DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-49-56
УДК 629.5.015.6:629.03

В.П. Ильин, Ю.С. Яковлева
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

МЕТОД ПЕРЕСЧЕТА НА НАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ УРОВНЕЙ КАВИТАЦИОННОГО ШУМА МОДЕЛЕЙ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ В ОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются испытания по определению уровней кавитационного шума модели гребных винтов в однородном потоке в кавитационной трубе и пересчет результатов модельных измерений на натурные условия.
Материалы и методы. Исследования базируются на результатах испытаний моделей гребных винтов в однородном потоке в кавитационной трубе и способе пересчета этих результатов на условия неоднородного потока за корпусом с учетом законов моделирования кавитационного шума.
Основные результаты. Разработаны метод прогнозирования спектральных уровней кавитационного шума гребного винта, основанный на результатах измерений уровней шума его модели в однородном потоке в кавитационной трубе, а также способ пересчета полученных результатов на условия неоднородного натекающего потока за корпусом.
Заключение. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования уровней кавитационного шума гребных винтов кораблей и судов на рабочей стадии проектирования.
Ключевые слова: гребной винт, уровни кавитационного шума, акустические измерения, кавитационная труба.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-49-56
UDC 629.5.015.6:629.03

V. Ilyin, Yu. Yakovleva
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

CAVITATION NOISE OF PROPELLER MODELS IN UNIFORM FLOW: FULL-SCALE EXTRAPOLATION METHOD

Object and purpose of research. This paper discusses laboratory measurements of cavitation-induced noise of propeller models in uniform flow, as well as extrapolation of the model test data to the full scale.
Materials and methods. The study is based on the model test data obtained in the cavitation tunnel for the models in uniform flow, as well as on extrapolation of these data to the non-uniform flow behind the hull, taking into account the laws of cavitation-induced noise simulation.
Main results. This study made it possible to develop a prediction method for spectral levels of cavitation-induced noise radiated by the propeller, based on the model test data obtained in the cavitation tunnel, as well as to develop the method of model test data extrapolation to the non-uniform flow behind the hull.
Conclusion. These results could be used to predict cavitation-induced noise of marine propellers at detailed design stage.
Keywords: propeller, cavitation-induced noise, acoustic measurements, cavitation tunnel.
Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Для цитирования: Ильин В.П., Яковлева Ю.С. Метод пересчета на натурные условия уровней кавитационного шума моделей гребных винтов при измерении в однородном потоке. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 3(389): 49–56.

For citations: Ilyin V., Yakovleva Yu. Cavitation noise of propeller models in uniform flow: full-scale extrapolation method. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; 3(389): 49–56 (in Russian).

Введение

Introduction

В настоящее время одним из основных источников внешнего акустического поля корабля является гребной винт (ГВ). Своеобразие шумоизлучения ГВ как источника шума гидродинамической природы заключается в том, что интенсивность роста уровня шумности ГВ со скоростью движения значительно выше, чем у других источников механического происхождения. По этой причине всегда существуют такие скорости хода, когда гидродинамические источники определяют общую шумность корабля. Гребной винт генерирует шум в широком диапазоне частот – от инфразвука до ультразвука.

Принято классифицировать индуцируемый винтом шум исходя из различий в физических процессах, приводящих к его возникновению, и частотного диапазона проявления шума. Наиболее интенсивным источником гидродинамического шума ГВ является кавитация. Кавитационный шум представляет собой широкополосное акустическое излучение в диапазоне звуковых и ультразвуковых частот. Этот вид шума обладает наибольшей из всех винтовых шумов интенсивностью роста уровней со скоростью хода [1–4]. Уровни кавитационного шума ГВ являются важной характеристикой корабля, что приводит к необходимости их прогнозирования на стадии проектирования.

Предлагаемые методы прогнозирования уровней кавитационного шума натурного ГВ по данным испытаний его геометрически подобной модели в кавитационной трубе базируются на использовании общепринятых в мировой практике экстраполяторов, учитывающих масштабные эффекты возникновения кавитации, а также на использовании полученных с помощью теории подобия и размерностей соотношений для масштабирования кавитационного шума [5–10].

Теоретическое обоснование экспериментальных методов прогнозирования уровней кавитационного шума

Theoretical justification for experimental methods of cavitation noise prediction

Вследствие сложности явления кавитации, трудно поддающегося аналитическому описанию, сегодня не существует доведенной до практического использования теории кавитации и кавитационного шума. Трудность решения задачи обуславливается, в частности, тем обстоятельством, что для определения спектральных уровней шума необходимо знание мгновенных, а не осредненных по времени параметров кавитационного течения.

В связи с этим определяющую роль в исследовании возникновения кавитации и ее шумоизлучения играет эксперимент и, соответственно, основанные на использовании опытных данных методы прогнозирования уровней кавитационного шума ГВ.

Существуют два метода прогнозирования уровней кавитационного шума ГВ. Первый базируется на результатах лабораторных испытаний моделей ГВ в кавитационной трубе в неоднородном потоке (за макетом корпуса), второй – в однородном потоке.

В первом случае при разработке способов пересчета спектральных уровней шума модели ГВ на натурные условия следует учитывать наличие существенного масштабного эффекта разрежения в месте возникновения кавитации, вызванного отсутствием моделирования по числу Рейнольдса. Практический прием, применяемый для преодоления этой трудности, состоит в представлении результатов измерений спектральных уровней шума модели ГВ в функции отношения критического числа кавитации σ_i к ее текущему значению σ_i/σ, где $\sigma = 2(p_\infty - p_v)/\rho V_\infty^2$ – число кавитации, образованное по скорости натекающего на винт потока; p_∞ – статическое давление в рабочем участке; ρ – массовая плотность воды; p_v – давление насыщенных паров воды.

Предполагается, что при одинаковом значении этого параметра на модели и в натурных условиях картина кавитационного обтекания лопастей одинакова. И, несмотря на разные значения критического числа кавитации σ_i, спектральные уровни шума из-за влияния различий чисел Рейнольдса подобны [1].

Таким образом, при разработке метода прогнозирования спектральных уровней кавитационного шума необходимо, прежде всего, определить величину масштабного эффекта возникновения кавитации. При испытаниях модели винта в неоднородном потоке за корпусом эта трудность является основной.

Однако из-за малых размеров рабочих участков кавитационных труб выполнение такого эксперимента не всегда оказывается возможным. Кроме того, даже если эта возможность в принципе существует, кавитационные и акустические испытания

модели ГВ за корпусом трудоемки и дорогостоящи. По этой причине возникает естественное желание воспользоваться для прогнозирования уровней шума результатами испытаний модели в однородном потоке в кавитационной трубе аналогично тому, как это делается при прогнозировании сил, моментов и наступления второй стадии кавитации в натурных условиях.

Очевидно, что для реализации такого метода прогнозирования необходимо располагать способом пересчета результатов кавитационных испытаний модели ГВ в однородном потоке на условия неоднородного потока. Таким образом, к проблеме учета масштабного эффекта по числу Рейнольдса добавляется еще одна – столь же непростая – проблема экстраполяции результатов кавитационных испытаний модели ГВ, полученных в однородном потоке, на условия неоднородного натекающего потока.

Принципиальность различия этих условий состоит в том, что в неоднородном потоке происходит постоянное изменение картины обтекания лопастей, сопровождающееся изменением разрежений на элементах их сечений и в ядрах свободных вихрей, в то время как в свободном потоке эти характеристики стационарны.

У правильно спроектированного ГВ наибольшая опасность возникновения кавитации и ее первые вспышки при работе винта в неоднородном потоке будут соответствовать тем угловым положениям лопастей θ_p, при которых они попадают в зону наибольшей подторможенности потока и в зону его наибольшего ускорения в сравнении со средним значением скорости для данного радиуса винта. Как правило, наиболее опасными сечениями лопасти, где кавитация возникает в первую очередь, являются ее концевые элементы: $0{,}9 < \bar{r} < 1{,}0$. Поэтому главную роль играют зоны подторможенности и ускорения натекающего потока на указанных значениях относительного радиуса винта.

После возникновения первых вспышек кавитации, по мере увеличения скорости, т.е. уменьшения значения числа кавитации σ, диапазон углов поворота лопасти $\delta\theta_p$, в котором существует кавитация, увеличивается. Возникновению кавитации уже соответствует не то единственное положение лопасти θ_p, при котором скорость натекающего потока в зоне подторможенности минимальна (в зоне ускорения, соответственно, максимальна), а ее предшествующее положение, при угле $\theta_p - \Delta\theta_{p1}$, где скорость больше (в зоне ускорения, соответственно, меньше). Исчезновение же кавитации произойдет, наоборот, позже – в угловом положении лопасти $\theta_p + \Delta\theta_{p2}$. Диапазон угловых положений лопасти $\delta\theta_p = \Delta\theta_{p1} + \Delta\theta_{p2}$ зависит от σ_i/σ – отношения критического числа кавитации к текущему. По мере его роста, обусловленного уменьшением числа кавитации с увеличением скорости натекающего на винт потока, диапазон угловых положений $\delta\theta_p$ растет, и, в конечном итоге, лопасть начинает кавитировать непрерывно – во всех угловых положениях.

Попробуем пренебречь нестационарностью обтекания и разнонагруженностью лопастей, обусловленной взаимным влиянием их вихревых систем, а также нестационарным характером самого кавитационного процесса. Тогда в первом грубом приближении можно положить, что форма и степень развития кавитации на лопасти ГВ, работающего в неоднородном потоке, аналогичны ее форме и степени развития у винта в однородном потоке при условии, что мгновенное значение относительной поступи $J' = V(\theta_p)/nD$, которое вычислено по текущему значению осевой скорости $V(\theta_p)$ в диске винта на радиусе $\bar{r} = 0{,}9$, работающего в неоднородном потоке, равно относительной поступи J в однородном потоке.

Тогда, используя это предположение, необходимо произвести кавитационные испытания модели ГВ в однородном потоке в кавитационной трубе, определив для ряда значений поступи критическое значение числа кавитации $\sigma_{ni}(J)$. В результате таких испытаний строится так называемая кавитационная диаграмма. Для удобства использования ее принято строить в виде $\sqrt{\sigma_{n_i}}(J)$, где $\sigma_{n_i} = \dfrac{2(p_\infty - p_v)}{\rho(\pi n D)^2}$ – критическое число кавитации, образованное по окружной скорости конца лопастей; n – частота вращения модели винта.

Использование изложенных соображений оказывается достаточным для пересчета результатов испытаний модели винта в однородном потоке на условия неоднородного потока для определения момента возникновения кавитации, соответствующего критической скорости. Этот момент будет определяться наибольшим значением параметра $\sqrt{\sigma_{n_i}}$ из двух возможных при $J_{\min}$ либо $J_{\max}$ в зависимости от того, насколько удачно приспособлен ГВ к работе в неоднородном потоке. Однако для пересчета спектральных уровней кавитационного шума представленных соображений недостаточно.

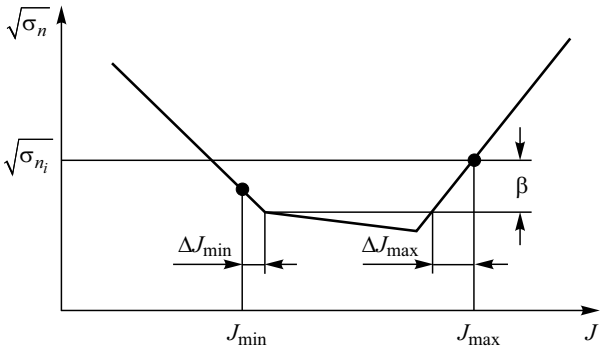

Рис. 1. Схематический вид кавитационной диаграммы модели гребного винта

Fig. 1. An example of propeller cavitation bucket

Как указывалось выше, по мере углубления развития кавитации с ростом скорости хода (т.е. по мере снижения числа кавитации, при котором работает ГВ) диапазон углов поворота лопасти $\delta\theta_p^{\pm}$, в котором существует кавитация, растет.

Последовательно используя принцип квазистационарности, положенный в основу пересчета момента возникновения кавитации, в этом случае также приходим к выводу о необходимости определения значения углов поворота лопасти $\theta_p^{\pm}$, при которых происходит возникновение и исчезновение кавитации. Очевидно, эти углы будут соответствовать значениям относительной поступи $(J_{\min} + \Delta J_{\min})$ и $(J_{\max} - \Delta J_{\max})$, при которых число кавитации $\sqrt{\sigma_{n_i}}$ соответствует своему критическому значению (рис. 1).

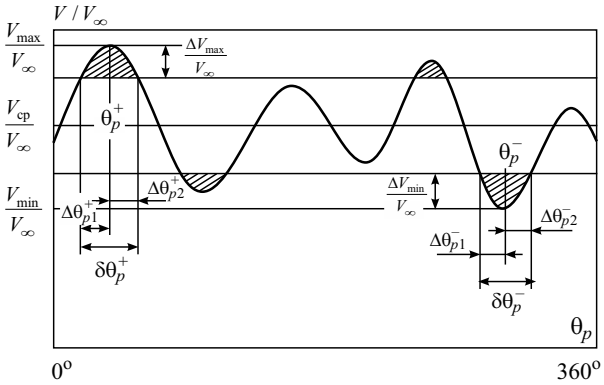

Рис. 2. Схематический вид поля скоростей за корпусом на относительном радиусе гребного винта $\bar{r}$ = 0,9

Fig. 2. An example of wake field behind the hull at relative propeller radius $\bar{r}$ = 0.9

Соответствующие этим значениям относительных поступей местные значения скорости $V(\theta_p)$ в районе их экстремальных значений могут быть выражены следующими очевидными соотношениями:

$$\frac{\Delta V_{\max}}{V_{\max}} = -(\beta - 1), \quad \frac{\Delta V_{\min}}{V_{\min}} = (\beta - 1), \tag{1}$$

где $\beta = \sqrt{\sigma_{n_i}} / \sqrt{\sigma_n}$, σ_n и σ_{n_i} – текущее и критическое значения чисел кавитации, образованных по окружной скорости концов лопастей.

Используя далее зависимость $V(\theta_p)$, схематически изображенную на рис. 2, определим с помощью последних соотношений диапазоны углов поворота лопасти в районах максимальной подторможенности и ускоренности натекающего потока $\delta\theta_p^-$ и $\delta\theta_p^+$, в которых существует кавитация.

Положим, что интенсивность уровней шума ГВ в неоднородном потоке пропорциональна относительной площади его диска, в которой существует кавитация, $\frac{\sum\left(\delta\theta_p^- + \delta\theta_p^+\right)}{2\pi}$. Тогда приходим к заключению, что для прогнозирования спектральных уровней кавитационного шума ГВ в неоднородном потоке $L_{\text{н.п.}}$ по результатам измерений уровней шума в однородном потоке $L_{\text{о.п.}}$ при экстремальных значениях мгновенной относительной поступи $J' = J_{\frac{\min}{\max}}$ в последние необходимо ввести поправку Δ, дБ, учитывающую ограниченность области существования кавитации в неоднородном потоке:

$$L_{\text{н.п.}} = L_{\text{о.п.}} + \Delta, \text{ дБ}, \ \Delta = 10\lg\frac{\sum(\delta\theta_p^- + \delta\theta_p^+)}{360°}, \text{ дБ}. \tag{2}$$

При определении поправки Δ необходимо учитывать два обстоятельства. Во-первых, минимальная степень развития кавитации должна соответствовать режиму обтекания, при котором обеспечивается получение устойчивого акустического сигнала, выделяемого на фоне кромочного шума ГВ. Во-вторых, максимальная достижимая степень развития кавитации в процессе акустических измерений определяется техническими возможностями конкретной кавитационной трубы. По этой причине максимальное значение $\beta = \sqrt{\sigma_{n_i}} / \sqrt{\sigma_n}$ является для каждой трубы индивидуальной характеристикой, зависящей от конструкции ГВ, а также от параметров p и n, при

которых можно обеспечить низкое значение σ_n при условии отсутствия газовой кавитации воды в рабочем участке.

Очевидно, что приведенных сведений недостаточно для использования указанных выше методов прогнозирования и правильной постановки экспериментов по исследованию момента возникновения кавитации моделей ГВ и ее шумообразования. Дополнительно требуется использование приемов учета масштабного эффекта возникновения кавитации и законов моделирования кавитационного шума.

Основные соотношения для пересчета уровней кавитационного шума с модели на натуру

Main expression for extrapolation of model cavitation noise data to the full scale

Основные соотношения для пересчета уровней шума с модели на натурные условия простейшим путем определяются при использовании теории подобия и размерности. В качестве трех основных физических величин с независимыми размерностями, определяющих картины кавитации и ее шумоизлучения, можно принять характерное давление $p = p_\infty - p_v$, массовую плотность жидкости ρ и характерный линейный размер кавитирующего тела l. Тогда, полагая, что радиус одиночного кавитационного пузырька пропорционален характерному размеру l, и используя закон распространения звуковой волны $p_S \cdot r = \text{const}$, получим

$$\bar{f} = f \cdot l\sqrt{\frac{\rho}{p}}, \quad \bar{G} = \frac{G \cdot r^2}{l^3\sqrt{p^3 \cdot \rho}}, \tag{3}$$

где G – сплошной спектр мощности (спектральная плотность); f – частота; r – расстояние между точкой наблюдения и источником звука.

Если представить звуковое давление p_S в полосе частот Δf, содержащей центральную частоту f, то получим

$$G \cdot \Delta f = p_S^2. \tag{4}$$

Для полосы частот Δf, пропорциональной центральной частоте f, из соотношений (3) и (4) будем иметь

$$\bar{L} = \frac{L \cdot r^2}{f^2 \cdot p^2}. \tag{5}$$

Принимая во внимание, что характерное давление и скорость невозмущенного потока V связаны числом кавитации σ, можно переписать соотношения (3) и (4) в форме

$$\bar{G} = \frac{G \cdot r^2}{l^3 \cdot \rho^2 \cdot V^3 \cdot \sigma^2}, \quad \bar{L} = \frac{L \cdot r^2}{l^3 \cdot \rho^2 \cdot V^4 \cdot \sigma^2}, \quad \bar{f} = \frac{f \cdot l}{V \cdot \sigma^{3/2}}. \tag{6}$$

Обычно спектральные уровни шума представляются в дБ относительно порогового давления p_{S0}. Тогда, используя соотношение (4), получим

$$\Delta G = 20\lg\left(\frac{G}{G_0}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad \Delta L = 20\lg\left(\frac{L}{L_0}\right)^{\frac{1}{2}}. \tag{7}$$

При моделировании кавитационного шума требуется выполнение следующих соотношений между натурой и моделью:

- подобие потоков;
- $l_н / l_м = \lambda$ – геометрическое подобие;
- $\sigma_н = \sigma_м$ – равенство чисел кавитации.

Возможность полностью удовлетворить этим условиям отсутствует, поэтому в соотношениях для масштабирования дополнительно к геометрическому масштабу λ необходимо предусмотреть различия в давлении p, числе кавитации σ и скорости V. Это заключение следует, как уже говорилось, из наличия влияния числа Рейнольдса. По этой причине представляется разумным предположить, что основные характеристики развития кавитации и кавитационного шума подобны при равных значениях в модели и в натуре отношению σ_i / σ, где σ_i – число возникновения кавитации.

Следовательно, вместо условия $\sigma_н = \sigma_м$, как было показано ранее, можно положить $(\sigma_i / \sigma)_н = (\sigma_i / \sigma)_м$. При этих предположениях необходимо использовать следующие масштабные факторы для частоты, уровней спектральной плотности и 1/3-октавных спектральных уровней:

$$\frac{f_н}{f_м} = \lambda^{-1} \cdot \left(\frac{V_н}{V_м}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_н}{\sigma_м}\right)^{\frac{1}{2}}; \tag{8}$$

$$\frac{G_н}{G_м} = \lambda^3 \cdot \left(\frac{V_н}{V_м}\right)^3 \cdot \left(\frac{\sigma_н}{\sigma_м}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{r_м}{r_н}\right)^2; \tag{9}$$

$$\frac{L_н}{L_м} = \lambda^2 \cdot \left(\frac{V_н}{V_м}\right)^4 \cdot \left(\frac{\sigma_н}{\sigma_м}\right)^2 \cdot \left(\frac{r_м}{r_н}\right)^2; \quad (10)$$

$$\Delta G_н - \Delta G_м = 20\lg\left[\lambda^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{V_н}{V_м}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{\sigma_н}{\sigma_м}\right)^{\frac{3}{4}} \cdot \left(\frac{r_м}{r_н}\right)\right]; \quad (11)$$

$$\Delta L_н - \Delta L_м = 20\lg\left[\lambda \cdot \left(\frac{V_н}{V_м}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma_н}{\sigma_м}\right) \cdot \left(\frac{r_м}{r_н}\right)\right]. \quad (12)$$

Метод прогнозирования спектральных уровней кавитационного шума гребных винтов

Prediction method for spectral levels of propeller cavitation noise

Разработанный метод прогнозирования базируется на пересчете результатов измерений уровней шума модели ГВ в однородном потоке в кавитационной трубе. Исходными данными для определения спектральных уровней кавитационного шума ГВ, помимо диаметра винта, являются определяемые в ходе модельного эксперимента в кавитационной трубе кавитационные и акустические характеристики модели винта, а также характеристики, определяющие режим его работы (поле скоростей за корпусом, зависимость скорости хода от частоты вращения ГВ, заглубление его оси).

Порядок расчета спектральных уровней кавитационного шума гребных винтов

Calculation procedure for spectral levels of propeller cavitation noise

1. Определяется зависимость спектральных уровней (в 1/3-октавной полосе частот) кавитационного шума модели ГВ от скорости потока при фиксированных значениях статического давления в рабочем участке кавитационной трубы $L_м^-$ и $L_м^+$ для экстремальных значений относительной поступи J_{min} и J_{max} соответственно.

2. Находятся спектральные уровни $L'^{\pm}_м$ кавитационного шума, пересчитанные к условиям свободного поля путем введения поправки $\Delta_1(f)$, дБ: $L'^{\pm}_м = L_м^{\pm} + \Delta_1$. Величина поправки Δ_1 зависит от условий формирования акустического поля в рабочем участке ограниченных размеров и поэтому является частотно зависимой. Для каждой кавитационной трубы она индивидуальна и, следовательно, должна быть заранее определена известными методами.

3. Определяется степень развития кавитации лопастей модели ГВ путем использования кавитационной диаграммы с помощью формулы

$$\beta = \sqrt{\sigma_{n_i}} / \sqrt{\sigma_n}. \quad (13)$$

4. Зависимость спектральных уровней кавитационного шума модели ГВ $L'^{\pm}_м$, измеренных при экстремальных значениях J_{min} и J_{max}, представляется в функции степени развития кавитации. С целью перехода к условиям работы ГВ в неоднородном потоке энергетически суммируются уровни шума $L'^{\pm}_м$ с учетом различия в диапазоне углов поворота лопасти в зонах подторможенного и ускоренного потоков $\delta\theta_p^{\pm}$. Переход осуществляется с использованием формул

$$L''_{м-} = L'_{м-} + \Delta_-, \text{ дБ и } L''_{м+} = L'_{м+} + \Delta_+, \text{ дБ}, \quad (14)$$

где

$$\Delta_- = 10\lg\frac{\sum\delta\theta_{p-}}{2\pi}, \text{ дБ и}$$
$$\Delta_+ = 10\lg\frac{\sum\delta\theta_{p+}}{2\pi}, \text{ дБ}. \quad (15)$$

После этого результирующие уровни шума модели ГВ в неоднородном потоке $L_м^*$ находятся как результат энергетического суммирования уровней шума $L''_{м-}$ и $L''_{м+}$ по известным правилам.

5. Определяются значения 1/3-октавных спектральных уровней кавитационного шума натурного ГВ для фиксированных значений степеней развития кавитации β по формулам

$$f_н = f_м \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \left(\frac{p_н}{p_м}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\rho_м}{\rho_н}\right)^{\frac{1}{2}}, \text{ Гц},$$
$$10\lg\frac{L_н}{L_0} = 10\lg\frac{L_м^*}{L_0} + 20\lg\lambda + 20\lg\frac{p_н}{p_м} + 20\lg\frac{r_м}{r_н}, \text{ дБ}. \quad (16)$$

Результаты натурных измерений свидетельствуют о том, что точность прогнозирования уровней кавитационного шума ГВ по предлагаемому методу составляет ±(3–4) дБ.

Заключение

Conclusion

Описан метод прогнозирования спектральных уровней кавитационного шума натурного ГВ по данным испытаний его геометрически подобной модели в однородном потоке кавитационной трубы. Метод основан на использовании общепринятых в мировой практике экстраполяторов, учитывающих масштабные эффекты возникновения кавитации, а также на применении полученных с помощью теории подобия и размерностей соотношений для масштабирования кавитационного шума.

Кроме того, разработан способ пересчета результатов кавитационных испытаний модели ГВ в однородном потоке в кавитационной трубе на условия неоднородного потока за корпусом, позволяющий с помощью выведенных соотношений определить диапазоны углов поворота лопасти в районах максимальной подторможенности и ускоренности натекающего на винт потока, в которых существует кавитация.

Путем сопоставления результатов натурных и лабораторных испытаний в однородном потоке кавитационной трубы установлено, что точность прогнозирования уровней шума по предложенному методу составляет ±(3–4) дБ.

Библиографический список

1. *Левковский Ю.Л.* Шум гребных винтов. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2005.
2. Cavitation Noise, Report of the Cavitation Committee // Proceedings of 18th ITTC. 1987, Kobe, Japan. Vol. 1. P. 183–189.
3. *Перник А.Д.* Проблемы кавитации. Л.: Судостроение, 1966. С. 179–183.
4. *Левковский Ю.Л.* Структура кавитационных течений. Л.: Судостроение, 1978. С. 188–195.
5. *Мак-Кормик Б.В.* Кавитация, обусловленная свободным вихрем, сходящим с несущей поверхности // Теоретические основы инженерных расчетов. 1962. Т. 84. № 3. С. 74–85.
6. *Noordzij Z.* A Note on the scaling of tip vortex cavitation inception // International Shipbuilding Progress. 1977. V. 24. № 277. P. 233–236.
7. *Левковский Ю.Л.* Моделирование кавитационного шума // Акустический журнал. 1967. Т. 13. № 3. С. 397–400.
8. *Bjorheden O.*, *Astrom L.* Prediction of propeller noise spectra // Proceedings Symposium on Hydrodynamics Ship and Offshore Propulsion Systems. Det. Norske Veritas. Oslo, Norway, 1977. P. 237–242.
9. *Latorre R.* On clarifying the scale factor role in cavitation noise scaling // Proceedings International Symposium on Cavitation. Sendai, Japan, 1986. P. 319–324.
10. *Fujiyama K.*, *Nakashima Y.* Numerical prediction of acoustic noise induced by cavitation on ship propeller at behind – hull condition // Proceeding of The Fifth International Symposium on Marine Propellers. 2017, Espoo, Finland. V. 3. P. 739–744.

References

1. *Yu. Levkovsky*. Noise of propellers. St. Petersrurg: KSRI, 2005 (*in Russian*).
2. Cavitation Noise, Report of the Cavitation Committee // Proceedings of 18th ITTC. 1987, Kobe, Japan. Vol. 1. P. 183–189.
3. *A. Pernik*. Cavitation issues. Leningrad: Sudostroenie, 1966. P. 179–183 (*in Russian*).
4. *Yu. Levkovsky*. Structure of cavitating flows. Leningrad: Sudostroenie, 1978. P. 188–195 (*in Russian*).
5. *B.W. McCormick*. On Cavitation Produced by a Vortex Trailing from a Lifting Surface // Theoretical fundamentals of engineering calculations. 1962. Vol. 84. No. 3. P. 74–85 (*Russian translation*).
6. *Noordzij Z.* A Note on the scaling of tip vortex cavitation inception // International Shipbuilding Progress. 1977. V. 24. № 277. P. 233–236.
7. *Yu. Levkovsky*. Simulation of cavitation noise // Acoustical Physics. 1967. Vol. 13. No. 3. P. 397–400 (*in Russian*).
8. *Bjorheden O.*, *Astrom L.* Prediction of propeller noise spectra // Proceedings Symposium on Hydrodynamics Ship and Offshore Propulsion Systems. Det. Norske Veritas. Oslo, Norway, 1977. P. 237–242.
9. *Latorre R.* On clarifying the scale factor role in cavitation noise scaling // Proceedings International Symposium on Cavitation. Sendai, Japan, 1986. P. 319–324.
10. *Fujiyama K.*, *Nakashima Y.* Numerical prediction of acoustic noise induced by cavitation on ship propeller at behind – hull condition // Proceeding of The Fifth International Symposium on Marine Propellers. 2017, Espoo, Finland. V. 3. P. 739–744.

Сведения об авторах

Ильин Вадим Петрович, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Мос-

ковское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 386-67-49. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Яковлева Юлия Сергеевна, к.т.н., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 386-67-49. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Vadim P. Ilyin, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 386-67-49. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Yulia S. Yakovleva, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 386-67-49. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 21.05.19
Принята в печать / Accepted: 17.07.19
© Ильин В.П., Яковлева Ю.С., 2019