ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Бычкова Олега Павловича
на тему: «Исследование физических механизмов усиления шума за счет взаимодействия струи и крыла самолета»
по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертация О.П. Бычкова посвящена изучению механизма усиления шума струи авиационного двигателя за счёт взаимодействия струи с кромкой крыла.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Во введении обосновывается актуальность изучения рассматриваемой задачи: известно, что при взаимодействии струи двигателя с крылом происходит усиление уровня звукового давления в «среднем» диапазоне частот, причём усиление происходит как над, так и под крылом, что нельзя объяснить простым отражением возмущений от поверхности крыла. Формулируется гипотеза, исследуемая в работе: усиление происходит за счёт дифракции на крыле волн неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, развивающихся в слое смешения струи с окружающим потоком. Будучи перенаправленными в верхнюю и нижнюю полусферу за счёт дифракции, волны неустойчивости и приводят к наблюдаемому усилению шума. Данная гипотеза нашла своё полное подтверждение в проведённых исследованиях.

Первая глава посвящена аналитическому исследованию модельной двумерной задачи: неустойчивость плоского тангенциального разрыва, сходящего с полубесконечной пластины (модель сопла или мотогондолы) в присутствии другой полубесконечной пластины (модель крыла). Задача решается методом Винера-Хопфа. Исследование проводится в двух постановках. В первой, приближённой, предполагается, что генерация волны неустойчивости происходит независимо от её последующей дифракции на

пластине, что справедливо, если кромка пластины достаточно удалена от кромки сопла, и решение разбивается на две упрощённые подзадачи. Во второй постановке получено точное решение исходной задачи, учитывающее взаимное влияние кромок сопла и крыла.

Вторая глава посвящена аналогичной трёхмерной задаче: дифракция возмущений, возникающих в слое смешения круглой струи, на плоской пластине. В отличие от плоской задачи, здесь возмущения в слое смешения считаются заданными в виде локализованных волновых пакетов, которые соответствуют росту волн неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и их последующему пространственному затуханию из-за размытия слоя смешения. После того, как определено радиальное распределение возмущений в волновом пакете, методом Винера-Хопфа решается трёхмерная задача об их дифракции на полубесконечной пластине. Проанализирована структура решения, в частности, поведение мод, соответствующих различным азимутальным волновым числам.

В третьей главе проводятся экспериментальные исследования влияния установки пластины вблизи струи на усиление шума струи в дальнем поле. С использованием решетки микрофонов, расположенных по окружности, перпендикулярной оси струи, и последующего разложения данных измерений по азимутальным модам построены диаграммы направленности шума струи без установленной пластины и с установленной пластиной, и выделен т.н. «шум взаимодействия». Экспериментально определено, какие моды усиливаются за счёт постановки пластины, а какие остаются практически неизменными. Получено, что наличие спутного потока приводит к ослаблению шума взаимодействия.

Четвертая глава также экспериментальная и посвящена тщательному измерению характеристик ближнего поля струи для использования в качестве входных данных в теоретической модели и последующей экспериментальной валидации теории. Проведено сравнение диаграмм направленности и спектров с аналитическим решением, полученным во

второй главе. Продемонстрировано качественное и во многом количественное согласие теории и измерений. Таким образом, валидирована разработанная теоретическая модель и обоснован механизм роста шума струи при взаимодействии с кромкой крыла.

Актуальность темы исследования очевидна и связана с проблемой снижения шума современных гражданских самолётов, в проектировании которых имеется тенденция сближения мотогондолы двигателя с крылом, а в перспективе – интеграция двигателя и планера, что приводит к возникновению шума взаимодействия струи двигателя и задней кромки крыла.

Достоверность полученных результатов обусловлена применением строгих математических методов (преобразование Фурье, метод Винера-Хопфа, метод перевала), использованием современных калиброванных микрофонов в экспериментальной части и согласием между теорией и экспериментом.

Новизна полученных результатов обуславливается новыми постановками задач, проведением новых экспериментальных исследований шума взаимодействия струи и крыла, валидацией разработанной модели в случае более реалистичной конфигурации крыла с выпущенным закрылком вблизи двухконтурной струи.

К диссертации имеется ряд замечаний.

1. Как в теоретической, так и в экспериментальной части работы встречаются утверждения, не обоснованные в тексте, но со ссылками на статьи соискателя, где такие обоснования приведены. Например, ссылки на статью [31] на стр. 32 и 40 и на статью [70] на стр. 100, 101, 103 По мнению оппонента, диссертация должна быть самодостаточной работой, в которой все утверждения должны быть максимально подробно обоснованы.

2. В теоретической части работы ряд выкладок проведен недостаточно подробно, нетривиальные обоснования ряда утверждений отсутствуют, а проверка условий применимости используемых асимптотических методов в тексте диссертации не проведена. А именно:

- В разделе 1.2 не обосновано, почему разрезы функций $\beta(\alpha)$ проведены именно таким образом.
- При выводе уравнения (1.10) из (1.9) пропущен множитель 2 у второго члена в левой части равенства.
- В формулах обратного преобразования Фурье (1.12), (1.13) контур интегрирования «обходит полюса α_0 и k' сверху». В тексте нет весьма нетривиального объяснения того, как этот контур получен деформированием исходного контура интегрирования по вещественной оси и почему при обходе этих полюсов в указанных формулах не появились соответствующие вычеты.
- Стр. 32: не приведена общая идея операций с функцией $k_{12/22}$, наличие точек ветвления и разрезов у которой препятствует применению метода Винера-Хопфа (замена разрезов цепочкой полюсов при аппроксимации Паде и дальнейшее устранение полюсов в одной из полуплоскостей при добавлении соответствующих вычетов).
- Стр. 33: проводится оценка значений интегралов методом перевала, однако перевальный контур не показан, единственность перевальной точки не доказана, поведение подынтегральной функции в «хвостах» контура интегрирования не исследовано. Таким образом, условия применения метода перевала в тексте диссертации не

проверены. Аналогичные вопросы возникают к двойному методу перевала при переходе от формулы (2.22) к (2.24).

- Формулы (1.23)-(1.25) представлены как финальное решение задачи о дифракции в дальнем поле. Однако, ниже на стр. 34 в двух последних абзацах говорится, что к ним нужно добавить вычеты в полюсах, которые пересечены при деформировании контура интегрирования в методе перевала, а на стр. 37 – что нужно ещё добавить петли контура интегрирования, обходящие разрезы. Математическая строгость решения (1.23)-(1.25), таким образом, вызывает вопросы. Кроме того, каждый из этих членов имеет свою физическую интерпретацию, которая, однако, в диссертации не обсуждается.

- Стр. 75: не объясняется, почему именно вычет в α_s соответствует начальному возмущению.

3. Стр. 37: непонятно, как из рис. 1.6 следует, что «зависимость амплитуды пульсаций давления … от поперечного расстояния … носит экспоненциальный характер». Данный характер было бы лучше продемонстрировать явно построением соответствующего графика.

4. При оценке методом перевала интеграла (2.8) утверждается, что асимптотика даётся седловой точкой $f(\alpha)$, что, по-видимому, неверно, поскольку не все слагаемые этой функции содержат большой параметр r.

5. В разделе 3.1 все величины в децибелах (в т.ч. спектры) приведены для квадратов амплитуд звукового давления ($Па^2$), а не для самих амплитуд (Па), что совершенно неочевидно из

текста. Не ясно, уровни давления или их квадраты приводятся в дБ в последующих разделах.

6. Раздел 3.2, в т.ч. рис. 3.12: термин «цилиндрическая направленность» представляется не вполне удачным, поскольку не даёт представления, собственно, о направлении распространения шума.

Вместе с тем, указанные замечания относятся к недостаткам изложения результатов и не затрагивают их существа. Несомненными достоинствами диссертации является получение точных аналитических решений, невозможное без виртуозного владения сложным математическим аппаратом, и их валидация экспериментами, причём полученное соответствие теории и эксперимента можно без преувеличения назвать блестящим. Результаты работы опубликованы в 9 статьях, инексируемых Web of Science/Scopus, в том числе в ведущих международных журналах, и докладывались на многих российских и международных конференциях. По мнению оппонента, данная работа значительно превышает средний уровень кандидатских диссертаций как по количеству полученных результатов, так и по их уровню.

Диссертация отвечает всем требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к кандидатским диссертациям. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Бычков Олег Павлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

доцент, доктор физико-математических наук
заведующий 103 лабораторией экспериментальной гидродинамики
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова

Веденеев Василий Владимирович

«11» февраля 2021 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (916) 338-23-82, e-mail: vasily.vedeneev@mail.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация:

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Адрес места работы:

119192, г. Москва, Мичуринский проспект, д. 1

НИИ механики МГУ, 103 лаборатория экспериментальной гидродинамики

тел.: +7 (916) 338-23-82, e-mail: vasily.vedeneev@mail.ru

Подпись сотрудника НИИ механики МГУ
В.В. Веденеева удостоверяю:

«11» февраля 2021 г.