьировании высоты придонной части потока. Представлены программные блоки и численные алгоритмы для определения радиуса притока по известной скорости ветра на радиусе стока торнадо и расчета газодинамических параметров основных классов торнадо, а также приближенного значения кинетической энергии.

В третьей главе диссертации моделируется натуральный эксперимент при численном построении решения модели Баутина С.П. для радиальных течений. Приведены результаты проведенных вычислительных экспериментов, которые подтверждают, что вблизи радиуса стока торнадо находится область пониженного давления, радиальная скорость направлена к центру потока, окружная скорость увеличивается вблизи радиуса стока. Произведен расчет кинетической энергии трех частей потока при учете разного числа математических моделей газодинамических параметров вихря при изменении высоты придонной части потока. Установлено, что система уравнений газовой динамики, действующая в условиях сил тяжести и Кориолиса, рассматриваемая в работе, хорошо имитирует данные

придонных течений и позволяет определить первичные оценки газодинамических параметров потока, а по ним рассчитать приблизительную кинетическую энергию вихря в рамках теории происхождения торнадо от поверхности Земли.

В заключении описаны итоги проведенного исследования, даны рекомендации, намечены перспективы и указано соответствие полученных результатов специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

**Научная новизна.** В области математического моделирования – разработан новый метод математического моделирования придонного течения газа, повторяющий данные натуральных наблюдений в рамках математической модели для стационарного случая.

В области численных методов – разработаны алгоритмы численных методов определения газодинамических параметров потока и приближенного значения кинетической энергии торнадо в рамках математической модели Баутина С.П. для стационарного случая, учитывающей формирование вихрей от поверхности Земли.

В области комплексов программ – разработан комплекс программ для построения приближенных решений стационарного придонного течения при формировании торнадо от поверхности Земли, который позволяет определить газодинамические параметры потока и кинетическую энергию, повторяющие данные натуральных наблюдений для классов торнадо из таблицы Фудзиты.

**Степень обоснованности и достоверности основных положений и выводов диссертации.** Результаты, полученные в ходе работы, подтверждаются математическими доказательствами соответствующих утверждений, согласием между теоретическими положениями и итоговыми результатами вычислительных экспериментов, которые были получены в ходе исследования.

Все полученные в ходе работы результаты были опубликованы и апробированы на различных конференциях. Диссертационное исследование Опрышко О.В. последовательно структурировано, имеет полную логическую завершенность. По исследовательской теме опубликовано 34 научные работы. Среди них 5 статей в изданиях из перечня ВАК или индексируемых в реферативной базе MathSciNet и реферативном журнале zbMATH, 1 препринт, 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, 26 – в трудах различных конференций, 6 свидетельств государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций диссертации.** Полученные результаты развивают теорию возникновения восходящих закрученных потоков от поверхности Земли, что заложено в математической модели. Согласно данной теории, имеется объяснение, откуда идет постоянный приток энергии и как возникает закрутка в торнадо. Каждый вихрь проходит стадии формирования, функционирования и разруше-

ния, которые наблюдаются в природе. По рассчитанным газодинамическим параметрам, полученным в ходе исследования, совпадающим с данными натуральных наблюдений, была приближенно определена кинетическая энергия торнадо классов, приведенных в таблице Фудзиты.

Разработка системы компьютерного и имитационного моделирования позволяет проводить вычислительные эксперименты, моделировать газодинамические параметры придонной области восходящего закрученного потока и приближенно рассчитывать кинетическую энергию для торнадо, которые приведены в таблице Фудзиты.

Теоретические результаты диссертационного исследования, описанные алгоритмы численных методов и разработанные программы представляют значимый интерес для исследователей, чьи научные интересы относятся к теории возникновения восходящих закрученных потоков от поверхности Земли, математическому моделированию придонной и других областей вихря.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

**Замечания по диссертации.** Анализ диссертационного исследования позволяет сделать следующие замечания:

1. На странице 42 рукописи завершается доказательство теоремы 3, однако автор пишет, что доказана теорема 4.
2. Не исследована роль температуры в рассматриваемых процессах, тогда как это может представлять интерес для их понимания.
3. В расчетах использовано только уравнение идеального газа, однако было бы не лишним провести расчеты и с использованием других уравнений состояния, исследовать влияние неидеальности газа.

Указанные замечания не снижают значимость представленных научных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

**Заключение.** Диссертационная работа Опрышко О.В. «Численное моделирование придонных частей торнадо и тропического циклона в стационарном случае» представляет собой полную, логически завершенную научно квалифицированную работу, в которой имеется решение актуальной научной задачи. Полученные результаты соответствуют научной специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Результаты научного исследования являются новыми и получены автором самостоятельно. Автореферат и публикации отражают полное содержание работы.

Диссертационное исследование соответствует пунктам 9–14 «Положения о присуждении степеней Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Опрышко Ольга Владимировна,

заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв составил

зав. лаб. ОИВТ РАН, к. ф.-м. н., с. н. с.

Хищенко Константин Владимирович

14.09.2023

Диссертация была обсуждена на научном семинаре Лаборатории широкодиапазонных уравнений состояния ОИВТ РАН 06 сентября 2023 года, протокол № 3. Отзыв был одобрен по результатам голосования участников семинара.

Председатель семинара,

зав. лаб. ОИВТ РАН, к. ф.-м. н., с. н. с.

Хищенко Константин Владимирович

14.09.2023

Подпись Хищенко Константина Владимировича удостоверяю.

Ученый секретарь ОИВТ РАН

д. ф.-м. н.



Киверин Алексей Дмитриевич

14.09.2023

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2; <https://jiht.ru/>; тел. (495)484-24-83, e-mail: konst@ihed.ras.ru