Проектирование и конструкция судов

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-5>
УДК 629.5.035.5

М.В. Китаев, В.В. Новиков, Г.П. Турмов

КИТАЕВ МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ – к.т.н., доцент,
SPIN: 9464-6580, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5345-6333>,
ResearcherID: S-3554-2018, ScopusID: 16024898400, e-mail: kitaev.mv@dvfu.ru
НОВИКОВ ВАЛЕРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – к.т.н., доцент,
SPIN: 7257-7822; ScopusID 5641710410, e-mail: leka1551@rambler.ru
ТУРМОВ ГЕННАДИЙ ПЕТРОВИЧ – д.т.н., профессор, e-mail: turmov@yandex.ru
Кафедра кораблестроения и океанотехники Инженерной школы
Дальневосточный федеральный университет
Владивосток, Россия

Особенности проектирования гребных винтов ледоколов и судов ледового плавания

Аннотация: Представлены обобщенные результаты доковых осмотров судов Дальневосточного морского бассейна. Приведены примеры и выполнен анализ характерных повреждений гребных винтов ледоколов и судов ледового плавания, а также условий, при которых они были получены. Рассмотрены требования Российского морского регистра судоходства (РС) к проектированию ледовых гребных винтов, характеристика возможных нагрузок на их лопасти. Приведен пример расчета усталостной прочности винтов ледокола с учетом рекомендаций РС и Шведско-финских правил для судов ледового плавания (Finnish-Swedish Ice Class Rules).

Ключевые слова: Дальневосточный морской бассейн, результаты доковых осмотров, гребные винты, повреждаемость, суда ледового плавания.

Введение

Освоение ресурсов Арктики и континентального шельфа арктических морей, осуществление круглогодичной навигации по Северному морскому пути (СМП) требует развитой транспортно-логистической инфраструктуры, для создания которой необходимо обеспечить перевозку миллионов тонн различных грузов. Реализация проектов такого масштаба возможна только при наличии специального транспортного и ледокольного флота. Так, использование сверхмощных атомных ледоколов нового поколения должно обеспечить круглогодичную навигацию по Северному морскому пути, а также проводку крупнотоннажных судов и лидерование караванов с экономически эффективной скоростью, характерной для транспортных судов, что значительно повысит конкурентоспособность указанного маршрута [5].

Дальневосточный капитан В.И. Абоносимов отмечает, что «...при проводке судов по Северному морскому пути ледовые условия могут быть особенно тяжелыми: при средних ледовых условиях на 60% восточной части СМП (при равенстве среднемесячных температур воздуха для отдельных районов) в зимне-весенний период толщина льда будет более 2 м, на 10% – более 3 м, в том числе на 4% – более 4 м. Тогда можно ожидать, что на 97% пути (тяжелые годы) лед будет толщиной более 2 м. Из них на 15% – более 3 м, в том числе на 5% – более 4 м» [1].

Подобная оценка условий эксплуатации говорит о том, что для круглогодичной навигации на востоке СМП необходимы ледоколы, способные преодолевать трехметровый лед, а ледокольные суда получали бы по возможности меньше повреждений при ледокольной проводке [10]. Это обстоятельство требует особого внимания к проблеме оценки фактических ледовых нагрузок на судовые конструкции и движительные комплексы судов, эксплуатируемых в сложных ледовых условиях.

Плавание в тяжелых ледовых условиях, на значительном удалении от баз снабжения и трудности проведения спасательных операций в море в аварийных случаях предъявляют повышенные требования к надежности элементов судна, обеспечивающих его движение. Существующий опыт говорит о том, что проблема повреждаемости гребных винтов ледоколов и судов ледового плавания так же остра, как и корпусных конструкций [2, 4, 6, 9–11]. Исходя из этого, при проектировании к гребным винтам ледоколов и судов ледового плавания предъявляют следующие основные требования:

- гребные винты должны обладать повышенной прочностью;
- должны обладать высокими гидродинамическими характеристиками на переднем и заднем ходу;
- соединение фланца лопасти винта со ступицей должно иметь простую, но надежную конструкцию.

Цель настоящего исследования – выявление особенностей проектирования гребных винтов ледоколов и судов ледового плавания для повышения их эксплуатационной надежности.

Прежде всего нам необходимо рассмотреть основные проблемы, возникающие при эксплуатации движительных комплексов таких судов. Для этого предлагается проанализировать результаты доковых осмотров судов Дальневосточного морского бассейна, установить характерные ледовые повреждения винтов и условий их возникновения. Далее необходимо рассмотреть и проанализировать требования основных нормативных документов, касающиеся вопросов расчетного проектирования гребных винтов ледоколов и судов ледового плавания и регламентирующих особенности определения их характеристик.

Повреждаемость судов при эксплуатации в ледовых условиях

Опыт эксплуатации судов в тяжелых ледовых условиях свидетельствует об их систематической повреждаемости. Инженерами-кораблестроителями постоянно ведутся исследования по учету и анализу повреждений судов, эксплуатируемых в сложной ледовой обстановке [3, 7, 12, 13 и др.]. Анализ, а также систематизация практического опыта и условий эксплуатации ледоколов и судов ледового плавания позволяют обобщить и выделить следующие основные виды повреждений.

- Повреждения носового района корпуса – форштевня, форпика и носовой части корпуса до цилиндрической вставки. Перечисленные повреждения главным образом возникают вследствие удара носовой оконечности судна о лед.

- Остаточные деформации промежуточных и основных шпангоутов, стрингеров и наружной обшивки (вмятины, бухтины, гофрировка). При этом глубина вмятин, вызванных взаимодействием судна со льдом, может составлять от 10 до 100 мм.

- Трещины и разрывы наружной обшивки в зоне глубоких вмятин, представляющие опасность не только с точки зрения непроницаемости, но и прочности корпуса. Трещины и разрывы обшивки, как правило, наблюдаются у судов в плохом техническом состоянии в местах соединения листов обшивки и шпангоутов ниже уровня действующей ватерлинии. Причиной разрывов часто является повышенный износ обшивки. При этом для отечественных судов выявлены следующие закономерности [3]: повреждаемость «старых судов» (постройки 1960–1970-х годов) носит интенсивный характер, имеет место значительный объем гофрировки обшивки, вмятины распространяются на значительную длину (до 10 шпаций); у

судов, строящихся с конца 1970-х годов отмечается эффект локализации повреждений, проявляющийся в уменьшении длин вмятин в наборе, исключении механизмов пластического деформирования перекрытия в целом, переходе от явлений гофрировки наружной обшивки к механизмам образования отдельных бухтин (протяженность вмятин 2–4 шпации).

- Интенсивный износ защитного покрытия и отдельных листов наружной обшивки в районе переменных ватерлиний и ледового пояса.

- Повреждение лопастей гребного винта, дейдвудного вала, руля, привода рулевой машины, подруливающего устройства. Самой распространенной причиной указанных повреждений является движение судна задним ходом во льду или маневрирование в ледовых условиях.

- Отказ главного двигателя из-за тяжелых ледовых условий при его недостаточной мощности, т.е. при работе на предельных режимах нагрузки.

Следует отметить, что благодаря накопленному опыту эксплуатационников и проектантов в большинстве случаев ледовые повреждения не сопровождаются тяжелыми аварийными последствиями, а их устранение, как правило, происходит при плановом доковом ремонте судна.

С учетом данных [12, 13], характеризующих особенности зимней навигации в Балтийском море, на рис. 1 представлены диаграммы, отражающие статистику повреждаемости судов, эксплуатируемых в сложных ледовых условиях, а также навигационные условия, при которых наблюдались аварийные ситуации.

Рис. 1. Анализ условий плавания, при которых наблюдались повреждения рассматриваемых судов (а); виды повреждений (б) [13].

Результаты статистической обработки повреждений отчетливо указывают на необходимость повышения надежности корпусных конструкций и прочности гребных винтов.

Аналогичные исследования проводились на Дальнем Востоке России [7, 10], где эксплуатируются все типы судов, входящих в состав морского и речного флотов: ледоколы (линейные и портовые), сухогрузы, лесовозы, танкеры, рефрижераторы, паромы, плавучие базы и заводы, рыбодобывающие и обрабатывающие, научно-исследовательские и др.

Так, линейные ледоколы типа «Москва» и «Ермак» обеспечивали проводку судов в восточном секторе Арктики, в порты Охотского моря (Нагаево и Магадан) и о. Сахалин (порт Москальво), к полярным станциям на островах, побережье и льдинах в Северном Ледовитом океане. В последние годы они использовались для выполнения туристических круизов и спасательных работ с аварийными судами, для обеспечения работы полярных станций в Северном Ледовитом океане и при спасении судов в Антарктиде.

Сухогрузные суда типа «Амгуема» осуществляли доставку грузов в районы Арктики, обеспечивали работу дрейфующих станций, пунктов на островах Северного Ледовитого океана и в Антарктиде. Во льдах они двигались за ледоколом в составе каравана или самостоятельно.

Сухогрузные суда типа «Повенец», «Пионер» и «Андижан» выполняли доставку грузов в Арктику, порты Магадан и Петропавловск-Камчатский, порты Вьетнама, Кампучии, Индии, Японии и т.д.

Сухогрузные суда типа «Пула», «Омск» и «Выборг» осуществляли перевозку грузов между портами Владивосток, Находка, Новороссийск, портами Канады, Японии, Кубы, Австралии и т.д. Плавание осуществляли по чистой воде с крайне редкими случаями кратковременного захода во льды.

Сухогрузные суда типа «Юный партизан» и «Росток» доставляли грузы из портов Находка, Владивосток в различные порты мира, а также из портов Японии в Петропавловск-Камчатский.

Лесовозы перевозили круглый и пиленый лес в районы Арктики и Камчатки, а также в Магадан, но в основном в порты Японии.

Рыболовные суда обеспечивали лов, обработку и доставку на плавучие базы и заводы или береговые холодильники рыбы, продуктов ее переработки и морепродуктов в Охотском, Беринговом и Японском морях, а также в южных районах Мирового океана (Индийский океан, побережья Австралии, Филиппин, Центральной и Южной Америки).

Таким образом, можно заключить, что суда, эксплуатируемые на Дальнем Востоке, больше половины ходового времени осуществляли плавание в тяжелых льдах или в штормовую погоду при пониженных температурах воздуха, швартовались друг к другу в открытом море или проходили по мелководью. Это сказывалось на их техническом состоянии и объемах ремонтных работ. Так, в период с 1963 по 1991 г. включительно В.Т. Луценко собрал и обработал большой массив материалов – актов доковых освидетельствований судов: 3869 – по корпусным конструкциям и 5149 – по гребным валам, винтам и дейдвудным устройствам. Максимальное количество анализируемых судов в отдельно взятый год составляло до 236 по корпусным конструкциям и до 287 – по гребным винтам, валам и дейдвудным устройствам [7]. В частности, по рассмотренным этим автором докованиям на первом месте по повреждаемости находятся корпусные конструкции – с учетом трещин, пробоин и вмятин (38%), далее следуют гребные винты с трещинами, обломами, обрывом, загибом, вырывами и забоинами в лопастях (23,9%), набор дейдвудных втулок (5,8%) и гребные валы с облицовками (4,7%) [там же].

В таблицах 1 и 2 систематизированы данные о повреждениях корпусных конструкций и движительных комплексов судов для отдельных районов Дальневосточного морского бассейна.

Таблица 1

**Повреждения корпусных конструкций судов отдельных районов Дальнего Востока
и в целом по бассейну [7]**

Порт приписки	Число судов	Постановки в док: повреждения					
		всего	трещины	пробоины	устранение вмятин	вмятины	
						всего	с трещинами
Владивосток	300	1701	173	58	458	1733	61
Находка	175	1132	151	31	273	944	33
Петропавловск- Камчатский	166	807	70	17	89	363	35
Холмск	98	229	54	12	82	208	6
По бассейну в целом	739	3869	448	118	902	3248	135

У ледокольных судов после навигации в лопастях гребных винтов могут появляться трещины и вырывы кромок. Сами лопасти при ударе о лед загибаются или обламываются. Как видно из вышеприведенных таблиц, чаще всего происходят загибы лопастей (440 шт.) и вырывы кромок (357 шт.).

Таблица 2

Повреждения элементов движительных комплексов судов отдельных районов Дальнего Востока и в целом по бассейну [7]

Порт приписки	Число судов	Постановки в док	Повреждения					
			винты				валы и облицовки с трещинами	дейдвуд
			трещины	обломы (утери) лопастей	Загибы лопастей	вырывы (забои) кромок		
Владивосток	377	2878	197	90	165	218	145	164
Находка	172	1219	51	25	160	72	37	70
Петропавловск-Камчатский	177	1025	81	59	115	67	60	66
По бассейну в целом	726	5149	329	174	440	357	242	300

По результатам доковых осмотров выявлено большое количество трещин в винтах, в основном усталостного характера (329 шт.), что свидетельствует о необходимости выполнения расчетов как предельной, так и усталостной прочности при переменных нагрузках и более широкого их внедрения в практику проектирования.

Приведенные выше данные показывают, что характер повреждений гребных винтов и их относительное количество с течением времени остаются такими же (по объему и видам), как и у корпусных конструкций движительных комплексов ледоколов и судов ледового плавания.

Примеры эксплуатационных повреждений гребных винтов

Как правило, гребные винты повреждаются при ударе о льдину, а в случае отсутствия крутящего момента на валу (при инерционном движении судна, сопровождаемого разворотом кормы) – от удара о кромку канала или льдину. Поэтому гребные винты судов ледового плавания и ледоколов изготавливают из стали, а не из хрупких материалов (чугуна или бронзы). Действительно, опыт эксплуатации показал, что у чугунных винтов часто отламываются лопасти, а у бронзовых и стальных они, как правило, загибаются. Примеры характерных повреждений показаны на рис. 2.

В обоих случаях полученные повреждения приводят к ухудшению пропульсивных качеств судна: вибрации, биению или полной потери скорости хода. На судах со стальными гребными винтами чаще наблюдаются поломки дейдвудного вала, что возможно только в случае, когда его прочность уступает прочности гребного винта или вал имеет конструктивный дефект. Ввиду этого практикой эксплуатации судов в ледовых условиях выработаны рекомендации, согласно которым на судне всегда должны храниться запасной дейдвудный вал, гребной винт или запасные съемные лопасти [1].

Одним из способов снижения рисков повреждения гребных винтов в реальных условиях эксплуатации является применение ледовых профилей и повышение запаса прочности за счет увеличения толщин лопастных сечений (рис. 3).

Наряду с увеличенной максимальной толщиной профиля Правилами Регистра [8] регламентируются и толщины на расстоянии 5% хорды входящей и выходящей кромок сечения лопасти. Такой подход приводит, с одной стороны, к реальному расширению диапазонов и режимов безопасной работы судна, с другой – к снижению гидродинамических и кавитационных характеристик работы винта на чистой воде. При этом необходимо учитывать тот факт, что для ледоколов и судов ледового плавания высокая эффективность работы гребного винта особенно важна, и ее необходимо оценивать при движении как передним, так и задним ходом (кормой вперед), так как судам приходится «работать» набегам и осуществлять маневрирование во льдах [1].

Рис. 2. Повреждения гребных винтов:
а, б – облом лопастей на судах типа БМРТ; в – отрыв лопасти на ледоколе «Ленинград»;
г – облом лопасти на ледоколе «Москва» [7].

Рис. 3. Профили лопастей сечений гребных винтов ледоколов:
а – авиационный (ледокол «Капитан Белоусов»); б – сегмент (ледокол «Сибирь»);
в – пластинчатый (ледокол «Сибиряков»); г – двояковыпуклый с плоским сечением
в средней части (ледокол «Красин») [7].

Таким образом, если прочность гребного винта недостаточна и не соответствует реальным условиям эксплуатации судна, то велика вероятность его повреждения или поломки. Если же прочность и масса избыточны, то это приводит к снижению пропульсивных качеств и экономичности судна при движении на чистой воде.

На рис. 4 показаны типовые повреждения гребных винтов судов ледовых классов (Ice1–Ice3) из никель-алюминиевой бронзы марки ALBC3.

Анализ опыта эксплуатации судов ледового плавания и характера полученных повреждений позволяет сделать следующие выводы:

- поломки гребных винтов обусловлены недостаточной статической и усталостной прочностью;
- расположение гребных винтов влияет на частоту поломок (бортовые винты ломаются чаще);
- на практике возможны нерасчетные режимы взаимодействия винта со льдом, что повышает риски повреждений и поломки лопастей.

Рис. 4. Типовые повреждения лопастей гребных винтов после плавания во льдах [7].

Особенности проектирования гребных винтов судов ледового плавания

Существующие методы расчетного проектирования гребных винтов обеспечивают необходимый запас прочности на основных (расчетных) режимах работы судна. В свою очередь эксплуатационные ограничения направлены на недопустимость превышения расчетных нагрузок, принятых при проектировании гребных винтов. На практике возможны другие (нерасчетные) режимы взаимодействия винта со льдом ввиду неопределенности действующих ледовых нагрузок и физико-механических характеристик льда, что приводит к повреждению винтов. Таким образом, при проектировании на сегодняшний день не представляется возможным предусмотреть все возможные случаи взаимодействия винта со льдом.

В последние годы проведен ряд экспериментальных и теоретических исследований, посвященных совершенствованию расчетных методов проектирования гребных винтов ледоколов и судов ледового плавания [6, 9, 11 и др.], корректировке и совершенствованию соответствующих нормативных документов.

Правила РМРС кроме рекомендаций по усилению корпуса для судов ледовых классов устанавливают требования к мощности главного двигателя, диаметру валопровода и толщине лопастей гребного винта. Так, для гребных винтов судов ледового плавания толщина лопасти гребного винта проверяется в расчетном корневом сечении и в сечении на радиусе $r = 0,6R$, где R – радиус винта, а также толщины концевых, входящих и выходящих кромок [8]. Толщины зависят от ледового класса судна, материала винта, его геометрических характеристик и мощности главного двигателя. Приведенные в Правилах формулы ориентированы в большей степени на воздействие статических нагрузок.

Применение современных программных комплексов для расчета глобальных и локальных ледовых нагрузок дает возможность моделировать реальные динамические ледовые нагрузки льда и обоснованно выбирать геометрические характеристики и толщины лопастных сечений винтов. Подобные расчеты в настоящее время активно применяются и в отечественной, и в международной практике, например при моделировании работы винта в наиболее опасном режиме – фрезеровании.

Так, согласно требованиям [12] для каждого ледового класса для реверсируемых винтов фиксированного шага рассматривается пять вариантов распределенной нагрузки (см. табл. 3) (аналогичные случаи нагрузки имеются и для винтов в направляющей насадке). В соответствии с циркулярным письмом Российского морского регистра судоходства № 312-11-812ц от 15.04.2015 г. указанная расчетная методика в полном объеме принята в качестве рекомендуемого судовладельцам варианта, позволяющего рассматривать соответствие проектируемых гребных винтов судов ледовых категорий классификации, предложенной Полярным кодексом.

Согласно указанному документу, в расчетах учитываются следующие нагрузки:

- максимальная, возникающая в течение срока службы судна сила, действующая на лопасть в направлении, противоположном направлению движения судна, в результате взаимодействия гребного винта и льда и включающая гидродинамические нагрузки; направление силы перпендикулярно линии хорды на радиусе;
- максимальный скручивающий лопасть момент относительно оси ее поворота (относительно крепления), возникающий в течение срока службы судна, в результате взаимодействия гребного винта и льда и включающий гидродинамические нагрузки;
- максимальный упор на гребной винт (суммарный упор, действующий через все лопасти гребного винта) в течение срока службы судна в результате взаимодействия гребного винта и льда; упор действует как вдоль оси гребного вала в сторону, противоположную гидродинамическому упору, так и в сторону его действия;
- максимальный крутящий момент на гребном винте при взаимодействии гребного винта со льдом и включающий гидродинамические нагрузки;
- сила поломки лопасти (возникновение пластической деформации).

Таблица 3

Случаи нагрузок на лопасть гребного винта [8]

Случай нагрузки	Сила	Площадь нагрузки	Винт с правым вращением лопасти
1	F_b	Равномерное давление на засасывающую часть лопасти на участке от $0,6R$ до конца лопасти и от входящей кромки лопасти до величины, равной $0,2$ длины хорды
2	50% от F_b	Равномерное давление на периферийную часть лопасти выше $0,9R$ со стороны засасывающей поверхности
3	F_f	Равномерное давление на нагнетающую поверхность лопасти на участке от $0,6R$ до конца лопасти и от передней кромки лопасти до величины, равной $0,2$ длины хорды
4	50% от F_f	Равномерное давление на периферийную часть лопасти выше $0,9R$ со стороны нагнетающей поверхности
5	60% от F_f или F_b , в зависимости от того, что больше	Равномерное давление на нагнетающую поверхность лопасти на участке от $0,6R$ до конца лопасти и от задней кромки лопасти до величины, равной $0,2$ длины хорды

Примечание: F_b – максимальная за срок службы судна сила, возникающая при фрезеровании льдины винтом, вращающимся в направлении переднего хода, и изгибающая лопасть в направлении, противоположном направлению движения судна.

F_f – максимальная за срок службы судна сила, возникающая при фрезеровании льдины винтом, вращающимся в направлении переднего хода, и изгибающая лопасть в направлении движения судна.

F_b и F_f имеют различное происхождение в результате взаимодействия гребного винта и льда и поэтому не наблюдаются одновременно. По этой причине они применяются по отношению к лопасти по отдельности.

Таким образом, нагрузки на гребной винт определяются исходя из полного срока службы судна при нормальных условиях эксплуатации, включая напряжения, возникающие при изменении направления вращения гребных винтов фиксированного шага. При расчете нагрузок учитываются особенности ледового плавания судов, в частности эксплуатация в канале за ледоколом и в ровном льду, преодолеваемом при работе набегам, и др. При этом выполняется оценка возможных, действующих в течение срока службы судна, максимальных давлений, сил и моментов на гребной винт, рассчитываются их критерии приемлемости и по напряжениям, и по усталостной прочности.

Применение расчетных методик, учитывающих весь комплекс возможных нагрузок и условия эксплуатации, дает возможность при проектировании ледовых гребных винтов повысить их работоспособность и надежность.

Пример расчета усталостной прочности лопасти гребного винта

В качестве примера рассмотрим результаты расчета усталостной прочности лопасти гребного винта ледокола, основанного на оценке предполагаемых нагрузок в течение срока службы судна и кривой усталости материала лопасти. При этом рассчитывается критерий приемлемости усталостной прочности винта, определяемый с учетом вероятностных характеристик и параметров циклических нагрузок на винт (распределение Вейбулла). Приведенные в п. 10.7.5.1 [8] зависимости дают возможность при проектировании выбирать основные характеристики гребного винта из условий обеспечения его надежности. Оценка работоспособности и прочности выполнялась нами для среднего и бортовых гребных винтов ледокола, анализировались различные конструкционные материалы (см. табл. 4).

Рис. 5. Предельные силы на лопасти в зависимости от условного предела текучести материала гребного винта разных сплавов.
Здесь и далее – рисунки и таблицы авторов.

По результатам нашего расчета для винтов на рис. 5 построена диаграмма сил, при которых возможна поломка лопасти. Наиболее прочными оказались винты следующих марок: бронзовый сплав БрАЖН10-4-4 ($\sigma_{0,2} = 570$ МПа), сталь 1Х14НД ($\sigma_{0,2} = 490,3$ МПа) и сталь 10Х12НДЛ ($\sigma_{0,2} = 450,5$ МПа).

Расчетные напряжения в лопасти должны удовлетворять условию, при котором критерий приемлемости:

$$k = \frac{\sigma_{ref2}}{\sigma_{ST}} \geq 1,5,$$

где σ_{ref} – напряжения, зависящие от свойств материала; σ_{ST} – расчетные напряжения в зоне корневой части лопасти.

В табл. 4 приведены результаты нашего расчета критерия приемлемости по напряжениям для рассматриваемых материалов.

Таблица 4

Расчетные данные по критерию приемлемости для гребных винтов

Сплав				
1Х14НД	ЛМцЖ55-3-1	25Л	БрАЖН10-4-4	10Х12НДЛ
k = 1,8	k = 0,7	k = 1,0	k = 2,1	k = 1,7

Как показывает табл. 4, этому условию удовлетворяют гребные винты, изготовленные из никель-алюминиевой бронзы БрАЖН10-4-4 и стальные винты из сплавов 1Х14НД и 10Х12НДЛ. Остальные материалы по критерию приемлемости не применимы.

Характеристики усталостной прочности среднего и боковых гребных винтов ледокола по данным расчетов оказались схожими. На рис. 6 в графическом виде показана диаграмма работоспособности для среднего гребного винта при эксплуатации ледокола с ледовым полем разной толщины.

Рис. 6. Усталостная сопротивляемость среднего гребного винта при эксплуатации ледокола с ледовым полем разной толщины ($\sigma_{ср}$ – средний предел выносливости материала лопасти при 10^8 циклах напряжения до разрушения в морской воде).

Расчетный анализ выполнен для разной толщины льда, контактирующего с гребным винтом. Согласно результатам расчета, сопротивляемость гребных винтов, изготовленных из отечественной никель-алюминиевой бронзы БрАЖН10-4-4 и сталей 1Х14НД, 10Х12НДЛ, примерно в два раза выше, чем у винтов, выполненных из сплавов ЛМцЖ55-3-1 и 25Л.

Приведенный пример расчетного анализа прочности гребных винтов ледокола иллюстрирует один из возможных подходов к учету циклических нагрузок при оценке надежности и прочности гребных винтов.

Выводы

Результаты выполненного статистического анализа повреждений гребных винтов, а также существующих требований к их конструированию свидетельствуют о необходимости совершенствования существующих на данный момент расчетных методов их проектирования.

Проведенный в статье анализ показывает, что к особенностям проектирования гребных винтов ледоколов и судов ледового плавания относятся не только выбор их геометрических характеристик, определение типа и формы лопастных сечений, но и определение необходимых с позиции обеспечения уровня надежности и прочности значений относительной толщины профиля и толщин в районе входящих и выходящих кромок лопастей.

Расчеты, основанные на применении современных информационных технологий, в частности систем инженерного анализа – САЕ-систем, позволяют оценивать напряженно-деформированное состояние для различных случаев нагрузки и вариантов взаимодействия гребного винта со льдом, что дает возможность более обосновано назначать безопасные режимы эксплуатации судов в ледовых условиях, тем самым снижать риски их повреждения. Дальнейшее направление наших исследований направлено на развитие и совершенствование практико-ориентированных расчетных методов и методик проектирования гребных винтов ледоколов и судов ледового плавания.

Вклад авторов в статью: М.В. Китаев – обработка и оформление статистического материала; В.В. Новиков – расчеты; Г.П. Турмов – постановка задачи, общее руководство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абоносимов В.И. Искусство ледового плавания. Владивосток: Изд-во Приморского полиграфкомбината, 2002. 798 с.
2. Андриюшин А.В. Анализ опыта эксплуатации гребных винтов судов ледового плавания и ледоколов // Морской вестник. 2006. № 2(18). С. 98–101.
3. Апполонов Е.М. Предельная прочность арктических судов: СПб.: Крыловский гос. научный центр, 2014. 244 с.
4. Беляшов В.А., Васильев Н.В., Макаров В.В. и др. Инновационные разработки Крыловского государственного научного центра для повышения безопасности и надежности судов с винторулевыми колонками в экстремальных ледовых условиях // Арктика: экология и экономика. 2018. № 1(29). С. 92–103.
5. Кашка М.М., Смирнов А.А., Головинский С.А. и др. Перспективы развития атомного ледокольного флота // Арктика: экология и экономика. 2016. № 3(23). С. 98–107.
6. Лобанов В.А. Численные оценки ледовых качеств гребных винтов // Интернет-журнал «Науковедение». 2012. № 4(13). С. 1–15.
7. Луценко В.Т. Некоторые статистические сведения о повреждаемости элементов подводной части морских судов ДВ бассейна // Повреждения и эксплуатационная надежность судовых конструкций: тез. докл. XII науч. конф. ДВПИ. Владивосток, 1994. С. 73–77.
8. Правила классификации и постройки морских судов часть VII. Механические установки // Российский морской регистр судоходства. СПб., 2019.
9. Пустошный А.В., Дарчиев Г.К., Фролова И.Г. Развитие научной базы проектирования гребных винтов для транспортных судов ледовых классов // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2019. Т. 1, № 387. С. 7–19.
10. Турмов Г.П., Барабанов Н.В., Абоносимов В.И. Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации мощных мелкосидящих ледоколов с учетом особенностей Дальневосточного бассейна и Арктики // Тихоокеанский деловой вестник. 2001. № 3. С. 10–12.
11. Хлыстова К.Б., Андриюшин А.В., Зуев П.С. и др. Ледовые нагрузки на гребных винтах и обеспечение их прочности для судов активного ледового плавания с применением современных методов компьютерного моделирования // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2018. S-2. С. 44–52.

12. Banda V., Goerlandt F., Montewka J. Winter navigation at the Baltic Sea: an analysis of accidents occurred during winters 2002–2003 & 2009–2013. Safety and reliability: methodology and applications: proceedings of the European safety and reliability conference (ESREL 2014), Wroclaw, 14–18 September 2014, p. 83–92.
13. Samuli H., Sjöfartsverket R. Finnish Maritime Administration; Swedish Maritime Administration, 2005 Research Report. N 54. Incidents and accidents in winter navigation in the Baltic Sea, winter 2002–2003, 39 p.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 2/43

Ship Design and Construction

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-5>

Kitaev M., Novikov V., Turmov G.

MAKSIM KITAEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5345-6333>, ScopusID: 16024898400,
ResearcherID: S-3554-2018, e-mail: kitaev.mv@dvfu.ru

VALERIY NOVIKOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Scopus ID 5641710410, e-mail: Leka1551@rambler.ru

GENNADY TURMOV, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: turmov@yandex.ru
Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, School of Engineering
Far Eastern Federal University
Vladivostok, Russia

Design features of screw propellers of icebreakers and ice navigation vessels

Abstract: This paper covers summarized results of dock inspections of vessels in the Far Eastern Sea Basin. Examples of typical damages of screw propellers of icebreakers and ice navigation vessels as well as critical conditions are duly presented. Requirements of the Russian Maritime Register of Shipping (RMRS) for the design of ice propellers and parameters of active loads for their blades are fully considered. The example of fatigue strength calculation of icebreaker propeller is given subject to the requirements by RMRS and Finnish-Swedish Ice Class Rules.

Keywords: Far Eastern Basin, dock inspection, screw propellers, damages, icebreakers, ice navigation vessels.

REFERENCES

1. Abonosimov V.I. The art of ice navigation. Vladivostok, Primorsk Polygraphic Combine, 2002, 798 p.
2. Andryushin A.V. Analysis of the operational experience of the propellers of ice navigation vessels and icebreakers. *Morskoy Vestnik*. 2006(18):98–101.
3. Appolonov E.M. The ultimate strength of Arctic vessels. SPb., Krylov State Scientific Center, 2014, 244 p.
4. Belyashov V.A., Vasiliev N.V., Makarov V.V. et al. Innovative developments of the Krylov State Scientific Center to improve the safety and reliability of propeller-driven ships in extreme ice conditions. *Arctic: Ecology and Economics*. 2018(29):92–103.
5. Kashka M.M., Smirnov A.A., Golovinsky S.A. et al. Prospects for the development of the nuclear icebreaker fleet. *Arctic: Ecology and Economics*. 2016(23):98–107.
6. Lobanov V.A. Numerical estimates of the ice qualities of propellers. *Internet-journal Science of Science*. 2012(13):1–15.

7. Lutsenko V.T. Some statistical information about the damaged of underwater part elements of marine vessels of the Far East basin. Damage and operational reliability of ship structures, Abstracts. XII scientific conf. DVPI. Vladivostok, 1994, 73–77 p.
8. Rules for the classification and construction of marine vessels. Part VII, Mechanical installations. Russian Maritime Register of Shipping. SPb., 2019.
9. Pustoshny A.V., Darchiev G.K., Frolova I.G. Development of the scientific base for the design of propellers for ice-class transport vessels. Proceedings of the Krylov State Scientific Center. 2019;1(387):7–19.
10. Turmov G.P. Barabanov N.V., Abonosimov V.I. Problems of designing, building and operating powerful shallow icebreakers taking into account the characteristics of the Far Eastern basin and the Arctic. Pacific Business Herald. N. 3. Ocean and business. Vladivostok, 2001, 10–12 p.
11. Khlystova K.B., Andryushin A.V., Zuev P.S. et al. Ice loads on propellers and ensuring their strength for active ice navigation vessels using modern computer simulation methods. Proceedings of the Krylov State Scientific Center. 2018(S-2):44–52.
12. Banda V., Goerlandt F., Montewka J. Winter navigation at the Baltic Sea: an analysis of accidents occurred during winters 2002–2003 & 2009–2013. Safety and reliability: methodology and applications. Proceedings of the European safety and reliability conference (ESREL 2014), Wroclaw, 14–18 Sept. 2014, p. 83–92.
13. Samuli H., Sjöfartsverket R. Finnish Maritime Administration; Swedish Maritime Administration, 2005 Research Report. N 54. Incidents and accidents in winter navigation in the Baltic Sea, winter 2002–2003, 39 p.