

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук
Бобкова Владимира Георгиевича, на диссертационную работу
Чэнь Болуня «Методика оценки шумового воздействия на окружающую среду
винтов легкомоторной авиации с распределенными гибридными и
электрическими силовыми установками с учетом компоновки летательных
аппаратов», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 2.5.12. – «Аэродинамика и процессы
теплообмена летательных аппаратов»

Диссертационная работа Чэнь Болуня посвящена разработке методики прогнозирования шумового воздействия на окружающую среду легкомоторных самолётов с распределёнными гибридными и электрическими силовыми установками (DEP/DNER). Основное внимание уделено оценке вклада в общий шум воздушных винтов, их взаимного влияния и взаимодействия с крылом. Работа имеет ярко выраженную инженерную направленность: предложенная методика ориентирована на использование на ранних этапах проектирования, когда необходимы быстрые параметрические оценки различных компоновок. Автор последовательно решает три задачи: построение аналитической («быстрой») модели шума винтов в присутствии крыла, верификация модели на известных экспериментальных и расчётных данных, а также численное исследование акустических характеристик одиночных и распределённых винтов в четырёх типовых компоновках. В качестве базового объекта взят самолёт Ан-2, что позволяет использовать отработанные экспериментальные данные МАИ.

Актуальность темы исследования диссертации не вызывает сомнений. В мировом авиастроении наблюдается устойчивый тенденция перехода к электрическим и гибридным силовым установкам, а концепция распределённой тяги рассматривается как одна из ключевых для региональной и малой авиации ближайшего будущего. При этом акустическое воздействие таких летательных аппаратов существенно отличается от традиционных винтовых и реактивных машин: появляются когерентные источники шума, эффекты интерференции, дополнительные механизмы генерации звука при взаимодействии винтов с крылом.

Современные требования ИКАО, ACARE и NASA по снижению шума ужесточаются, и разработчики новых летательных аппаратов нуждаются в

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«05» 06 2026 г.

доступных инженерных методиках, позволяющих на ранних стадиях оценивать шум перспективных компоновок. Разработанная автором быстрая модель (время счёта – секунды против десятков часов вычислительных экспериментов) закрывает именно эту потребность. Таким образом, тема диссертации является своевременной и практически востребованной.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем диссертационной работы составляет 121 страницу и включает 86 рисунков, 10 таблиц и приложение. Список литературы включает в себя 133 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи, научная новизна, практическая значимость и сформулированы положения, выносимые на защиту. Особо следует отметить чёткое разделение предмета и объекта исследования, а также подробную апробацию. Стиль введения соответствует требованиям ВАК.

В **первой главе** автор рассматривает классификацию распределенных электрических и гибридных силовых установок (DEP/DEHP), аэродинамику одиночных и распределённых винтов (на базе дисковой теории, вихревой теории Жуковского и теории элемента лопасти), а затем переходит к аэроакустике: анализирует влияние на акустику расстояния между винтами, турбулентности, направления вращения и эффекта монтажа (шум крыла от следа винта). Обзор охватывает как классические работы (Гутин, Жуковский, Лайтхилл), так и современные исследования NASA и DLR.

Глава 2 («Математические модели расчета шума») – методологическое ядро диссертации. Автор последовательно описывает три модели: акустико-вихревое волновое уравнение (реализовано в пакете FlowVision), уравнение FW-N в формулировке Farassat 1A (реализовано в пакете Ansys Fluent) и собственную быструю аналитическую модель. Последняя заслуживает отдельного внимания: она базируется на теории Гутина для шума винта и на классической теории нестационарной подъёмной силы (функция Сирса) для шума крыла. Вывод формул (36)-(37) для шума нагрузки и объёмного шума, а также (81)-(86) для шума крыла от следа винта выполнен корректно. Глава демонстрирует высокий уровень владения математическим аппаратом аэроакустики.

Глава 3 («Прогнозирование и анализ аэроакустических характеристик») содержит верификацию и собственно расчёты. Верификация проведена на трёх независимых источниках: эксперимент DLR (винт+крыло), расчёт NASA GL-10 (8

винтов) с помощью кода ANOPP и эксперимент МАИ на винте АВ-2 самолёта Ан-2. Особенно ценно сравнение результатов трёх численных методов, реализованных в коммерческих пакетах Fluent, FlowVision, Acran между собой и с экспериментом. Далее автор с использованием разработанной аналитической модели выполнил параметрические расчёты для одиночного большого винта (диаметр 3,6 м) и трёх малых винтов (диаметр 2,0 м) в четырёх компоновках и при четырёх углах установки. Автором получены количественные оценки, которые показывают, что компоновка из распределённых винтов имеет уровень акустического шума на 2–5 дБ выше, чем один винт равной тяги, а в компоновках «толкающий винт» и «над крылом на 80% хорды» повышение достигает 5–8 дБ в передней и задней полусферах.

Заключение лаконично суммирует основные результаты и соответствует положениям, выносимым на защиту.

Научная новизна работы состоит в следующем: автором разработана новая математическая модель дополнительного источника шума на крыле, вызванного следом воздушного винта. В отличие от известных работ, ограничивающихся суперпозицией шума изолированных винтов или учётом взаимодействия только между винтами, автор предлагает аналитическое описание генерации звука на крыле из-за периодического воздействия вихревого следа. Автором создана быстрая инженерная методика прогнозирования аэроакустических характеристик для систем «винт–крыло» и «набор винтов–крыло», которая позволяет существенно сократить время расчёта с десятков часов до нескольких секунд. Впервые выполнено систематическое численное сравнение четырёх типов компоновок винта относительно крыла как для одиночного, так и для распределённых винтов. Автором получены количественные оценки превышения уровня шума распределённых винтов над одиночным при равной тяге, а также выявлены компоновки, приводящие к локальному увеличению шума в передней и задней полусферах.

Практическая и научная ценность работы. Научная ценность работы заключается в развитии методов аналитической аэроакустики применительно к новому классу летательных аппаратов с распределёнными электрическими и гибридными силовыми установками. Предложенная модель шума крыла от следа винта может быть использована в дальнейших исследованиях взаимодействия ротора и статора в авиационных двигателях и вентиляторах. Практическая значимость работы тем более не вызывает сомнений – разработанная и

провалидированная автором быстрая методика может быть внедрена в практику проектных организаций для оценки и оптимизации компоновок легкомоторных самолётов с DEP на ранних этапах проектирования. Также полученные количественные соотношения для различных исследованных автором компоновок дают проектировщикам конкретные ориентиры.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертационной работы обеспечена как использованием классических теорий (Гутина, Жуковского, Сирса, Лайтхилла, FW-H), проверенных многолетней практикой, так и валидацией на экспериментальных данных и валидацией с результатами современных коммерческих пакетов.

Замечания по диссертационной работе. При общей положительной оценке диссертации Чэнь Болюня, следует отметить ряд замечаний.

1) Оформление текста диссертационной сделано небрежно: в тексте присутствует ряд стилистических погрешностей и опечаток; формулы, описывающие разработанную модель, приведенные в главе 2 трудно читаемы.

2) При упрощении модели шума крыла (стр. 69–70) амплитуда пульсаций подъемной силы принята автором постоянной по размаху ($A_m(y_0') = 0.5 \cdot A_m(r_{eff})$). Это сильное допущение, не обоснованное в тексте, тем более что экспериментальное распределение на рис. 42 показывает неравномерность, и следовало бы оценить влияние этого упрощения на конечный результат.

3) Расхождение численного метода FW-H с экспериментом в передней полусфере (0–45°, рис. 48) достигает 10 дБ, хотя автор объясняет это шумом двигателя и турбулентностью. Следовало бы количественно оценить, какая часть расхождения приходится на эти факторы.

4) Отсутствует количественная оценка погрешности предложенной модели. В работе приведены только визуальные сравнения графиков. Желательно было бы представить таблицу среднеквадратичного отклонения по углам для разных углов установки, что позволило бы пользователям методики понимать её точность.

5) Достаточно скудно описана численная реализация модели; не приведены временные шаги и критерии сходимости для численных расчётов (Глава 3.2.2).

Указанные замечания не носят принципиального характера и не ставят под сомнение основные научные результаты диссертации.

Общая оценка работы. Приведенные выше замечания несущественно влияют на общую оценку работы. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, а её результаты представляют научную и практическую ценность.

Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертации изложены в 13 публикациях, в том числе в двух изданиях, входящих в перечень ВАК и в трёх изданиях и сборниках трудов конференций индексируемых в базе данных Scopus. Диссертационная работа удовлетворяет квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям и соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней, а её автор Чэнь Болунь заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.12. – «Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов».

Официальный оппонент,

старший научный сотрудник
Федерального государственного
учреждения "Федеральный
исследовательский центр Институт
прикладной математики им. М.В.
Келдыша Российской академии наук",
кандидат физико-математических наук

Бобков Владимир Георгиевич

«29» мая 2026 г.

Подпись Бобкова Владимира Георгиевича
удостоверяю.

Зам. директора по научной работе
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
доктор физико-математических наук



Поляков С.В.

С отзывом ознакомлен

Чэнь Болунь

05.06.2026