УДК 628.517.2 DOI 10.18698/0536-1044-2016-11-50-56

Экспериментальный метод определения механизма генерации аэродинамического шума

С.Г. Смирнов, Е.О. Панкова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

An Experimental Method of Determining the Mechanism of Aerodynamic Noise Generation

S.G. Smirnov, E.O. Pankova

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: ssmirnov1945@mail.ru, pankovaelena@yandex.ru

В машиностроении наиболее шумным является оборудование, в основе работы которого лежат аэродинамические процессы. Это вентиляторы, компрессоры, пневмодвигатели, двигатели внутреннего сгорания, газотурбинные установки и другие агрегаты. Конструирование принципиально нового малошумного энергетического оборудования требует знания причин шумообразования в уже существующих машинах. Предложен оригинальный экспериментальный метод по определению механизма генерации аэродинамического шума различных энергетических установок с помощью несложного физического опыта на примере испытания роторной газодувки Рутс производства Мелитопольского компрессорного завода. Газодинамические процессы в технических устройствах являются источниками возникновения интенсивной звуковой энергии, генерация которой может быть интерпретирована простейшими идеальными математическими моделями (монополь, диполь, квадруполь). Из теоретической акустики известно, что генерируемая звуковая энергия трех указанных типов звуковых источников зависит от степени скорости аэродинамических потоков соответственно четвертой, шестой и восьмой степени. Эксперимент позволил определить зоны монопольного, дипольного и квадрупольного характера генерации шума в диапазоне частот 125…8 000 Гц при различных режимах работы. Проведенный анализ особенностей излучения аэродинамического шума на примере газодувки Рутс в октавных полосах частот позволил подробно исследовать процессы звукового излучения. Он показал, что, несмотря на наличие трех механизмов возникновения шума, на существующих режимах работы газодувок до частоты вращения роторов 3 000 мин$^{-1}$ преобладает излучение монопольного типа, подчиняющееся закону четвертой степени. Следовательно, при численном моделировании генерации звука газодувок Рутс следует использовать математический аппарат монопольного излучателя.

Ключевые слова: энергетическое оборудование, газодувка Рутс, генерация звука, акустическое излучение, уровень звуковой мощности.

The noisiest equipment in mechanical engineering is of the type that uses aerodynamic processes. Fans, compressors, pneumatic motors, internal combustion engines, gas turbines and other units belong to this group. The design of fundamentally new low-noise power equipment requires knowledge of the causes of noise generation in existing machines. This paper proposes an original experimental method to determine the mechanism of aerodynamic noise generation in different power plants based on a simple physical experiment with a rotary Roots blower manufactured by the Melitopol Compressor Plant. Gas dynamic processes in

technical devices are the source of intense acoustic energy, the generation of which can be interpreted by means of ideal mathematical models (monopole, dipole, quadrupole). It is known from theoretical acoustics that the sound energy generated by these three types of audio sources depends on the aerodynamic flow velocity of the 4th, 6th or 8th power, respectively. The experiment allowed the zones of monopole, dipole and quadrupole nature of noise generation to be identified in the frequency range of (125–8 000) Hz at different modes of operation. The sound emission processes were thoroughly investigated through the analysis of aerodynamic noise emission of Roots blowers in octave frequency bands. The analysis has shown that despite the fact that three mechanisms of noise occurrence are possible, for the existing modes of operation of rotary blowers (up to 3 000 min^{-1}) the monopole emission subject to the forth power law is dominant. One should, therefore, use the mathematical apparatus of the monopole emitter for numerical simulation of sound generation in Roots blowers.

Keywords: power equipment, Roots blower, sound generation, acoustic emission, sound power level.

Одним из существенных негативных факторов, определяющих нарушение комфортных условий в машиностроении, является шум. Работа металлорежущих станков, кузнечно-прессового, литейного и другого оборудования сопровождается сильным шумом. Однако наиболее шумными являются объекты техники, в основе работы которых лежат гидроаэродинамические процессы. Такие объекты различны по назначению, конструкции, габаритным размерам и широко распространены.

На практике для нахождения способов снижения шума аэродинамического происхождения используют принцип его подавления в источнике, т. е. конструирование принципиально нового малошумного энергетического оборудования или проектирование эффективных глушителей [1–3]. Если выбран путь снижения шума на стадии проектирования новых конструкций, то разработчику необходимо определить причины шумообразования существующих машин [4–6] и выяснить взаимосвязь режимов их работы и конструктивных особенностей с уровнями генерируемых звуков.

В настоящее время в творческой работе инженера широкое применение находят методы машинного проектирования. Для выбора математической модели численного расчета шума энергетического оборудования — вентиляторов, компрессоров, пневмодвигателей, двигателей внутреннего сгорания, газотурбинных установок и других агрегатов — необходимо выяснить, каков механизм физических процессов, вызывающих этот шум [7–10]. При этом возникает вопрос о том, какие частотные составляющие спектра шума обусловлены этими процессами.

Цель работы — создание простого метода экспериментального определения причин возникновения шума в существующих машинах, позволяющего на основе полученных знаний вносить коррекцию во вновь проектируемые конструкции.

Наиболее часто встречающиеся источники аэродинамического шума в технических устройствах могут быть интерпретированы простейшими идеальными моделями (монополь, диполь, квадруполь) [11, 12]. Генерируемая звуковая энергия трех указанных типов звуковых источников изменяется в широких пределах и зависит от скорости аэродинамических потоков v, плотности газа ρ и скорости звука c.

Для монопольного источника (пульсирующая сфера, излучающая звук равномерно по всем направлениям) излучаемая мощность звука

$$P_m \sim \frac{\rho}{c} v^4.$$

Для дипольного источника (осциллирующая твердая сфера, образованная двумя монопольными источниками одинаковой производительности, но работающими в противофазе и находящимися на пренебрежительно малом расстоянии друг от друга) излучаемая мощность звука

$$P_d \sim \frac{\rho}{c^3} v^6.$$

Для квадрупольного источника (комбинация из двух равных и противоположных по знаку диполей) излучаемая мощность звука

$$P_k \sim \frac{\rho}{c^5} v^8.$$

Если сделать допущение, что скорость потоков v в газовых каналах технических устройств пропорциональна частоте вращения рабочих органов (валов, роторов) n, то звуковая мощность, генерируемая работой этих энергетических машин, будет пропорциональна n в четвертой, шестой или восьмой степени. Значение степени частоты вращения будет зависеть от преобладания тех или иных акустических процессов, сопровождающих работу машины.

Аэродинамический шум, возникающий из-за периодического вытеснения газа рабочими органами компрессорных машин или двигателей внутреннего сгорания, можно описать монопольным излучателем. Звуковая мощность таких процессов пропорциональна четвертой степени объемной скорости или частоты вращения коленчатых валов и роторов ($P \sim n^4$). Например, для роторных газодувок Рутс — это шум, связанный с периодическим захватом порций газа лопастями роторов.

Шум, возникающий из-за образования вихрей у твердых границ каналов в потоке газа, а также вследствие взаимодействия уже образовавшихся вихрей с твердыми стенками, приводит к эффекту, эквивалентному акустическому диполю. Звуковая мощность в этом случае пропорциональна шестой степени частоты вращения рабочих органов ($P \sim n^6$). Вихревой шум в компрессорах обусловлен взаимодействием всасываемого и нагнетаемого газов с рабочими органами, например, с вращающимися роторами, а также перетечками газа через зазоры.

Квадрупольные источники могут обусловливать акустические излучения, возникающие при свободном истечении газовых струй или при обтекании потоком твердых тел (например, лопастей роторов), в результате чего создаются флуктуации скорости в турбулентном пограничном слое. В этом случае звуковая мощность пропорциональна восьмой степени частоты вращения этих роторов ($P \sim n^8$).

Оценка степени пропорциональности может характеризовать механизм шумообразования, его физическую природу и стать одним из методов исследования качественных сторон акустических процессов, сопровождающих работу энергетических машин. Следовательно, скорость газового потока или частота вращения рабочих органов являются не только параметрами, характеризующими работу газодинамической установки, но и величинами, удобными для классификации природы акустического излучения.

В работе на примере испытания роторной газодувки Рутс производства Мелитопольского компрессорного завода показано, что излучаемая звуковая мощность интенсивно возрастает при повышении частоты вращения роторов. При этом ощутимое влияние на излучаемый шум оказывает акустическое сопротивление всасывающего тракта (рис. 1). Экспериментальная кривая *1* характеризуется чередованием провалов и подъемов уровней звуковой

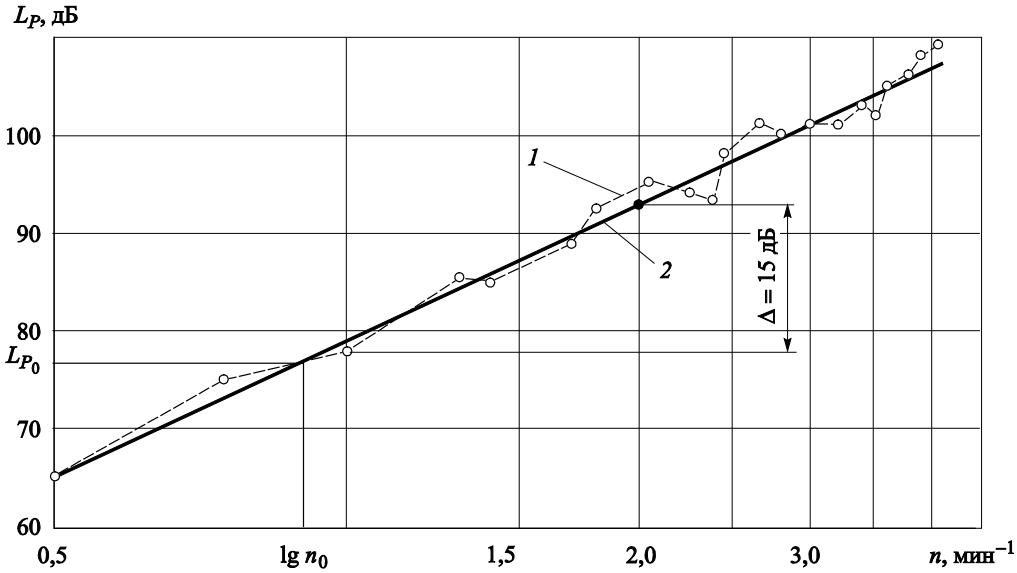

Рис. 1. Зависимость уровня звуковой мощности шума всасывания газодувки L_P от скорости вращения роторов n:
1 — данные эксперимента; *2* — усредненная зависимость

мощности, что подтверждает наличие резонансов и антирезонансов по длине всасывающего тракта. Общая тенденция повышения мощности излучаемого шума представлена усредненной прямой *2*, и если известен измеренный уровень звуковой мощности L_{P_0} при начальной частоте вращения n_0, то графически можно определить звуковую мощность при любой заданной частоте вращения n.

Уравнение прямой *2* (см. рис. 1), проходящей через точку с координатами L_{P_0} и $\lg n_0$, имеет вид

$$L_P - L_{P_0} = k\left(\lg n - \lg n_0\right),$$

где $k = \operatorname{tg}\alpha$ (α — угол наклона прямой относительно оси абсцисс). При удвоении частоты вращения с n до $2n$ уровень звуковой мощности повышается на Δ (дБ), откуда

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\Delta}{\lg 2n - \lg n} = \frac{\Delta}{\lg 2} = \frac{\Delta}{0,3}.$$

В рассматриваемом случае $\Delta = 15$ дБ, тогда $k = 50$ и выражение для звуковой мощности при текущем значении n примет вид

$$L_P = L_{P_0} + 50\lg\frac{n}{n_0} = L_{P_0} + 10\lg\left(\frac{n}{n_0}\right)^5.$$

Из этого выражения следует, что звуковая мощность, излучаемая на стороне всасывания газодувкой, пропорциональна пятой степени частоты вращения роторов в диапазоне 500…4 500 мин$^{-1}$.

Как будет показано далее, промежуточная пятая степень, средняя между четвертой и шестой, объясняется тем, что в широком диапазоне частоты вращения роторов меняется определяющий механизм генерации шума с монопольного на дипольный. В связи с этим обобщенная прямая занимает промежуточное положение и проходит под углом, более крутым, чем четвертая степень, и менее крутым, чем шестая.

На рис. 2–4 представлены изменения уровней звуковой мощности L_P в октавных полосах звуковых частот в зависимости от частоты вращения роторов n газодувки Рутс в диапазоне 1 500…5 000 мин$^{-1}$.

Характер изменения звуковой мощности в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 500, 250, 125 Гц (см. рис. 2) свидетельствует о монопольном типе излучении шума (закон четвертой степени). Следовательно, генерация шума в этих октавных полосах определяется пульсацией объемной скорости всасываемого в газодувку потока воздуха. Однако в октавной полосе 500 Гц при $n > 4\,400$ мин$^{-1}$ рост излучения звуковой мощности начинает носить более крутой характер (шестая степень), что свидетельствует о возрастании роли вихреобразования в генерации шума. Следует отметить, что мощность монопольного и дипольного типов излучения пропорциональна сопротивле-

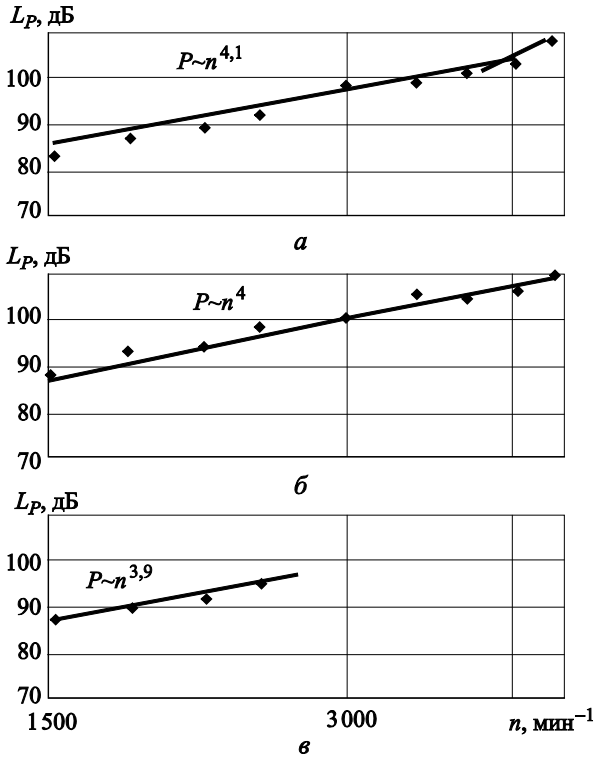

Рис. 2. Зависимости уровня звуковой мощности шума всасывания газодувки L_P от частоты вращения роторов n в октавах 500 (*а*), 250 (*б*) и 125 Гц (*в*)

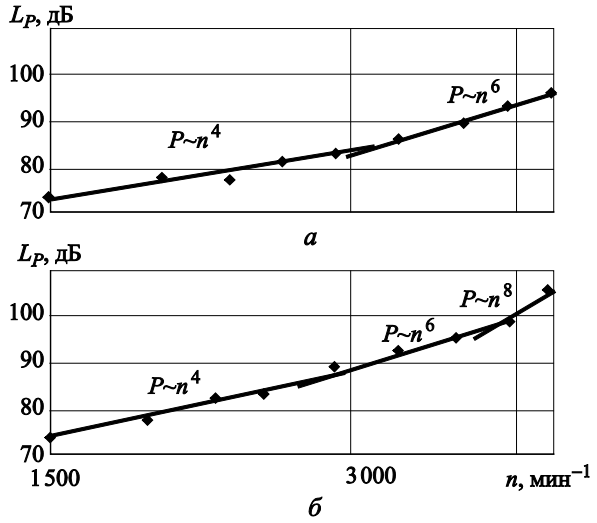

Рис. 3. Зависимости уровня звуковой мощности шума всасывания газодувки L_P от частоты вращения роторов n в октавах 1 000 (*а*) и 2 000 Гц (*б*)

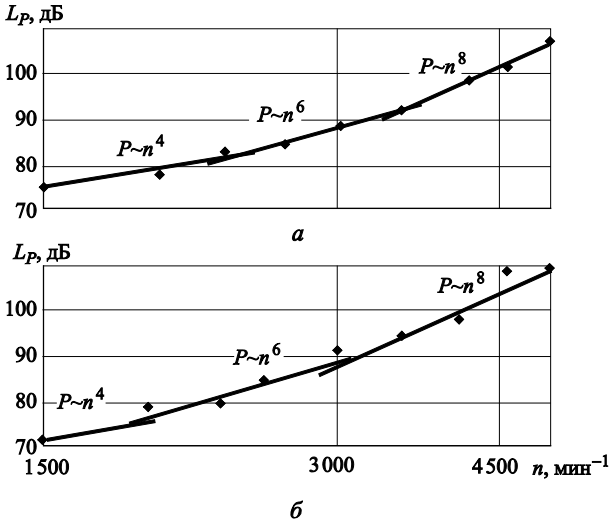

Рис. 4. Зависимости уровня звуковой мощности шума всасывания газодувки L_P от частоты вращения роторов n в октавах 4 000 (*а*) и 8 000 Гц (*б*)

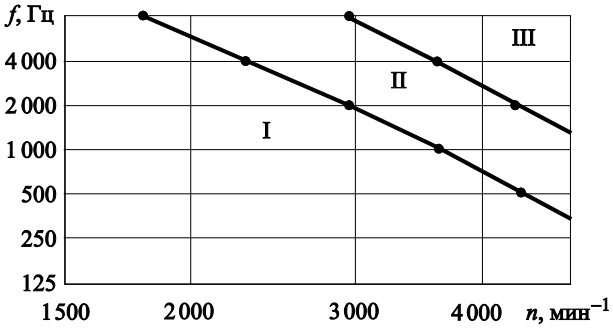

Рис. 5. Диаграмма зон преобладания различных типов излучения аэродинамического шума газодувки:
I — монополь; II — диполь; III — квадруполь

нию излучения источника R. Для первого из них $R_м \sim (kr)^2$, для второго $R_д \sim (kr)^4$, где ~ — знак пропорциональности, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, r — радиус излучателя. Таким образом, на низких частотах при больших длинах волн λ параметр $(kr) << 1$, и энергия, излучаемая монополем, на два порядка больше, чем энергия, излучаемая диполем, при прочих равных условиях.

В следующей октавной полосе 1 000 Гц (см. рис. 3) преобладание процессов дипольного характера в излучении звука началось при более низких частотах вращения роторов (n = = 3 500 мин$^{-1}$). Объясняется это тем, что при существующих размерах газодувок в частотном диапазоне 1 000 Гц параметр (kr) приближается к единице, а при увеличении частоты становится больше единицы, и энергия, излучаемая диполем, растет быстрее, чем энергия, излучаемая монополем.

В октавной полосе 2 000 Гц (см. рис. 3, *а*) уже просматриваются три зоны: монопольного, дипольного и квадрупольного излучения.

В октавных полосах 4 000 и 8 000 Гц (см. рис. 4) чередование преобладающей роли монопольного, дипольного и квадрупольного характеров излучения начинается на более тихоходных режимах. Необходимо отметить, что в этих частотных диапазонах уровни звуковой мощности невелики и практически не оказывают влияния на суммарный шум газодувки.

На основе анализа экспериментальных зависимостей построена диаграмма зон преобладания различных типов излучения аэродинамического шума газодувки Рутс в зависимости от частоты вращения роторов (рис. 5). Анализ диаграммы показал, что для режимов работы газодувки до 2 000 мин$^{-1}$ во всем диапазоне звуковых частот преобладает монопольное излучение, т. е. шум определяется пульсациями объемной скорости.

В диапазоне 2 000…3 000 мин$^{-1}$ звуковые излучения вызываются двумя типами излучателей — монопольным и дипольным. Однако суммарный шум газодувки определяют уровни октавных полос 250 и 500 Гц. На рис. 6 представлен спектр шума всасывания газодувки при частоте n = 3 000 мин$^{-1}$. Отсюда следует, что монопольное излучение доминирует в общем шуме.

С увеличением частоты вращения роторов монопольное излучение перестает играть определяющую роль. Это приводит к тому, что суммарный уровень звуковой мощности при частоте n = 3 500 мин$^{-1}$ становится пропорционален шестой степени частоты вращения роторов. Можно предположить, что при режимах работы, превышающих частоту 5 000 мин$^{-1}$, суммар-

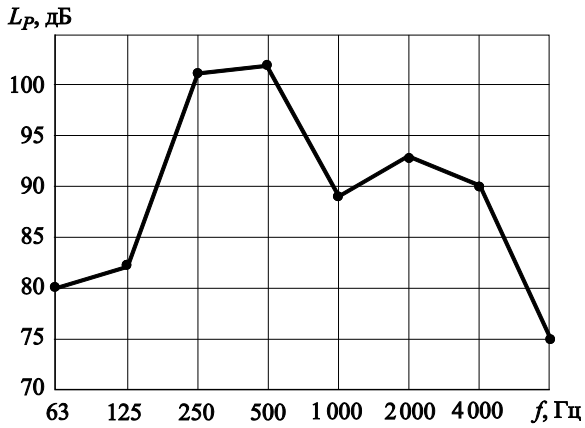

Рис. 6. Октавный спектр шума всасывания газодувки Рутс при частоте n = 3 000 мин$^{-1}$

ный уровень звуковой мощности будет пропорционален более высокой степени частоты, так как определяющими станут дипольный и квадрупольный типы излучения.

Выводы

1. Проведенный анализ особенностей излучения аэродинамического шума на примере газодувки Рутс в октавных полосах частот позволил подробно исследовать процессы звукового излучения. Он показал, что, несмотря на наличие трех механизмов возникновения шума, на существующих режимах работы газодувок до частоты 3 000 мин$^{-1}$ преобладает излучение монопольного типа, подчиняющееся закону четвертой степени. Следовательно, при численном моделировании генерации звука газодувок Рутс следует использовать математический аппарат монопольного излучателя.

2. Описанный экспериментальный метод может быть использован для анализа шумообразования поршневых компрессоров, вентиляторов, двигателей внутреннего сгорания и других агрегатов. При этом метод прост в аппаратной реализации.

3. В настоящее время анализ генерации аэродинамического шума, возникающего при работе различного энергетического оборудования, представляет интерес для современных исследователей. В связи с этим предлагаемый метод может стать востребованным.

Литература

[1] Рон Э.В. Численная аэроакустика в автомобилестроении. *Журнал автомобильных инженеров*, 2012, № 4 (75), с. 10–14.

[2] Гусев В.П., Лешко М.Ю., Пестерева М.Ю. Генерация аэродинамического шума в элементах систем вентиляции. *АВОК*, 2006, № 3, с. 70–81.

[3] Копьев В.Ф., Остриков Н.Н. Исследование технологии снижения шума обтекания с помощью изменения формы поверхности плохообтекаемых тел. *Тез. докл. Второй Всерос. открытой конф. по авиационной акустике*, 2011, с. 103–104.

[4] Баженова Л.А. К вопросу о механизме возникновения вихревого звука при обтекании потоком твердых неподвижных тел. *Сб. тр. науч. конф., посвященной 100-летию А.В. Римского-Корсакова*, Москва, ГЕОС, 2010, с. 69–80.

[5] Тараторин А.А., Тупов В.Б. Методика определения акустического центра источника шума. *Теплоэнергетика*, 2015, № 7, с. 19–24.

[6] Гусев В.П. Повышение точности акустических расчетов инженерных систем. *АВОК*, 2011, № 3, с. 64–71.

[7] Di Zhou, Xiaoyu Wang, Jun Chen, Xiaodong Jing, Xiaofeng Sun. Sound generation by non-synchronously oscillating rotor blades in turbomachinery. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, vol. 355, pp. 150–171.

[8] Giakoumis E.G., Rakopoulos C.D., Dimaratos A.M., Rakopoulos D.C. Combustion noise radiation during acceleration of a turbocharged diesel engine operating with biodiesel or n-butanol diesel fuel blends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Pt. D, Journal of Automobile Engineering*, 2012, vol. 226, pp. 971–986.

[9] Zhang L., Liang S., Hu C. Flow and Noise Characteristics of Centrifugal Fan under Different Stall Conditions. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, vol. 2014, Article ID 403541, 9 p. Available at: http://dx.doi.org/10.1155/2014/403541 (accessed 27 January 2016).

[10] Пятунин К.Р., Архарова Н.В., Ремизов А.Е. Численное моделирование тонального шума ступени вентилятора двухконтурного турбореактивного двигателя. *Вестник СГАУ*, 2014, № 5–3 (47), с. 60–65.

[11] Скучик Е. *Основы акустики*. Т. 2. Москва, Мир, 1976. 540 с.

[12] Вуд А. *Звуковые волны и их применение*. Москва, ЛКИ, 2010. 144 с.

References

[1] Ron E.V. Chislennaia aeroakustika v avtomobilestroenii [Numerical aeroacoustics in the automotive industry]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov* [Zurnal AAI]. 2012, no. 4(75), pp. 10–14.

[2] Gusev V.P., Leshko M.Iu., Pestereva M.Iu. Generatsiia aerodinamicheskogo shuma v elementakh sistem ventiliatsii [Generation of aerodynamic noise in ventilation systems elements].

AVOK [Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics]. 2006, no. 3, pp. 70–81.

[3] Kop'ev V.F., Ostrikov N.N. Issledovanie tekhnologii snizheniia shuma obtekaniia s pomoshch'iu izmeneniia formy poverkhnosti plokhoobtekaemykh tel [Research technologies to reduce flow noise by changing the shape of the surface of bluff bodies]. *Tezisy dokladov Vtoroi vserossiiskoi otkrytoi konferentsii po aviatsionnoi akustike* [Abstracts of the 2 All-Russia Conference on the open air acoustics]. 2011, pp. 103–104.

[4] Bazhenova L.A. K voprosu o mekhanizme vozniknoveniia vikhrevogo zvuka pri obtekanii potokom tverdykh nepodvizhnykh tel [On the question of the mechanism of the vortex of sound in the flow stream of solid motionless bodies]. *Sbornik trudov nauchnoi konferentsii, posviashchennoi 100-letiiu A.V. Rimskogo-Korsakova* [Proceedings of the scientific conference devoted to the 100th anniversary of A. Rimsky-Korsakov]. Moscow, GEOS publ., 2010, pp. 69–80.

[5] Taratorin A.A., Tupov V.B. Detection technique of acoustical center of noise source. *Thermal Engineering*, 2015, vol. 62, no. 7, pp. 480–483.

[6] Gusev V.P. Povyshenie tochnosti akusticheskikh raschetov inzhenernykh system [Enhancement of utility systems' acoustic calculations precision]. *AVOK* [Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics]. 2011, no. 3, pp. 64–71.

[7] Zhou D., Wang X., Chen J., Jing X., Sun X. Sound generation by non-synchronously oscillating rotor blades in turbomachinery. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, vol. 355, pp. 150–171.

[8] Giakoumis E.G., Rakopoulos C.D., Dimaratos A.M., Rakopoulos D.C. Combustion noise radiation during acceleration of a turbocharged diesel engine operating with biodiesel or n-butanol diesel fuel blends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Pt. D, Journal of Automobile Engineering*, 2012, vol. 226, pp. 971–986.

[9] Zhang L., Liang S., Hu C. Flow and Noise Characteristics of Centrifugal Fan under Different Stall Conditions. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, vol. 2014, Article ID 403541, 9 p. Available at: http://dx.doi.org/10.1155/2014/403541 (accessed 27 January 2016).

[10] Piatunin K.R., Arkharova N.V., Remizov A.E. Chislennoe modelirovanie tonal'nogo shuma stupeni ventiliatora dvukhkonturnogo turboreaktivnogo dvigatelia [Numerical simulation of tonal noise of a bypass engine fan stage]. *Vestnik SGAU* [Vestnik of the Samara State Aerospace University]. 2014, no. 5-3(47), pp. 60–65.

[11] Skuchik E. *Osnovy akustiki* [Acoustics Basics]. Vol. 2. Moscow, Mir publ., 1976. 540 p.

[12] Vud A. *Zvukovye volny i ikh primenenie* [Sound waves and their applications]. Moscow, LKI publ., 2010. 144 p.

Статья поступила в редакцию 25.05.2016

Информация об авторах

СМИРНОВ Сергей Георгиевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Экология и промышленная безопасность». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: ssmirnov1945@mail.ru).

ПАНКОВА Елена Олеговна (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Экология и промышленная безопасность». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pankovaelena@yandex.ru).

Information about the authors

SMIRNOV Sergey Georgievich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Ecology and Industrial Safety. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ssmirnov1945@mail.ru).

PANKOVA Elena Olegovna (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Ecology and Industrial Safety. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: pankovaelena@yandex.ru).