DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-95-101
УДК 629.5.035.5+629.5.015.6

А.А. Коваль, А.А. Маслова, Н.В. Маринич
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ С ПРЕДЗАКРУЧИВАЮЩИМ АППАРАТОМ

**Объект и цель научной работы.** Целью данного исследования является проверка возможности использования предзакручивающего аппарата (ПА) перед открытым гребным винтом (ОГВ) умеренной саблевидности для снижения уровней гидродинамического некавитационного шума. Объектом для сравнения характеристик выбран серийный (малошумный) саблевидный ОГВ.

**Материалы и методы.** Выполнены проектировочные и поверочные расчеты в заданном поле скоростей предзакручивающего аппарата. ПА проектировался с учетом обеспечения поворота поля скоростей на углы саблевидности винта-прототипа. Расчетными методами определялось поле скоростей за ПА и выполнялся проектировочный расчет ОГВ с учетом неоднородности натекающего потока. Для оценки пропульсивных, кавитационных и акустических характеристик ГВПА в сравнении с ОГВ были проведены модельные испытания и расчеты виброакустических характеристик.

**Основные результаты.** В ходе работы выдвинуто предположение об использовании предзакручивающего аппарата и гребного винта (ГВ) умеренной саблевидности в качестве альтернативы малошумному саблевидному открытому гребному винту. Спроектирована и изготовлена модель движительного комплекса, состоящего из гребного винта и предзакручивающего аппарата (ГВПА). Проведены сравнительные кавитационные, гидродинамические и акустические испытания модели ГВ и ГВПА в кавитационной трубе и самоходные испытания в глубоководном опытовом бассейне.

**Заключение.** Результаты модельных испытаний показали, что применение гребных винтов с предзакручивающим аппаратом приводит к снижению уровней высокочастотного шума в сравнении с открытым гребным винтом. Кавитационные и пропульсивные характеристики движителя сохраняются.

**Ключевые слова:** гребной винт, саблевидность, предзакручивающий аппарат, гидродинамический шум, гидродинамические и кавитационные характеристики, акустические измерения, движитель, модельный эксперимент.
*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-95-101
UDC 629.5.035.5+629.5.015.6

A. Koval, A. Maslova, N. Marinich
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

# PROPELLER DESIGN WITH PRE-SWIRL STATORS

**Object and purpose of research.** This research was intended to check if a pre-swirl stator installed before an open propeller of moderate skew could be a viable solution for non-cavitation hydrodynamic noise mitigation. This solution was compared with a typical open skewed silent propeller.

**Materials and methods.** Design and verification calculations have been performed in a given wake field of pre-swirl stator. Pre-swirl stator was designed considering the wake field turn at the skew angles of typical propeller. Wake field behind the pre-swirl stator and design calculation of open propeller considering the heterogeneity of inflow were determined using the calculation methods. The tests and calculations of vibroacoustic parameters have been performed for evaluation of propulsion, cavitation and acoustic parameters of propellers with pre-swirl stators in comparison with open propeller.

*Для цитирования:* Коваль А.А., Маслова А.А., Маринич Н.В. Проектирование гребных винтов с предзакручивающим аппаратом. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 1(399): 95–101.
*For citations:* Koval A., Maslova A., Marinich N. Propeller design with pre-swirl stators. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 1(399): 95–101 (in Russian).

**Main results.** This work was also intended to answer the question if a moderate-skew propeller with pre-swirl stator could be an alternative to a silent skewed open propeller. To this effect, a model of propulsion system (propeller + pre-swirl stator) was designed and manufactured. This model was further used for comparative cavitation, hydrodynamic and acoustic testing in the cavitation tunnel, as well as for self-propulsion tests in deep-water towing tank.
**Conclusion.** The tests have shown that propellers with pre-swirl stators have lower noise emission at high frequencies than open propellers. Cavitation and propulsion performance remain the same for both options.
**Keywords:** propeller, skew, pre-swirl stator, hydrodynamic noise, hydrodynamic and cavitation performance, acoustic measurements, propeller, model test.
*The authors declare no conflicts of interest.*

## Введение
Introduction

В настоящее время движители типа «открытый гребной винт» хорошо зарекомендовали себя с позиции как высоких пропульсивных характеристик, так и снижения дискретной составляющей профильного шума, что обусловлено ранее проведенными работами по выбору оптимальной саблевидности лопастей ОГВ [1].

Наиболее благоприятное воздействие на профильный шум оказывает выбор числа лопастей и придание им саблевидной формы. Рациональный выбор числа лопастей для заданного поля неоднородности основан на способности гребного винта избирательно реагировать на различные составляющие неоднородности. Это происходит потому, что возникающие на отдельных лопастях винта гармонические составляющие нестационарных сил взаимно уравновешиваются. Исключение составляют те составляющие, появление которых вызвано гармониками разложения поля скоростей в ряд Фурье по угловой координате с номерами, кратными числу лопастей, а также те, что отличаются от этого значения на единицу. Эту особенность реакции винта на неоднородность натекающего потока принято именовать фильтрующим свойством [2].

В связи с тем, что амплитуды гармонических составляющих разложения поля скоростей, как правило, быстро уменьшаются с ростом номера гармоники, оказывается выгодным применение гребных винтов с возможно большим числом лопастей (так, на гипотетическом бесконечнолопастном винте периодические нестационарные силы вообще не возникают). По этой причине сейчас обычно используют семилопастные гребные винты.

Применение винтов с четным числом лопастей всегда невыгодно из-за четности симметрии поля скоростей у одновальных кораблей [2].

Увеличение саблевидности лопасти приводит к росту высокочастотного некавитационного шума, а также к снижению прочностных характеристик лопастей гребного винта. Применение предзакручивающего аппарата перед ГВ умеренной саблевидности позволит снизить уровни высокочастотного шума, сохранив низкие уровни дискретной составляющей шума. Гребной винт с ПА за счет уменьшения саблевидности лопастей будет иметь больший запас прочности, чем серийный (малошумный) саблевидный открытый гребной винт.

## Влияние саблевидности на уровни высокочастотного шума
Skew effect upon high-frequency noise emission

Использование саблевидной формы контура лопасти призвано обеспечить постепенный вход лопасти в зону подторможенности или ускоренности потока. При этом элементарные нестационарные силы, возникающие на различных участках лопасти, достигают максимума в различные моменты времени. Поэтому амплитуда результирующей нестационарной силы на каждой лопасти, а следовательно, и на винте в целом, уменьшается, а время действия силы увеличивается, что приводит к уменьшению спектральных уровней сил и излучения для гармоник лопастной частоты [3].

Эффект применения саблевидной формы лопасти зависит не только от величины саблевидности – степени отличия от симметричной формы лопасти, но и от распределения саблевидности вдоль радиуса, которое для каждой картины неоднородного поля оказывается своим.

Однако увеличение саблевидности лопастей, как показала практика, приводит к увеличению высокочастотного шума. Авторы данной работы показали это, взяв за основу некую геометрию гребного винта с оптимизированным на снижение звука вращения распределением саблевидности по радиусу, а затем уменьшая его саблевидность с шагом 10 % до нулевого значения. Одновременно проводилась оценка высокочастотного шума и дискретной составляющей на первых трех лопастных гармониках. Таким образом была определена зависимость между уменьшением саблевид-

ности, уровнем высокочастотного шума и значениями дискретной составляющей.

Для серийного семилопастного (малошумного) саблевидного ГВ, выбранного как объект оптимизации в рамках настоящей работы, был выполнен расчет по описанному выше методу с помощью компьютерной программы, разработанной в Крыловском центре.

Согласно методу саблевидность ($C_S$) лопасти уменьшали от исходного значения до нуля с шагом 10 %. При этом за 100 % *Cs* принималось исходное значение саблевидности, а снижение (например, на 20 %) соответствовало 80 % *Cs*. График, показывающий изменение распределения по радиусу саблевидности в зависимости от процента снижения, представлен на рис. 1 (см. вклейку).

С помощью программы расчета составляющих виброакустических характеристик ГВ, разработанной в Крыловском центре, и типовых исходных данных, были выполнены расчеты всех вариантов ГВ с представленными на рис. 1 вариантами саблевидности, а затем проанализированы полученные результаты. Из данного анализа стало очевидным, что применение ГВ вообще без саблевидности позволяет добиться максимального снижения высокочастотного шума (вплоть до 5 дБ), однако уровень шума на лопастной частоте увеличивается больше чем на 12 дБ.

С точки зрения оптимизации гребного винта требуется выбрать вариант уменьшения саблевидности лопастей ОГВ с сохранением низких уровней дискретного излучения профильного шума. Одним из очевидных решений является увеличение числа лопастей при одновременном снижении их саблевидности.

Другим решением, которому и посвящена данная работа, является применение специального предзакручивающего устройства, позволяющего исказить поле набегающего потока [4]. Влияние такого рода устройств перед гребным винтом на пропульсивные качества движителей надводных судов изучают как отечественные, так и зарубежные исследователи [5, 6, 7].

Рациональный выбор предзакручивающего аппарата основан на той же теории, что и выбор саблевидности для ОГВ. Отличие заключается лишь в том, что при этом не контур лопасти обеспечивает постепенный вход в зоны неоднородности поля скорости, а само поле скорости имеет специальный наклон, в который входит несаблевидная лопасть [8]. Указанный подход к проектированию ПА схематично показан на рис. 2.

## Проектирование гребного винта с предзакручивающим аппаратом

Propeller design with pre-swirl stator

Для оптимизации открытого гребного винта с целью снижения уровней высокочастотного шума предложено применять предзакручивающее устройство перед открытым гребным винтом малой саблевидности (ГВПА).

В таком случае, помимо проектирования на заданный поворот поля скоростей предзакручивающего аппарата, требуется и проектирование открытого гребного винта с уменьшенной саблевидностью для обеспечения заданного упора в новом поле скоростей. При этом для обеспечения низкой дискретной составляющей шума число лопастей аппарата выбирается больше числа лопастей гребного винта. Предполагается, что спроектированный аппарат обеспечит такой же сдвиг по окружности осевой составляющей поля скоростей, как и применение саблевидной лопасти гребного винта. Для сопоставления результатов экспериментов в качестве винта-прототипа принят серийный семилопастной (малошумный) гребной винт.

Предзакручивающий аппарат проектировался с учетом обеспечения поворота поля скоростей на углы саблевидности винта-прототипа. Число лопа-

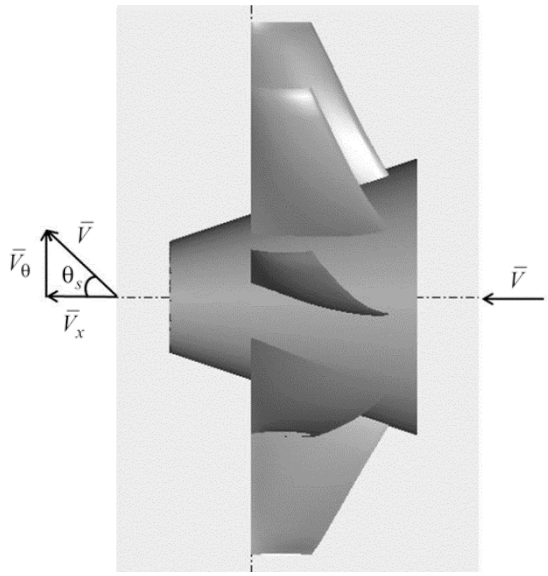



**Рис. 2.** Поворот поля скоростей с помощью предзакручивающего аппарата

**Fig. 2.** Wake field turn by means of pre-swirl stator

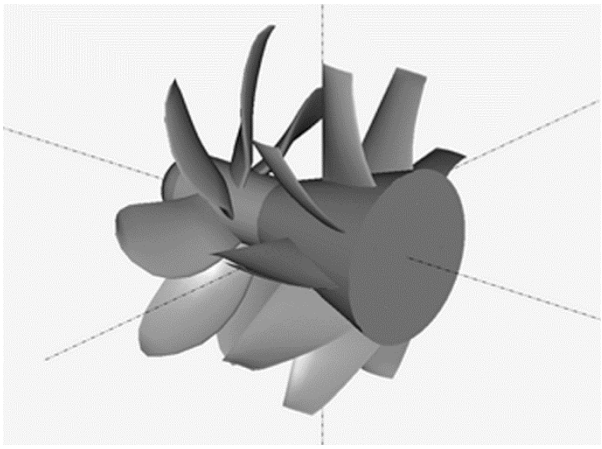


**Рис. 3.** Трехмерная модель установки предзакручивающего аппарата перед открытым гребным винтом

**Fig. 3.** Three-dimensional model of pre-swirl stator before open propeller

стей аппарата принято равным 9. Далее для заданной геометрии лопастей расчетными методами определялось поле скоростей за ПА и выполнялся проектировочный расчет ОГВ с исходной геометрией винта-прототипа, но с учетом изменения поля скоростей [9]. Трехмерная модель полученного движительного комплекса приведена на рис. 3.

## Модельные испытания гребного винта с предзакручивающим аппаратом

Model tests of propeller with pre-swirl stator

Для оценки пропульсивных, кавитационных и акустических характеристик ГВПА в сравнении с ОГВ были проведены испытания модели гребного винта уменьшенной саблевидности с предзакручивающим аппаратом в кавитационной трубе и самоходные испытания модели ГВПА в составе корпуса в глубоководном опытовом бассейне.

Для проведения эксперимента была изготовлена модель ГВПА, состоящая из модели предзакручивающего аппарата и модели ГВ. Модель ПА оснащалась металлической обечайкой, которая обеспечивает дополнительную жесткость лопастей и позволяет установить модель в кавитационной трубе. Фотографии изготовленных элементов представлены на рис. 4.

В кавитационной трубе были проведены исследования модели ГВПА в условиях однородного набегающего потока, в т.н. свободной воде. Общий вид модели движительного комплекса, установленной в кавитационной трубе, приведен на рис. 5.

Эксперименты в кавитационной трубе включали измерения гидродинамических, кавитационных и акустических характеристик движителя. Все исследования проводились согласно методикам, принятым в Крыловском центре.

## Кавитационные характеристики

Cavitation performance

Кавитационные исследования заключались в определении момента исчезновения кавитации на лопастях макета ГВ с предзакручивающим аппаратом. Исчезновение кавитации определяется визуально при стробоскопическом освещении, в этот момент фиксируется давление в рабочем участке и рассчитывается соответствующее ему критическое значение числа кавитации ($\sqrt{\sigma_n}$).

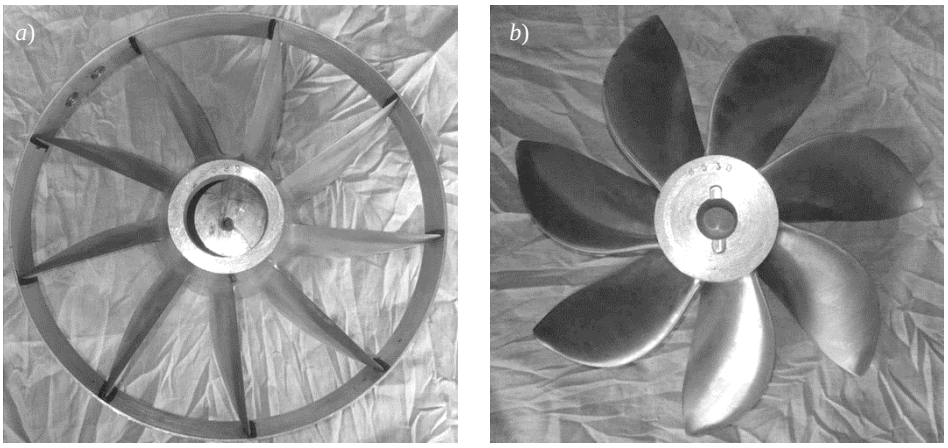



**Рис. 4.** Модель предзакручивающего аппарата (*a*) и гребного винта (*b*)

**Fig. 4.** Model of pre-swirl stator (*a*) and propeller (*b*)

Результаты кавитационных испытаний модели винта представляются в виде зависимости параметра $\sqrt{\sigma_n}$, соответствующего возникновению той или иной формы кавитации, от относительной поступи $J$. Для модели движителя ГВПА, так же как и для открытого гребного винта, характерными формами кавитации лопастей являются:

- концевой вихрь, сходящий с конца лопасти на засасывающей поверхности (левая ветвь кавитационной диаграммы);
- кромочная кавитация на нагнетающей стороне лопасти (правая ветвь кавитационной диаграммы);
- пленочная или пленочно-вихревая кавитация, возникающая на засасывающей поверхности лопасти (площадка кавитационной диаграммы);
- пузырьковая кавитация, возникающая на засасывающей стороне лопасти в виде отдельных пузырьков, покрывающих значительную часть лопасти.

На рис. 6 (см. вклейку) приведена полученная в результате испытаний кавитационная диаграмма ГВПА в сравнении с кавитационной диаграммой серийного винта прототипа. Из результатов видно, что кавитационная диаграмма ГВПА несколько смещена по поступи влево, но в целом кавитационные характеристики движителя соответствуют характеристикам открытого саблевидного винта.

## Гидродинамические характеристики

Hydrodynamic parameters

Гидродинамические испытания модели ГВПА в кавитационной трубе проводились при постоянной частоте вращения при атмосферном статическом давлении в рабочем участке. Скорость потока воды варьировалась от вызванной скорости до скорости, при которой коэффициент упора равен 0. Результаты испытаний представляют в безразмерной форме в виде зависимостей коэффициентов упора ($K_T$) и момента ($10K_Q$) от относительной поступи $J$ (кривых действия). На рис. 7 (см. вклейку) приведены результаты испытаний модели ГВПА в сравнении с кривыми действия винта прототипа.

Крутящий момент нового гребного винта, спроектированного на тот же режим упора, что и у винта прототипа, оказывается существенно ниже, что при дальнейшем перепроектировании ГВ можно использовать для улучшения пропульсивных и акустических характеристик ГВПА. Однако для оценки пропульсивных качеств движителя ГВПА требуется учесть дополнительное сопротивление лопастей предзакручивающего аппарата. Для этого были проведены самоходные испытания за корпусом в глубоководном опытовом бассейне.

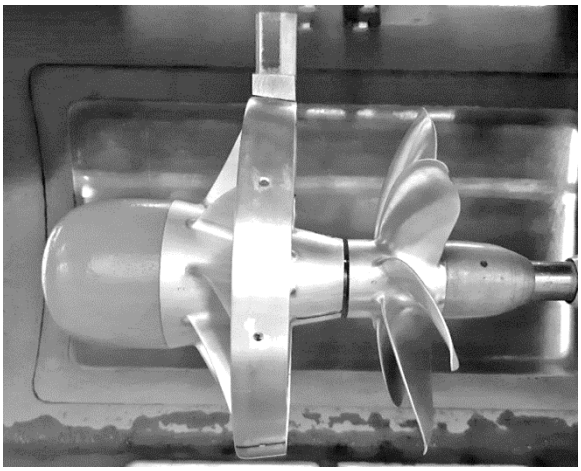


**Рис. 5**. Макет движительного комплекса
**Fig. 5.** A dummy of propulsion system

Результаты самоходных испытаний моделей ГВПА и ОГВ в составе корпуса приведены на рис. 8 (см. вклейку). Сравнительный анализ показывает, что при проектировании гребного винта за предзакручивающим аппаратом необходимо учитывать снижение суммарного коэффициента упора $K_{TT}$ за счет появления дополнительного сопротивления лопастей предзакручивающего аппарата $K_{TD}$. Несмотря на снижение коэффициента тяги $K_E$, пропульсивный коэффициент комплекса $\eta_D$ выше, чем у открытого гребного винта. При дальнейшем проектировании это позволит уменьшить диаметр или частоту вращения гребного винта, что положительно скажется на акустических характеристиках ГВПА.

## Акустические характеристики

Acoustic parameters

Определение акустических характеристик включало определение уровней некавитационного шума при избыточном давлении в рабочем участке $p_0$ = 1 атм. Измерения проводились при постоянной рабочей поступи ГВ. По результатам проведенных испытаний строится зависимость уровня шума от частоты сигнала в некотором диапазоне частот. Результаты измерений для модели ГВПА приведены на рис. 9 (см. вклейку).

Для сопоставления акустических характеристик различных движителей результаты акустических

испытаний моделей при различных частотах вращения нормируются по методике, разработанной в Крыловском центре [10].

На рис. 10 (см. вклейку) приведено сравнение нормированных уровней высокочастотного шума винта-прототипа с нормированными уровнями высокочастотного шума ГВ с предзакручивающим аппаратом.

Применение предзакручивающего аппарата и уменьшение саблевидности лопастей гребного винта приводит к увеличению жесткости ГВ, что в свою очередь сдвигает максимальные уровни излучения в сторону больших частот при некотором увеличении значений максимальных уровней. При этом спад на правой ветви спектра излучения высокочастотного некавитационного шума происходит с большей скоростью, что является положительной тенденцией.

## Заключение

Conclusion

Применение специального предзакручивающего аппарата позволяет исказить поле набегающего на винт потока. Управление полем скорости может привести к снижению высокочастотного шума до 5 дБ, однако наличие зон подторможенности за лопастями устройства несколько снижает эффект. По расчетным данным прогнозируется снижение на 3 дБ. Кроме того, предварительное закручивание потока позволяет снизить потери с окружными скоростями, что дает выигрыш в пропульсивном коэффициенте движителя в пределах 5–8 %. Улучшение пропульсивных качеств движителя дает возможность уменьшить диаметр гребного винта, что позволит дополнительно снизить уровни гидродинамического некавитационного шума.

Дальнейшие исследования будут направлены на повышение пропульсивных, акустических и кавитационных качеств ГВПА, проектирование гидродинамически нагруженных ГВ за ПА, определение предела снижения диаметра ГВ за ПА, повышение пропульсивных качеств движителя посредством установки на ПА преднасадки.

## Список использованной литературы

1. *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.
2. 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.
3. *Левковский Ю.Л.* Шум гребных винтов. Санкт-Петербург : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2005. 184 с.
4. *Дубенский Л.Н., Крикало Т.В., Пустошный А.Ф.* Уменьшение периодических усилий, возникающих на гребном винте, посредством искусственного перераспределения поля скорости в диске гребного винта с помощью пассивных устройств // НТО им. акад. А.Н. Крылова: материалы по обмену опытом. 1976. Вып. 241. С. 91–98.
5. Green retrofitting through optimisation of hull-propulsion interaction – GRIP / *H.J. Prins* [et al.] // Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 14. P. 1591–1600. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.124.
6. Experimental and Numerical Study of Pre-Swirl Stators PSS / *K. Koushan, V. Krasilnikov, M. Nataletti, L. Sileo, S. Spence* // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 8, No. 1. P. 47 (23 p.). DOI: 10.3390/jmse8010047.
7. On the Design and Analysis of Pre-Swirl Stators for Single and Twin Screw Ships / *G.-J. Zondervan, J. Holtrop, J. Windt, T. van Terwisga* // Proceedings of Second International Symposium on Marine Propulsors (SMP'11). Hamburg : Hamburg Univ. of Technology, 2011. P. 197–204.
8. *Бушковский В.А., Коваль А.А., Маслова А.А.* Исследование возможности формирования поля скоростей для обеспечения заданных качеств движителя «винт-насадка» // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2021. Вып. 1(395). С. 79–84. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-395-79-84.
9. Гребные винты: современные методы расчета / *В.Ф. Бавин, Н.Ю. Завадовский, Ю.Л. Левковский, В.Г. Мишкевич.* Ленинград : Судостроение, 1983. 296 с.
10. *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.

## References

1. *A. Mukhin.* Acoustic optimization of geometric elements for submarine propellers // Transactions of Krylov State Research Centre, 2009, Issue 47(331), pp. 81–90 (*in Russian*).
2. *Ya Voitkunsky et al.* Ship theory. Reference book. In 3 vol. Vol. 1. Hydromechanics. Ship resistance. Marine propulsors. Leningrad, Sudostroyeniye, 1985, 764 pp. (*in Russian*).
3. *Yu. Levkovsky.* Propeller noise. St. Petersburg, Krylov Shipbuilding Research Institute, 2005, 182 [1] pp. (*in Russian*).

4. *L. Dubensky, T. Krikalo, A. Pustoshny*. Mitigation of periodical forces on propeller through artificial wake redistribution by means of passive devices // Academician Krylov Scientific & Technical Society of Shipbuilders, 1976, Issue 241, pp. 91–98 (*in Russian*).
5. Green retrofitting through optimisation of hull-propulsion interaction – GRIP / *H.J. Prins* [et al.] // Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 14. P. 1591–1600. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.124.
6. Experimental and Numerical Study of Pre-Swirl Stators PSS / *K. Koushan, V. Krasilnikov, M. Nataletti, L. Sileo, S. Spence* // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 8, No. 1. P. 47 (23 p.). DOI: 10.3390/jmse8010047.
7. On the Design and Analysis of Pre-Swirl Stators for Single and Twin Screw Ships / *G.-J. Zondervan, J. Holtrop, J. Windt, T. van Terwisga* // Proceedings of Second International Symposium on Marine Propulsors (SMP'11). Hamburg : Hamburg Univ. of Technology, 2011. P. 197–204.
8. *V. Bushkovsky, A. Koval, A. Maslova*. Wake optimization of ducted propeller // Transactions of Krylov State Research Centre, 2021, Issue 1(395), pp. 79–84 (*in Russian*).
9. *V. Bavin, N. Zavadovsky, Yu. Levkovsky, V. Mishkevich*. Propellers: modern calculation methods. Leningrad, Sudostroyeniye, 1983 (*in Russian*).
10. *Yu. Levkovsky*. Propeller noise: physics and simulation methods // Transactions of Krylov State Research Institute, 2009, Issue 47(331), pp. 63–72 (*in Russian*).

## Сведения об авторах

*Коваль Анастасия Александровна*, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-67-49. E-mail: 2homyaka@mail.ru. https://orcid.org/0000-0001-6775-4120.
*Маринич Николай Владимирович*, начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-67-49. E-mail: n_marinich@ksrc.ru. https://orcid.org/0000-0002-9290-3041.
*Маслова Анна Андреевна*, инженер 2-й категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-67-49. E-mail: nurok1990@mail.ru. https://orcid.org/0000-0001-5657-6584.

## About the authors

*Anastasia A. Koval*, Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-67-49. E-mail: 2homyaka@mail.ru. https://orcid.org/0000-0001-6775-4120.
*Nikolay V. Marinich*, Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-67-49. E-mail: n_marinich@ksrc.ru. https://orcid.org/0000-0002-9290-3041.
*Anna A. Maslova*, Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-67-49. E-mail: nurok1990@mail.ru. https://orcid.org/0000-0001-5657-6584.

Поступила / Received: 01.12.21
Принята в печать / Accepted: 10.03.22
© Коваль А.А., Маслова А.А., Маринич Н.В., 2022

**Рис. 1.** График изменения саблевидности в процентах от исходной саблевидности серийного семилопастного (малошумного) саблевидного гребного винта

**Fig. 1.** Skew change a percentage of the initial skew of a serially produced seven-blade silent skewed propeller

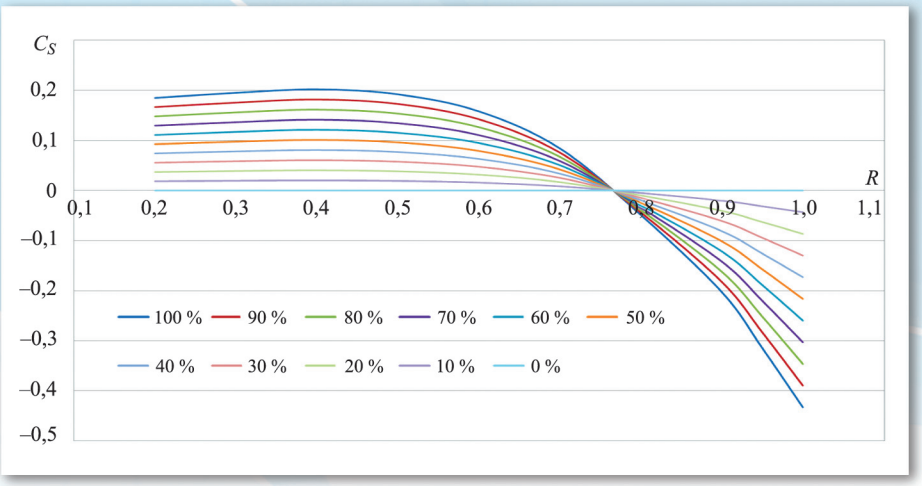



**Рис. 6.** Кавитационная диаграмма открытого гребного винта (——) и гребного винта с предзакручивающим аппаратом (——)

**Fig. 6.** Model cavitation buckets: open propeller (——) vs propeller with pre-swirl stator (——)

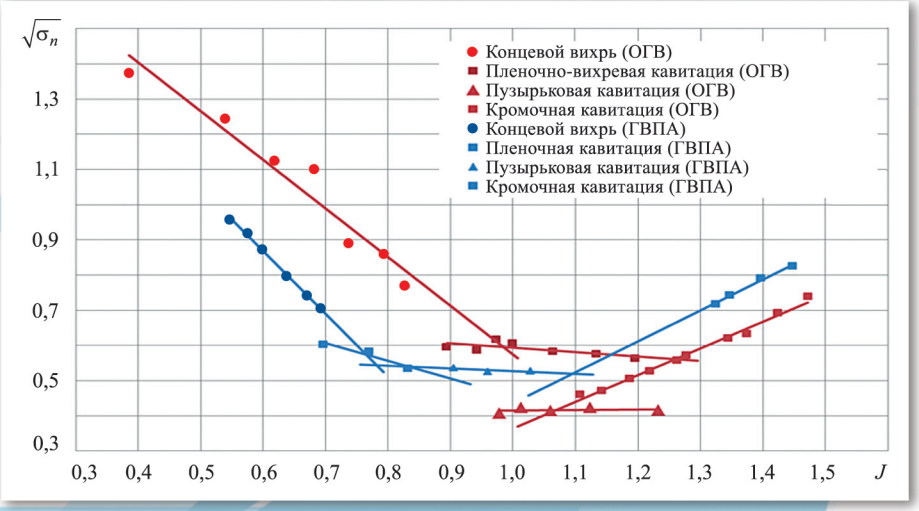
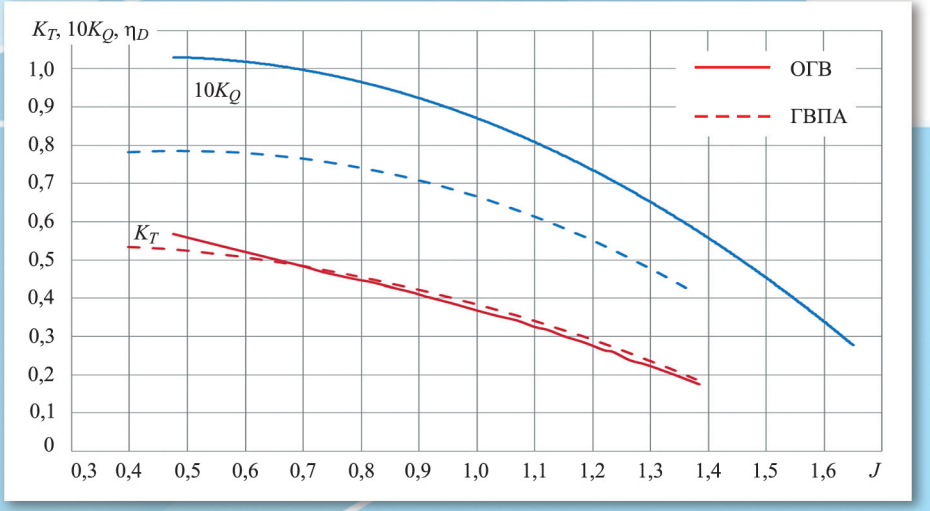



**Рис. 7.** Кривые действия моделей открытого гребного винта и гребного винта с предзакручивающим аппаратом

**Fig. 7.** Model performance curves: open propeller vs propeller with pre-swirl stator



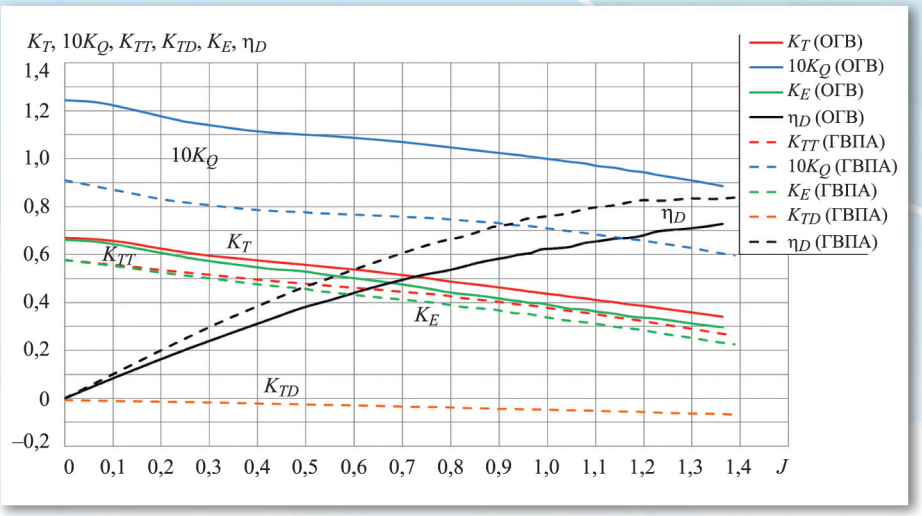



**Рис. 8.** Самоходные испытания моделей открытого гребного винта и гребного винта с предзакручивающим аппаратом

**Fig. 8.** Self-propulsion tests: open propeller vs propeller with pre-swirl stator

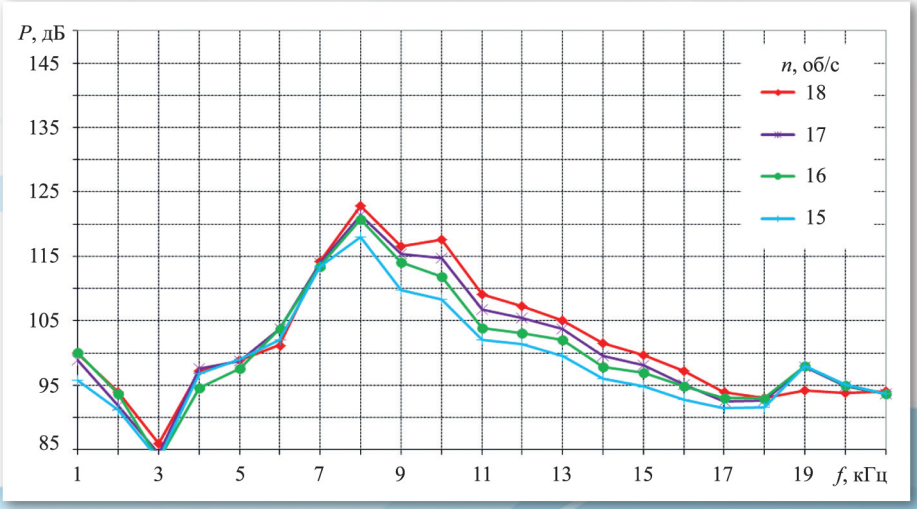



**Рис. 9.** 1/3-октавные уровни высокочастотного шума модели гребного винта с предзакручивающим аппаратом

**Fig. 9.** 1/3-octave high-frequency noise levels of propeller model with pre-swirl stator

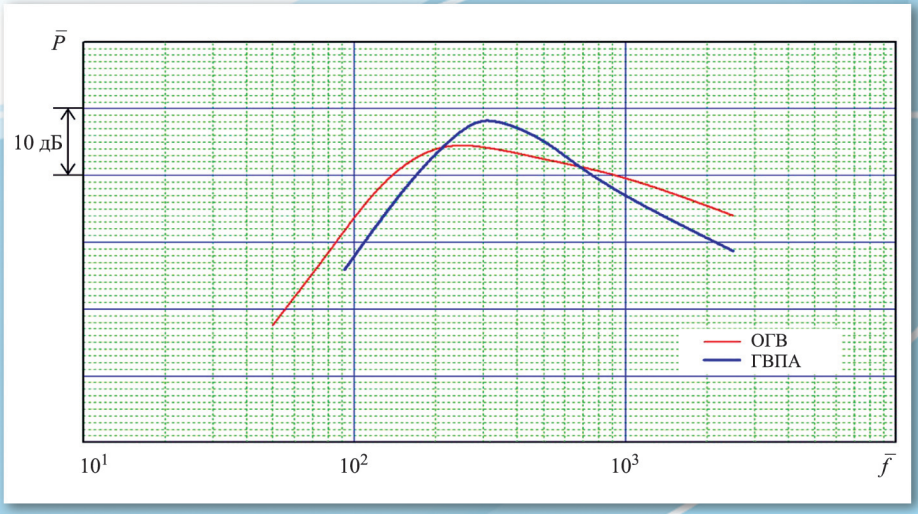



**Рис. 10.** Сравнение нормированных уровней высокочастотного шума моделей открытого гребного винта и гребного винта с предзакручивающим аппаратом

**Fig. 10.** Comparison of normalized high-frequency noise levels: open propeller vs propeller with pre-swirl stator