



Chen, X., Zhao, Q., Barakos, G. and Kusyumov, A. (2019) Numerical analysis of hovering main rotor aero-acoustic characteristics for ice detection. *Russian Aeronautics (Iz VUZ)*, 62(3), pp. 429-437. (doi: [10.3103/S1068799819030103](https://doi.org/10.3103/S1068799819030103)).

This is the author's final accepted version.

There may be differences between this version and the published version. You are advised to consult the publisher's version if you wish to cite from it.

<http://eprints.gla.ac.uk/173989/>

Deposited on: 23 November 2018

Enlighten – Research publications by members of the University of Glasgow
<http://eprints.gla.ac.uk>

УДК 533.69

КСИ ЧЕН,

д-р филос. по техн. наукам,

КИЮН ЖАО,

д-р филос. по техн. наукам,

(Нанкинский университет авиации и аэронавтики, Нанкин, КНР),

ДЖ. БАРАКОС,

д-р филос. по техн. наукам

(Университет Глазго, Глазго, Великобритания)

george.barakos@glasgow.ac.uk

А. КУСЮМОВ,

д-р физ.-мат. наук,

(КНИТУ-КАИ, Казань)

postbox7@mail.ru

Численное моделирование аэроакустических характеристик несущего винта на режиме висения в условиях обледенения

Рассматривается обтекание винта с учетом деформации геометрии поверхности лопасти в целях выявления обледенения лопасти. Воздействие обледенения учитывается в виде локальной деформации поверхности лопасти, и результаты численного моделирования обтекания анализируются с применением уравнения распространения звуковой волны. Проводится оценка мест расположения приемников аэроакустического излучения на поверхности фюзеляжа вертолета. Оценивается влияние деформации лопасти на аэроакустические характеристики винта в зависимости от "объема обледенения" и его места

расположения. Показано, что в качестве средства обнаружения обледенения на поверхности лопасти следует применять массив микрофонов, который должен располагаться на верхней части задней поверхности фюзеляжа и вдоль хвостовой балки.

Вычислительная гидромеханика, аэроакустические характеристики, воздействие обледенения, винт, вертолет

ВВЕДЕНИЕ

Обледенение лопастей винта вертолета может быть серьезной проблемой с точки зрения безопасности полета [1, 2], поскольку в результате изменения формы лопастей ухудшаются аэродинамические характеристики винта [3, 4]. В настоящее время имеется два основных подхода к решению проблемы обледенения [5]. В рамках "первого подхода" пилоты получают информацию о метеоусловиях и пытаются обойти области с потенциально опасными условиями обледенения. При использовании второго подхода вертолет тщательно очищается перед взлетом и затем включается противообледенительная система (ПОС) для удаления льда во время полета. В частности, в настоящее время только 5% вертолетного парка США снабжены ПОС [6].

Для воздушных судов без ПОС общие рекомендации предписывают избегать полета в условиях обледенения. В сравнении с самолетами (см., например, [7]), проблема обледенения при полете вертолета не столь хорошо изучена вследствие сложности изучения нестационарного пространственного (3-D) течения при наличии вращательного движения винта и больших значений центробежной силы на лопастях [8, 9].

Согласно предыдущим исследованиям [10, 11], изменение поведения течения и формы лопасти в условиях обледенения сказывается на аэроакустическом излучении винта. В [12] показано, что аэроакустическое излучение винта может быть использовано для выявления образования льда на ранней стадии процесса

обледенения. К настоящему времени опубликован целый ряд работ, посвященный определению аэроакустического излучения винта (см., например, фундаментальные работы [13, 14]). Это определяет предпосылки для использования аэроакустических характеристик винта в задаче идентификации обледенения.

Целью настоящей работы является анализ изменения аэроакустических характеристик винта при наличии обледенения и определение расположения микрофонов для решения данной задачи. В качестве первого шага рассчитываются аэродинамические и аэроакустические характеристики винта без обледенения (примеры работ данного направления в отечественной литературе можно найти в [15-17]). Затем производится оценка влияния положения и объема обледенения на поверхности лопасти на аэроакустические характеристики. Численное моделирование осуществляется с использованием пакета НМВ [18-20], а аэроакустическое излучение определяется на базе решения уравнения Ffowcs-Williams Hawkins [21].

1. Аэродинамические характеристики профиля NACA23012 при наличии и без ледяных наростов

Для сравнения с результатами численного моделирования использованы экспериментальные данные для профиля NACA23012 с обледенением, полученные в аэродинамической трубе ЛТРТ с малой степенью турбулентности (NASA, Лэнгли). Измерения проводились для числа Маха 0.208 при числе Рейнольдса 2×10^6 [22].

Рисунок 1 показывает форму и расположение ледяного нароста на поверхности профиля NACA23012. Размер ледяного нароста является очень малым и радиус скругления r составляет $0.0139c$, где c - хорда профиля.

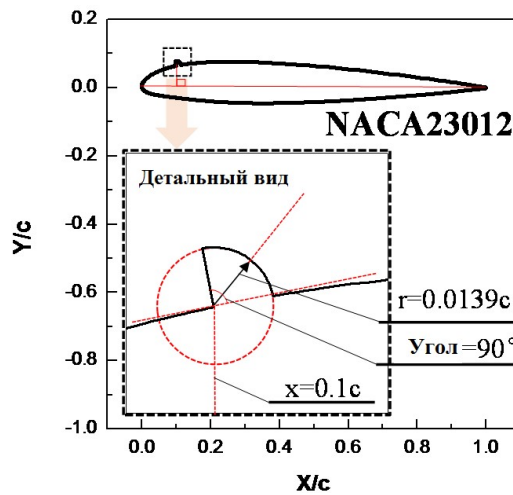


Рис. 1. Общий вид аэродинамического профиля NASA23012 и изображение ледяного нароста

Рисунок 2 представляет сравнение распределенных аэродинамических характеристик на поверхности профиля при различном состоянии лопасти для угла атаки 0 градусов. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с данными эксперимента в ЛТРТ.

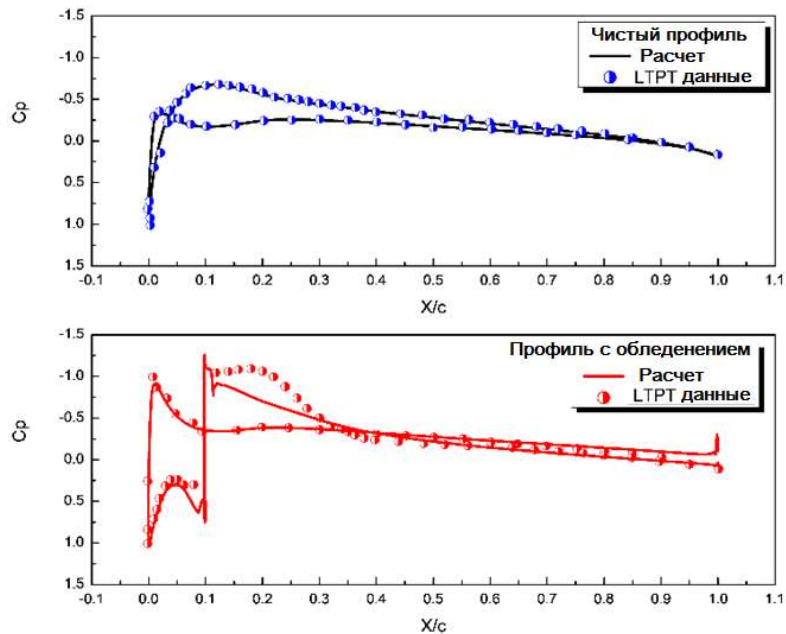


Рис. 2. Распределение коэффициента давления на поверхности профиля NASA23012 при наличии и без ледяного нароста

2. Акустические характеристики винта на режиме висения при наличии и без обледенения

Анализ изменения акустических характеристик винта на режиме висения

проводился для винта Caradonna - Tung (С-Т) [23]. Винт С-Т имеет две лопасти и построен на основе традиционного профиля NASA0012. Ледяной нарост занимал область от $0.6R$ до $0.9R$ вдоль лопасти винта. Рисунок 3а показывает область обледенения на поверхности лопасти винта и сечение ледяного нароста.

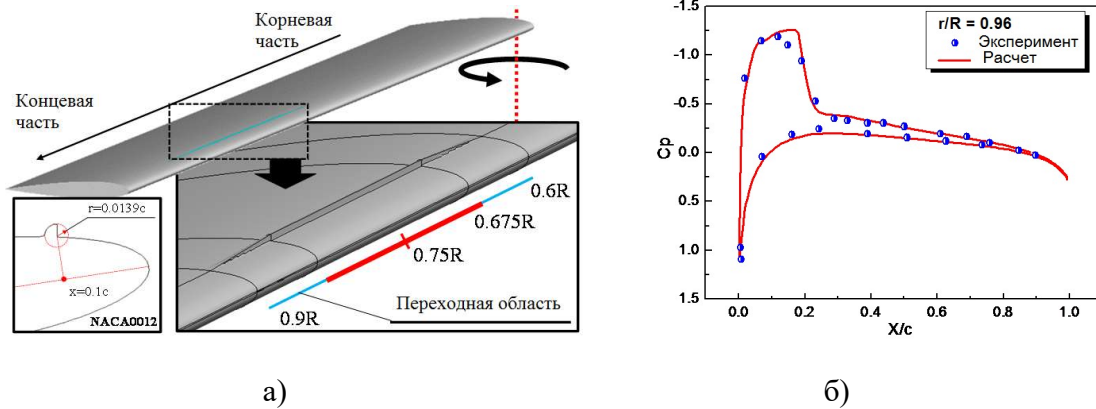


Рис. 3. Ледяной нарост на поверхности винта С-Т (а) и сравнение рассчитанного распределения давления в сечении «чистой» лопасти винта с экспериментальными данными (б)

Моделирование обтекания «чистого» (без обледенения) винта и с обледенением проводилось для конечного числа Маха $M_{tip}=0.794$ и числа Рейнольдса $Re=3.48 \times 10^6$. Из рис. 3б следует, что результаты численного моделирования обтекания чистой лопасти винта (r/R - относительный радиус токи на поверхности лопасти) хорошо согласуются с экспериментальными данными [23].

Рисунок 4а показывает возможное расположение микрофонов при установке на фюзеляже вертолета для определения поверхностного обледенения. Результаты моделирования представлены на рис. 4б. Рисунок 4б показывает воспринимаемые различными микрофонами разности $\Delta P_{ci} = P_c - P_i$ эффективных звуковых давлений (ЭЗД) P_c и P_i для "чистой" и обледенелой лопастей.

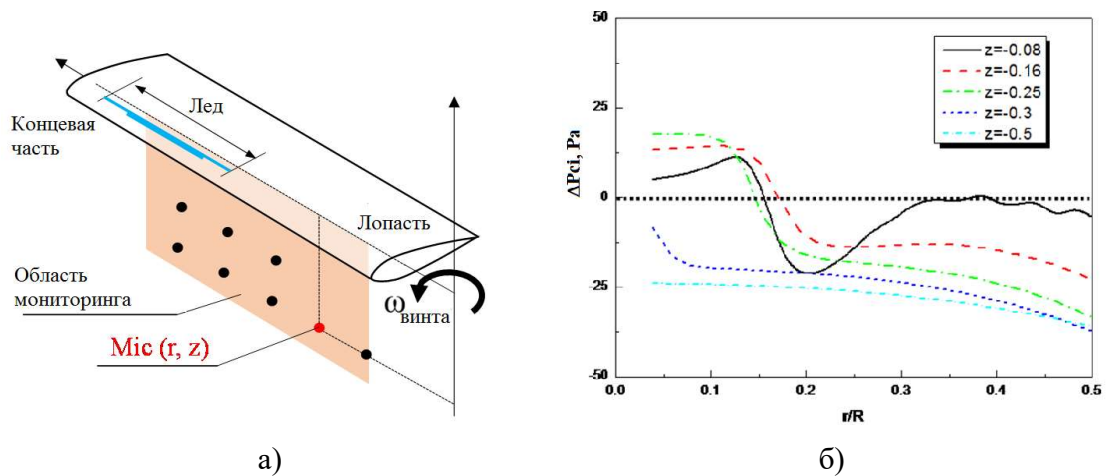


Рис. 4. Установка микрофонов относительно лопасти (а); разность ЭЗД для "чистой" и обледенелой лопастей в плоскостях $z=\text{const}$ (б)

В плоскости $z = -0.25R$ (и выше нее) ЭЗД, создаваемое обледенелой лопастью, снижено в корневой части лопасти (в сравнении с "чистой" лопастью), и понижено в остальной части. В плоскостях $z = -0.3R$ и $z = -0.5R$ ЭЗД, создаваемое обледенелой лопастью, меньше, в сравнении "чистой" лопастью (отрицательная разность), что приводит к снижению несущей силы винта. В целом, когда микрофоны удалены от плоскости вращения винта, ЭЗД для всех микрофонов снижено. Для микрофонов, располагающихся ближе к плоскости вращения, разность ЭЗД меняется более существенно в радиальном направлении. Изменение разности ЭЗД может быть использовано как "индикатор" обледенения. Рисунок 5 показывает поле разностей ЭЗД, воспринимаемых микрофонами в допущении, что микрофоны могут регистрировать изменение давления не ниже, чем 10 Па.

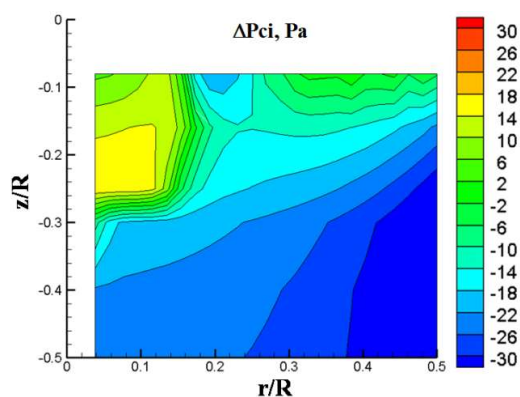


Рис. 5. Поле разностей ЭЗД, для "чистой" и обледенелой лопастей

3. Акустические характеристики винта с различным объемом ледяного нароста

На рис. 6 представлено изменение акустических характеристик лопастей винта с различными областями обледенения. Винт из предыдущего раздела с областью обледенения размером $0.3R$ рассматривался как винта А. Размер области обледенения винта D короче и составляет $0.033R$.

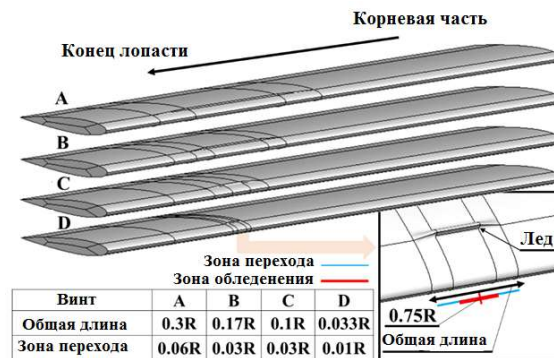


Рис. 6. Размеры и положение областей обледенения

В таблице 1 представлены аэродинамические коэффициенты тяги (C_T), крутящего момента (m_k) и коэффициент полезного действия (η) винта на режиме висения при условиях моделирования $M_{tip}=0.794$, $Re=3.48 \times 10^6$ (аналогично использованным в разделе 2) и для угла общего шага винта 8° . Хотя площадь обледенения мала в сравнении с площадью лопасти, ухудшение аэродинамических характеристик может быть значительным и коэффициент полезного действия винта может уменьшиться на 70%.

Таблица 1. Аэродинамические коэффициенты винтов с различной областью обледенения

Винт	C_T	m_k	η	$\Delta\eta$
"Чистый"	1.10×10^{-2}	1.17×10^{-3}	0.492	
A	0.61×10^{-2}	1.54×10^{-3}	0.156	-68.2%
B	0.91×10^{-2}	1.36×10^{-3}	0.318	-35.4%
C	1.04×10^{-2}	1.29×10^{-3}	0.409	-16.8%
D	1.06×10^{-2}	1.21×10^{-3}	0.454	-7.69%

На рис. 7 представлены данные по аэроакустическим характеристикам двух винтов с различным обледенением при различном расположении приемников

акустического давления. Для удаленного от лопасти микрофона ($z=-0.5R$, $z=-0.3R$) ЭЗД для винта D очень близко и по величине чуть выше, по сравнению с давлением, создаваемым "чистым" винтом. Для микрофонов, близко расположенных к плоскости вращения винта, ЭЗД сначала ниже, чем для "чистой" лопасти (близко к корневой части лопасти); для остальной части лопасти ЭЗД от обледенелой лопасти несколько выше, чем для чистой лопасти. Аналогичный характер распределения ЭЗД следует также из рис. 8.

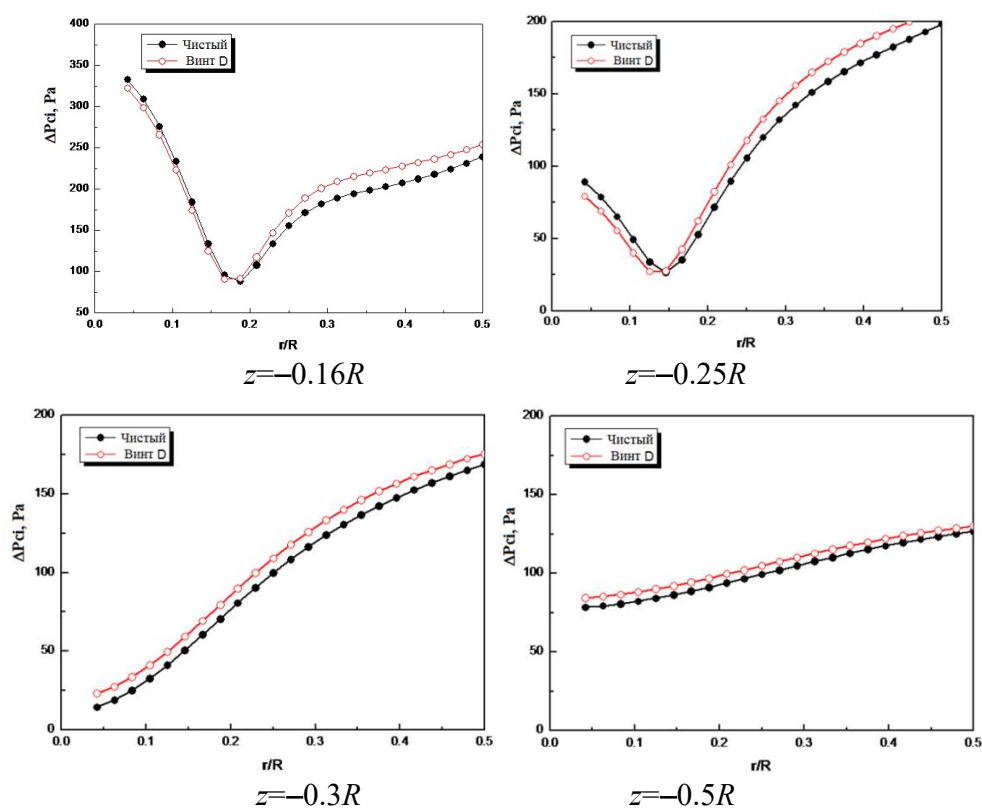


Рис. 7. ЭЗД для "чистой" и обледенелой лопастей винта D в различных плоскостях измерений

Как следует из рис. 8а, даже для винта D, когда область обледенения весьма мала, изменение акустических характеристик винта весьма очевидно. Это показывает, что небольшие изменения формы поверхности лопасти на ранней стадии обледенения могут быть зафиксированы по изменению аэроакустических характеристик винта.

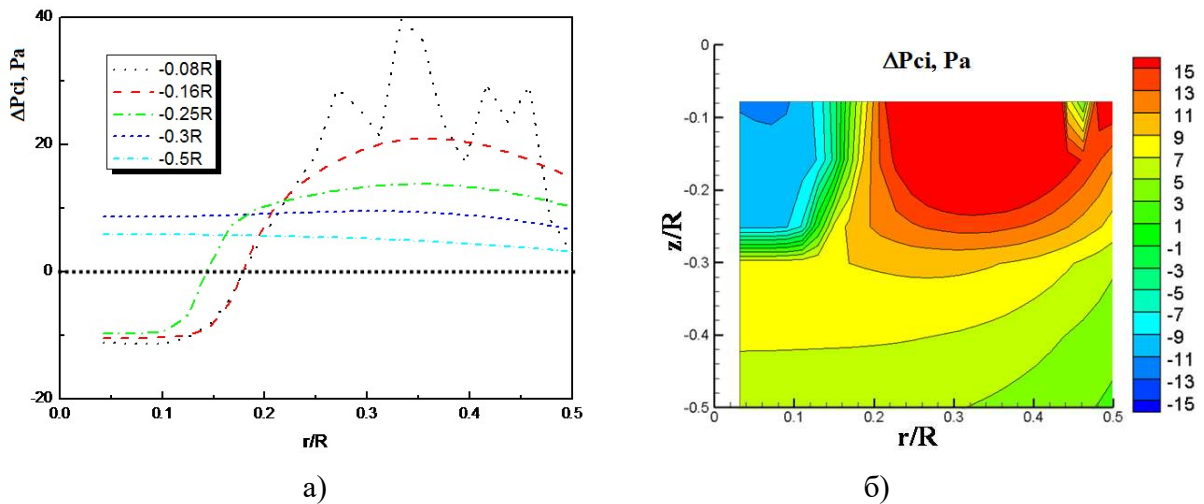


Рис. 8. Разности ЭЗД в плоскостях $z=\text{const}$ (а) и поле разностей ЭЗД (б) для "чистой" и обледенелой лопастей винта D

На рис. 8б показано поле разности ЭЗД ΔP_{ci} для винта D. В областях желтого и зеленого цвета величина ΔP_{ci} слишком низка и применение микрофона не позволяет обнаружить обледенение. В области красного цвета акустическое давление повышено, и здесь можно расположить приемники акустического давления. То же относится к области голубого цвета, где могут располагаться приемники акустического давления, однако размеры этой области меньше.

4. Акустические характеристики винта при различном расположении ледяного нароста

Для определения влияния расположения ледяного нароста на аэроакустические характеристики винта проведено моделирование обтекания винтов, лопасти которых представлены на рис. 9а. Размеры и форма двух ледяных наростов для винтов E и F такие же, как и для винта D, но места расположения наростов отличаются. Для лопасти винта E ледяной нарост располагается на расстоянии между $0.53R$ и $0.56R$ (от корня лопасти) и для лопасти винта F - на расстоянии между $0.33R$ и $0.36R$. В целом влияние положения ледяного нароста на аэродинамические характеристики винта незначительно. Рисунок 9б показывает аэроакустические распределенные характеристики ниже плоскости вращения

различных винтов. Поскольку объем области обледенения мал в целом изменение ЭЗД не столь значительно. При этом влияние положения области обледенения на локальное изменение ЭЗД просматривается хорошо.

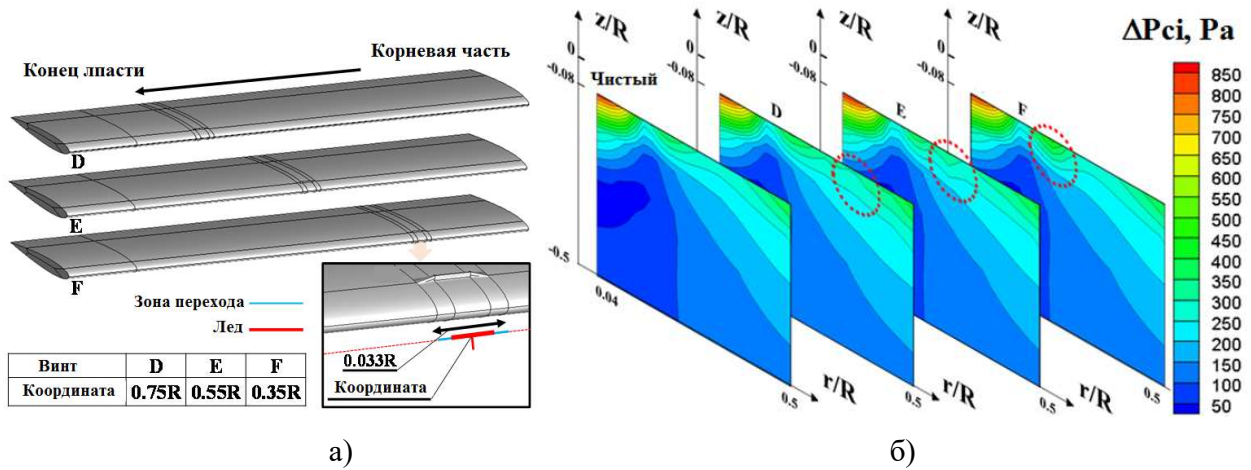


Рис. 9. Винты с различным положением ледяного нароста (а) и распределение ЭЗД в сечении ниже плоскости вращения (б)

В таблице 2 представлены аэродинамические коэффициенты исследованных винтов при тех же условиях моделирования, что и в предыдущих разделах: $M_{tip}=0.794$, $Re=3.48 \times 10^6$ и для угла общего шага винта 8° .

Таблица 2. Аэродинамические характеристики винтов с различным положением области обледенения

Винт	C_T	m_k	η	$\Delta\eta$
"Чистый"	1.10×10^{-2}	1.17×10^{-3}	0.492	
D	1.06×10^{-2}	1.21×10^{-3}	0.454	-7.69%
E	1.07×10^{-2}	1.20×10^{-3}	0.461	-6.31%
F	1.07×10^{-2}	1.18×10^{-3}	0.468	-4.87%

На рис. 10 приведены абсолютные значения разности ΔP_{ci} ЭЗД для рассматриваемых винтов в плоскости $z=-0.16R$. Как можно ожидать, когда ледяной нарост расположен ближе к концевой части винта (винт D) размеры области изменения ЭЗД больше, в сравнении с винтами у которых ледяной нарост располагается ближе к корневой части (винты E и F).

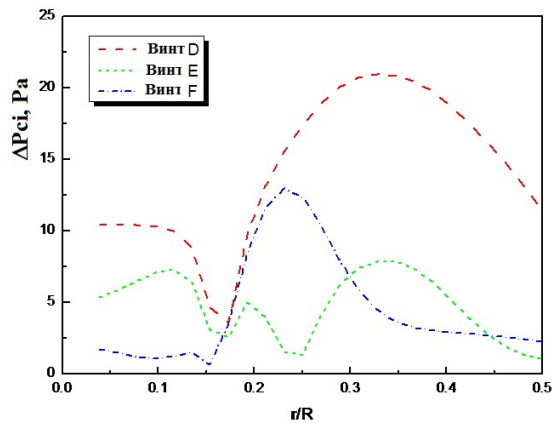


Рис. 10. Модуль разности ЭЗД на поверхности "чистой" и обледенелой лопасти

Анализируя результаты измерения акустического давления в различных точках, особенно при использовании нескольких микрофонов, можно определить положение области обледенения. Поскольку форма поверхности различных фюзеляжей может отличаться, в данной работе принята форма фюзеляжа в виде полусферы радиуса $0.3R$ и полуцилиндра радиуса $0.125R$ (рис. 11а). Рисунок 11б показывает результаты расчета, полученные в местах расположения микрофонов для различных винтов при наличии обледенения. Из рисунка следует, что имеется существенная разница в данных измерения ЭЗД различными микрофонами (А-Ф) для винтов (D-F).

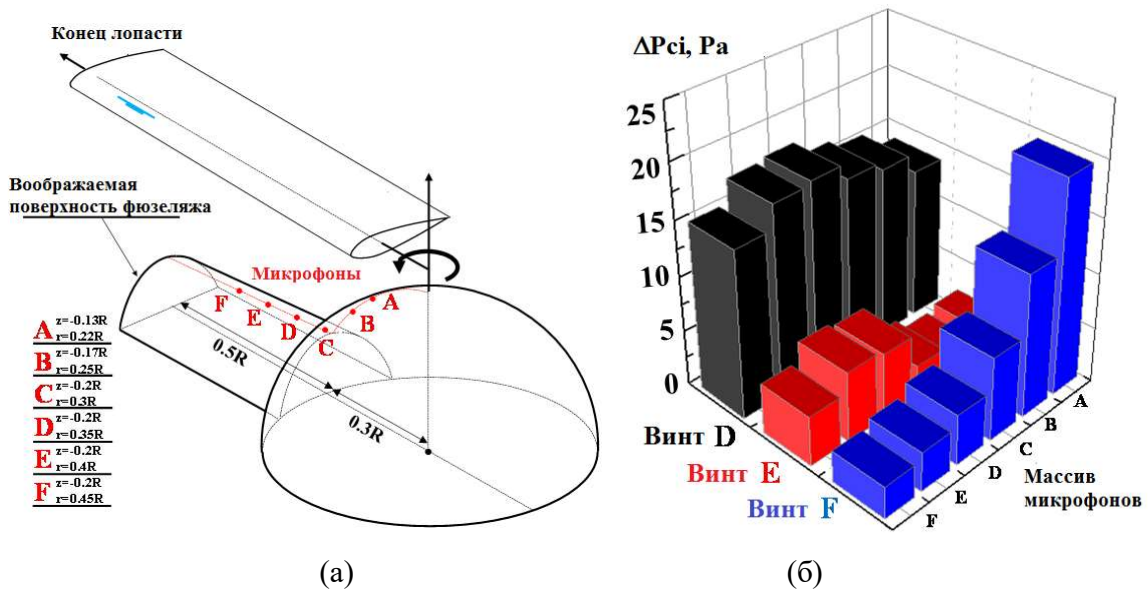


Рис. 11. Расположение и отклик массива микрофонов при наличии обледенения: (а) расположение микрофонов, (б) отклик микрофонов

Для рассматриваемого режима висения принято допущение, что пороговый уровень восприятия микрофона более 5 Па и в этом случае микрофон называется «включенным». Рисунок 12 показывает результаты измерений и соотношения между массивом микрофонов (в выключенном и включенном состоянии) при наличии обледенения. Как следует из рисунка, для винта D (с ледяным наростом в области $0.7R$) все микрофоны включены. Для винта E (обледенение в области $0.5R$) включенными являются микрофоны D и E, а для винта F (обледенение в области $0.3R$) включены микрофоны A, B и C. Если размеры области обледенения превышают $0.03R$, включенными являются все микрофоны.

В целом следует заметить, что однозначно определить положение и размеры области обледенения с использованием массива микрофонов достаточно сложно, поскольку большая область обледенения близко к корневой части может вызвать такое же акустическое воздействие, что и небольшая область обледенения в окрестности концевой части лопасти. Несмотря на это потенциально положение области обледенения все же может быть идентифицировано при использовании массива микрофонов. В рассматриваемом случае можно констатировать, что если микрофоны D, E и F выключены, то обледенение не может произойти в области, близкой к концевой части лопасти, и имеющей размер $0.3R$ вдоль лопасти. Если выключены микрофоны A, B и C, то обледенение не может произойти в области размером $0.3R$ около корневой части лопасти; при выключенном микрофоне F обледенение не может произойти в области, начиная с $0.5R$ и до конца лопасти. В случае, когда все микрофоны включены, обледенению может быть подвергнута вся поверхность лопасти.

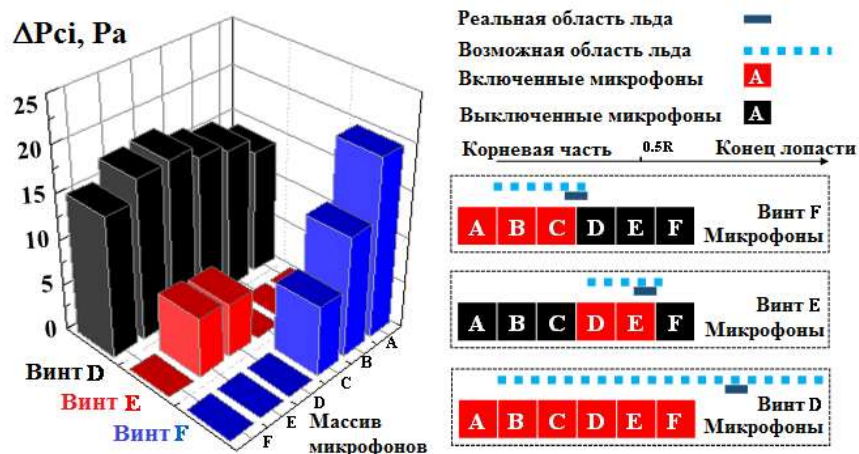


Рис. 12. Расположение включенных и выключенных микрофонов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие обледенения значительно влияет на аэроакустические характеристики винта. В целом, влияние обледенения на аэроакустику возрастает при уменьшении вертикальной дистанции до микрофона и несколько увеличивается с ростом радиальной дистанции. Наличие обледенения близко к корневой части лопасти приводит к изменению сигнала микрофонов, расположенных в этой части лопасти, тогда как сигнал с микрофонов около концевой части практически не изменяется. Использование массива микрофонов, расположенных в различных точках, позволяет определить положение области обледенения.

Работа частично поддержана Национальным Фондом Естественных Наук Китая (№ 11272150 и 11572156) и гранта No. 9.1577.2017/4.6 Министерства образования и науки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hartman P., Narducci R., Peterson A., Dadone L., Mingione G., Zanazzi G., Brandi V.* Prediction of ice accumulation and airfoil performance degradation: A Boeing - CIRA research collaboration // Annu. Forum Proc. - AHS Int.. 2006. P. 1–24.
2. *Шевяков В.И.* Обеспечение выполнения требований по защите воздушных судов от обледенения // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 177. С. 72-77.

3. *Cebeci T., Kafyeke F.* Aircraft icing // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2003. 35 P. 11–21. doi:10.1146/annurev.fluid.35.101101.161217.

4. *Hemming R.J., Britton R.K., Flemming R.J., Bond T.H.* Results of a sub-scale model rotor icing test // *AIAA Pap.* 91-0660. 1991. 30 p. doi:10.2514/6.1991-660.

5. *Caliskan F., Hajiyev C.* In-flight detection and identification and accommodation of aircraft icing // *AIP Conf. Proc.* 2012 P. 200–206. doi:10.1063/1.4765490.

6. *Heinrich A., Ross R., Zumwait G., Provorse J., Padmanabhan V., Thompson J., Riley J.* Aircraft Icing Handbook. Atlantic City International Airport, NJ:FAA technical Center, 1991. 390 p. DOT/FAA/CT-88/8-1.

7. *Павленко О.В.* Параметрические исследования влияния обледенения на аэродинамические характеристики профиля крыла // *Ученые записки ЦАГИ.* 2009. №2.

8. *Zhao G.Q., Zhao Q.J., Chen X.* New 3-D ice accretion method of hovering rotor including effects of centrifugal force // *Aerosp. Sci. Technol.* 2016. 48 P. 122–130. doi:10.1016/j.ast.2015.10.018.

9. *Z. Wang, Zhu C.* Study of the effect of centrifugal force on rotor blade icing process // *Int. J. Aerosp. Eng.* 2017. P. 1–9. doi:10.1155/2017/8695170.

10. *Chen X., Zhao Q. J., Ma Y. Y., Wang B.* Mechanism analyses on aeroacoustic characteristics of iced rotor for ice detection // *Am. Helicopter Soc. 73th Annu. Forum.* 2017. P. 1–10.

11. *Chen X., Zhao Q. J.* Numerical simulations for ice accretion on rotors using new three-dimensional icing model // *J. Aircr.* 2017. 54 P. 1428–1442. doi:10.2514/1.C033986.

12. *Cheng B., Han Y., Brentner K.S., Palacios J., Morris P.J., Hanson D.R., Kinzel M.P.* Rotor broadband noise due to surface roughness during ice accretion // *54th AIAA Aerosp. Sci. Meet.* 2016. P. 1–16. doi:doi:10.2514/6.2016-1270.

13. *Di Francescantonio P.* A new boundary integral formulation for the prediction

of sound radiation // J. Sound Vib. 1997. 202. P. 491–509. doi:10.1006/jsvi.1996.0843.

14. *Brentner K.S., Farassat F.* Analytical comparison of the acoustic analogy and kirchhoff formulation for moving surfaces // AIAA J. 1998. 36 P. 1379–1386. doi:10.2514/2.558.

15. *Игнаткин Ю.М., Константинов С.Г.* Исследование аэродинамических характеристик несущего винта вертолета методом CFD // Тр. МАИ [Электронный журнал]. 2012. № 57. С. 1 – 22.

16. *Абалакин И.В. и др.* Численное моделирование аэродинамических и акустических характеристик винта в кольце // Матем. Моделирование. 2015. Т. 27. № 10. С.125 – 144.

17. *Крицкий Б.С. и др.* Определение аэродинамических характеристик одиночной лопасти несущего винта в пакетах FloEFD, ANSYS Fluent И RC-VTOL // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. № 223 (1). С. 77–83.

18. *Barakos G., Steijl R., Badcock K., Brocklehurst A.* Development of CFD capability for full helicopter engineering analysis // 31st Eur. Rotorcr. Forum. 2005 P. 1–15.

19. *Steijl R., Barakos G.N.* CFD analysis of complete helicopter configurations - Lessons learnt from the GOAHEAD project // Aerosp. Sci. Technol. 2012. 19. P. 58–71. doi:10.1016/j.ast.2011.01.007.

20. *Гапунова Л.И. и др.* Определение аэродинамических характеристик модели несущего винта на режиме осевого обтекания // Изв. вузов. Авиационная техника. 2014. № 3. С. 7–13.

21. *Farassat F.* Linear acoustic formulas for calculation of rotating blade noise // AIAA J. 1981. 19. P. 1122–1130. doi:10.2514/3.60051.

22. *Bragg M.B., Broeren A.P., Blumenthal L.A.* Iced-airfoil aerodynamics // Prog. Aerosp. Sci. 2005. 41. P. 323–362. doi:10.1016/j.paerosci.2005.07.001.

23. *Caradonna F. X., Laub G. H., Tung C.* An experimental investigation of the parallel blade-vortex interaction // NASA/TM 86005, 1984. 76 p.