

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-50-57
УДК 534.6+629.5.035.5

Ю.А. Егоров , П.С. Иванов , Н.В. Маринич 
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ЗАВИСИМОСТЬ КРОМОЧНОГО ШУМА МОДЕЛИ ГРЕБНОГО ВИНТА ОТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Объект и цель научной работы. Объектом исследований являются модели гребных винтов. Цель – определение влияния гидродинамической нагрузки движителя на уровни высокочастотного некавитационного (кромочного) шума.

Материалы и методы. Выполнен сравнительный анализ отечественных и зарубежных методов нормирования кромочного шума. Проведены измерения кромочного шума для серии моделей гребных винтов с разной гидродинамической нагрузкой.




Основные результаты. Выявлены теоретические предпосылки влияния гидродинамической нагрузки (в виде безразмерного коэффициента упора K_T) на уровни кромочного шума. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили корректность указанного подхода применительно к моделям гребных винтов.

Заключение. Проведенные модельные испытания подтвердили влияние гидродинамической нагрузки (коэффициента упора движителя K_T) на уровни кромочного шума. Определен примерный диапазон величины K_T , оптимальной для снижения шумности гребных винтов.

Ключевые слова: кромочный шум, пограничный слой, гидродинамическая нагрузка, судовые движители, модельный эксперимент.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-50-57
UDC 534.6+629.5.035.5

Yu.A. Yegorov , P.S. Ivanov , N.V. Marinich 
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

EDGE NOISE VS HYDRODYNAMIC LOAD ON PROPELLER MODEL

Object and purpose of research. This paper discusses propeller model. The purpose of the study was to understand the effect of hydrodynamic load on the propeller upon its high-frequency non-cavitation noise radiation (edge noise).

Materials and methods. Comparative analysis of Russian and foreign methods for assignment of edge noise norms. Edge noise measurements for a series of propeller models with different hydrodynamic load.

Main results. The study yielded certain theoretical hints suggesting the effect of hydrodynamic load (as non-dimensional thrust coefficient K_T) upon edge noise. Experimental studies performed in this work have confirmed that this approach is valid for propeller models.

Conclusion. Model tests have confirmed that edge noise depends on hydrodynamic load on the propeller (i.e. its thrust coefficient), as well as indicated tentative K_T range optimal for propeller noise mitigation.

Keywords: edge noise, boundary layer, hydrodynamic load, marine propellers, model test.

The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Егоров Ю.А., Иванов П.С., Маринич Н.В. Зависимость кромочного шума модели гребного винта от гидродинамической нагрузки. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 2(404): 50–57.

For citations: Yegorov Yu.A., Ivanov P.S., Marinich N.V. Edge noise vs hydrodynamic load on propeller model. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 2(404): 50–57 (in Russian).

Одна из актуальных проблем судостроения – это совершенствование судов в плане снижения воздействия на окружающую среду вызываемого ими шумоизлучения. Поскольку одним из доминирующих источников шума судна является его движитель, улучшение акустических характеристик последнего становится важнейшей задачей.

При этом следует заметить, что, хотя проблема шумоизлучения движителей, в частности гребных винтов (ГВ), актуальна еще с 1940-х гг., до сих пор она решалась (преимущественно исходя из соображений скрытности) исключительно для кораблей ВМФ. Однако сегодня совершенствование акустических характеристик становится все более важным и для транспортных судов. Это связано с рядом тенденций в современном судостроении, не последнее место среди которых занимают вопросы экологии. Так, в отечественной практике проектирования судов уже есть прецедент: для ряда судов снабжения проекта «Сахалин» были введены акустические ограничения, вызванные необходимостью работы в акваториях, связанных с размножением китов [1].

Процессы, связанные с регулированием шумоизлучения судов, усиливаются и в мировом масштабе. Профильные международные организации вводят или готовят к введению ряд нормативов, регламентирующих допустимые уровни шума судна в различных частотных диапазонах. В качестве примера можно привести требования ICES (International Council for the Exploration of the Sea) к предельной шумности для исследовательских судов, работающих в рыбной отрасли. В данном документе предлагается кривая, нормирующая шум на скорости 11 уз в 1/3-октавном спектре [1].

Исторически при проектировании движителей транспортных судов определяющим требованием была экономичность, т.е. достижение максимального коэффициента полезного действия (КПД). Движитель, оптимальный с точки зрения КПД, как правило, будет далек от идеала с точки зрения акустических качеств. По указанной причине прямое использование опыта проектирования движителей для целей ВМФ применительно к коммерческим судам затруднено из-за различия выдвигаемых требований к их характеристикам. Таким образом, возникает насущная необходимость в разработке новых методов оценки акустических свойств движителей (гребных винтов) или значительной модификации существующих методик.

В данной работе рассматривается вопрос, связанный с влиянием гидродинамической нагрузки

гребного винта на генерируемое им излучение, называемое обычно кромочным шумом. Под кромочным шумом мы будем понимать широкополосное акустическое излучение в звуковом диапазоне частот, обусловленное взаимодействием сходящихся вихрей в турбулентном пограничном слое лопасти ГВ и ее выходящей кромки.

Одним из подходов к снижению шума движителей является преднамеренное проектирование ГВ на уменьшенные значения диаметра (по сравнению с оптимальными в плане достижения максимального КПД). Это предполагает, что проектирование гребного винта (выбор его геометрических элементов) производится из условия, что расчетное значение коэффициента упора имеет большую величину, чем обычно принимаемое значение $K_{Topt} = 0,20–0,25$ [2].

Отметим, что данный подход противоречит упомянутому выше распространенному требованию к проектированию движителей коммерческих судов с точки зрения максимальной экономичности. Однако новые реалии судостроения способны вызвать необходимость пересмотра устоявшихся практик в проектировании гребных винтов. Вероятно, что в недалеком будущем оптимальным будет считаться движитель, представляющий собой компромисс в плане шумности и экономичности.

Считается, что уменьшение диаметра ГВ приводит к снижению всех известных видов некавитационного шумоизлучения движителя. При этом улучшение акустических параметров движителя достигается за счет некоторого снижения его кавитационных и пропульсивных качеств [2].

Принятые в отечественной практике степенные зависимости интенсивности кромочного шума имеют вид [3]:

$$p_L^2 \sim n^5 D^7, \quad (1)$$

где p_L^2 – акустическое давление; n – частота вращения ГВ; D – диаметр ГВ.

Из данной формулы очевидно, что уменьшение диаметра движителя приводит к существенному снижению уровней кромочного шума, даже если сопровождается некоторым увеличением частоты вращения n . В таблице приводится расчетная оценка возможного эффекта по снижению уровней кромочного шума при уменьшении диаметра движителя. Здесь приведены результаты для ГВ, геометрические элементы лопастей которых являются одинаковыми, за исключением шага и кривизны.

Таблица. Возможное снижение уровней шума гребного винта за счет уменьшения его диаметра

Table. Possible reduction in propeller noise levels due to reduction of its diameter

№ гребного винта	1	2	3	4
K_T	0,30	0,43	0,49	0,57
$\delta K_T = K_T/K_{T1}$	1,0	1,42	1,63	1,90
D/D_1	1,0	0,88	0,83	0,77
n/n_1	1,0	1,04	1,07	1,11
Снижение шума за счет изменения диаметра ΔL_D , дБ	0,0	-4,0	-5,5	-7,8
Увеличение шума за счет изменения частоты вращения ΔL_n , дБ	0,0	0,9	1,4	2,3
Суммарное изменение шума ΔL_{nD} , дБ	0,0	-3,1	-4,1	-5,5

Расчет выполнялся для одного и того же судна и при одинаковой скорости его хода. Значения диаметров движителей и частот их вращения отнесены к соответствующим значениям базового варианта, спроектированного на значение $K_T = 0,3$. Из таблицы следует, что уменьшение диаметра движителя на 23 % приводит к увеличению значения K_T с величины 0,3 до 0,57 и способно вызвать снижение уровней кромочного шума на величину 5,5 дБ.

Первоначальный анализ полученных результатов показывает, что снижение диаметра движителя, сопровождающееся увеличением коэффициента упора K_T , является эффективным средством снижения шумности судна в звуковом диапазоне частот. При этом ограничения по пределам уменьшения диаметра связаны исключительно с недопустимым ухудшением кавитационных и пропульсивных характеристик движителя и, возможно, с прочностными характеристиками используемых конструкционных материалов.

Однако есть веские основания если не опровергнуть, то существенно скорректировать данный оптимистичный вывод. Как было сказано выше, возникновение кромочного шума обусловлено взаимодействием сходящих вихрей в турбулентном пограничном слое лопасти и ее выходящей кромки. В связи с этим параметры, характеризующие турбулентный пограничный слой на лопасти, очень важны и для понимания физической природы кромочного шума.

Принятые же в настоящее время для кромочного шума зависимости (подробно изложенные в монографии [4]) базируются на теории размерности и не включают характеристик пограничного слоя ни в каком виде. При этом в зарубежных источниках подход к описанию такого явления, как trailing edge noise или turbulent layer-trailing edge noise (TBL-TE noise), основан на результате, который

Фоукс Вильямс и Холл получили для полубесконечной тонкой пластины еще в 1970 г. [5]. Несмотря на дальнейшее развитие и уточнения решения данной задачи другими исследователями, основные выводы остаются актуальными до сих пор:

$$p_L^2 \sim U^5 l \Omega, \quad (2.1)$$

где U – скорость потока; l – размах пластины (крыла); Ω – характерный масштаб турбулентности.

Последнюю величину как раз и принято оценивать через характеристики пограничного слоя $\Omega \sim \delta$ или δ^* , δ – толщина погранслоя на выходящей кромке, δ^* – толщина вытеснения. Разные исследователи в последующем использовали обе величины: и δ , и δ^* . Мы для единообразия будем использовать величину толщины пограничного слоя δ . Учитывая, что $\Omega \sim \delta$, получим

$$p_L^2 \sim U^5 l \delta. \quad (2.2)$$

За рубежом основанные на данной зависимости формулы давно и успешно применяют для оценки уровней кромочного шума крыльев или лопастей воздушных объектов – винтов вертолетов, крыльев турбин и прочих. Примеры использования подобных формул можно видеть, например, в работах [6–8]. В отечественной практике такие формулы предлагали специалисты ЦАГИ для оценки кромочного шума винта самолета [9]. Применительно к судовым движителям наши специалисты подобный подход до последнего времени не применяли и использовали только в работах [10, 11].

Применительно к лопасти движителя размах крыла

$$l = \frac{D}{2} - \frac{D_h}{2},$$

где D_h – диаметр ступицы ГВ.

Очевидно, что $l \sim D$. Вместо скорости потока U для ГВ корректным будет использование полной скорости обтекания лопасти

$$W = \sqrt{V^2 + (\pi n D)^2},$$

где V – осевая составляющая скорости в диске ГВ; $\pi n D$ – окружная составляющая скорости.

Учитывая, что $V = JnD$, можно записать

$$W = \sqrt{(JnD)^2 + (\pi n D)^2} = nD\sqrt{J^2 + \pi^2}.$$

Поскольку для подавляющего большинства судов значение относительной поступи $J < 1$, можно в первом приближении считать, что $W \sim nD$.

Введя величину относительной толщины пограничного слоя $\bar{\delta} = \delta / D$, выражение (2.2) можно переписать в виде

$$p_L^2 \sim n^5 D^7 \bar{\delta}. \quad (2.3)$$

Таким образом, различие между формулами (1) и (2.1) сводится к отсутствию в первой учета влияния на кромочный шум характеристик пограничного слоя.

Как известно, толщина пограничного зависит от угла атаки лопасти

$$\alpha: \delta = \delta_0 f(\alpha),$$

где δ_0 – толщина пограничного слоя при нулевом угле атаки.

В литературе по данному вопросу можно найти различные варианты таких зависимостей. Из зарубежных источников по теме стоит упомянуть исследование Т. Брукса [6]. Он приводит формулы толщины пограничного слоя для крыла с профилем NACA12, причем полученные зависимости различны для засасывающей и нагнетающей сторон.

Для засасывающей стороны:

$$\frac{\delta_p}{\delta_0} = 10^{[-0,14175\alpha + 0,00106\alpha^2]}. \quad (3.1)$$

Для нагнетающей стороны:

$$\frac{\delta_s}{\delta_0} = 10^{0,0311\alpha} \quad \text{при } 0^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ, \quad (3.2)$$

$$\frac{\delta_s}{\delta_0} = 0,3468 \cdot 10^{0,1231\alpha} \quad \text{при } 5^\circ \leq \alpha \leq 12,5^\circ, \quad (3.3)$$

$$\frac{\delta_s}{\delta_0} = 5,718 \cdot 10^{0,0258\alpha} \quad \text{при } 12,5^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ, \quad (3.4)$$

где α – угол атаки крыла; δ_p – толщина пограничного слоя на нагнетающей стороне крыла; δ_s – толщи-

на пограничного слоя на засасывающей стороне крыла; δ_0 – толщина пограничного слоя при нулевом угле атаки.

Отметим особо, что согласно Бруксу зависимость толщины пограничного слоя от угла атаки существенно меняется при достижении значения $\alpha = 5^\circ$.

Определить параметры пограничного слоя более точно можно с помощью метода [12], предварительно выполнив расчет распределения скорости по лопасти методом сращиваемых асимптотических разложений по теории несущей поверхности в рамках модели идеальной жидкости.

В свою очередь, при проектировании движителя на меньший диаметр большие значения K_T достигаются увеличением величины шага лопасти, т.е. упомянутого угла атаки α : $K_T = f(\alpha)$. Таким образом, из формул (2.3), (3.1)–(3.4) следует, что при уменьшении диаметра движителя одновременно с описанным выше и приведенным в таблице уменьшением уровней кромочного шума должно происходить также увеличение составляющей шума, обусловленной влиянием угла атаки на толщину пограничного слоя.

Для проверки данной гипотезы в Большой скоростной кавитационной трубе Крыловского центра были проведены акустические испытания серии моделей, спроектированных на увеличенный коэффициент упора K_T . Все четыре модели данной серии были изготовлены из одного материала (баббит), имели одинаковый диаметр и большинство геометрических параметров, за исключением шага и кривизны лопасти. Данные модели соответствуют номерам столбцов 1–4 из таблицы, нумерация увеличивается с ростом K_T .

На рис. 1 представлен пример результатов испытаний по измерению уровней кромочного шума для четырех моделей, полученных при одинаковой частоте вращения n , но каждый на своей рабочей относительной поступи J . Поскольку все модели имеют одинаковый диаметр и испытаны при одинаковой частоте вращения, согласно формуле (1) уровни кромочного шума L также должны быть одинаковыми. Однако мы видим, что имеется явно выраженная тенденция увеличения уровней кромочного шума моделей с увеличением значения коэффициента упора K_T .

На рис. 2 те же результаты представлены в виде изменения уровня шума моделей относительно базового варианта, спроектированного на значение $K_T = 0,3$ (модель № 1). Видно, что разница уровней шума ΔL стабильно возрастает по мере роста вели-

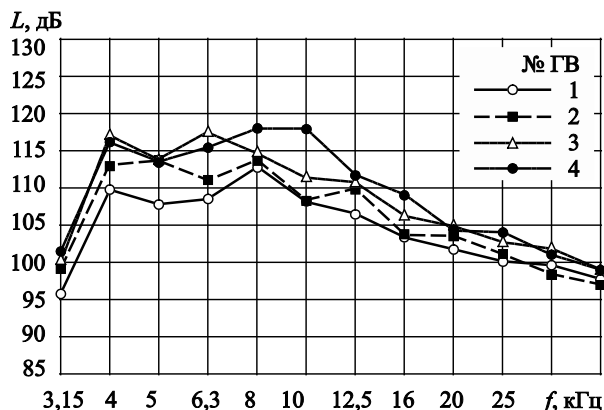


Рис. 1. 1/3-октавные уровни шума моделей гребных винтов № 1–4, измеренные в Большой скоростной кавитационной трубе. Результаты получены при одинаковой частоте вращения $n = 28$ 1/с

Fig. 1. 1/3-octave noise levels of propeller models Nos. 1-4, as measured in Krylov State Research Centre Large High-Speed Cavitation Tunnel. The results were obtained for one and the same rotation speed $n = 28$ rps

чины K_T . При этом значение ΔL для максимально отличающихся по K_T моделей № 1 и 4 лежит в диапазоне 1,5÷10 дБ, а в среднем составляет 4÷5 дБ, что существенно выше погрешности акустических измерений в кавитационной трубе, составляющей $\pm 2,5$ дБ.

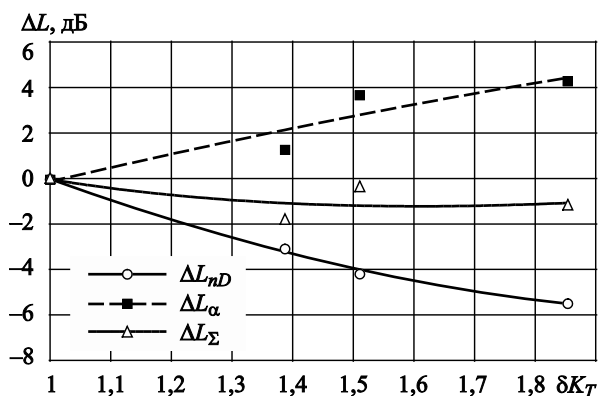


Рис. 3. Изменение шума моделей гребного винта в серии в зависимости от относительного изменения коэффициента упора δK_T : ΔL_{nD} – изменение уровня шума моделей из-за уменьшения диаметра; ΔL_α – изменение уровня шума моделей из-за увеличения нагрузки; ΔL_Σ – суммарное изменение уровней шума

Fig. 3. Changes in noise levels of series propeller with respect to relative change in thrust coefficient δK_T : ΔL_{nD} – noise change due to diameter reduction; ΔL_α – noise change due to higher load; ΔL_Σ – total change in noise levels

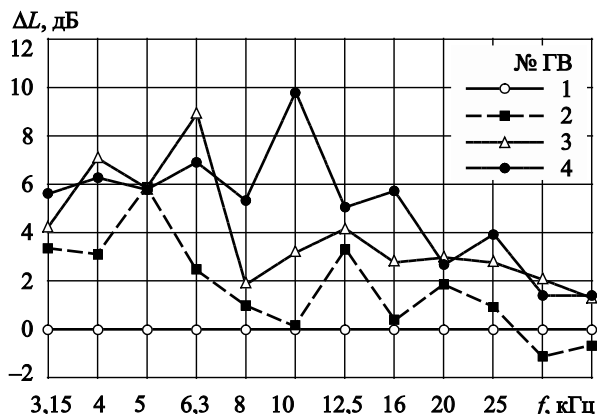


Рис. 2. Изменение уровней шума моделей гребного винта серии относительно базового варианта № 1 ($K_T = 0,3$). Результаты получены при одинаковой частоте вращения $n = 28$ 1/с

Fig. 2. Changes in noise levels of series propeller with respect to initial Variant 1 ($K_T = 0.3$). The results were obtained for one and the same rotation speed $n = 28$ rps

Результаты измерения шума всех моделей получены для нескольких значений n . Величина ΔL осреднена по частоте измерения f в диапазоне 3÷40 кГц для всех частот вращения. Полученное итоговое интегральное значение ΔL_α представлено на рис. 3 совместно с изменением шума от уменьшения диаметра ΔL_{nD} из таблицы в зависимости от относительного увеличения коэффициента упора δK_T . На этом же рисунке видно суммарное изменение уровней шума с учетом уменьшения диаметра и влияния нагрузки.

Из рис. 3 очевидно, что спрогнозированное по формуле (1) ожидаемое уменьшение уровней кромочного шума, получаемое при проектировании ГВ на заведомо меньший диаметр, оказывается существенно завышенным. Вместо ожидаемых 5,5 дБ можно рассчитывать только на эффект величинной не более 2 дБ. Кроме того, можно заметить, что начиная со значений $\delta K_T \approx 1,5$ (что соответствует $K_T = 0,45$) дальнейшего снижения уровня шума не происходит.

Физической причиной этого может быть то, что при указанных K_T углы атаки лопастей ГВ достигают некоторых предельных значений, после которых зависимость толщины пограничного слоя (а следовательно, и уровней шума) от угла атаки меняет свой характер. Подобное поведение зависимости толщины пограничного слоя от угла атаки описано формулами Брукса (3.2)–(3.3), согласно которым резкое изменение зависимости $\delta(\alpha)$ происходит при значении $\alpha = 5^\circ$.

Заметим, что формулы Брукса получены им для авиационных профилей $NACA12$, тогда как при проектировании испытуемых моделей ГВ используется другой профиль – $NACA66$. По этой причине прямое использование формул (3.1)–(3.4) для определения зависимости $\delta(\alpha)$ применительно к ГВ будет не вполне корректным, однако разумно предположить, что качественное понимание происходящих в пограничном слое процессов они описывают верно и для нашего случая.

Стоит особо оговорить тот факт, что результат, полученный в модельных испытаниях, нельзя прямо переносить на натурные условия, поскольку существенным может оказаться проявление масштабных эффектов, величина и степень влияния которых в данном случае неизвестна. Однако общая выявленная тенденция из-за указанного соображения измениться не должна – влияние на кромочный шум факторов собственно уменьшения проектного диаметра ГВ и увеличения нагрузки является разнонаправленным, что приводит к уменьшению ожидаемого снижения шума.

Отметим, что полученный результат противоречит более ранним, согласно которым никакой зависимости уровней кромочного шума от нагрузки не было выявлено. Причины того, что выводы о влиянии нагрузки ГВ на уровни кромочного шума не были сделаны ранее, изложены ниже.

1. Относительная незначительность измеряемого эффекта.

Характерная для акустических испытаний в кавитационных трубах погрешность измерения составляет величину порядка $\pm 2,0 \div 2,5$ дБ. При этом среднее различие в уровнях шума для моделей № 1 и 2, например, составило около 1,5 дБ. Очевидно, что, напрямую сравнивая результаты испытаний этих двух моделей, сделать вывод о влиянии нагрузки на уровни шума затруднительно.

2. Недостаточная систематичность исследований.

Исходя из указанной величины погрешности измерений сделать уверенный вывод о влиянии нагрузки на шум движителя можно только при существенной разнице по K_T для сравниваемых моделей, а лучше иметь результаты испытаний серии ГВ с достаточно большим числом моделей. Между тем, помимо описанной в данной работе серии ГВ по шагу, систематических акустических испытаний моделей в зависимости от нагрузки в достаточном объеме не проводилось.

3. Совершенствование испытательного оборудования.

Получение описанных выше результатов испытаний стало возможным, в т.ч., из-за совершенствования объектов экспериментальной базы. Несмотря на то, что собственно экспериментальные установки (кавитационные трубы) Крыловского центра за последние два-три десятилетия не были существенно модернизированы, их аппаратное обеспечение значительно улучшилось. Так, используемые в работе результаты испытаний получены в Большой скоростной кавитационной трубе на установке гидропривода, обладающей пониженным уровнем собственных шумов. Внедрение данной установки произошло относительно недавно, в 2014–2018 гг. Кроме того, используемое сейчас измерительное и вычислительное оборудование позволяет производить получение и обработку результатов существенно более оперативно и качественно, чем ранее.

4. Отсутствие теоретических предпосылок.

Как было указано выше, теоретическое понимание физической природы кромочного шума ввиду его крайней сложности не было достаточно детально проработано. К настоящему времени достигнут заметный прогресс в понимании важности учета характеристик пограничного слоя на выходящей кромке лопасти при рассмотрении проблемы кромочного шума. Это позволяет делать более точные оценки влияния характеристик ГВ на параметры кромочного шума, например – оценить влияние числа лопастей на кромочный шум [11], усовершенствовать методику учета масштабного эффекта применительно к кромочному шуму, а также учесть влияние на шум угла атаки, как сделано в данной работе.

По результатам анализа описанных выше испытаний можно сделать следующие предварительные выводы:

- подтверждено влияние гидродинамической нагрузки ГВ в виде коэффициента упора K_T на уровни кромочного шума;
- снижение уровней шума за счет проектирования ГВ на меньший диаметр приводит к снижению уровней кромочного шума, но на величины, существенно меньшие ожидаемых ранее;
- при увеличении значения K_T до величины приблизительно $0,40 \div 0,45$ дальнейшего уменьшения уровней кромочного шума не происходит. Учитывая, что увеличение K_T сопровождается также ухудшением пропульсивных и кавитационных характеристик ГВ, проектирование малозумного ГВ представляется целесообразным на значения $K_T \leq 0,40$.

Список использованной литературы

1. *Пустошный А.В.* Кавитация гребных винтов транспортных судов. Исследования XXI века: монография. Санкт-Петербург : Крыловский государственный научный центр, 2022. 260 с.
2. *Мухин А.Б.* Акустическая оптимизация геометрических элементов гребных винтов подводных лодок // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2009. Вып. 47(331). С. 81–90.
3. *Левковский Ю.Л.* Физическая природа и методы моделирования шума гребных винтов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2009. Вып. 47(331). С. 63–72.
4. *Левковский Ю.Л.* Шум гребных винтов: монография. Санкт-Петербург : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2005. 184 с.
5. *Ffowcs Williams J.E., Hall L.H.* Aerodynamic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering half plane // Journal of Fluid Mechanics. 1970. Mar. 9. Vol. 40, pt. 4, P. 657–670. DOI: 10.1017/S0022112070000368.
6. *Brooks T.F., Pope D.S., Marcolini M.A.* Airfoil Self-Noise and Prediction. Hampton, 1989. 137 p. (NASA Reference Publication; No. 1218).
7. *Grosveld F.W.* Prediction of broadband noise from horizontal axis wind turbines // AIAA Journal of propulsion and power. 1985. Vol. 1, No. 4. P. 292–299.
8. *Schlinker R.H., Amiet R.K.* Helicopter rotor trailing edge noise / National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Branch, 1981. IV, 145 p. (NASA Contractor Report; No. 3470).
9. *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.
10. *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).
11. *Бушковский В.А., Егоров Ю.А.* Влияние числа лопастей на высокочастотный шум судового движителя // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Вып. 4(402). С. 41–48. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-41-48.
12. *Маринич Н.А., Калюжный В.Г.* Расчет отрывного обтекания элементов движителя // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 73(357). С. 41–50.
- burg : Krylov State Research Centre, 2022. 260 p. (in Russian).
2. *Mukhin A.B.* Acoustic optimization of geometric elements for submarine propellers // Transactions of Krylov Central Research Institute. 2009. Vol. 47(331). P. 81–90 (in Russian).
3. *Levkovsky Yu.* Propeller noise: physics and simulation methods // Transactions of Krylov Central Research Institute. 2009. Vol. 47(331). P. 63–72 (in Russian).
4. *Yu. Levkovsky.* Propeller noise. Monograph. St. Petersburg : Krylov Central Research Institute, 2005. 184 p. (in Russian).
5. *Ffowcs Williams J.E., Hall L.H.* Aerodynamic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering half plane // Journal of Fluid Mechanics. 1970. Mar. 9. Vol. 40, pt. 4, P. 657–670. DOI: 10.1017/S0022112070000368.
6. *Brooks T.F., Pope D.S., Marcolini M.A.* Airfoil Self-Noise and Prediction. Hampton, 1989. 137 p. (NASA Reference Publication; No. 1218).
7. *Grosveld F.W.* Prediction of broadband noise from horizontal axis wind turbines // AIAA Journal of propulsion and power. 1985. Vol. 1, No. 4. P. 292–299.
8. *Schlinker R.H., Amiet R.K.* Helicopter rotor trailing edge noise / National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Branch, 1981. IV, 145 p. (NASA Contractor Report; No. 3470).
9. *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. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-25-34 (in Russian).
10. *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).
11. *Bushkovsky V., Yegorov Yu.* Blade number effect upon high-frequency marine propulsor noise: model test data // Transactions of Krylov State Research Centre. 2022. Vol. 4(402). P. 41–48. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-41-48 (in Russian).
12. *Marinich N.A., Kalyuzhny V.G.* Calculation of flow separations for the propulsor elements // Transactions of Krylov State Research Centre. 2013. Vol. 73(357). P. 41–50 (in Russian).

References

1. *Pustoshny A.V.* Propeller cavitation of cargo carriers. Research of the XXI century. Monograph. St. Peters-

Сведения об авторах

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: yurjo@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3790-2086>.

Иванов Павел Сергеевич, инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: ivanov_pavel1998@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0000-3374-2164>.

Маринич Николай Владимирович, к.т.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: n_marinich@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9290-3041>.

About the authors

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: yurjo@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3790-2086>.

Pavel S. Ivanov, Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: ivanov_pavel1998@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0000-3374-2164>.

Nikolay V. Marinich, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: n_marinich@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9290-3041>.

Поступила / Received: 01.02.23

Принята в печать / Accepted: 02.06.23

© Егоров Ю.А., Иванов П.С., Маринич Н./В., 2023