

Численное моделирование шума биротативного винтовентилятораИ. П. Бойчук^{1,*} Ю. И. Руднев^{2†}¹Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова
Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46²Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина. Украина, 61002, Харьков, площадь Свободы, д. 4
(Статья поступила 09.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

В работе предлагается численный метод моделирования шума биротативного винтовентилятора, который позволяет сочетать разумную степень точности оценки аэродинамического шума с приемлемой скоростью проведения расчетов. Это достигается в применении упрощенной схемы расчета гидродинамической задачи с использованием вихревого панельного метода и упрощенного метода Фокса Вильямса–Хоукинса (явные формулы Фарассата) для расчета акустики. Предлагаемый подход может быть использован для определения *тонального* шума ротора. Он характеризуется простотой реализации, высокой скоростью проведения расчетов, возможностью учета шума, возникающего при взаимодействии вихревого следа, сходящего с лопастей переднего ротора, с решеткой лопастей заднего. Данный метод применим для предварительных оценок шума на этапе проектирования.

PACS: 43.28.Ra

УДК: 534.231.

Ключевые слова: моделирование шума, открытый ротор.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, основным источником шума современных авиационных двигателей является винтовентилятор (open rotor). Расчет шумовых характеристик винтовых двигателей представляет собой исключительно важную прикладную задачу, решение которой сопряжено со значительными трудностями. Данная сложность многократно возрастает при исследовании шума перспективных биротативных винтовентиляторных двигателей (CROR), поскольку расчетная схема должна учитывать шум, возникающий при взаимодействии вихревой пелены, сходящей с лопастей переднего винта, с лопастями заднего.

Методы, нашедшие применение в вычислительной аэроакустике, часто основаны на акустических аналогиях. Поэтому процесс предсказания шума проводят в два этапа. На первом этапе решается аэродинамическая задача, а на втором — акустическая. При этом основным минусом данного подхода является высокая вычислительная нагрузка при вычислении аэродинамических источников шума. В настоящее время получили наибольшее распространение два подхода к исследованию шума CROR: аналитический метод Аммита [1] и различные численные методы.

Как правило, при численном моделировании большинство авторов используют приближение дальнего звукового поля. Т.е. отдельно рассчитывают характеристики течения в области, примыкающей к ротору (гидродинамическая задача), а по найденному нестационарному полю скоростей и давлений определяют акустические пульсации давления в удаленных

точках с использованием теории Лайтхилла–Фокса Вильямса–Хоукинса (акустическая задача) [2]. При этом для расчета течения вязкого газа используются исключительно ресурсоемкие численные схемы с применением подвижных сеток [3].

Особое место среди методов предсказания шума по-прежнему занимают аналитические методы, позволяющие с помощью «скромных» вычислительных ресурсов получить априорные оценки на ранних этапах проектирования. К достоинствам аналитических методов нужно отнести высокую скорость проведения расчетов. Однако существующие методики оценок, основанные на аналитическом подходе Аммита, не позволяют учесть такие факторы как реальную геометрию лопастей или отклонение набегающего потока от оси двигателя,

Оба подхода позволяют рассчитывать уровни звукового давления как тонального, так и широкополосного шумов. Однако на начальном уровне проектирования CROR - двигателя, как правило, достаточно достоверно оценить возможные уровни тонального шума на различных режимах.

В работе предлагается численный метод, который позволяет сочетать разумную степень точности оценки аэродинамического шума с приемлемой скоростью проведения расчетов. Это достигается применением упрощенной схемы расчета гидродинамической задачи с использованием вихревого панельного метода и упрощенного метода Фокса Вильямса–Хоукинса (явные формулы Фарассата).

1. ВИХРЕВОЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

Разобьем все пространство на две области: область Ω , непосредственно примыкающая к ротору, и дополнение этой области до всего пространства $\Omega_0 = R^3 \setminus \Omega$.

*E-mail: ip.boychuk@gmail.com

†E-mail: yuriy.rudnyev@gmail.com

Звуковые колебания исследуются только в Ω_0 , причем на некотором удалении от границы (приближение дальнего звукового поля).

Интенсивность источников аэродинамического шума определяется пульсациями давления и скорости, возникающие при нестационарном обтекании решеток лопастей ротора. В качестве метода решения задачи обтекания лопастей, предлагается использовать одну из разновидностей семейства панельных методов — метод дискретных вихрей [4].

Предполагая, что всюду в области течения за исключением вихревой пелены, сходящей с задней кромки лопастей, завихренность равна нулю, введем потенциал поля скоростей:

$$\mathbf{v} = \nabla \phi. \quad (1)$$

Из условия несжимаемости $\text{div } \mathbf{v} = 0$ будем иметь для потенциала ϕ уравнение Лапласа:

$$\Delta \phi = 0. \quad (2)$$

На твердых поверхностях винта задаем условие непротекания:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = v_{n0}(t), \quad (3)$$

где $\mathbf{n}$ — единичный вектор нормали к стенке, а v_{n0} — заданная нормальная скорость движения твердой поверхности (определяется угловой скоростью движения роторов).

Также необходимо задать значение скорости набегающего невозмущенного потока $\mathbf{v}_\infty$

$$\mathbf{v}_{r \rightarrow \infty} = \mathbf{v}_\infty. \quad (4)$$

На заранее неизвестных вихревых поверхностях, сходящих с задних кромок лопастей, должно выполняться условие непрерывности поля давления:

$$p_+ = p_-, \quad (5)$$

где индексы «+» и «-» относятся к значениям давления по разные стороны от поверхности вихревой пелены

Используя интеграл Коши — Лагранжа, можем определить давление по найденному потенциалу поля скоростей.

$$\rho \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{(\nabla \phi)^2}{2} \right) + p = \rho \frac{v_\infty^2}{2} + p_0 \quad (6)$$

Таким образом, для определения гидродинамических параметров воздушного потока в области Ω имеем краевую задачу (1)–(6). Решение данной задачи будем отыскивать численно с помощью метода дискретных вихрей.

Суть метода дискретных вихрей состоит в представление параметров потока в области течения через параметры, распределенные на поверхности обтекаемого

тела и вихревой пелены. Для этого поверхности лопастей и других твердых тел и вихревой след, сходящий с лопастей, заменяем непрерывной вихревой поверхностью. Тогда задача аэродинамики сводится к нахождению распределения интенсивности вихрей, для которого поле скоростей, индуцируемое вихревыми поверхностями слоем, удовлетворяло исходным уравнениям движения среды и граничным условиям.

Разобьем вихревые поверхности на отдельные элементы, так называемые панели, заменяя непрерывный вихревой слой системой дискретных вихрей, основным элементом в которой будет подковообразная вихревая рамка, связанная с отдельной панелью. Каждая рамка состоит из трех бесконечно тонких вихревых отрезков с одинаковой интенсивностью Γ , располагающихся на границе панели. Скорость, индуцируемую каждым вихревым отрезком, нетрудно подсчитать, исходя из общей формулы Био–Савара:

$$\mathbf{v} = \frac{\Gamma}{2\pi} \int \frac{d\mathbf{l} \times (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1)}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1|^3}. \quad (7)$$

Здесь $\mathbf{r}_0$ и $\mathbf{r}_1$ — радиусы векторы начала и конца вихревого отрезка в системе координат с началом в точке, в которой определяется скорость. Интеграл в формуле (7) легко вычисляется в явном виде:

$$\mathbf{v} = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mathbf{r}_0 \times \mathbf{r}_1}{|\mathbf{r}_0 \times \mathbf{r}_1|^2} \left[\frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_0}{r_0} - \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_1}{r_1} \right], \quad (\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0). \quad (8)$$

Вихревые рамки, связанные с панелями на твердой поверхности, будем называть присоединенными, а рамки, с помощью которых будем моделировать вихревую пелену — свободными.

Расчетный процесс начинаем в отсутствие вихревой пелены. Определим интенсивности Γ_i , $i = \overline{1, N}$ (N — общее число панелей) из условия непротекания на твердых поверхностях. Этому условию будем удовлетворять в отдельных точках, так называемых точках коллокации, которые разместим в центре каждой панели (рис. 1). Поскольку рамки имеют подковообразную форму, то на задней кромке лопастей будет автоматически выполняться условие Кутты–Жуковского о конечности скорости.

Γ_i определяются как решения системы линейных алгебраических уравнений следующего вида

$$v_{n0i} = \sum_{k=1}^N a_{ik} \Gamma_k + (\mathbf{v}_\infty, \mathbf{n}), \quad i = \overline{1, N}, \quad (9)$$

где a_{ik} (т.н. коэффициенты влияния) представляют собой нормальную скорость, индуцируемую k -ой присоединенной вихревой рамкой единичной интенсивности в центре i -ой панели в соответствии с формулой (8); v_{n0i} — нормальная скорость движения i -ой панели (для неподвижных панелей принимается равной нулю).

По найденным значениям Γ_i определяем скорость потока на кромке лопасти. С этой скоростью сносим

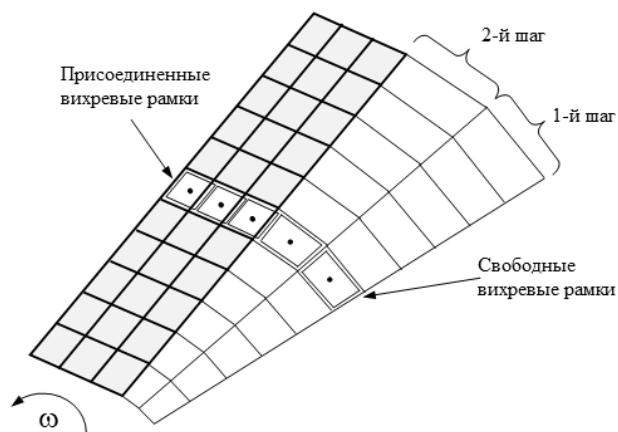


Рис. 1: Формирование вихревой пелены

первый ряд свободных вихревых рамок с задней кромки. Ширина ряда определяется принятым временным шагом Δt и равна $v\Delta t$. Интенсивность свободных рамок принимаем равной интенсивности присоединенных рамок примыкающих к кромке. В дальнейшем, на каждом следующем шаге по времени (рис. 1) свободные вихревые рамки сносятся по потоку, а их интенсивность не меняется. Интенсивность присоединенных рамок с учетом сошедших свободных рамок вихревой пелены определяется на каждом следующем временном шаге как решение системы

$$\sum_{k=1}^N a_{ik} \Gamma_k = v_{n0i} - (\mathbf{v}_\infty, \mathbf{n}) - \sum_{k=1}^{N^*} b_{ik} \Gamma_k^*, \quad i = \overline{1, N}, \quad (10)$$

где N^* — число вихревых рамок в пелене, b_{ik} — коэффициенты влияния свободных вихревых рамок.

Количество свободных вихревых рамок N^* в вихревой пелене определяется из условия численной сходимости метода. В качестве критерия сходимости выбирается сила тяги ротора. Тяга определяется как сумма подъемных сил, действующих на панели винта. Поскольку каждая такая панель моделируется вихревой рамкой, то по теореме Жуковского подъемная сила, действующая на панель, определяется выражением:

$$F_i = \rho v_i \Gamma_i h_i, \quad (11)$$

где v_i — скорость набегающего потока, h_i — длина панели, отсчитываемая вдоль лопасти.

Количество спускаемых рядов свободных вихревых рамок N_{row}^* фиксируется, когда дальнейшее его увеличение существенно не изменяет значения подъемной

силы, действующей на лопасть. Это означает, что свободная вихревая рамка, сошедшая в момент t_0 с края лопасти, в момент $t_1 = t_0 + \Delta t \cdot N_R^*$ исключается из вычислительного процесса.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

После установления описанного итерационного процесса начинаем подсчет пульсаций акустического давления в некоторых точках. Для этого накапливаем нестационарные поля давления и скорости на контрольной поверхности $\partial\Omega$. Давления определяется по формуле

$$p(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\partial\Omega} \left[\frac{\rho_0 v_n c + (\mathbf{L}, \mathbf{e}_r)}{cr(1 - M_r)} \right]_{ret} dS + \frac{1}{4\pi} \int_{\partial\Omega} \left[\frac{(\mathbf{L}, \mathbf{e}_r)}{r^2(1 - M_r)} \right]_{ret} dS. \quad (12)$$

Здесь $\mathbf{L} = p\mathbf{n} + \rho_0(v_n - u_n)\mathbf{v}$, $\mathbf{r} = \mathbf{x} - \mathbf{y}$, $\mathbf{e}_r = \mathbf{r}/r$, $M_r = (\mathbf{u}, \mathbf{e}_r)/c$, $\mathbf{y}$ — радиус-вектор точки поверхности (точки интегрирования), $\mathbf{u}$ — вектор скорости, с которой перемещается точка поверхности. Индекс *ret* означает, что соответствующее выражение вычисляется в момент излучения. По найденному распределению давления и скоростей на контрольной поверхности $\partial\Omega$ (границе области Ω) мы определяем акустические колебания в некоторых расчетных точках по формулам Фарассата [5]. Эти формулы являются приближенными решениями внешней задачи для линейных уравнений акустики.

3. РАСЧЕТ ШУМА ОТКРЫТОГО РОТОРА

На рис.2, 3 показан пример моделирования аэродинамики и расчета шума с помощью предложенного метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данный подход, применяемый для расчета тонального шума, дает возможность учитывать шум от взаимодействия вихревого следа, сходящего с лопаток переднего ротора, с лопатками заднего. В дальнейшем предполагается развитие метода для учета вихревого шума за счет добавления моделирования турбулентности.

[1] Blandeau V.P., Joseph P.F., Tester B.J. 15th AIAA / CEAS aeroacoustics conference, Miami, USA, 2009.

[2] Jia S.H., Yang B., Zhao X.L., Xu J.Z. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2013. **52**. 022047.

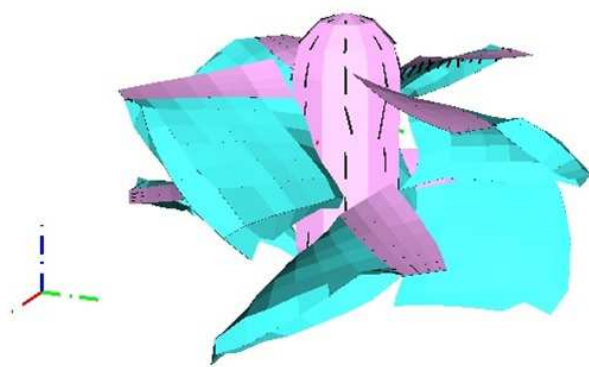


Рис. 2: Схождение вихревой пелены с лопаток винтовентилятора

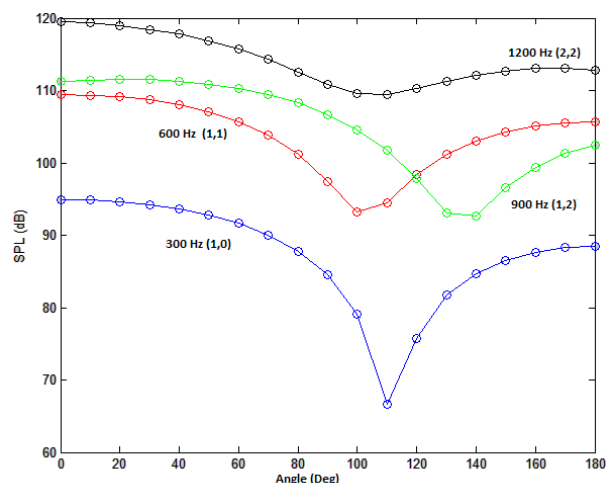


Рис. 3: Расчет уровня звукового давления для различных мод

[3] Скворцов Р.А., Титарев В.А., Беляев И.В. Акустика среды обитания. 2016. С. 152.

[4] Santana L. D., Schram C. 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (33rd AIAA Aeroacoustics Conference). 2012,

Colorado Springs, CO. AIAA 2012-2073.

[5] Farassat F. NASA/TM-2007-214853.

Numerical simulation of the noise of a open rotor

I. P. Boychuk^{1,a}, Y. I. Rudnyev^{2,b}

¹Department of Software for Computer Engineering and Automated Systems, Faculty of Energy, Information Technology and Control Systems, V. G. Shoukhov Belgorod State Technological University Belgorod 308012, Russia.

²Department of Applied Mathematics, Faculty of Mathematics and Informatics, V. N. Karazin Kharkiv National University. Kharkiv 61002, Ukraine

E-mail: ^aip.boychuk@gmail.com, ^byuriy.rudnyev@gmail.com

The paper proposes a numerical method for simulating the noise of a open rotor, which allows us to combine a reasonable degree of accuracy in the estimation of aerodynamic noise with an acceptable speed of calculations. This is achieved by applying a simplified scheme for calculating the hydrodynamic problem using the vortex panel method and the simplified Ffowcs Williams–Hawkings method (explicit Farassat formulas) for calculating acoustics. The proposed approach can be used to determine the tonal noise of the rotor. It is characterized by ease of implementation, high speed of calculations, the possibility of taking into account the noise generated by the interaction of the vortex trail coming from the blades of the front rotor, with the blades of the rear rotor. This method is applicable for preliminary noise estimates at the design stage.

PACS: 43.28.Ra

Keywords: noise simulation, open rotor.

Received 09 July 2017.

Сведения об авторах

1. Бойчук Игорь Петрович — канд. техн. наук, доцент; тел.: (4722) 54-98-53, e-mail: ip.boychuk@gmail.com.

2. Руднев Юрий Ильич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: +380 (57) 707 5270, e-mail: yuriy.rudnyev@gmail.com.