

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-41-48

УДК 629.5.035.5+534.83

В.А. Бушковский, Ю.А. Егоров 
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ЛОПАСТЕЙ НА ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ШУМ СУДОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются лопастные системы гребных винтов (ГВ) и водометов. Цель – определение направления снижения высокочастотного некавитационного шума судовых движителей.

Материалы и методы. Проведен анализ зарубежных и отечественных работ в области аэроакустики и гидроакустики винтов и крыльев. Определены характеристики турбулентного пограничного слоя на лопастях, влияющие на акустическое излучение винтов. Методы оценки шумности, полученные в аэродинамике крыльев, применены для судовых движителей.

Основные результаты. Теоретические исследования определили тенденцию снижения высокочастотного шума судовых движителей посредством уменьшения числа лопастей ГВ. Проведенные непосредственные измерения шума моделей движителей подтвердили отмеченную тенденцию снижения высокочастотного шума.

Заключение. В отличие от низкочастотного излучения гребных винтов в высокочастотной области снижение излучения возможно посредством уменьшения числа лопастей ГВ.

Ключевые слова: высокочастотный шум, акустические измерения, судовые движители, модельный эксперимент.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-41-48

UDC 629.5.035.5+534.83

V.A. Bushkovsky, Yu.A. Yegorov 
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

BLADE NUMBER EFFECT UPON HIGH-FREQUENCY MARINE PROPULSOR NOISE

Object and purpose of research. This paper discusses blade systems of propellers and water jets. The purpose of the study was to outline the ways to mitigation of high-frequency non-cavitation noise of marine propulsors.

Materials and methods. The study analyses Russian and foreign publications on aero- and hydroacoustics of propellers and foil systems. It also determines the parameters of turbulent boundary layer on propeller blades with respect to its effect upon propeller noise radiation. Noise assessment methods obtained for aerodynamics of foil systems have been applied to marine propulsors.

Main results. Theoretical studies have shown that marine propellers with fewer blades tend to have lower radiation of high-frequency noise. Direct noise measurements of propulsor models performed under this study have confirmed this trend.

Conclusion. In contrast to the low-frequency propeller noise, high-frequency acoustic radiation can be achieved through reduction of propeller blade number.

Keywords: high-frequency noise, acoustic measurements, marine propulsors, model test.
The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Бушковский В.А., Егоров Ю.А. Влияние числа лопастей на высокочастотный шум судового движителя. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 4(402): 41–48.

For citations: Bushkovsky V.A., Yegorov Yu.A. Blade number effect upon high-frequency marine propulsor noise: model test data. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 4(402): 41–48 (in Russian).

Проблема снижения шумности судовых движителей в последнее время приобретает все большую актуальность. Если ранее возможность снижения шумности движителей рассматривалась только для военных кораблей (прежде всего подводных лодок, из соображений их скрытности), то в настоящее время большое внимание уделяется шумности гражданских судов. Объясняется это, в числе прочего, повышенным вниманием к вопросам экологии.

Влияние деятельности человека на окружающую среду неоспоримо, и антропогенные шумы являются важной составной частью этого явления. Доказано, например, вредное воздействие шума от деятельности человека на многих представителей морской фауны, в частности на китов. Поскольку в развитых странах ответственное отношение к окружающей среде является устойчивым трендом, введение в общую практику законодательных требований по ограничению шумности коммерческих судов – только вопрос времени. Уже сейчас международные организации, занимающиеся вопросами судоходства, пытаются учесть современные экологические требования. С этой целью готовится к введению нормирование подводного шумоизлучения транспортных судов для снижения их воздействия на морских обитателей в зонах наиболее активного судоходства.

Заметим, что авиастроение уже прошло подобный путь, и сейчас существуют запреты на полеты летательных аппаратов в определенных местностях, что связано с воздействием шума на жизнедеятельность, например, некоторых видов редких птиц [1]. Достаточно давно введены нормы по шумности самолетов при их посадке в аэропортах. Напомним, что у ряда отечественных самолетов, не удовлетворявших данным требованиям, периодически возникали проблемы с эксплуатацией в аэропортах европейских городов. Поскольку существуют планы по введению аналогичных ограничений для судов, заходящих в порты, снижение шумности коммерческих судов является не абстрактной отдаленной задачей, а проблемой ближайшего будущего.

Известно, что движитель является одним из доминирующих источников шума, создаваемого судном [2]. Безусловно, существует большой и успешный опыт снижения шумности, например, гребных винтов кораблей ВМФ. Вместе с тем прямое использование этого опыта для гражданских судов невозможно ввиду различия требований, исходно предъявляемых к движителям коммерческих судов и военных кораблей.

Так, у коммерческого судна главным требованием часто становится эффективность движителя, обеспечивающего экономичный режим работы энергетической установки (и в итоге малый расход топлива), тогда как для военного корабля это менее актуально. По этой причине геометрия, условия и режимы работы судового движителя коммерческого судна и военного корабля существенно различаются, а это в свою очередь влияет на их акустические характеристики. Для прогресса в создании малошумных движителей коммерческих судов необходимы дополнительные систематические как теоретические, так и экспериментальные исследования. В данной статье изложен лишь один из подходов, позволяющих наметить путь к снижению шумности движителя в высокочастотной области.

Очевидно, что одной из первых задач на пути к созданию малошумного движителя является определение влияния изменения основных его геометрических характеристик на акустические свойства. Ниже будет показано, как изменение количества лопастей Z подвижной лопастной системы гребного винта (ГВ) или рабочего колеса (РК) движителя влияет на генерируемый им высокочастотный (кромочный) шум. Высокочастотный шум, обусловленный кавитацией движителя, не рассматривается.

Ввиду крайне сложной физической природы кромочного шума универсального расчетного метода его определения не существует. Во многом это связано с тем, что высокочастотный шум судовых движителей имеет две составляющие: гидродинамическую (вихревую) и вибрационную [2]. Несмотря на непрерывное совершенствование расчетных методов вообще и непрекращающиеся усилия по созданию надежной схемы вычисления кромочного шума в частности, на данный момент применение численных методов в данной области либо является слишком дорогим, либо не позволяет получить результаты с требуемой точностью. Поэтому надежные способы оценки уровней высокочастотного шума движителей связаны с проведением экспериментальных исследований.

В отечественной практике существует два проверенных способа оценки уровней шума движителя:

1. прогноз по результатам модельного эксперимента;
2. расчет по эмпирическим формулам, полученным в результате обработки большого объема экспериментальных данных.

Из анализа принятых для оценки уровней кромочного шума расчетных формул, полученных путем статистической обработки результатов измерения шума различных ГВ, можно сделать вывод о смещении максимума высокочастотного излучения в область более высоких частот при увеличении числа лопастей движителя. Оценить по этим формулам влияние числа лопастей на тенденцию изменения уровней шума не представляется возможным. Однако для такой оценки можно использовать другой подход, основанный на понимании физической основы кромочного шума, изложенном ниже.

Высокочастотное излучение гребного винта обусловлено взаимодействием нестационарно движущихся вихрей (вихревых структур) с выходящей кромкой лопастей. Вихри возникают в турбулентном пограничном слое лопастей ГВ. При сходе вихрей на выходящей кромке лопасти появляется нестационарная сила, приводящая к высокочастотному излучению, называемому вихревым шумом или гидродинамической составляющей кромочного шума.

Данная сила также возбуждает колебания лопастей на собственных частотах, и эти упругие колебания усиливают интенсивность схода вихрей с выходящей кромки. Такое явление называют переизлучением шума на собственных частотах лопастей или вибрационной составляющей кромочного шума. Совокупность гидродинамической и вибрационной составляющих образует то сложное физическое явление, которое принято называть кромочным шумом.

В работе [2] это физическое явление еще более усложняется в предположении об обратном влиянии упругих колебаний на формирование вихревого шума. Для упрощенной схемы явления ясно, что кромочный шум превосходит вихревой: они были бы равны только в случае абсолютно жестких лопастей [3]. Все дальнейшее изложение касается гидродинамической составляющей кромочного шума. При этом очевидно, что основные тенденции изменения вихревой составляющей шума проявятся и в кромочном шуме в целом.

При таком подходе к проблеме кромочного шума понятно, что важнейшим физическим явлением, определяющим его основные особенности, является взаимодействие турбулентного пограничного слоя с выходящими кромками лопастей.

Впервые решение задачи кромочного шума в такой постановке предложили Дж. Фоукс Вильямс и Л. Холл еще в 1970 г. [4]. Результат, полученный

ими для кромочного шума полубесконечной тонкой пластины, выглядит следующим образом:

$$\langle p^2 \rangle \sim \rho_0^2 v'^2 \frac{V_c^2}{c_0} \left(\frac{l\Omega}{r^2} \right) \bar{D}, \quad (1)$$

здесь $\langle p^2 \rangle$ – средний квадрат звукового давления на расстоянии r от выходящей кромки; ρ_0 – средняя плотность жидкости; v'^2 – турбулентная пульсация скорости; c_0 – скорость звука; V_c – конвективная скорость; l – размах пластины (крыла); Ω – характерный масштаб турбулентности; \bar{D} – множитель, учитывающий фактор направленности излучения. $\bar{D} = 1$ при расположении наблюдателя в перпендикулярном от плоскости выходящей кромки направлении.

Обычные допущения для пограничного слоя потока сводятся к тому, что $v'^2 \sim V_c \sim V$ и $\Omega \sim \delta$, где V – скорость потока, δ – толщина пограничного слоя на выходящей кромке.

Разные исследователи в качестве характерного масштаба турбулентности использовали как толщину пограничного слоя, так и толщину вытеснения – δ^* , или толщину следа в районе выходящей кромки [5]. Для единообразия мы в дальнейшем будем использовать величину толщины пограничного слоя δ .

Впоследствии М. Хау уточнил решение (1), получив следующее уравнение [6]:

$$\langle p^2 \rangle \sim \rho_0^2 v'^2 \frac{V_c^3}{c_0} \left(\frac{l\Omega}{r^2} \right) \times \frac{\sin \alpha \sin^2(\varphi/2) \cos^3 \beta}{(1 + M_{0R})^2 (1 - M_{vR})^2 (1 - M_{v1} \sin \alpha)}. \quad (2)$$

Знаменатель правой части данного выражения связан с доплеровскими эффектами. Ввиду того, что в водной среде значение числа Маха M весьма мало (как правило, $M \leq 0,01$), данный множитель для наших условий близок к 1 и может не учитываться. Множитель $\cos^3 \beta$ говорит о возможности снижения уровня кромочного шума в случае, когда угол между выходящей кромкой и направлением потока отличен от 90° . На этом теоретическом предсказании М. Хау основаны исследования по снижению уровней кромочного шума за счет использования пилообразной или синусоидальной выходящей кромки либо крыльев скошенной формы [7, 13]. Для лопастей подавляющего большинства движителей угол β близок к 90° и множитель $\cos^3 \beta = 1$. Фактор направленности $\sin^2(\varphi/2) = 1$ в перпендикулярном от плоскости выходящей кромки направлении.

Таким образом, упрощенное и пригодное для практического использования следствие из выводов как Фокса Вильямса, так и Хау сводится к выражению:

$$L \sim V^5 \frac{l\delta}{r^2}. \quad (3)$$

Известно большое количество публикаций, в которых формулы, производные от (3), используются различными зарубежными исследователями для нормирования измеренных уровней воздушного кромочного шума различных объектов – крыльев, лопастей ветровых турбин, несущих и хвостовых винтов вертолетов. Подобные же формулы лежат в основе многих расчетных полуэмпирических методов оценки уровней аэродинамического кромочного шума.

Относительно применимости таких формул при исследовании шума судовых движителей информации значительно меньше. Это связано с тем, что для судовых движителей формирование высокочастотного шума значительно сложнее, чем для воздушных винтов и крыльев. Хотя еще в работе [8] было предложено исследовать высокочастотный шум на крыльях в жидкости с использованием результатов обтекания крыльев в аэродинамической трубе с последующим пересчетом шума в воздухе на требуемые условия. В работе Блейка [9] формулы типа (3) приводятся применительно к высокочастотному подводному шуму. В случае, когда подобные формулы используются не применительно к крылу, а для многолопастных систем (винты, турбины), в них добавляется множитель Z . Это связано с тем, что высокочастотный шум не коррелирован и каждая лопасть является самостоятельным источником шума.

Отметим, что подходы к оценке уровней кромочного шума движителя, основанные на характеристиках толщины пограничного слоя выходящей кромки, в отечественной судовой акустике до настоящего времени практически не встречались и использовались только в работе [3]. Однако в области исследований аэродинамического шума подобные формулы в России используются. Например, специалисты ЦАГИ в ряде статей для оценки высокочастотного шума задней кромки тянущего воздушного винта самолета применяют формулу:

$$L(f) = 10Lg \times \left(U_{\text{окр}}^5 Z\Phi \frac{\delta l}{R^2} \left(\frac{St}{St_{\text{max}}} \right)^4 \left(\left(\frac{St}{St_{\text{max}}} \right)^{1,5} + 0,5 \right)^{-4} \right) + Kb, \quad (4)$$

здесь $U_{\text{окр}}$ – окружная скорость воздушного винта; δ – толщина пограничного слоя на выходящей кромке; Z – число лопастей винта; St – число Струаля, $St = \frac{f\delta}{U_{\text{окр}}}$, $St_{\text{max}} = 0,1$; l – длина элемента лопасти; Kb – коэффициент масштабирования; Φ – множитель, отвечающий за фактор направленности; R – расстояние до наблюдателя.

Данная формула происходит из зарубежных источников (авторы ссылаются на труды специалистов NASA [14]) и восходит в итоге к уравнениям Фокса Вильямса и Холла, Хау и Амиета. Шум задней кромки является калькой с английского trailing edge noise и соответствует принятому в области судовой акустики термину «кромочный шум». А точнее – гидродинамической составляющей кромочного шума, поскольку вибрационная составляющая данного явления в аэроакустике имеет существенно меньшее значение, чем в гидроакустике.

Используя формулу (4), авторы статьи [10] выводят следующее выражение для сравнения уровней высокочастотного шума воздушных винтов с разным числом лопастей:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{Z_2}{Z_1}, \quad (5)$$

где ΔL – изменение уровня высокочастотного шума для двух винтов.

Авторы подчеркивают, что данная формула справедлива при следующих условиях сравнения:

- равенство тяг на сходственных режимах работы: $\frac{Z_2 \alpha_2 n_2^2 D_2^4}{Z_1 \alpha_1 n_1^2 D_1^4} = 1$;
- равенство окружных скоростей: $\pi n_1 D_1 = \pi n_2 D_2$;
- геометрическое подобие лопастей винтов.

Из выражения (5) следует, что при увеличении числа лопастей винта в 2 раза высокочастотный шум возрастает на 3 дБ. Однако данная оценка, правильно определяющая тенденцию изменения кромочного шума в зависимости от числа лопастей, является слишком оптимистичной. Дело в том, что из практики проектирования судовых движителей известно, что для сохранения оптимальных пропульсивных характеристик необходимо, чтобы дисковое отношение A_E/A_0 имело определенное значение ($\approx 0,5-0,7$) и сохранялось при изменении числа лопастей.

Таким образом, условие полного геометрического подобия лопастей винтов несовместимо с условием равенства тяг: увеличение числа лопастей Z при соблюдении условия $A_E/A_0 = \text{const}$

приводит к уменьшению ширины лопасти s . От ширины лопасти в свою очередь зависит толщина пограничного слоя на выходящей кромке лопасти δ .

Попробуем оценить влияние числа лопастей на высокочастотный шум более строго. Рассмотрим два гребных винта с различными числами лопастей и различной шириной лопастей Z_1, c_1 и Z_2, c_2 . Для соблюдения равенства дисковых отношений положим $Z_1, c_1 = Z_2, c_2$. Из формулы (4) возьмем интересующую нас составляющую

$$L \sim U^5 Z \delta. \quad (6)$$

Известно, что для турбулентного пограничного слоя величина δ может быть определена из соотношения [11]

$$\delta \sim 0,217 c^{6/7} \left(\frac{v}{U} \right)^{1/7}. \quad (7)$$

Нас интересует изменение уровней шума для двух винтов:

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{U_2^5 Z_2 \delta_2}{U_1^5 Z_1 \delta_1}.$$

Подставив выражение (6) в формулу (5) и при условии $U_2 = U_1$, сохраняя дисковое отношение, получаем:

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{Z_2 \left(\frac{c_2 Z_2}{Z_2} \right)^{6/7}}{Z_1 \left(\frac{c_1 Z_1}{Z_1} \right)^{6/7}} = \frac{Z_2^{1-6/7}}{Z_1^{1-6/7}} = \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^{1/7}. \quad (8)$$

В логарифмическом представлении

$$\Delta L = 10 \lg \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^{1/7}. \quad (9)$$

По формуле (9) снижение уровней шума ΔL при уменьшении числа лопастей в 2 раза составит всего 0,4 дБ, что существенно меньше 3 дБ, вытекающих из формулы (5). Тем не менее из выражения (9) однозначно следует, что для снижения уровней высокочастотного шума при прочих равных условиях предпочтительно иметь гребной винт с меньшим числом лопастей. Необходимо отметить, что при уменьшении числа лопастей вдвое происходит изменение составляющих числа Струхала, и это приводит к смещению максимума спектра в область более

низких частот. Поэтому в области высоких частот, за максимумом спектра, снижение уровней будет больше чем 0,4 дБ за счет смещения спектра влево.

Оценим, насколько сместится по частоте спектр движителя при уменьшении числа лопастей в два раза. Число Струхала по толщине погранслоя запишем в виде

$$St = \frac{f \delta}{U}, \quad (10)$$

где f – частота излучения.

Для движителя с числом лопастей Z_1 :

$$St_1 = \frac{f_1 \delta_1}{U_1}. \quad (10.1)$$

Для движителя с числом лопастей Z_2 :

$$St_2 = \frac{f_2 \delta_2}{U_2}. \quad (10.2)$$

Скорости U_1 и U_2 для лопастей движителей, спроектированных на один режим работы, очевидно равны: $U_1 = U_2$. Также равны или очень близки числа Струхала: $St_1 \approx St_2$. Тогда из формул 10, 10.1, 10.2 следует, что

$$f_2 = f_1 \frac{\delta_1}{\delta_2}. \quad (11)$$

Подставив формулу (7) в выражение (11), получим

$$f_2 = f_1 \left(\frac{c_1}{c_2} \right)^{6/7}. \quad (12)$$

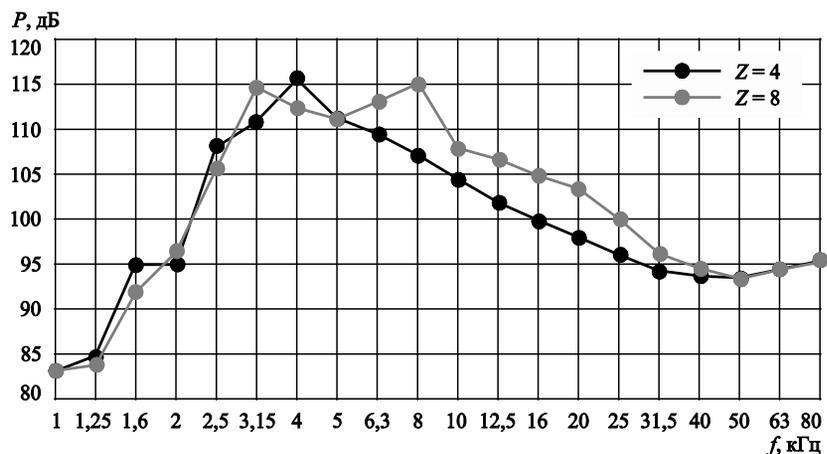
При сохранении дискового отношения A_E/A_0 увеличение числа лопастей движителя приводит к уменьшению ширины лопасти s . При этом, если остальные геометрические характеристики лопасти остаются неизменными или изменяются незначительно, можно считать, что

$$\frac{z_2}{z_1} \approx \frac{c_1}{c_2}. \quad (13)$$

Таким образом, подстановкой выражения (13) в формулу (12) окончательно получаем

$$f_2 = f_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^{6/7} \text{ или } \frac{f_2}{f_1} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^{6/7}. \quad (14)$$

Из формулы (14) следует, что при уменьшении числа лопастей вдвое частота излучения уменьшится в 1,8 раза.



Результаты модельного эксперимента по измерению уровней шума движителей с числом лопастей $Z = 4$ и 8
Model test results for noise levels of propulsors with blade number $Z = 4$ and 8

Для проверки влияния числа лопастей на тенденции изменения высокочастотного шума в Большой кавитационной трубе Крыловского центра были проведены испытания двух вариантов модели водометного движителя с разными вариантами рабочих колес. Для первого варианта число лопастей составило $Z = 8$, для второго – $Z = 4$. Оба варианта движителей спроектировали на один режим работы; у обоих вариантов рабочих колес сохранено одинаковое дисковое отношение. На рисунке представлены результаты модельных акустических испытаний двух вариантов движителя при одинаковой частоте вращения РК.

Анализ результатов испытаний показывает, что движитель с рабочим колесом с числом лопастей $Z = 4$ дает снижение уровней шума по сравнению с восьмилопастным на 4–6 дБ в диапазоне частот $f = 6,3–25$ кГц. Это заметно больше, чем следует из формулы (9). Данный факт можно объяснить двумя соображениями.

Во-первых, формула (9) описывает только гидродинамическую составляющую высокочастотного шума. Вибрационную составляющую она не учитывает. Между тем уменьшение числа лопастей при сохранении дискового отношения вызывает существенное повышение жесткости лопасти, что, безусловно, способно привести к снижению вибрационной составляющей кромочного шума, а значит, и кромочного шума в целом.

Во-вторых, очевидно, что снижение числа лопастей привело к явному снижению частоты максимума излучения. При этом спектр излучения визуально существенно сдвигается влево, а правая ветка спектра для случая $Z = 4$ оказывается намного ниже варианта с $Z = 8$. Сдвиг же левой ветки спектра излучения незаметен, поскольку в этой частотной области шум движителя маскирует-

ся собственными шумами экспериментальной установки.

Сопоставление результатов модельных испытаний с выражениями (9) и (14) подтверждает корректность теоретических выкладок, приведенных выше. Формулы качественно верно описывают направление изменения уровней высокочастотного шума движителя в зависимости от изменения числа его лопастей, а именно – уменьшение числа лопастей движителя приводит к некоторому уменьшению уровней излучения и существенному смещению спектра излучения влево, в область более низких частот.

Полученные в диапазоне $f = 4–25$ кГц уровни шума, пересчитанные с помощью указанных формул, оказываются весьма близки друг к другу. Различие двух спектров на большинстве частот не превышает погрешности измерения.

Следует особо отметить, что акустические характеристики движителя не ограничиваются высокочастотной областью. В инфразвуковом диапазоне акустическое излучение движителя имеет другую природу – оно вызвано неоднородностью и турбулентностью набегающего потока. Из существующего опыта проектирования и испытания гребных винтов известно, что для данных видов шума увеличение числа лопастей, напротив, приводит к снижению уровней излучения. Гипотетический ГВ с бесконечным числом лопастей был бы бесшумным в низкочастотном диапазоне [12].

Таким образом, влияние числа лопастей движителя на уровни шума разнонаправленно: увеличение числа лопастей приводит к снижению уровней излучения в низкочастотной области и к повышению – в высокочастотной. Выбор числа лопастей с точки зрения шумности является компромиссом и зависит от конкретных условий эксплуатации и задач, стоящих перед разработчиком.

Список использованной литературы

1. *Ning Z., Hu H.* An experimental study on the aerodynamics and aeroacoustic characteristics of small propellers of UAV // 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reston : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016. Vol. 18. P. AIAA 2016-1785 (19 p.). DOI: 10.2514/6.2016-1785.
2. *Левковский Ю.Л.* Шум гребных винтов / ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Санкт-Петербург, 2005. 184 с.
3. *Бушковский В.А., Егоров Ю.А.* Оценка влияния формы крыла на высокочастотный вихревой шум // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 64(348).
4. *Williams J.E.F., Hall L.H.* Aerodynamic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering half plane // Journal of Fluid Mechanics. 1970. Vol. 40, No. 4. P. 657–670. DOI: 10.1017/S0022112070000368.
5. Авиационная акустика : в 2 ч. Ч. 1 : Шум на местности дозвуковых пассажирских самолетов и вертолетов / [А.Г. Мунин, В.Ф. Самохин, Р.А. Шипов и др.]. Москва : Машиностроение, 1986. 242, [1] с.
6. *Crighton D.G.* Airframe noise // Aeroacoustics of flight vehicles: theory and practice. Vol. 1 : Noise sources. Hampton, 1991. P. 391–447 (NASA Reference Publication ; No. 1258, vol. 1).
7. *Егоров Ю.А., Коваль А.А.* Применение пилообразной выходящей кромки лопасти движителя для снижения уровней высокочастотного шума судна // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2019. Вып. 4(390). С. 137–150. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-137-150.
8. *Морозов В.П.* Исследование гидродинамического шума, возникающего при обтекании крыльев, пластин и цилиндров // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1968. Вып. 241. С. 99–109.
9. *Blake W.K.* Aero-hydroacoustic for ships. [Bethesda] : David Taylor naval ship research and development center, 1984. 2 vol. (DTNSRDC Report ; № 84/010).
10. *Самохин В.Ф., Мошков П.А.* Оценка влияния числа лопастей и диаметра на шум воздушного винта // Вестник Самарского ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 25–34. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-25-34.
11. Справочник по теории корабля : в 3 т. Т. 1 : Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / [Я.И. Войткунский и др.]. Ленинград : Судостроение, 1985. 764 с.
12. *Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А.* Судовые движители. Ленинград : Судостроение, 1988. 294, [1] с.
13. *Howe M.S.* Aerodynamic noise of a serrated trailing edge // Journal of Fluids and Structures. 1991. Vol. 5, No. 1. P. 33–45. DOI: 10.1016/0889-9746(91)80010-B.
14. *Brooks T.F., Pope D.S., Marcolini M.A.* Airfoil Self-Noise and Prediction. Hampton, 1989. 137 p. (NASA Reference Publication ; No. 1218).

References

1. *Ning Z., Hu H.* An experimental study on the aerodynamics and aeroacoustic characteristics of small propellers of UAV // 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reston : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016. Vol. 18. P. AIAA 2016-1785 (19 p.). DOI: 10.2514/6.2016-1785.
2. *Levkovsky Yu.* Propeller noise. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2005. 182 p. (*in Russian*).
3. *Bushkovsky V., Yegorov Yu.* Assessment of foil shape effect upon high-frequency turbulence noise // Transactions of Krylov State Research Centre. 2011. Vol. 64(348) (*in Russian*).
4. *Williams J.E.F., Hall L.H.* Aerodynamic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering half plane // Journal of Fluid Mechanics. 1970. Vol. 40, No. 4. P. 657–670. DOI: 10.1017/S0022112070000368.
5. *Munin A., Samokhin V., Shipov R.* [et al]. Aviation acoustics. In 2 Parts. Part 1: Noise radiation of subsonic passenger airplanes and helicopters. Moscow : Mashinostroyeniye, 1986. 242, [1] p. (*in Russian*).
6. *Crighton D.G.* Airframe noise // Aeroacoustics of flight vehicles: theory and practice. Vol. 1 : Noise sources. Hampton, 1991. P. 391–447 (NASA Reference Publication ; No. 1258, vol. 1).
7. *Yegorov Yu., Koval A.* Sawtooth trailing edges of propeller blades as high-frequency noise dampers // Transactions of Krylov State Research Centre. 2019. Vol. 4(390). P. 137–150 (*in Russian*).
8. *Morozov V.* Flow noise investigation for foils, plates and cylinders // Transactions of Krylov State Research Centre. 1968. Vol. 241. P. 99–109 (*in Russian*).
9. *Blake W.K.* Aero-hydroacoustic for ships [Bethesda] : David Taylor naval ship research and development center, 1984. 2 vol. (DTNSRDC Report ; № 84/010).
10. *Samokhin V., Moshkov P.* Estimation of diameter and blade number effects upon propeller noise radiation // Vestnik of Samara University. Aerospace and mechanical engineering. 2016. Vol. 15, No. 3. P. 25–34 (*in Russian*).
11. Ship Theory. Reference book / Under editorship of Ya. Voitkunsky. In 3 vol. Vol. 1. Hydromechanics.

- Resistance. Propulsors. Leningrad : Sudostroyenie, 1985 (in Russian).
12. Artyushkov L., Achkinadze A., Rusetsky A. Ship propulsors. Text book. Leningrad : Sudostroyenie, 1988. 294, [1] p. (in Russian).
13. Howe M.S. Aerodynamic noise of a serrated trailing edge // Journal of Fluids and Structures. 1991. Vol. 5, No. 1. P. 33–45. DOI: 10.1016/0889-9746(91)80010-B.
14. Brooks T.F., Pope D.S., Marcolini M.A. Airfoil Self-Noise and Prediction. Hampton, 1989. 137 p. (NASA Reference Publication ; No. 1218).
- Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-67-49. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
- Егоров Юрий Александрович, начальник стенда ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-67-49. E-mail: krylov@krylov.spb.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3790-2086>.

About the authors

Vladimir A. Bushkovsky, Cand. Sci. (Eng), Lead Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-67-49. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Yury A. Yegorov, Test Rig Manager, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-67-49. E-mail: krylov@krylov.spb.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3790-2086>.

Сведения об авторах

Бушковский Владимир Александрович, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург,

Поступила / Received: 13.07.22
Принята в печать / Accepted: 06.10.22
© Бушковский В.А., Егоров Ю.А., 2022