

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-7-19
УДК 629.5.035.001.63

А.В. Пустошный, Г.К. Дарчиев, И.Г. Фролова
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

РАЗВИТИЕ НАУЧНОЙ БАЗЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ ЛЕДОВЫХ КЛАССОВ

Объект и цель научной работы. Целью работы является обзор разработок и представление новых результатов, полученных в Крыловском государственном научном центре (КГНЦ), в обеспечение проектирования гребных винтов транспортных судов высоких ледовых классов.

Материалы и методы. Приведенные результаты получены экспериментальным и расчетным путями.

Основные результаты. Представлены основные результаты работ КГНЦ, направленных на уточнение характеристик прочности, повышение пропульсивных характеристик ледовых гребных винтов (в том числе при работе вблизи кавитационных режимов во льдах на швартовах), а также на борьбу с развитием частичной кавитации на лопастях в транзитных режимах движения судна в открытой воде.

Закключение. Развитие крупнотоннажных транспортных судов арктического плавания выдвинуло новые требования к двигателям, и полученные результаты и технологии позволяют соблюдать требования к гребным винтам и сохранять конкурентоспособность и коммерческую привлекательность разработанных в КГНЦ гребных винтов высоких ледовых классов.

Ключевые слова: пропульсивные характеристики, гребной винт, модельные испытания, RANS, профилировка, ледовый класс, судно, кавитация.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

NAVAL ARCHITECTURE

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-7-19
UDC 629.5.035.001.63

A. Pustoshny, G. Darchiev, I. Frolova
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC BASIS IN DESIGN OF PROPELLERS FOR ICE-CLASS CARRIER SHIPS

Object and purpose of research. The purpose of this study is to review the developments and present new results obtained by Krylov State Research Centre (KSRC) in design of propellers for carrier ships with high ice classes.

Materials and methods. The results were obtained by means of experiments and calculations.

Main results. The study presents main results of KSRC developments intended to obtain more accurate strength parameters and increase propulsion performance of ice-class propellers (including ice operation at bollard pull in the vicinity of cavitation condition), as well as to combat partial cavitation on propeller blades in open-water transit conditions.

Для цитирования: Пустошный А.В., Дарчиев Г.К., Фролова И.Г. Развитие научной базы проектирования гребных винтов для транспортных судов ледовых классов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 1(387): 7–19.

For citations: Pustoshny A., Darchiev G., Frolova I. Development of scientific basis in design of propellers for ice-class carrier ships. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; 1(387): 7–19 (in Russian).

Conclusion. The progress in large Arctic carrier ships aroused new requirements to their propulsor, and the results and technologies available with KSRC make it possible to satisfy these requirements and, at the same time, keep KSRC-developed propellers of high ice classes competitive and commercially attractive.

Keywords: propulsion performance, propeller, model tests, RANS, profiling, ice class, ship, cavitation.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Введение

Introduction

Российское судостроение и судоходство отличаются тем, что для подавляющего большинства судов требуется ледовый класс. Это может быть один из легких ледовых классов, как принято у дальневосточных транспортных компаний, в основном осуществляющих перевозки в незамерзающих морях, или самые высокие ледовые классы для круглогодичной вывозки полезных ископаемых из Арктики, а также ледокольные классы для ледоколов и арк-

тических судов снабжения, которым придаются функции ледоколов. Несмотря на то, что большинство транспортных судов строится за рубежом, гребные винты зачастую проектируются и производятся в России. В этих условиях, чтобы поддержать уровень одного из ведущих мировых проектантов винтов, Крыловский государственный научный центр (КГНЦ) должен постоянно проводить анализ новых требований и тенденций и целенаправленно совершенствовать научные основы проектирования ледовых винтов с учетом накопленного опыта и новых задач.

Таблица. Проекты гребных винтов для судов ледовых классов, выполненные в КГНЦ

Table. KSRC designs of ice-class propellers

№ п/п	Заказчик	Проект	Название	D , м	P_s , МВт	Ледовый класс	Год проектирования
1	ABB Oy		Icebreaker Glib	2–4	1–5	DNV Icebreaker ICE 10	2003
2	ABB Oy	7233MP	Icebreaker Tug			DNV Icebreaker ICE 10	2004
3	ABB Oy	7211MP	SOA Research vessel			Chinese Ship Register Ice class B	2004
4	ABB Oy	7230MP	Train ferry			Chinese Ship Register Ice class B	2004
5	ABB Oy	7215MP	Platform supply vessel			DNV Ice C	2004
6	ABB Oy		Botnica			DNV ICE10IB	2006
7	ABB Oy	7252MP	Dosno Tanker			DNV Ice class 1A	2006
8	ABB Oy	8126JS_01	Research ship 4000T			Chinese Ship Register B3 Finnish-Swedish IC	2010
9	Steerprop Ltd	W0174	Multipurpose salvage vessel of MPSV07 project			RMRS ARC5	2010
10	АО «ЦС «Звездочка»	ДПК 3500M	MPSV 06			RMRS Icebreaker 6	2010
11	АО «ЦС «Звездочка»	ДПК 2500	Проект 20181			RMRS Arc5	2012
12	ABB Oy		Nordic Yards Arctic resource vessel			RMRS Icebreaker 6	2013
13	АО «ЦС «Звездочка»	ДПК 1200	Танкер проекта RST27			RMRS Ice2	2013
14	АО «ЦС «Звездочка»	ДПК 1000Г	Буксир пр. ЗАО «Спецсудопроект»			RMRS Ice3	2013

Продолжение таблицы
Continuation of table

№ п/п	Заказчик	Проект	Название	D , м	P_s , МВт	Ледовый класс	Год проектирования
15	АО «ЦС «Звездочка»	ДПК 2500Н	Морской буксир пр. 23470	2–4	1–5	RMRS Arc4	2015
16	АО «ЦС «Звездочка»	ДПК 4500Н	Судно кабелеукладчик пр. 15310			RMRS Arc4	2015
17	ABB Oy		Sahalin icebreaker	4–6	5–15	DNV Icebreaker ICE 10	2003
18	ABB Oy		Norilsk icebreaker			RMRS LU7	2004
19	ABB Oy	7224MP	Moss Maritime Icebreaker			DNV ICE 15 IB	2004
20	ABB Oy	7249MP	Lukoil oil tanker			RMRS LU6 (Stern)	2006
21	ABB Oy		DAT Arctic tanker			RMRS LU6 (Bow)	2006
22	Steerprop Ltd	W0091	Supply ship			RMRS LU7	2006
23	Steerprop Ltd	W0092	Arctic icebreaker			RMRS LL7	2006
24	SaipemS.p.A		Pipe-lay vessel			ABS General Ice Class – A0	2007
25	ABB Oy	7296MP	Arctic Drill Ship			DNV ICE10	2009
26	АО «ЦС «Звездочка»	Flowserve	Судно снабжения пр. 22420			RMRS Arc4	2010
27	ABB Oy	0080ET_01	Arctic container vessel			RMRS ARC8	2011
28	АО «ЦС «Звездочка»	ДПК 8500	Icebreaker 21900M			RMRS Icebreaker 7	2012
29	АО «ЦС «Звездочка»	Flowserve	Судно снабжения пр. 22390–22391			RMRS Arc5	2012
30	ABB Oy	CVX-000025-A	LK25 Triple screw Arctic Icebreaker			RMRS Icebreaker 8	2013
31	Steerprop Ltd	SP110 ARC	Icebreaker 21900M			RMRS Icebreaker 7	2013
32	ABB Oy		YAMAL 172.6 m ³ Arctic LNG CARRIER			RMRS ARC7	2014
33	ABB Oy	3153SH_04	Samsung arctic shuttle tanker 42K			RMRS ARC7	2014
34	AkerArctic	AARC P-27358	Yamal arctic heavy module carrier P-27358	DNV PC-3 RMRS Arc7	2014		
35	ABB Oy	6026ET, Crystal Endeavour	Круизное судно	DNVGL-2016 PC6	2017		
36	HUNDAI		Танкер НИИ 1737/38	6–8	10–20	DNV ICE-1A	2005
37	HUNDAI		Танкер / химический продуктовозHMD439			DNV ICE 1A RMRS LU4 Finish-Swedish IA	2005
38	DAEWOO SHIP-BUILDING		Large ice-going LNG tankers			Finish Swedish IA	2007

Проектирование ледовых винтов в течение длительного времени являлось предметом сотрудничества с фирмой АВВ, которая, несмотря на изначально скептическое отношение многих специалистов в области арктического судоходства, внедрила электрические колонки в качестве главных движителей судов ледовых классов. С увеличением размеров арктических транспортных судов такие колонки стали практически безальтернативным видом движителей, обеспечивая возможность управляемости крупнотоннажных судов в тяжелых льдах. Несколько проектов было выполнено в КГНЦ для компании Steerprop, выпускающей механические колонки с Z-образной передачей. Также активно велись работы с ЦС «Звездочка» и КБ «Винт» по федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники» над созданием отечественных механических колонок ледовых классов. Сейчас такие колонки внедрены на ряде судов, построенных на отечественных верфях.

В таблице приводится перечень гребных винтов для судов ледовых классов, спроектированных Крыловским центром.

Проектирование гребных винтов осуществляется исходя из требований, сформулированных в техническом задании заказчика (проектного бюро, верфи или, в случае применения колонок, производителя колонок). Однако опыт проектирования ледовых гребных винтов показал, что соблюсти баланс требований к ним гораздо сложнее, чем для винтов без ледового класса [2, 9], поэтому для сочетания зачастую противоречивых требований целесообразно на предварительной стадии проектирования проводить проектно-исследовательскую проработку, включающую определение достижимых характеристик движителей.

Традиционно в отечественной практике баланс требований к гребным винтам ледоколов и судов ледового плавания сводился к приоритету требований по прочности, определяемых по Правилам Регистра [17], а также к требованиям по гидродинамике для обеспечения работы судна во льдах – назначалась величина упора на швартовах вперед и назад, которая, как правило, была достижима только при отсутствии влияния развитой кавитации на упор. Появившиеся для современных арктических судов требования по КПД при ходе на чистой воде, а также по вибрациям на данном режиме, индуцированным работой винта, и связанные с этим требования по частичной кавитации до недавнего времени считались второ-

степенными. Ниже проанализированы различные аспекты развития научных подходов к проектированию ледовых гребных винтов с учетом современных требований.

Учет требований по прочности ледовых гребных винтов

Consideration of strength requirements for ice-class propellers

Правила Регистра [17] отражают опыт эксплуатации и постройки ледовых судов, накопленный в XX веке, когда в Арктике перевозки осуществлялись преимущественно судами водоизмещением до 5 тыс. т. Правила предполагают обоснованные формулы для выбора максимальных толщин лопастей гребных винтов в зависимости от перерабатываемой мощности на валу. Также Регистром предписано применение ледовых профилей, для которых, наряду с максимальной толщиной, нормируются толщины в 5 % хорды от входящей и выходящей кромок. Это делает ледовые профили более «тупыми» по сравнению с хорошо отработанными гидродинамическими винтовыми профилями, например, типа NASA 66 (MOD), и, как будет показано выше, существенно усложняет кавитационные аспекты проектирования винтов.

Увеличение размеров транспортных судов в Арктике в XXI веке приводит к необходимости пересмотра целого ряда норм прочности для судов. Применительно к гребным винтам серьезное научное исследование прочности выполнил А.В. Андрушин [3], который использовал свой большой опыт работы в ледовом бассейне ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, а позднее проанализировал опыт Регистра в испытаниях и эксплуатации ледовых судов. Им были разработаны модели взаимодействия лопасти со льдом и предложены новые формулы для определения безопасных толщин лопастей, изданные Регистром в виде методических материалов [19, 20]. Однако применение предложенных формул приводило к необходимости существенного увеличения толщин винтов, что в ряде случаев вызвало резкие протесты производителей колонок, которые исходя из условий сохранения пирамиды прочности должны были существенно и, согласно их опыту эксплуатации колонок, необоснованно увеличивать прочность, а следовательно, вес и размеры других элементов колонок.

В КГНЦ в рамках ФЦП «РГМТ» под руководством А.В. Пустошного прошла работа по теме «Нормирование», в которой была сделана попытка

найти разумный компромисс между новыми предложениями и старыми Правилами Регистра. В частности, по теме в ходе антарктического рейса судна «Академик Трешников» группе сотрудников под руководством Н.В. Васильева [16] удалось провести уникальные натурные измерения нагрузок на гребных валах и оценить перегрузки движителей во время выполнения сложных ледовых маневров. По итогам анализа исследований совместно с Регистром было решено сохранить на данном этапе в качестве основных формулы из действующих Правил для выбора прочных размеров лопастей, оставив предложения [19, 20] на уровне методического материала.

По-видимому, работа [3] была последней «классической» работой, в которой нагрузки на лопасти определялись по формулам от воздействия равнодействующей силы. Параллельно, начиная с правил финско-шведской администрации, в международной практике уже развивались компьютерные методы расчета, в которых нагрузки на лопасть при считающемся наиболее опасным режиме фрезерования льда моделировались распределенным давлением в зонах контакта со льдом вблизи входящей кромки, на конце лопасти и, для расчетов реверсивных режимов работы винта, вблизи выходящей кромки. Для специфицированных таким образом для каждого ледового класса пяти вариантов распределенной нагрузки компьютерный расчет распределения напряжений в лопасти проводился методом конечных элементов. Позже такую методику приняла Международная ассоциация классификационных обществ IACS. После этого методика полностью вошла в Правила Российского Регистра [18] в качестве варианта, позволяющего рассматривать соответствие гребных винтов классификации, предложенной Полярным кодексом РС.

Сегодня уже можно оценить роль этих разработок с точки зрения опыта проектирования винтов КГНЦ. С одной стороны, благодаря методам, связанным с приложением распределенных ледовых нагрузок и с расчетом по методу конечных элементов, удалось получить существенно более точную модель напряженно-деформированного состояния лопасти и, следовательно, более обоснованно и рационально выбрать ее толщину. Это позволяет избежать переупрочнения винтов и, значит, переутяжеления колонки, сохраняя приемлемые параметры движительных комплексов в целом.

В то же время 5 утвержденных к расчету случаев нагружения лопастей распределенной ледо-



Рис. 1. Характерные повреждения гребных винтов с саблевидными лопастями после контакта со льдом

Fig. 1. Typical damage of high-skew propellers after contact with ice

вой нагрузкой заведомо не в полной мере описывают все возможные варианты ледовой нагрузки. Например, расчеты напряженного состояния для винтов с саблевидностью лопастей, по указанным случаям распределенных ледовых нагрузок, зачастую не дают оснований для ограничения угла skew для ледовых винтов. Однако практика показывает, что саблевидные лопасти во льдах гнутся – как правило, отгибается откинута назад часть лопасти на концевых радиусах (рис. 1). В отечественной практике это послужило основанием для массовой замены на небольших транспортных судах саблевидных винтов на винты с симметричным контуром лопасти.

Очевидно, что в ходе работы во льдах могут возникнуть другие опасные режимы, не связанные с режимом фрезерования льда, принимаемым в качестве самого опасного с точки зрения прочности. В международной практике для них существует

термин «нерасчетные режимы». В качестве примера приведем навал лопасти остановленного (заблокированного) винта на лед при сохранении движения судна вперед. В этом случае силы на элементах лопасти могут существенно превышать расчетные. Поэтому к расчетам по современным методикам следует относиться с определенной долей осторожности, а не как к абсолютной истине, максимально сохраняя решения, принятые ранее по опыту эксплуатации. Например, проектант должен ограничить применение саблевидных лопастей для гребных винтов высоких и средних ледовых классов или вообще отказаться от них.

Что касается методики [20], то ретроспективно она сыграла также положительную роль. В частности, с ее применением были спроектированы винты сухогруза типа «Норильский никель», задуманного как «судно двойного действия» (концепция, предложенная финскими специалистами [13]), для которого основной режим работы во льдах – кормой вперед. У «Норильского никеля» при более опасной для ледовых судов одновальной компоновке (при отсутствии дублирования движителей) имелся повышенный запас прочности движительного комплекса. Кроме того, в настоящее время, например, в публикациях английского Ллойда [14], появилась вполне обоснованная позиция о необходимости проектировать кормовую оконечность и движители ледовых судов двойного действия на один ледовый класс выше, чем судно в целом. Наконец, по информации от капитана одного из судов типа «Норильский никель», для поддержания управляемости во льдах судно в ровном льду эксплуатируется со скоростью около 9 уз (резко снижая ее при подходах к торосам), что существенно выше скоростей, считавшихся ранее нормальными для работы во льдах. При этом поломок винтов зафиксировано не было. Следует отметить, что сегодня заказчики арктических судов из экономических соображений требуют увеличения скорости ледовых проводок даже до 12 уз. Но нужно понимать, что это является технически очень сложной задачей, требующей проведения целого ряда исследований, и нет никаких гарантий, что при внедрении необходимых технических решений сохранится коммерческая привлекательность судов.

Все изложенное может послужить аргументом в пользу того, что при назначении требований к гребному винту, а также при его проектировании должен прорабатываться существенно больший объем информации, чем предписывается правилами классификационных обществ.

Пропульсивные характеристики винтов на ходу и на швартовах

Propulsion performance of propellers in running and bollard-pull conditions

Как уже отмечалось, ранее в качестве основного пропульсивного требования к характеристикам ледовых гребных винтов выдвигалось требование достижения максимальной (при заданной мощности) величины упора на швартовом режиме при работе как вперед, так и назад. Это подразумевает отсутствие второй стадии кавитации, когда наличие развитой кавитации приводит к тому, что начиная с определенной величины дальнейший рост частоты вращения винта и, соответственно, подводимой к винту мощности не вызывает увеличение упора винта.

Традиционное средство для повышения упора на швартовах – насадка – во льдах практически не применяется из-за опасности ее разрушения льдом. Для главного движителя не применяются также и специальные приемы повышения упора на швартовах, характерные для средств активного управления (например, контур лопасти Каплана). Поэтому у проектанта винта в качестве основного средства для повышения упора на швартовах остается поиск оптимального дискового отношения, снижением которого можно добиться определенного увеличения упора на швартовах при заданной мощности, но, с другой стороны, его снижение приводит к повышению риска второй стадии кавитации.

Исследование развитой кавитации на швартовах, как правило, выполняется в имеющемся в КГНЦ кавитационном бассейне, т.к. в кавитационной трубе винт своими вызванными скоростями начинает разгонять воду в трубе и вместо швартового режима оказывается работающим при заметной ходовой поступи (в средней кавитационной трубе КГНЦ при длительной работе с моделью устанавливается поступь около 0,3). В кавитационном бассейне фактор вызванных скоростей отсутствует. Для примера, на рис. 2 представлен вид кавитации на швартовах, полученный С.П. Шевцовым в вакуумном бассейне.

Как видно, кавитация представляет собой концевой вихрь, который в действительности на швартовом режиме начинается не вблизи конца лопасти, как на ходовых режимах при легкой нагрузке винта, а на входящей кромке лопасти на средних и иногда на малых относительных радиусах. Такой вихрь, кроме всего прочего, «всасыва-

ет» кромочную кавитацию, так что он является единственной формой кавитации на швартовах. С уменьшением числа кавитации этот кавитирующий вихрь увеличивается в диаметре и становится препятствием вблизи входящей кромки для нормальной работы профилей, что сопровождается падением коэффициента упора.

Близкая картина кавитации получена в суперкомпьютерном центре КГНЦ под руководством М.П. Лобачева и А.Е. Таранова расчетом по RANS-методу с использованием пакета STAR-CCM+ [4] (рис. 3).

Проведенная работа, направленная на оптимизацию винтов ледоколов, позволила подойти к расчетному прогнозированию второй стадии кавитации на швартовах. При этом были существенно уточнены методики прогнозирования ходкости на очень малых скоростях хода [5].

Интересная идея относительно практической методики прогнозирования второй стадии кавитации гребного винта изложена в работе [8], выполненной под руководством Г.И. Каневского: удалось связать результаты определения момента начала второй стадии кавитации на ходовом и на швартовом режимах, что с достаточной для практики точностью позволяет прогнозировать начало второй стадии на швартовах по стандартным испытаниям модели гребного винта в кавитационной трубе.



Рис. 3. Результаты расчета кавитации гребного винта на швартовом режиме

Fig. 3. Cavitation calculation results for propeller at bollard pull

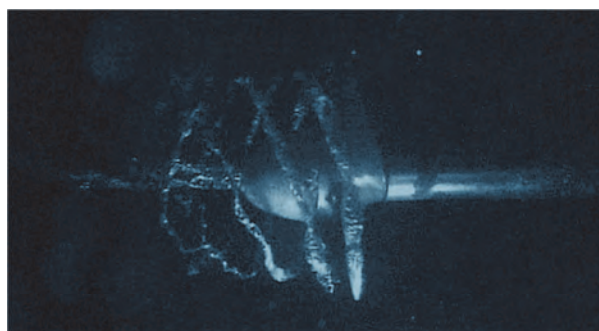
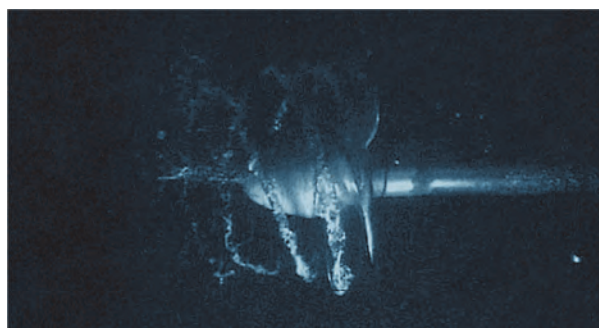
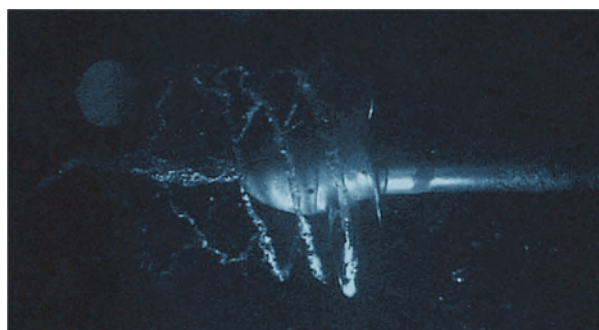
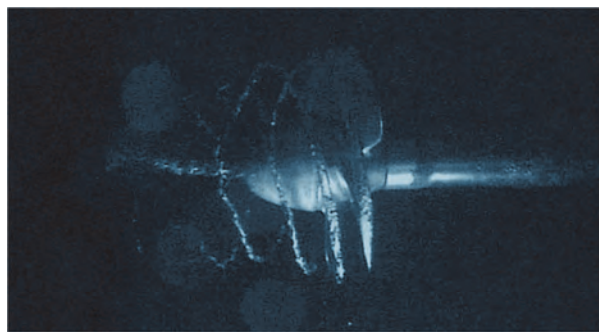


Рис. 2. Вид кавитации на швартовах в кавитационном бассейне при числах кавитации 3,1; 2,2; 2,1 (начало 2 стадии кавитации); 1,75 (развитая 2 стадия)

Fig. 2. Bollard-pull cavitation obtained in cavitation test tank at cavitation numbers 3.1; 2.2; 2.1 (beginning of thrust-breakdown cavitation); 1.75 (developed thrust-breakdown cavitation)

В настоящее время в развитие работы [8] в КГНЦ получены данные модельных испытаний для винтов ледоколов, указывающие на необходимость учета заметного влияния корпуса на момент начала кавитации на швартовах. Такое влияние может привести к тому, что вторая стадия кавитации начнется при числах кавитации на 20 % ниже, чем у винта в открытой воде.

Все эти исследования, которые принято рассматривать как «чисто методические» с соответствующим отношением к их финансированию, на самом деле имеют большое практическое значение: прогнозируя по методическим основаниям отдаление наступления второй стадии кавитации, проектант может уменьшить дисковое отношение винта. Для ледового транспортного судна это означает возможность повышения КПД винтов на ходовых режимах.

Относительно достижимого КПД гребных винтов ледовых судов имеющиеся данные по спроектированным ледовым винтам позволяют говорить, что на ходовых режимах КПД гребных винтов транспортных судов высоких ледовых классов, как правило, лежит в диапазоне 0,53–0,55, в то время как для неледовых транспортных судов КПД гребных винтов, в зависимости от типа судна может

достигать 0,6–0,68. Анализируя эти цифры, следует учитывать, что снижение «среднестатистического КПД» для ледовых судов частично обусловлено большей нагрузкой винта (за счет большего сопротивления корпуса с ледокольными обводами носа), а частично – необходимыми для ледовых винтов изменениями геометрии (прежде всего, большей толщиной лопастей).

Говоря о пропульсивных требованиях для гребных винтов ледовых транспортных судов, нужно понимать, что соответствующее тенденции к повышению энергоэффективности судов требование по максимально высокому КПД на транзитном режиме в открытой воде означает, что винт должен иметь геометрические характеристики (распределение шага и кривизны), максимально приближенные к характеристикам винтов неледового класса. В таких условиях становится проблематичным выполнение обычного для ледоколов с винтами на валу требования по обеспечению достаточно большого упора на заднем ходу при реверсе оборотами. Это является еще одним аргументом в пользу применения в качестве главных движителей ледовых судов поворотных колонок, реверс которых осуществляется поворотом колонки на 180°.

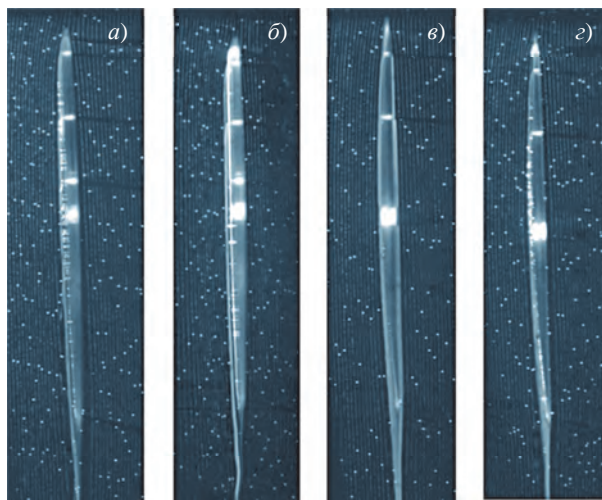


Рис. 4. Результаты испытания профилей с шероховатостью и без нее при угле атаки 2°: ледовый профиль без (а) и с шероховатостью (б) на входящей кромке; профиль НАСА 66 (MOD) без (в) и с шероховатостью (г) на входящей кромке

Fig. 4. Test results for profiles with roughness and without it, angle of attack 2°: ice profile without (a) and with (b) roughness at its leading edge; profile НАСА 66 (MOD) without (c) and with (d) roughness on its leading edge

Частичная кавитация ледовых гребных винтов

Partial cavitation of ice-class propellers

В практике XX века почти не обращали внимания на влияние движителей на вибрации и обитаемость судов ледового плавания в открытой воде: работа во льдах заведомо связана с большими вибрациями и шумом, а на свободной воде мощные выкружки гребных валов создавали большую неоднородность поля скоростей, в которой сильная кавитация была неизбежна.

Арктические крупнотоннажные транспортные суда предназначены для перевозок полезных ископаемых по маршрутам, включающим сотни миль во льду и тысячи миль по свободной ото льда воде. Поэтому заказчик вправе ставить вопрос о вибрационной активности гребных винтов в открытой воде, а следовательно, и о проявлениях в ней первой стадии кавитации. При применении тянущих колонок на двухвальных судах неоднородность потока, натекающего на гребной винт, крайне невелика, поэтому кавитационные проблемы не возникали. Однако с появлением трехвальных судов, где средний винт находится

в следе за корпусом, неоднородность потока стала существенно выше и вопрос об исследовании частичной кавитации на ледовых винтах обрел актуальность.

Благодаря содействию российского судовладельца – компании «Совкомфлот» – специалисты КГНЦ приняли участие в широкой программе исследований кавитации для арктического судна на кавитационных установках двух крупных зарубежных исследовательских центров, а также смогли получить данные натурных наблюдений за кавитацией на лопастях гребных винтов. Анализ этой информации сопровождался рядом экспериментов на кавитационных установках [6, 15].

Принципиальным различием модельных испытаний в Крыловском центре и за рубежом является использование в зарубежных центрах искусственной турбуликации лопастей. Сопоставление картин кавитации модели и натуре показало для ледового гребного винта совершенно разные картины кавитации гладкой модели винта в КГНЦ и моделей с искусственной шероховатостью в зарубежных исследовательских центрах. При применении шероховатости кавитация на лопастях оказалась ближе к кавитации, зарегистрированной при натурных наблюдениях, поэтому было предпринято исследование влияния искусственной шероховатости на кавитацию.

Визуализация ламинарного обтекания профилей в гидродинамической трубе показала (рис. 4), что при небольших углах атаки (2°) обтекание профилей, применяемых, как на обычных винтах (NACA 66 (MOD)), и ледовых профилей (ИК 82, разработанных в КГНЦ) примерно одинаково и с шероховатостью вблизи входящей кромки, работающей в качестве турбулизатора, и без нее. При увеличении угла атаки до 4° , что характерно при работе винта в неоднородном поле скоростей, картина резко изменилась (рис. 5): на гладких профилях шероховатость по-прежнему работала как турбулизатор пограничного слоя, а на ледовом профиле началось образование отрывных структур, т.е. шероховатость стала работать как «срывник», за которым образуется отрывная зона, в которой в условиях пониженного давления формируется каверна.

Дальнейшие исследования учитывали, что существующая в КГНЦ практика проектирования гребных винтов основана на максимально точном расположении кавитационной диаграммы винта относительно режимов, характеризующих работу лопасти (рис. б). Иначе говоря, проектант должен

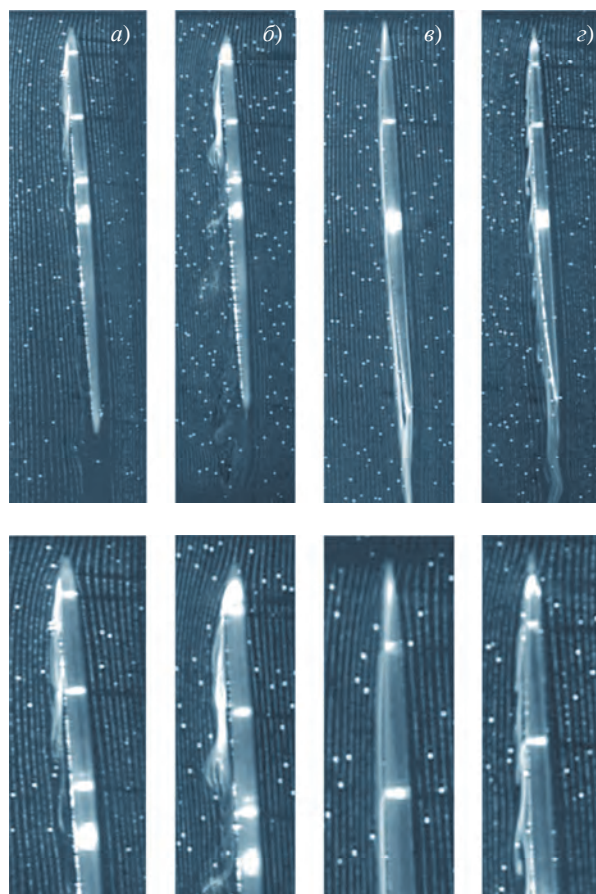


Рис. 5. Результаты испытания профилей с шероховатостью и без при угле атаки 4° : ледовый профиль без (а) и с шероховатостью (б) на входящей кромке; профиль NACA 66 (MOD) без (в) и с шероховатостью (г) на входящей кромке

Fig. 5. Test results for profiles with roughness and without it, angle of attack 4° : ice profile without (a) and with (b) roughness at its leading edge; profile NACA 66 (MOD) without (c) and with (d) roughness on its leading edge

путем изменения геометрии винта (распределения шага и кривизны) максимально точно поместить петлю, характеризующую в терминах числа кавитации и мгновенной поступи режимы работы лопасти за полный оборот винта в неоднородном поле скоростей, внутрь кавитационной корзины, характеризующей начало кавитации на данной поступи и получаемой в результате кавитационных испытаний модели винта в открытой воде [1]. При такой методике исследуются гладкие модели винта. В зарубежной практике кавитационные испытания моделей винтов проводятся за корпусом модели судна, при этом делается прогноз развития

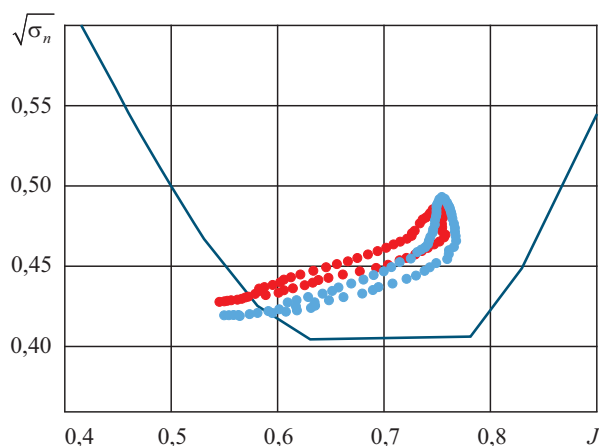
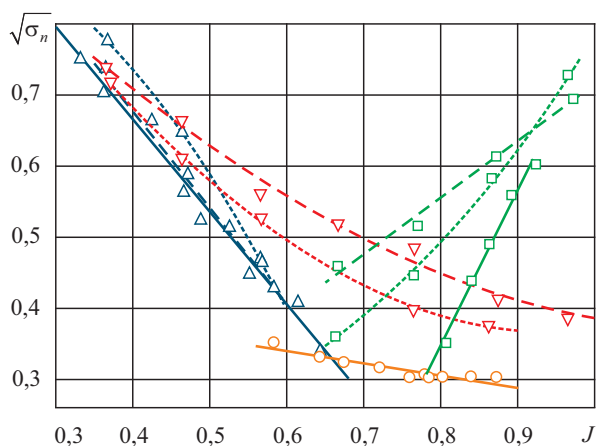


Рис. 6. Типичное расположение кривой распределения числа кавитации в зависимости от мгновенной поступи при вращении лопасти относительно кавитационной диаграммы при проектировании винта

Fig. 6. Typical position of cavitation number distribution curve versus instantaneous advance ratio as the blade rotates (with respect to the cavitation bucket in the process of propeller design)



- без шероховатости
- - - с шероховатостью $\mu = 3$ мкм
- · - с шероховатостью $\mu = 30$ мкм
- 1 – концевой вихрь с засасывающей стороны
- 2 – пленочная кавитация с засасывающей стороны
- 3 – пузырьчатая кавитация
- 4 – пленочная кавитация с нагнетающей стороны

Рис. 7. Влияние шероховатости вблизи входящей кромки на кавитационную диаграмму ледового винта

Fig. 7. Effect of roughness near the leading edge upon cavitation bucket of ice-class propeller

кавитации на спецификационном режиме, а также измеряются пульсации давления на корпусе от работы винта. В этом случае шероховатость помогает «приблизить» картину кавитации на модели к результатам натурных наблюдений за гребными винтами. Другими словами, перед российскими и зарубежными исследователями стояли несколько разные задачи и, соответственно, использовались разные методики, причем если для гидродинамических неледовых винтовых профилей результаты испытаний коррелировались, для ледовых профилей, особенно при больших углах атаки лопастей (большой неоднородности поля скоростей), эти методики стали давать существенно разные результаты.

Для того чтобы прогнозировать не только момент начала кавитации, но и картину развитой кавитации, в работе [15] было предложено дополнительно к отечественной методике кавитационных испытаний в свободной воде проводить аналогичные испытания по определению кавитации за шероховатостью, а также определять картины развитой кавитации в режиме, соответствующем полному ходу судна. Поведение кривой начала кавитации за шероховатостью сопоставлено с кавитационной диаграммой гладкой модели на рис. 7. На рисунке приводится картина кавитации, полученная при наличии шероховатости на модели и без нее на поступи, соответствующей наибольшей опасности появления кавитации на судне (в подторможенной зоне в верхнем положении лопасти «12 часов»). Как видно, шероховатость существенно влияет на характеристики кавитации на модели.

В работе [7] предложен метод совершенствования профилей гребных винтов, когда в качестве дополнительного критерия проверки кавитационных качеств лопастей вводится, наряду с кавитацией гладкой модели, параметр «кавитация за шероховатостью», характеризующий зависимость начала такой кавитации от поступи (аналог левой ветви традиционной кавитационной диаграммы). Исследования показали, что в данном случае добиться улучшения по этому дополнительному параметру можно, только проводя компьютерную оптимизацию профилей лопасти на каждом радиусе, снижая углы натекания на носик профиля. Эта идея была предложена в 80-х гг. XX века К.В. Александровым и Е.Я. Семионичевой [12], однако они могли выполнять такую оптимизацию только с использованием доступных тогда упрощенных вихревых и потенциальных методов.

В предлагаемой в [7] методике были задействованы самые современные методы расчета: для определения углов атаки лопастей винта использовалась программа SPG, разработанная А.Ш. Ачкинадзе и В.И. Красильниковым при содействии КГНЦ [10, 11], для расчета вязкого обтекания профилей применялся современный пакет программ STAR-CCM+ фирмы CD-Adapco.

В результате было получено новое семейство профилей для различных радиусов винта, спроектированное для данного судна в заданном поле скоростей. Изменение левой ветви кавитационной диаграммы винта «за шероховатостью» представлено на рис. 8.

Следует отметить, что в отличие от традиционных винтов полученная профилировка не является единой не только по распределению толщины, но и по распределению кривизны вдоль радиуса. Введение нового параметра контроля – кавитационной диаграммы за шероховатостью – вызвало изменение философии проектирования гребного винта с последующей специальной работой по сглаживанию поверхности лопасти из-за распределения кривизны, которое для каждого проекта гребного винта на каждом радиусе уникально и основано на режимах работы гребного винта за корпусом судна в неоднородном потоке.

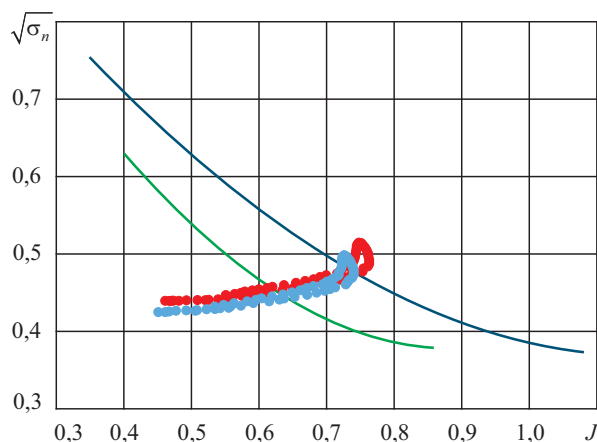
Заклучение

Conclusion

Развитие крупнотоннажных транспортных судов арктического плавания выдвинуло новые требования к их движителям. Как проектант гребных винтов Крыловский центр проводит постоянные исследования, направленные на совершенствование технологий и технических решений, применяемых при создании гребных винтов высоких ледовых классов.

Основными направлениями работы в последние годы были обеспечение прочности, повышение КПД и борьба с кавитацией на ледовых гребных винтах как в режимах работы во льдах (на швартовом и близком к нему режимах), так и на транзитных режимах движения судна в открытой воде.

Полученные результаты и технологии обеспечивают выполнение новых требований к гребным винтам и сохранение конкурентоспособности и коммерческой привлекательности разработанных в КГНЦ гребных винтов высоких ледовых классов.



Исходный гребной винт:

— пленочная кавитация с засасывающей стороны

Модифицированный гребной винт:

— пленочная кавитация с засасывающей стороны

Рис. 8. Сопоставление кавитационных диаграмм возникновения «кавитации за шероховатостью» для исходного и модифицированного винтов и диапазон изменения чисел кавитации при работе лопасти в неоднородном потоке

Fig. 8. Comparison of cavitation buckets: inception of “cavitation behind roughness” for initial and modified propeller and variation range of cavitation numbers during blade operation in non-uniform flow

Библиографический список

1. Гориков А.С., Русецкий А.А., Борусевич В.О. Кавитационные трубы. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2007.
2. Пустошный А.В. Проблемы ходкости транспортных судов. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр, 2016.
3. Андришин А.В. Теория взаимодействия гребного винта со льдом. Обеспечение эксплуатационной прочности элементов пропульсивного комплекса судов ледового плавания и ледоколов. Дис. ... д.т.н. СПб.: СПбГМТУ, 2007. 254 с.
4. Багаев Д.В., Егоров С.В., Лобачев М.П., Рудниченко А.А., Таранов А.Е. Валидация технологии численного моделирования кавитационных течений // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 4(382). С. 46–56.
5. Борусевич В.О., Каневский Г.И., Капранцев С.В., Клубничкин А.М., Лобачев М.П. Развитие методов прогнозирования ходовых качеств транспортных судов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 4(382). С. 21–28.

6. Дарчиев Г.К., Пустошный А.В., Фролова И.Г., Орлов П.М. Анализ влияния шероховатости входящей кромки профилей на структуру потока // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 1(383). С. 60–66.
7. Дарчиев Г.К., Пустошный А.В. Особенности технологии проектирования гребных винтов транспортных судов ледового плавания // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4(42).
8. Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Лобачев М.П., Рудниченко А.А. Разработка методики определения запаса гребных винтов ледоколов на развитую кавитацию // Труды Крыловского государственного научного центра. Вып. 2(384). 2018. С. 49–60.
9. Пустошный А.В., Сазонов К.Е. Проблемы, связанные с увеличением скорости круглогодичной работы крупнотоннажных транспортных судов в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2017. № 3(27). С. 103–110.
10. Achkinadze A.S., Berg A., Krasilnikov V.I., Stepanov I.E. Numerical and experimental verification of the SPA/QSPA-POD velocity-based BEM program for steady and quasi-steady analysis of the podded propellers // Proceedings of SP'2001 Conference (Laurentiev's Lectures). St. Petersburg, Russia, June 19–21, 2001.
11. Achkinadze A.Sh., Krasilnikov V.I., Berg A., Stepanov I.E. Numerical analysis of podded and steering systems using a velocity based source boundary element method with modified trailing edge // Proceeding of Propeller / Shafting'2003 Symposium. Virginia Beach, VA, USA, 17–18 September, 2003. P. 1–22.
12. Alexandrov K., Semionicheva E. Improvement of cavitating and vibroacoustic characteristics of blade hydraulic apparatus by optimization of the blades cylindrical section // Proc. of ISC'94. St. Petersburg, 1994. P. 1–7.
13. Backstrom M., Juumma K., Wilkman G. New icebreaking tanker concept for the Arctic (DAT) // Proceeding of POAK 95. Murmansk, Russia, 1995. P. 62–71.
14. Hingley R., Tustin R. Method and approaches for the classification of the ship design for Stern first operation in Ice // Lloyd's paper ICETECH-08-113-RF.
15. Pustoshny A.V., Darchiev G.K., Frolova .G. The problem of propeller design for high ice class transportation ships // Proceedings of the fifth international symposium on marine propulsors, SMP'17. V. 3. Espoo, Finland, 12–15 June, 2017. P. 390–397.
16. Pustoshny A.V., Vasiljev N.V., Shaposhnikov V.M. Some aspects of regulation for propulsors of ice-class ships // Arctic Shipping Forum. Helsinki, 2014. Electronic Publication.
17. Правила постройки и классификации судов. Т. 2. Ч. 6. СПб.: РМРС, 2011. С. 35–40.
18. Правила постройки и классификации судов. Т. 3. Ч. 1. СПб.: РМРС, 2011. С. 16–26.
19. Сборник нормативно-методических материалов. Книга 12. СПб.: РМРС, 2002.
20. Сборник нормативно-методических материалов. Книга 20. СПб.: РМРС, 2010.

References

1. Gorshkov A., Rusetsky A., Borusevich V. Cavitation tunnels. St. Petersburg, Krylov Shipbuilding Research Institute, 2007 (in Russian).
2. Pustoshny A. Propulsion performance of carrier ships. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2016 (in Russian).
3. Andryushin A. Theory of propeller interaction with ice. Ensuring operational strength of propulsion system elements for ice-going ships and icebreakers. Doctoral Theses. St. Petersburg State Marine Technical University, 2007. 254 pp. (in Russian).
4. Bagaev D., Yegorov S., Lobachev M., Rudnichenko A., Taranov A. Validation of numerical simulation technology for cavitating flows // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2016. Issue 4(382). P. 46–56 (in Russian).
5. Borusevich V., Kanevsky G., Kaprantsev S., Klubnichkin A., Lobachev M. Developing prediction methods for propulsion performance of carrier ships // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018. Issue 4(382). P. 21–28 (in Russian).
6. Darchiev G., Pustoshny A., Frolova I., Orlov P. Leading edge roughness effect of blade profiles upon flow structure // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018. Issue 1(383). P. 60–66 (in Russian).
7. Darchiev G., Pustoshny A. Peculiarities of propeller design for ice-going carrier ships // Marine Intellectual Technologies. 2018. No. 4(42) (in Russian).
8. Kanevsky G., Klubnichkin A., Lobachev M., Rudnichenko A. Developing the procedure for determination of second-stage cavitation margin for icebreaker propellers // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018. Issue 2(384). P. 49–60 (in Russian).
9. Pustoshny A., Sazonov K. Issues related to raising the speeds of heavy-tonnage cargo vessels during year-round Arctic operations // Arctic: Ecology and Economy. 2017. No. 3(27). P. 103–110 (in Russian).
10. Achkinadze A.S., Berg A., Krasilnikov V.I., Stepanov I.E. Numerical and experimental verification of the SPA/QSPA-POD velocity-based BEM program for steady and quasi-steady analysis of the podded

- propellers // Proceedings of SP'2001 Conference (Lavrentiev's Lectures). St. Petersburg, Russia, June 19–21, 2001.
11. *Achkinadze A.Sh., Krasilnikov V.I., Berg A., Stepanov I.E.* Numerical analysis of podded and steering systems using a velocity based source boundary element method with modified trailing edge // Proceeding of Propeller / Shafting'2003 Symposium. Virginia Beach, VA, USA, 17–18 September, 2003. P. 1–22.
 12. *Alexandrov K., Semionicheva E.* Improvement of cavitating and vibroacoustic characteristics of blade hydraulic apparatus by optimization of the blades cylindrical section // Proc. of ISC'94. St. Petersburg, 1994. P. 1–7.
 13. *Backstrom M., Juumma K., Wilkman G.* New icebreaking tanker concept for the Arctic (DAT) // Proceeding of POAK 95. Murmansk, Russia, 1995. P. 62–71.
 14. *Hingley R., Tustin R.* Method and approaches for the classification of the ship design for Stern first operation in Ice // Lloyd's paper ICETECH-08-113-RF.
 15. *Pustoshny A.V., Darchiev G.K., Frolova .G.* The problem of propeller design for high ice class transportation ships // Proceedings of the fifth international symposium on marine propulsors, SMP'17. V. 3. Espoo, Finland, 12–15 June, 2017. P. 390–397.
 16. *Pustoshny A.V., Vasiljev N.V., Shaposhnikov V.M.* Some aspects of regulation for propulsors of ice-class ships // Arctic Shipping Forum. Helsinki, 2014. Electronic Publication.
 17. Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Vol. 2, Part 6. St. Petersburg, RS, 2011. P. 35–40 (*in Russian*).
 18. Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Vol. 3, Part 1. St. Petersburg, RS, 2011. P. 16–26 (*in Russian*).
 19. Compendium of regulatory and methodical materials. Book 12. St. Petersburg, RS, 2002 (*in Russian*).
 20. Compendium of regulatory and methodical documents. Book 20. St. Petersburg, RS, 2010 (*in Russian*).

Сведения об авторах

Пустошный Александр Владимирович, д.т.н., член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник – консультант ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: +7 (921) 230-30-16. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Дарчиев Георгий Константинович, инженер 2 категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: +7 (812) 415-47-62. E-mail: georgdarchiev@gmail.com.

Фролова Ирина Геннадиевна, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: +7 (921) 230-30-16. E-mail: irina.frolova@inbox.ru.

About the authors

Alexander V. Pustoshny, Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Chief Researcher – Advisor, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (921) 230-30-16. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Georgy K. Darchiev, 2nd Category Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-62. E-mail: georgdarchiev@gmail.com.

Irina G. Frolova, Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (921) 230-30-16. E-mail: irina.frolova@inbox.ru.

Поступила / Received: 30.10.18
Принята в печать / Accepted: 01.02.19
© Коллектив авторов, 2019