

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Гаджиева Дмитрия Александровича **«Взаимодействие вихревых течений с твёрдыми поверхностями и акустическими возмущениями»**, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертация Д.А. Гаджиева посвящена нестационарным задачам об эволюции вихрей в присутствии твёрдых поверхностей и о взаимодействии вихревых течений со звуком. При решении использовались как аналитические способы приближённого решения уравнений Эйлера и Навье–Стокса, основанные на методе возмущений, так и прямое численное моделирование.

Цель диссертации заключалась в выявлении механизмов и определении характеристик диффузии и генерации вихрей в вязкой среде в присутствии твёрдых границ и взаимодействия вихрей с акустическими возмущениями на примере двух противоположно закрученных вихрей вблизи плоскости и цилиндрического вихря, образующегося при вращении цилиндра.

В диссертации решены следующие **задачи**:

1. Эволюция двух точечных вихрей с равными по модулю и противоположными по знаку циркуляциями в вязкой несжимаемой жидкости вблизи твёрдой поверхности. Численное решение представлено для случая, когда в начальный момент времени расстояние между вихрями равно расстоянию до плоскости. Расчеты проведены для трех значений чисел Рейнольдса 1000, 2000 и 8000.

2. Порождение осесимметричного вихря в вязкой среде с помощью вращения бесконечного кругового цилиндра для случая сжимаемого газа с переменной вязкостью. Интерес представляет разложение по малому числу Маха, в котором главный член – это классическое точное решение о развитии вихря в несжимаемой жидкости.

3. Взаимодействие плоской звуковой волны в идеальном газе с осесимметричным вихрем, который может быть создан продолжительным

вращением кругового цилиндра в вязкой среде. Решение представлено в виде бегущей плоской волны плюс возмущение этого течения вихрем. Решение представляет собой обобщение решения Питаевского для точечного вихря имеющего особенность. Решение диссертанта такой особенности не содержит.

4. Взаимодействие плоской звуковой волны в идеальном газе с двумя точечными вихрями вблизи твёрдой поверхности.

Следует отметить, что в задачах 3 и 4 ставится вопрос о звуковых волнах, порождаемых взаимодействием движущейся из бесконечности волны с вихревыми течениями из задач 2 и 1, соответственно. Это устанавливает связь между всеми главами диссертации.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Задача о вихревой паре вблизи твёрдой поверхности рассмотрена в строгой аналитической постановке. Впервые описана локальная структура нестационарного отрыва пограничного слоя.

2. Решение задачи о порождении вихря вращающимся цилиндром впервые получено одновременно и в нестационарной постановке, и с учётом сжимаемости. Показано, что в широком диапазоне условий, соответствующих реальным газам, скорость течения на больших расстояниях от поверхности цилиндра превосходит скорость в случае несжимаемой жидкости.

3. Задача о взаимодействии звука с осесимметричным вихрем впервые решена для вихря, который может быть создан в реальной вязкой среде. Показано, что решение обобщает оба известных решения классической задачи взаимодействия звука с точечным вихрем.

4. Для задачи о взаимодействии звука с двумя точечными вихрями вблизи твёрдой поверхности получено решение нового типа: волна, удовлетворяющая граничному условию излучения Зоммерфельда, но отличная от чисто цилиндрической.

Актуальность и практическая значимость работы обусловлена тем, что вихревые течения вблизи твёрдых поверхностей встречаются в ряде практически важных задач. Задача из главы 1 моделирует вихревой след за гражданским самолётом при посадке в аэропорт, когда существует опасность попадания в след другого самолёта. Качественное описание отрыва пограничного слоя может

послужить опорой для развития теории нестационарного ламинарного отрыва. Задачи из глав 2 и 3 носят академический характер. Установленные асимптотические решения могут быть использованы для валидации численных методов и интерпретации соответствующих экспериментов. Данными задачами занимались многие выдающиеся учёные (L. Mack, Л. П. Питаевский, Y. Aharonov, D. Bohm, M. Berry, А. Л. Фабрикант, M. Howe и др.), что подчёркивает значительный интерес со стороны научного сообщества. Результаты главы 3 могут быть полезны при изучении распространения звука через область турбулентности и акустической неустойчивости вихрей, а также имеют приложения в динамике сверхтекучей жидкости и квантовой механике. Обнаруженный характерный пространственный масштаб, намного превосходящий как размер вихря, так и длину акустической волны, определяет минимальный размер области, которую требуется разрешать в физическом или численном эксперименте. Решение задачи из главы 2 необходимо для решения задачи из главы 3 в приближениях более высокого порядка.

В **первой главе** рассмотрена задача о вихревой паре вблизи плоской твёрдой поверхности в вязкой жидкости. Корректно раскрыты особенности в поле скоростей в начальный момент времени. Особая трудность была связана с моделированием отрыва и присоединения пограничного слоя и отсоединения отрывной зоны от поверхности. Продемонстрировано влияние взаимодействия с оторвавшимся завихренным слоем на диссипацию завихренности и на траекторию движения центров вихрей.

Во **второй главе** рассмотрена задача о возникновении вихря в вязком сжимаемом газе при вращении бесконечно протяжённого кругового цилиндра. При этом течение считалось осесимметричным, т.е. пренебрегалось возможной неустойчивостью. С помощью метода сращиваемых асимптотических разложений построено решение в двух областях на больших временах. Обнаружен интересный эффект немонотонного поведения циркуляции на масштабе порядка радиуса цилиндра. Результаты валидируются численным решением полных уравнений Навье—Стокса.

Третья глава посвящена двум задачам взаимодействия течений газа с акустическими возмущениями. Используется борновское приближение, в котором

периодическое по времени решение удовлетворяет неоднородному уравнению Гельмгольца с граничным условием излучения Зоммерфельда. Основная сложность состояла в асимптотическом вычислении интеграла свёртки правой части уравнения с функцией Грина в приближении малых длин волн. Результат подтверждается численным интегрированием. Наиболее важным свойством решения для случая осесимметричного вихря с экспоненциально затухающим полем скорости является наличие предельного перехода к классическому решению для случая точечного вихря.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием классических уравнений гидродинамики – уравнений Навье—Стокса (в задачах о вихрях над плоскостью и о вращении цилиндра) и линеаризованных уравнений Эйлера (в задачах о взаимодействии вихрей со звуком) – с применением известных методов интегрирования, согласованием асимптотических и численных решений и согласованием с хорошо апробированными решениями других авторов.

По материалам диссертации имеются **замечания**:

1. По существу в диссертации представлено лишь частное численное решение задачи взаимодействия двух вихрей с плоскостью, когда начальное расстояние между вихрями равно расстоянию вихрей до плоскости. Причем решение дается для трех чисел Рейнольдса, отличающихся на порядок от реальных значений чисел Рейнольдса. Из этого решения можно лишь качественно судить о рассматриваемом явлении. Полный анализ этого явления отсутствует.
2. Решение задачи о порождении осесимметричного вихря в вязкой среде с помощью вращения бесконечного кругового цилиндра для случая сжимаемого газа с переменной вязкостью чересчур громоздко и необозримо. Интерес представляет второй член разложения по малому числу Маха, в котором главный член – это классическое точное решение о развитии вихря в несжимаемой жидкости. Однако это простое для анализа решение для поля скоростей не выписано. Автор привел лишь разложение для температуры. Из-за этого упущения результат автора серьезно проигрывает в наглядности его представления.

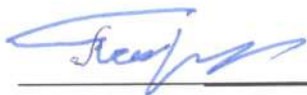
3. Слабо освещён обзор исследований турбулентного вихревого следа при реальных числах Рейнольдса.

Указанные замечания имеют характер рекомендаций и не снижают общей ценности работы. В целом, диссертационная работа Д.А. Гаджиева выполнена на высоком научном уровне и носит законченный характер. Основные результаты диссертации изложены в 9 статьях, индексируемых в Web of Science и Scopus, из которых 2 опубликованы в ведущих журналах РАН и 1 в основном европейском журнале по гидродинамике, что говорит о признании и высокой оценке результатов автора как российскими, так и европейскими учёными. Результаты прошли апробацию на ряде конференций и семинаров.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Диссертация полностью соответствует паспорту специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы» и отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Гаджиев Дмитрий Александрович заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Лаборатории механики систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского» Российской академии наук (119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1, телефон +7(916)079-61-58, e-mail: petrovipmech@gmail.com)

«19» ноября 2021 г.



Петров Александр Георгиевич

Подпись А.Г. Петрова заверяю
Ученый секретарь ИИМех РАН



М.А. Котов

19.11.2021