

УТВЕРЖДАЮ



Проректор
по научной работе, к.ф.-м.н.

Баган Виталий
Анатольевич

«1» июня 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)» (МФТИ)

Диссертация «Взаимодействие вихревых течений с твёрдыми поверхностями и акустическими возмущениями» выполнена на кафедре теоретической и прикладной аэрогидромеханики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В период подготовки диссертации с 2017 г. по настоящее время соискатель **ГАДЖИЕВ Дмитрий Александрович** работал в отделении аэродинамики самолетов и ракет федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е.Жуковского» в должности младшего научного сотрудника.

В 2017 г. Гаджиев Д.А. окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» по направлению подготовки 03.04.01 Прикладные математика и физика. С 2017 г. по 2021 г. обучался в очной аспирантуре МФТИ по направлению подготовки 01.06.01 Математика и механика.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2021 г. в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, **ГАЙФУЛЛИН Александр Маркович**. Основное место работы – федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», главный научный сотрудник отделения аэродинамики самолетов и ракет.

По итогам обсуждения диссертации «Взаимодействие вихревых течений с твёрдыми поверхностями и акустическими возмущениями» **принято следующее заключение.**

Тема диссертации является актуальной в силу распространённости вихревых течений в природе и технике. Вихри являются структурными единицами турбулентного течения жидкости или газа, участвуют в формировании подъёмной силы крыла самолёта, возникают в океанах и атмосфере Земли. Ряд практически важных задач связан с эволюцией вихревых течений жидкости или газа вблизи твёрдых поверхностей. Существенно вихревым является течение в вязком пограничном слое вблизи твёрдой поверхности. Отрыв пограничного слоя, возможный при условии неблагоприятного градиента давления, может приводить к появлению вихрей вдали от твёрдых границ в изначально потенциальном потоке. Аналогично ряд вихревых течений можно создать движением твёрдых тел в вязкой среде. Другие актуальные задачи возникают при распространении через область вихревого течения сжимаемого газа акустических волн. Среди них проблемы рассеяния, излучения и поглощения звука вихревыми и турбулентными течениями, акустической диагностики вихревых течений (определения расположения вихрей на основе картины рассеяния звука), потери устойчивости ламинарных вихревых течений под воздействием звука.

Цели и задачи диссертации:

1. Определение сценариев эволюции пары прямолинейных вихревых нитей с равной по модулю и противоположной по знаку циркуляцией в вязкой несжимаемой жидкости вблизи твёрдой поверхности.
2. Определение асимптотических характеристик течения, возникающего в вязком сжимаемом газе при вращении кругового цилиндра, на больших временах при больших числах Рейнольдса в предположении осесимметричности.
3. Определение асимптотических характеристик взаимодействия плоской акустической волны с цилиндрическим вихрем из задачи 2 в невязком совершенном газе в случае, когда характерные числа Маха малы, а эффективный радиус вихря велик по сравнению с длиной волны.
4. Определение асимптотических характеристик взаимодействия плоской акустической волны с вихревой парой вблизи твёрдой поверхности из задачи 1 в невязком совершенном газе в случае, когда характерные числа Маха малы, а расстояние между вихрями и высота вихрей над поверхностью велики по сравнению с длиной волны.

Основные результаты диссертации:

1. Получено численное решение двумерной задачи об эволюции в вязкой несжимаемой жидкости двух вихрей с противоположными циркуляциями вблизи бесконечной прямолинейной твёрдой поверхности. Рассчитаны модификация траекторий движения вихрей и уменьшение со

временем их циркуляции под влиянием глобального нестационарного отрыва пограничного слоя.

2. На основе асимптотического анализа уравнений Навье-Стокса определены характеристики цилиндрического вихря, возникающего при вращении кругового цилиндра в вязкой среде, для случая сжимаемого газа с линейной зависимостью коэффициентов диффузии от температуры. Найдены условия, при которых циркуляция скорости будет на больших расстояниях от цилиндра выше, чем в случае несжимаемой жидкости, и в некоторой промежуточной области – выше, чем на поверхности цилиндра.
3. Впервые рассмотрена задача взаимодействия плоской акустической волны и цилиндрического вихря, возникающего при вращении кругового цилиндра в вязкой среде. Построено асимптотическое решение для случая, когда характерный масштаб области течения велик по сравнению с длиной волны. Асимптотическая структура рассеянной волны совпадает со структурой волны в задаче о коротковолновой дифракции на щели. Два известных решения для случая вихревой нити, решение Л. П. Питаевского и решение П. В. Сакова, содержатся в качестве предельных случаев в двух различных асимптотических областях. Получено решение в дальнем поле задачи взаимодействия плоской акустической волны и двух вихрей с противоположными циркуляциями вблизи бесконечной прямолинейной твёрдой поверхности. Рассеянная волна имеет вид уходящей на бесконечность волны, отличной от цилиндрической.

Результаты глав 1, 3 получены лично соискателем при научном руководстве доктора физико-математических наук, члена-корреспондента РАН Гайфуллина А.М. *Результаты главы 2 получены совместно* с А. М. Гайфуллиным и А. В. Зубцовым.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые дано описание локальной структуры нестационарного отрыва пограничного слоя, происходящего при взаимодействии вихрей с твёрдой поверхностью. Впервые построено решение задачи о порождении вихря вращающимся цилиндром с учётом сжимаемости, удовлетворяющее условию затухания возмущений на бесконечности. Обнаружено явление «скачка циркуляции»: в сжимаемом газе с коэффициентом вязкости, зависящим от температуры, внутренний предел внешнего решения для циркуляции скорости в общем случае отличается от значения циркуляции на поверхности цилиндра. Впервые получено решение, включающее в себя в качестве предельных случаев в различных асимптотических областях оба известных решения классической задачи взаимодействия плоской акустической волны с вихревой нитью. Получено решение в дальнем поле задачи взаимодействия течения с акустическими возмущениями нового типа: рассеянная волна, отличная от цилиндрической и удовлетворяющая условию излучению Зоммерфельда.

Практическая ценность результатов диссертации заключается в том, что качественное описание отрыва пограничного слоя в задаче об эволюции вихрей

над твёрдой поверхностью может послужить опорой для развития теории нестационарного ламинарного отрыва. Физическая интерпретация обнаруженных эффектов, таких, как «скачок циркуляции» в задаче о порождении вихря, может быть полезной для понимания физики более сложных течений сжимаемого газа с переменной вязкостью. Установленные асимптотические решения для задачи о порождении вихря вращающимся цилиндром и для задачи о взаимодействии звука с цилиндрическим вихрем могут быть использованы для валидации численных методов и интерпретации соответствующих экспериментов. Анализ решения задачи взаимодействия плоской акустической волны с экспоненциально затухающим цилиндрическим вихрем показывает, какое из двух известных решений для случая вихревой нити реализуется в физическом и численном эксперименте. Новый масштаб длины, характерный для решения задачи взаимодействия звука с экспоненциально затухающим цилиндрическим вихрем и превосходящий как длину акустической волны, так и эффективный радиус вихря, определяет минимальный размер области, которую необходимо разрешать в физическом или численном эксперименте.

Достоверность (высокая степень точности измерений и объективности оценок) результатов исследования обеспечена:

- строгостью и корректностью математических доказательств и рассуждений;
- согласованием между аналитическими и численными результатами исследования;
- Положения и выводы, сформулированные в диссертации, получили квалифицированную апробацию на международных и российских научных конференциях и семинарах. Достоверность также подтверждается публикациями результатов исследования в рецензируемых научных изданиях, в том числе, рекомендованных ВАК.

Обоснованность выводов и рекомендаций подтверждена:

- корректностью применения апробированного в научной практике исследовательского и аналитического аппарата, использованием классических уравнений гидродинамики, уравнений Навье--Стокса и линеаризованных уравнений Эйлера, и общепринятых методов интегрирования;
- сопоставлением результатов исследования с данными зарубежного и отечественного опыта;
- обсуждением результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях;
- публикациями результатов исследования в рецензируемых научных изданиях, в том числе, рекомендованных ВАК РФ.

Материалы диссертации опубликованы автором достаточно полно в следующих работах:

1. Гаджиев Д. А., Гайфуллин А. М. Эволюция двух вихрей вблизи твердой поверхности // *Прикладная механика и техническая физика*. — 2018. — Т. 59, № 2. — С. 31—38.

2. Gadzhiev D. A., Gaifullin A. M. Structure of laminar unsteady boundary layer separation under an airplane wake vortex interaction with a ground surface // *AIP Conference Proceedings*. — 2018. — Vol. 2027. — P. 030125.

3. Gadzhiev D. A., Gaifullin A. M. Sound scattering by a vortex: case of exponentially decaying velocity // *Journal of Fluid Mechanics*. — 2021. — Vol. 918. — A46.

4. Gadzhiev D. A., Gaifullin A. M. Waves propagation through a localized axisymmetric vortical flow // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2021. — Vol. 1959. — P. 012020.

5. Gaifullin A. M., Gadzhiev D. A. Evolution of vortex wake near the Earth's surface // *AIP Conference Proceedings*. — 2016. — Vol. 1170. — P. 020019.

6. Gaifullin A. M., Gadzhiev D. A., Zubtsov A. V. Vortices appearance and diffusion // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2017. — Vol. 894. — P. 012017.

7. Gaifullin A. M., Gadzhiev D. A., Zhvick V. V., Zubtsov A. V. Vortical structures interaction // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2019. — Vol. 1268. — P. 012016.

8. Gadzhiev D. A., Gaifullin A. M., Zubtsov A. V. An axisymmetric vortex around a rotating infinitely elongated circular cylinder in a viscous heatconducting gas // *AIP Conference Proceedings*. — 2020. — Vol. 2211. — P. 030009.

9. Гаджиев Д. А., Гайфуллин А. М., Зубцов А. В. О порождении вихря вращающимся цилиндром // *Прикладная математика и механика*. — 2020. — Т. 84, № 5. — С. 570—589.

Личный вклад соискателя в работах с соавторами заключается в следующем: [1-5] - асимптотическое и численное решение задачи; [6-9] - проведение вычислительных экспериментов и анализ аналитических и численных результатов.

Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

1. 58-я, 59-я, 60-я, 61-я, 62-я, 63-я научные конференции МФТИ (г.Жуковский, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020).

2. XXVII, XXVIII, XIX, XXX, XXXI научно-технические конференции по аэродинамике (п. Володарского, 2016, 2017; д. Богданиха, 2018; п.Володарского, 2019, парк-отель Яхонты, 2020).

3. XVI Международная школа-семинар «Модели и методы аэродинамики» (г.Евпатория, 2016).

4. Международные конференции по дифференциальным уравнениям и динамическим системам (г. Суздаль, 2018, 2020).

5. XIX Международная конференция по методам аэрофизических исследований (ICMAR 2018, г. Новосибирск, 2018).

6. Седьмая всероссийская конференция с международным участием «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (г. Рыбинск, 2019).

7. IX Международная конференция «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» (г. Новосибирск, 2020).

8. 11-я международная конференция — школа молодых учёных «Волны и вихри в сложных средах» (г. Москва, 2020).

9. Международная научная конференция по механике «IX Поляховские чтения» (г. Санкт-Петербург, 2021).

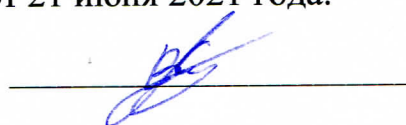
10. Семинар по механике сплошных сред под руководством А.Г. Куликовского, В.П. Карликова, О.Э. Мельника, А. Н. Осипцова (г. Москва, НИИ механики МГУ, 12 мая 2021).

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, в частности, пунктам:

- п. 4 – Течения сжимаемых сред и ударные волны;
- п. 11 – Пограничные слои, слои смешения, течения в следе;
- п. 14 – Линейные и нелинейные волны в жидкостях и газах;
- п. 15 – Тепломассоперенос в газах и жидкостях;
- п. 18 – Аналитические, асимптотические и численные методы исследования уравнений кинетических и континуальных моделей однородных и многофазных сред (конечно-разностные, спектральные, методы конечного объема, методы прямого моделирования и др.).

Диссертация «Взаимодействие вихревых течений с твёрдыми поверхностями и акустическими возмущениями» **ГАДЖИЕВА Дмитрия Александровича** рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности ***01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.***

Заключение принято на заседании кафедры теоретической и прикладной аэрогидромеханики МФТИ. Присутствовало на заседании 8 человек. Результаты голосования: «за» – 8 чел., «против» – нет, «воздержались» – нет, протокол №1 от 21 июня 2021 года.



Судаков Виталий Георгиевич,
д-р физ.-мат. наук, доцент,
заместитель заведующего кафедрой
теоретической и прикладной аэрогидромеханики МФТИ