

УДК 534.8

Моделирование тонального шума сложных винтовых конфигураций

Фараносов Георгий Анатольевич^{1(*)}georgiy.faranosov@tsagi.ru
SPIN-код: 7312-2990*Титарев Владимир Александрович*^{1,2}vladimir.titarev@frccsc.ru
SPIN-код: 2086-9279¹ ФАУ «ЦАГИ», Московский комплекс, Москва, Россия² ФИЦ ИУ РАН, Москва, Россия

Аннотация. Существуют вычислительные задачи, сложность которых определяется не только объемом и детализацией сеток или наличием в распоряжении исследователя мощного суперкомпьютера, но и физической постановкой задачи и умением извлекать из массивов вычислительных данных именно те характеристики течения, которые отвечают за генерацию шума. Одной из таких задач является моделирование тональной компоненты шума винта, которая вносит значимый вклад в сертификационную метрику EPNдБ, особенно для перспективных мультивинтовых систем (распределенные силовые установки, биротативные винты), интегрированных в компоновку планера. В докладе представлены результаты расчетных исследований задач, где ключевую роль играют эффекты аэроакустического взаимодействия винтов как между собой, так и с элементами планера и показано, каким образом применение валидированного численного метода позволяет раскрыть физические особенности механизмов генерации шума.

Ключевые слова: тональный шум винта, биротативный винтовентилятор, распределенная силовая установка, численное моделирование

Modeling the tonal noise of complex propeller configurations

Faranosov Georgy Anatolievich^{1(*)}georgiy.faranosov@tsagi.ru
SPIN-code: 7312-2990*Titarev Vladimir Alexandrovich*^{1,2}vladimir.titarev@frccsc.ru
SPIN-code: 2086-9279¹ FAU TsAGI, Moscow Complex, Moscow, Russia² FRC CSC RAS, Moscow, Russia

Abstract. There are computational problems whose complexity is determined not only by the volume and detail of meshes or the availability of a powerful supercomputer, but also by the physical formulation of the problem and the ability to extract from large computational data arrays precisely those flow characteristics that are responsible for noise generation. One such problem is modeling the tonal noise component of a propeller, which makes a significant contribution to the EPNdB certification metric, especially for advanced multi-propeller systems (distributed propulsion systems, contra-rotating propellers) integrated into the airframe layout. This paper presents the results of computational studies of problems where the key role is

played by the effects of aeroacoustic interaction of propellers both with each other and with airframe elements, and demonstrates how the application of a validated numerical method allows revealing the physical features of noise generation mechanisms.

Keywords: propeller tonal noise, contra-rotating open rotor, distributed propulsion system, numerical simulation

Введение. Существуют вычислительные задачи, сложность которых определяется не только объемом и детализацией сеток или наличием в распоряжении исследователя мощного суперкомпьютера, но и физической постановкой задачи и умением извлекать из массивов вычислительных данных именно те характеристики течения, которые отвечают за генерацию шума. Одной из таких задач является моделирование тональной компоненты шума винта, которая вносит значимый вклад в сертификационную метрику EPNдБ [1], особенно для перспективных мультивинтовых систем (распределенные силовые установки, биротативные винты), интегрированных в компоновку планера.

Воздушный винт является сложным источником звука, предсказание характеристик которого необходимо для разработки винтовых двигателей для современных и перспективных самолетов. Основными составляющими шума винта являются широкополосный шум, связанный, в значительной мере, с взаимодействием турбулентных пульсаций в пограничном слое лопасти, с ее задней кромкой, и тональный шум, связанный с детерминированными аэродинамическими процессами, нестационарность которых для внешнего наблюдателя обусловлена вращением винта (или винтов) [2]. Именно тональные гармоники в значительной мере определяют раздражающее действие шума, поэтому значительная часть исследований по шуму винтов посвящена моделированию тонального шума [3].

Поскольку при расчете тонального шума винтов не речь идет о моделировании турбулентности, задача может казаться достаточно простой по вычислительной сути, однако даже в этом случае многое решает физическая интуиция, способность ставить правильные запросы, отталкивающиеся от конфигурации системы, и анализировать получаемые ответы. Сложные винтовые конфигурации (биротативные винты, распределенные винты, интегрированные в компоновку планера) позволяют максимально реализовать преимущества винтовых движителей, однако их акустическое проектирование сталкивается со значительными трудностями [3, 4].

В отличие от одиночного винта, оценка шума которого сравнительно проста, анализ сложных систем затруднен как при постановке лабораторного и/или натурного эксперимента, так и при численном моделировании. Тем не менее, аккуратное применение вычислительных методов позволяет проводить детальный анализ различных источников шума в сложных конфигурациях, зачастую недоступный для экспериментального изучения. В настоящей работе представлены некоторые результаты расчетных исследований тех задач, в которых ключевую роль играют эффекты аэроакустического взаимодействия винтов как между собой, так и с элементами планера и показано,

каким образом применение валидированного численного метода позволяет раскрыть физические особенности механизмов генерации шума.

Материалы и методы. В отличие от двухконтурного реактивного двигателя, где основные аэродинамические процессы «скрыты» внутри мотогондолы, винт представляет собой открытую систему, создающую значительные аэродинамические и акустические возмущения в окружающем пространстве. Первая простейшая модель тонального шума пропеллеров, в которой воздействие винта на окружающую среду сводилось к точечным силам, что позволяло получить аналитическое решение, была предложена Л.Я. Гутиным [5]. Однако столь упрощенный подход, при котором не нужно детальное знание геометрии и распределения нагрузок по лопасти, «работает» только когда винт является компактным источником шума, т.е. когда длина волны излучения много больше диаметра винта.

В последние годы надежно зарекомендовал себя так называемый «гибридный подход» к данной задаче. В рамках такого подхода исходная полная система уравнений гидродинамики (это может быть система уравнений Навье-Стокса или, в некоторых случаях, Эйлера) решается численно методами вычислительной гидродинамики (CFD), но не во всей области пространства вплоть до так называемого дальнего акустического поля, в котором обычно определяется шум летательных аппаратов при сертификации и которое представляет практический интерес, а только в некоторой весьма компактной области – в так называемом ближнем поле. Шум в дальнем поле рассчитывается затем на основе решения волнового уравнения по методу Фокса Вильямса-Хоукинса (FWH) [3] с использованием в качестве граничных условий результатов нестационарного CFD-расчета (5 переменных: $\vec{u}$, p , ρ), сохраненных на некоторой контрольной FWH-поверхности, окружающей источник шума. Звуковое давление в методе FWH представляется в виде интеграла по FWH-поверхности $p(\vec{r}, t) = \oint F(\vec{r}, \vec{r}', t, \vec{u}, p, \rho) ds(\vec{r}')$, где $\vec{r}$ — радиус-вектор точки в дальнем поле, $\vec{r}'$ — радиус-вектор точки на FWH-поверхности, конкретный вид функции F можно найти, например, в [6, 7].

Подобные методы могут использоваться для расчета как тонального, так и широкополосного шума, однако моделирование последнего существенно более затратно с точки зрения потребных вычислительных ресурсов, поскольку требует детального разрешения турбулентного пограничного слоя на лопастях. С точки зрения практического применения в инженерных приложениях ключевую роль играет скорость получения результата. В связи с этим численное моделирование широкополосного шума пока занимает нишу исследовательских задач, в то время как высокоточные методы моделирования тонального шума приближаются к инженерным инструментам. Схематично иерархия вычислительных методов применительно к задаче расчета шума винта в координатах «точность — затраты» приведена на рис. 1.

Наибольший практический интерес представляют не столько одиночные винты, но их реалистичные конфигурации: винты, интегрированные друг

с другом (например, «открытый ротор») и/или с элементами планера (крыло, пилон). В подобных системах ключевую роль играют эффекты взаимодействия, влияющие как на аэродинамические, так и на акустические характеристики. В настоящее время гибридный подход позволяет рассчитывать тональный шум таких компоновок. Чтобы приблизить этот подход к инженерному в смысле устойчивости и скорости, а значит, возможности решения оптимизационных задач улучшения геометрии лопастей для снижения шума, необходимы надежные параллельные вычислительные методы, способные моделировать обтекание тел сложной формы, вращающихся с разными скоростями.

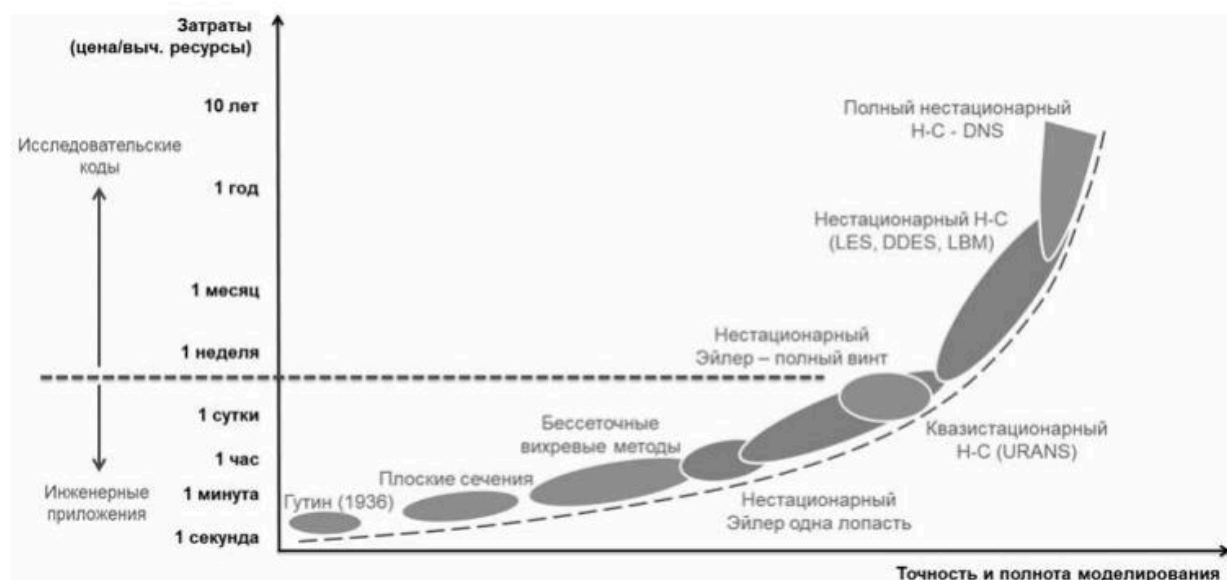


Рис. 1. Схематичное представление иерархии расчетных методов шума винтов

В акустическом отделении ЦАГИ для таких задач разрабатывается программный комплекс «Гербер» [8–10], в котором реализован неявный численный метод высокого порядка аппроксимации. В нем комбинируются вращающиеся области вокруг винтов и неподвижная область, охватывающая элементы планера, с интерполяцией решения на скользящих границах. Для проведения расчетов на суперЭВМ реализована гибридная параллельная модель MPI+OpenMP. Сначала на основе уравнений Эйлера или Навье — Стокса моделируется нестационарное течение в ближней зоне, затем шум в дальнем поле рассчитывается по методу Фокса Вильямса — Хоукингса (FWH) с использованием функции Грина конвективного волнового уравнения [7], что позволяет явным образом учитывать набегающий поток.

Результаты. За последние годы программный комплекс «Гербер» прошел достаточно тщательную валидацию в части моделирования шума одиночных винтов как на данных зарубежных экспериментов на крупномасштабных акустических установках [11], так и на данных, полученных в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ [10]. Кроме того, недавно проведенная модификация оборудования на стенде АК-2, позволяет проводить одновре-

менные измерения аэродинамических и акустических характеристик винтов для комплексной валидации численных методов. На рис. 2 показано сравнение результатов расчета и эксперимента в части моделирования коэффициента тяги (рис. 2, *а*) и спектра шума (рис. 2, *б*) тематического двухлопастного винта, демонстрирующее достаточно высокую точность расчета, позволяющего корректно разрешить на умеренной сетке (около 14 млн ячеек) не только тяговые характеристики винта, но и первые 5 гармоник тонального шума.

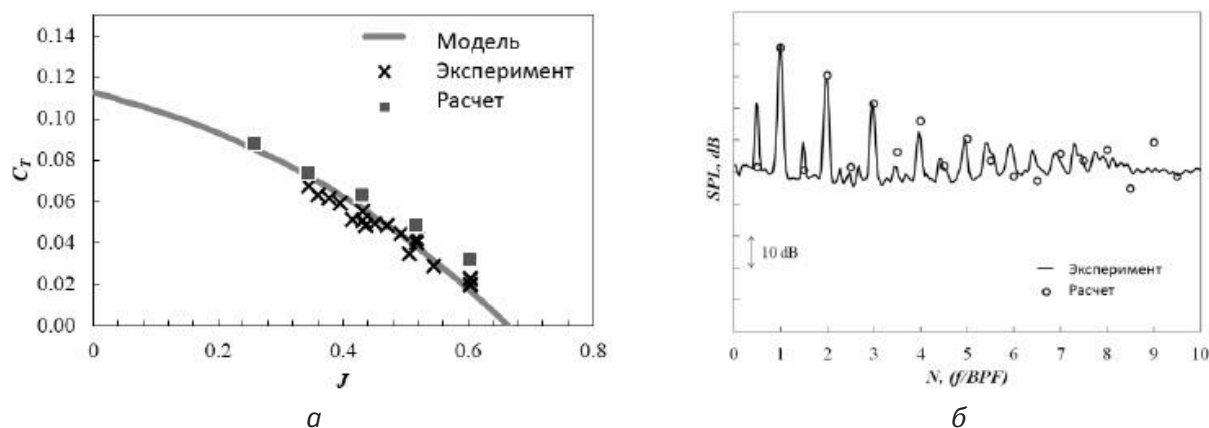


Рис. 2. Пример результатов валидации комплекса «Гербера» для тематического винта:

а — зависимость коэффициента тяги от относительной поступи; *б* — спектр шума в плоскости вращения винта

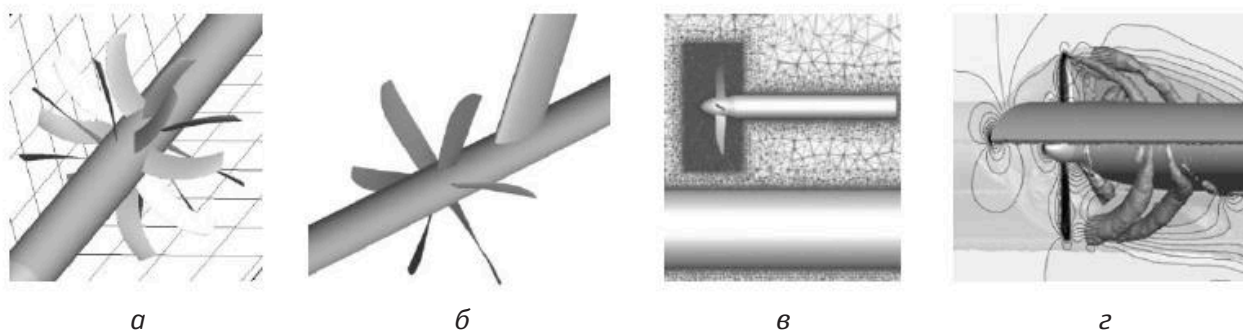


Рис. 3. Различные компоновки, исследованные с помощью пакета «Гербера»:

а — открытый ротор; *б* — винт-пилон; *в* — винт-фюзеляж; *г* — винт-крыло

Успешная валидация метода применительно к моделированию аэродинамики и тонального шума одиночных винтов позволяет использовать его для моделирования более сложных конфигураций: винта с пилоном [9], винта с фюзеляжем [12], винта с крылом [13] и открытого ротора [14] (рис. 3). Так, в работе [9] были обнаружены интерференционные эффекты между собственным шумом винта и шумом, переизлучаемым пилоном. В работе [12] с помощью кода «Гербера» были смоделированы акустические нагрузки от винта на поверхности фюзеляжа с целью оптимизации его силового набора с точки зрения звукоизолирующей способности. В [13] была изучена схема распределенной силовой установки, в которой винт располагался между предкрылком и крылом и продемонстрировано существенное влияние крыла

на акустические характеристики системы, выявлены особенности, негативно влияющие на сертификационные уровни шума на местности.

Показателен результат, полученный для биротативного винтовентилятора, состоящего из двух соосных противовращающихся винтов (также называемого CROR — counter rotating open rotor) [14]. При анализе результатов численного моделирования обнаружено достаточно нетривиальное явление излучения волн Маха в заднюю полусферу (рис. 4, а). Аналогичное явление наблюдалось и в расчетах других авторов [15]. Физический анализ показывает, что такие возмущения возникают, когда шум взаимодействия возбуждает слабо затухающие собственные моды в струйном течении за винтом, что, в свою очередь, порождает излучение волн Маха в набегающий поток (рис. 4, б).

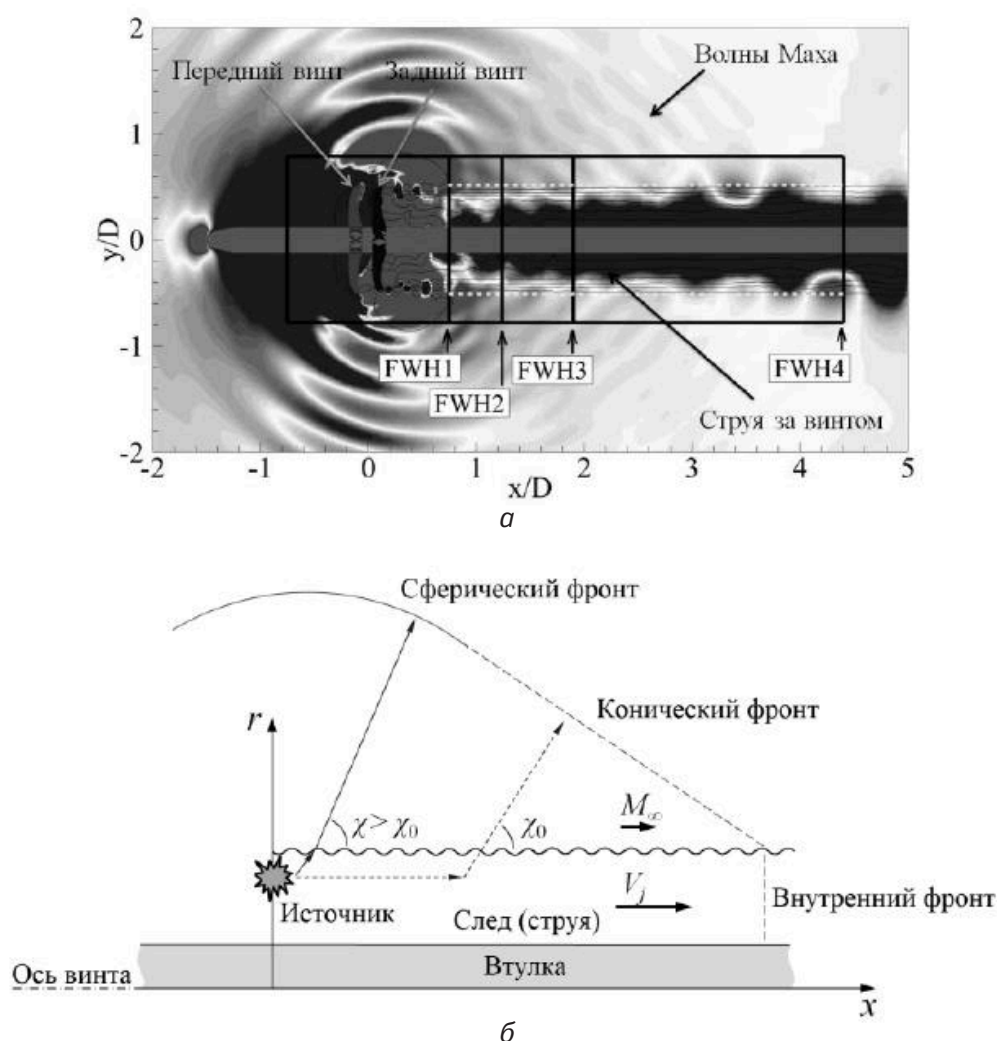


Рис. 4. Мгновенное поле давления, создаваемого CROR (а), черным показаны контуры контрольных FWH-поверхностей для расчета шума; качественное объяснение структуры акустического поля в задней полусфере (б)

Как правило, для одиночного винта создаваемое им струйное течение не оказывает заметного влияния на излучаемый тональный шум, излучаемый преимущественно в окрестности плоскости вращения винта. В случае же би-

ротативного винтовентилятора оказывается, что тональный шум взаимодействия, проявляющийся на комбинационных частотах $f_{n_1, n_2} = (n_1 B_1 + n_2 B_2) f_0$ (B_1 и B_2 — число лопастей переднего и заднего винтов, n_1 и n_2 — любые целые значения, f_0 — частота вращения винтов), излучается в телесный угол вблизи оси винта, а значит, в том числе, непосредственно в струю за винтом, что и приводит к возбуждению собственных мод струи. Классический подход FWH с контрольными поверхностями, плотно охватывающими винты (FWH1 на рис. 4, а) приводит к некорректной оценке шума на комбинационных частотах. Удлиненная поверхность (FWH4 на рис. 4, а) дает точные результаты, но требует очень мелкой сетки на большом протяжении, что затратно с вычислительной точки зрения. Для корректного расчета шума взаимодействия без экстремальных требований к сетке предложен новый подход, основанный на использовании аналитической модели возмущений в следе за винтом, обеспечивающий точность, сравнимую с использованием очень длинных FWH-поверхностей. В таком подходе струя за винтом моделируется в виде бесконечного цилиндрического дозвукового течения, отделенного от окружающего потока тангенциальным разрывом. Для такого течения аналитически находится дисперсионное соотношение для собственных мод, решение которого позволяет найти параметры возбуждаемой винтом слабо затухающей моды (с фазовой скоростью относительно струи, близкой к скорости звука), порождающей маховское излучение в окружающей среде. Амплитуда и фаза этой моды могут быть откалиброваны по полному решению вблизи винта, после чего аналитическое решение используется для расчета шума в дальнем поле, дополняя решение от стандартной FWH-поверхности и обеспечивая высокую точность моделирования комбинационных гармоник.

Обсуждение. Численные методы не являются заменой физического эксперимента — напротив, их ценность раскрывается только при обязательной валидации на экспериментальных данных. Именно валидация превращает расчетный инструмент из «черного ящика» в надежный способ расширения экспериментальных возможностей: позволяет заглянуть глубже в физику процессов и понять механизмы генерации шума в сложных конфигурациях, которые в эксперименте часто остаются «скрытыми».

Именно такой подход, примененный к результатам расчетов рассмотренных винтовых конфигураций, позволил провести детальный анализ каждой системы; оценить взаимное влияние различных элементов на генерацию и распространение шума; выдать рекомендации по его снижению в каждом конкретном случае. В таком случае моделирование не подменяет эксперимент, а дополняет его, предоставляя информацию, подчас недоступную прямому измерению.

Заключение. Показана актуальность задачи моделирования тонального шума воздушных винтов. Рассмотрен ряд задач, в которых важную роль играют эффекты аэроакустического взаимодействия винтов как между собой, так и в компоновке с элементами планера. Продемонстрирована возможность

применения программного комплекса «Гербера» для анализа источников тонального шума и эффектов его распространения в сложных компоновках.

Валидационные эксперименты проведены на базе УНУ «Заглушенная камера с потоком АК-2» ФАУ ЦАГИ. Расчеты выполнены с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «Высокопроизводительные вычисления и большие данные» (ЦКП «Информатика») ФИЦ ИУ РАН (г. Москва).

Авторы благодарны Р.В. Акиньшину, В.О. Еременко и Е.В. Стрельцову за помощь в построении расчетных сеток.

Список источников

- [1] Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации, Охрана окружающей среды. Т. I. Авиационный шум. Международные стандарты и Рекомендуемая практика, 2014.
- [2] Hubbard H.H. Aeroacoustics of Flight Vehicles: Theory and Practice. Vol. 1. Noise Sources. NASA, Greenbelt, MD, USA, 1991.
- [3] Greenwood E. et al. Challenges and opportunities for low noise electric aircraft. *International Journal of Aeroacoustics*, 2022, vol. 21, no. 5–7, pp. 315–381. <https://doi.org/10.1177/1475472X221107377>
- [4] Peake N., Parry A. Modern challenges facing turbomachinery aeroacoustics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2012, vol. 44, pp. 227–248. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-120710-101231>
- [5] Ffowcs Williams J.E., Hawkings D.L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion. *Philos Trans R Soc Lond Ser A, Math Phys Sci*, 1969, vol. 264 (1151), pp. 321–342. <https://doi.org/10.1098/rsta.1969.0031>
- [6] Najafi-Yazdi A., Bres G.A., Mongeau L. An acoustic analogy formulation for moving sources in uniformly moving media. *Proceedings of the Royal Society A*, 2011, vol. 467, pp. 144–165. <https://doi.org/10.1098/rspa.2010.0172>
- [7] Гутин Л.Я. О звуковом поле вращающегося винта. *ЖТФ*, 1936, т. 6, № 5, с. 899–909.
- [8] Беляев И.В., Копьев В.Ф., Титарев В.А. Разработка нового подхода к расчету шума винтов с использованием суперкомпьютеров. *Ученые записки ЦАГИ*, 2014, т. XLV, № 2, с. 78–106.
- [9] Титарев В.А., Фараносов Г.А., Чернышев С.А., Батраков А.С. Численное моделирование влияния взаимного расположения винта и пилона на шум турбовинтового самолета. *Акустический журнал*, 2018, т. 64, № 6, с. 722–736. <https://doi.org/10.1134/S0320791918060126>
- [10] Titarev V., Chernyshev S., Faranosov G. Numerical simulation of propeller aerodynamics and tonal noise using parallel code “Gerbera”. *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, 2025, vol. 63, pp. 313–340. <https://doi.org/10.1515/rnam-2025-0023>
- [11] Belyaev I., Kopiev V., Skvortsov R., Pankratov I., Titarev V., Zaytsev M. Comparison of rotor noise measurement results in large-scale and small-scale anechoic facilities. 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2015, AIAA-2015-2986. <https://doi.org/10.2514/6.2015-2986>

-
- [12] Лазарев Л.А., Титарев В.А., Голубев А.Ю. Оптимизация силового набора подкрепленной оболочки под действием акустического поля винта. *Акустический журнал*, 2022, т. 68, № 3, с. 323–329. <https://doi.org/10.31857/S0320791922030078>
 - [13] Фараносов Г.А., Титарев В.А., Остриков Н.Н., Бычков О.П., Акинъшин Р.В., Дунаевский А.И. Особенности шума винта распределенной силовой установки, интегрированного в механизированное крыло. *XXI науч.-техн. конф. по аэроакустике: тез. докл.* Суздаль, 2025, с. 61–62.
 - [14] Faranosov G., Titarev V. Tonal Mach wave radiation of a counter-rotating open rotor. *Physics of Fluids*, 2025, vol. 37, no. 11, art. no. 116118. <https://doi.org/10.1063/5.0294204>
 - [15] Spalart P.R., Travin A.K., Shur M.L., Strelets M.Kh. Initial Noise Predictions for Open Rotors Using First Principles. *AIAA Paper*, 2010, no. AIAA-2010-379. <https://doi.org/10.2514/6.2010-3793>