Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-1>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/36TVN115.pdf>

DOI: 10.15862/36TVN115 (<http://dx.doi.org/10.15862/36TVN115>)

УДК 659.62

Лобанов Василий Алексеевич

ФГБОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта»

Россия, Нижний Новгород¹

доцент кафедры Судовождения и безопасности судоходства

доктор технических наук, доцент

E-mail: lobbas@mail.ru

Пропульсивные качества комплекса винт-насадка во льдах

¹ 603155, Нижний Новгород, Большая Печёрская, 32-46

Аннотация. В работе с применением САЕ-технологий исследован характер работы движительно-рулевого комплекса «гребной винт – поворотная насадка» в условиях чистой воды и в тёртых льдах различной толщины и сплочённости. Показана плохая приспособленность комплекса для эксплуатации в исследованных льдах.

Произведены оценки чистого гидродинамического упора, рулевой силы и ледовых нагрузок на комплексе. По результатам статистического анализа данных численных испытаний получены кривые полезной тяги комплекса и его рулевой силы в исследованных ледовых условиях. Выявлено существенное падение этих характеристик комплекса при его работе во льдах по сравнению с условиями чистой воды.

Поставлен ряд численных экспериментов с целью проверки адекватности гипотезы о независимости ледового и гидродинамического воздействия на корпус судна и его движительно-рулевой комплекс. Для сопоставимых динамических условий, углов перекадки насадки проанализировано влияние льдов на характер и уровень гидродинамического упора и рулевой силы комплекса. Отмечены существенные расхождения пространственно-временного поведения и среднего значения этих параметров в водолеяной среде и в условиях чистой воды. Подтверждён ранее сделанный вывод о несостоятельности «гипотезы о независимости».

Ключевые слова: судно; движительно-рулевой комплекс; ледовые качества; ледовые условия; упор; рулевая сила; САЕ-системы; конечноэлементное моделирование.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Лобанов В.А. Пропульсивные качества комплекса винт-насадка во льдах // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/36TVN115.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/36TVN115

Введение

Такие важные ледовые качества судна, как ходкость и маневренность далеко не в полной мере определяются уровнем, условиями и характером взаимодействия с водоледной средой только его корпуса. Не менее значимым фактором при оценках названных характеристик следует признать пропульсивный потенциал движительно-рулевого комплекса (ДРК) теплохода в ледовых условиях.

При этом необходимо отметить, что современные полуэмпирические методики расчёта ледовой ходкости и маневренности базируются на прогнозе «чистых» ледовых нагрузок [1-4,6,8-12], априорно принимая гипотезу о независимости ледового и гидродинамического воздействия на корпус и ДРК судна. Согласно этой гипотезе гидродинамические нагрузки во льдах и на чистой воде эквивалентны при одинаковых режимах эксплуатации судна (скорости движения, частоте вращения движителей, угле перекладки рулевого комплекса). Однако данная гипотеза не подтверждена экспериментально из-за отсутствия каких-либо технических средств, реализующих раздельное измерение ледовых и гидродинамических сил на корпусе судна и элементах его ДРК.

При решении задач чисто эксплуатационного характера оценка полного ледового сопротивления корпуса судна с учётом «гипотезы независимости» вполне приемлема, так как ледовые нагрузки, как правило, многократно превосходят уровень гидродинамического воздействия. Поэтому даже приближённый учёт последнего не приведёт к значимым погрешностям в прогнозе суммарных корпусных сил. Но такой подход нельзя признать корректным при оценке пропульсивных качеств ДРК ввиду сопоставимости величин ледового и гидродинамического воздействия на него. Кроме того недопустимо игнорирование различий в характере обтекания жидкостью движителя во льдах и на чистой воде, которые, безусловно, отражаются на его тяговых параметрах.

Потребности в адекватных методах анализа тяговых характеристик судовых ДРК в ледовых условиях, по убеждению (и некоторому опыту) автора, могут быть вполне удовлетворены в рамках применения САЕ-технологий² [13]. Уже первые авторские попытки численных решений подобных проблем [5,6] показали обнадеживающие результаты. Ниже приведён разбор ещё одной серии САЕ-испытаний, посвящённых оценкам пропульсивных качеств судового комплекса «гребной винт-поворотная насадка» во льдах.

Моделирование

Последующий анализ был связан с обработкой результатов конечноэлементного моделирования нескольких десятков вариантов движения комплекса «винт-насадка» в различных динамических и ледовых условиях. Как показали натурные ледовые испытания флота, наиболее неблагоприятные эксплуатационные условия для движителей в насадках наблюдаются в сильноплочённых тёртых и зажорных льдах. Эти среды способствуют быстрому «забиванию» льдом ДРК и ощутимому снижению тяги вплоть до её полной потери. Поэтому в данной работе автор ограничил круг численных экспериментов варьированием ледовых условий в границах этих сред.

В расчётных вариантах изменялась скорость движения комплекса (0,0 – 4,0 м/с), толщина тёртых льдов (0,2 – 0,6 м), их сплочённость в районе комплекса (2-3 – 9-10 баллов).

² САЕ (англ. Computer-aided engineering) — общее название для программ и программных пакетов, предназначенных для решения различных инженерных задач: расчётов, анализа и симуляции физических процессов. Расчётная часть пакетов чаще всего основана на численных методах решения дифференциальных уравнений (см.: метод конечных элементов, метод конечных объёмов, метод конечных разностей и др.).

Модели материалов, типы и формулировки конечных элементов, алгоритмы контактного взаимодействия тел описаны в работе [5].

Пример типовой исходной модели показан на рис. 1 [составлено автором]. Расчётные характеристики комплекса обозначены на рис. 2 [составлено автором] и объяснены в табл. 1.

Рис.1. Пример исходной модели движения комплекса «винт-насадка» в тёртых льдах (1 – бассейн с водой; 2 – тёртые льды; 3 – насадка; 4 – винт)

Рис.2. Параметры комплекса «винт-насадка»

Таблица 1

Расчётные характеристики комплекса «винт-насадка»

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Величина
Диаметр входного сопла насадки	D_h	мм	2474
Диаметр выходного сопла насадки	D_t	мм	2000
Угол наклона образующей насадки	α	градус	10
Длина насадки	L_n	мм	1433
Максимальная толщина профиля насадки	T_p	мм	182
Расстояние между началом образующей лопасти винта и передней кромкой насадки	R_c	мм	533
Диаметр винта	D_p	мм	1970
**Расчётный шаг винта		мм	2110
**Угол наклона образующей лопасти		градус	7
**Количество лопастей			4
**Суммарная площадь лопастей		м ²	1,734
**Дисковое отношение			0,552
Крутящий момент на валу		кН·м	35,0

Примечания.

1. Прототипом модельного движителя явился ледовый винт танкера смешанного река-море плавания проекта 19614 [7].
2. ** – дополнительные контрольные параметры.

Полезная тяга

Оценка потерь полезной тяги комплекса «винт-насадка» в ледовых условиях потребовала предварительного моделирования его движения в чистой воде с целью определения кривой упора. В качестве примера на рис. 3 [составлено автором] приведён ряд осциллограмм упора комплекса для нескольких фиксированных скоростей хода. Результирующая кривая упора в чистой воде, полученная по итогам статистической обработки подобных осциллограмм, показана на рис. 4 [составлено автором]. При этом частота вращения гребного винта комплекса при заданном крутящем моменте на валу (табл. 1) стабилизировалась в пределах 32,5-33,0 рад/с (Рис. 5, [составлено автором]).

Рис.3. Временные зависимости упора комплекса в чистой воде для нескольких скоростей хода (кривые A-D – результаты численного моделирования; кривые E-H – сглаженные значения)

Рис. 4. Кривая упора комплекса в чистой воде

Рис. 5. Стабилизация частоты вращения винта комплекса в чистой воде

Принципиально важным преимуществом САЕ-технологий по отношению к натурным испытаниям или модельным экспериментам в рамках поставленной задачи является возможность раздельной оценки ледовых и гидродинамических нагрузок на элементы ДРК. Поэтому САЕ-моделирование, по-сути, позволяет проверить адекватность «гипотезы независимости».

Проведённые автором численные эксперименты убедительно показывают, что в общем случае упомянутая гипотеза не подтверждается. Это можно проиллюстрировать данными, приведёнными на рис. 6 [составлено автором]. Здесь отображены кривые гидродинамических

упоров исследуемого комплекса в чистой воде и тёртых льдах толщиной 0,5 м и начальной сплочённостью около 7 баллов при постоянной скорости движения ДРК равной 1,0 м/с.

Рис. 6. Сравнение гидродинамического упора комплекса в чистой воде и льдах

Анализ зависимостей демонстрирует, что в чистой воде упор комплекса при заданном ходе стабилизируется в пределах 118 кН (осциллограмма А, её сглаженное значение – кривая С, рис. 6, [составлено автором]) при частоте вращения винта 32,5 рад/с (кривая В, рис. 5, [составлено автором]). Моделирование движения комплекса с теми же параметрами в ледовых условиях обнаруживает значительную временную неустойчивость упора (осциллограмма В, её сглаженное значение – кривая D, рис. 6, [составлено автором]). Его среднее значение во льдах (прямая Е, рис. 6, [составлено автором]) падает более, чем в 1,5 раза по сравнению с чистой водой (кривая С, рис. 6, [составлено автором]).

Объяснение последнему, по убеждению автора, следует искать в различии характера обтекания жидкостью движителя во льдах и в чистой воде. В качестве подтверждения на рис. 7 [составлено автором] для сравниваемых выше вариантов показаны векторные поля распределения скоростей возмущённой жидкости при движении в ней ДРК.

а

б

Рис.7. Сравнение характера взаимодействия комплекса с водой

(а – чистая вода; б – тёртые льды)

Очевидно, что уровень турбулентности водяного потока в окрестностях комплекса в ледовых условиях (Рис. 7б [составлено автором], льды не показаны в целях сопоставимости картин) значительно превосходит этот параметр для чистой воды (Рис. 7а [составлено автором]).

Конечноэлементное моделирование наглядно иллюстрирует плохую приспособленность комплекса «винт-насадка» для работы во льдах. Так уже в разреженной ледяной среде начальной сплочённостью 6-7 баллов в районе ДРК он начинает интенсивно «забиваться» льдом (Рис. 8 [составлено автором]).

PN-COMPLEX ICE THRUST H02
Time = 0.82999

а

PN-COMPLEX ICE THRUST
Time = 2.96

б

Рис.8. Характер взаимодействия комплекса с разреженными тёртыми льдами
(а – толщина льда 0,2 м; б – толщина льда 0,5 м)

При постоянном вращающем моменте на гребном валу такие особенности взаимодействия комплекса с водоледяной средой порождают характерную неустойчивость частоты вращения винта, гидродинамического упора, ледового сопротивления и полезной тяги ДРК. На рис. 9 и 10 [составлено автором] это показано на примере движения ДРК со скоростью 1,0 м/с в тёртых льдах толщиной 0,5 м и начальной сплочённостью 7 баллов.

Рис.9. Временной характер поведения гидродинамических и ледовых нагрузок на комплексе

Рис.10. Временной характер частоты вращения винта при постоянном вращающем моменте на гребном валу

В качестве статистической точки для каждого варианта динамических и ледовых условий в последующей обработке использовалась средняя величина полезной тяги комплекса (в примере, приведённом на рис. 9 [составлено автором] – это уровень прямой G). По результатам анализа была получена серия статистических зависимостей полезной тяги

комплекса от скорости его движения, толщины тёртых льдов и их начальной сплочённости в районе ДРК.

Пример подобных кривых для толщин льда 0,2 м; 0,5 м; их сплочённости 3 балла и 7 баллов в сравнении с упором в чистой воде приведён на рис. 11 [составлено автором].

а

б

Рис. 11. Кривые полезной тяги ДРК в тёртых льдах (а – толщина льда 0,2 м; б – толщина льда 0,5 м)

Следует отметить хорошую функциональную связь величины полезной тяги комплекса от перечисленных факторов. Так описание полученного экспериментального разброса точек регрессионным полиномом третьей степени показало корреляцию выше 0,98.

Анализ кривых рис. 11 [составлено автором] показывает сильную зависимость полезной тяги ДРК от толщины и сплочённости льдов. И если первый параметр в конкретных

ледовых условиях можно считать постоянной величиной, то распределение льдов в районе ДРК будет определяться геометрией корпуса судна, его осадкой, посадкой и расположением комплекса. Эти факторы, безусловно, значимо скажутся на особенностях ледовой ходкости теплоходов, оборудованных однотипными ДРК. Поэтому использование подобных зависимостей (Рис. 11 [составлено автором]) для выработки практических рекомендаций требует дополнительного изучения (моделирования) характера обтекания льдами судна (Рис. 12 [составлено автором]).

Рис.12. Характер обтекания тёртыми льдами судов с различным формобразованием
(а – судно с классической формой носа; б – судно с бульбообразным носом)

Например, для судна смешанного река-море плавания среднего водоизмещения (3500 т – 4500 т) с традиционными обводами подобный комплекс может обеспечить скорость движения в тонких (около 0,2 м) сильносплочённых льдах (9-10 баллов) в пределах «малого – среднего хода» (Рис. 11а [составлено автором]). Но уже полуметровые льды той же сплочённости будут для него близки к предельным при прогнозируемой скорости движения не выше «самого малого хода» (Рис. 11б [составлено автором]).

Рулевая сила

По аналогии с оценкой полезной тяги была проведена серия предварительных численных испытаний комплекса «винт-насадка» в чистой воде при различных углах перекадки насадки с целью определения рулевой силы комплекса. На рис. 13 [составлено автором] проиллюстрированы некоторые результаты этих испытаний. Итоговые кривые для углов перекадки насадки 15 и 30 градусов показаны на рис. 14 [составлено автором]. При этом необходимо отметить, что рулевая сила зависит от борта перекадки, что обусловлено направлением вращения винта. На рис. 13 и 14 [составлено автором] приведены кривые, соответствующие стороне перекадки с наибольшими значениями рулевой силы.

Рис.13. Временные зависимости рулевой силы комплекса в чистой воде для нескольких скоростей хода и углов перекадки насадки
(кривые A-D – результаты численного моделирования; кривые E-H – сглаженные значения)

Рис.14. Кривые рулевой силы комплекса в чистой воде
(кривая A – угол перекадки 15 градусов; кривая B – угол перекадки 30 градусов)

Для реальных скоростей движения ДРК в ледовых условиях (более 0,5 м/с) сохраняется тенденция, выявленная на этапе анализа его тяговых возможностей – с ростом толщины и сплочённости тёртых льдов также уменьшается и рулевая сила комплекса (Рис. 15 [составлено автором]).

а

б

Рис.15. Кривые рулевой силы ДРК в тёртых льдах при угле перекадки 30 градусов

(а – толщина льда 0,2 м; б – толщина льда 0,5 м)

Так, например, во льдах толщиной 0,5 м начальной сплочённостью 7 баллов в районе ДРК его рулевая сила при угле перекадки в 30 градусов уменьшается примерно вдвое по сравнению с условиями чистой воды (Рис. 15а [составлено автором], кривые А и В). В отличие от тяговых характеристик (Рис. 11 [составлено автором]) с высокой долей оправдываемости можно предполагать, что поведение кривых рулевой силы не будет монотонным, так как режимы движения близкие к «швартовным» на чистой воде и во льдах после «промыывания комплекса» должны быть идентичны (Рис. 15 [составлено автором], пунктирные участки линий В и С).

Выводы

1. Потребность в численном прогнозе пропульсивных качеств ДРК судна во льдах обусловлена ограниченностью традиционных полуэмпирических методик при описании этого процесса.
2. Упомянутые методики базируются на гипотезе о независимости ледового и гидродинамического воздействия, которая не подтверждена ни натурно, ни экспериментально.
3. С ростом толщины и сплочённости тёртых льдов существенно падает полезная тяга комплекса «гребной винт – поворотная насадка» и его рулевая сила.
4. Кривые рулевой силы комплекса не монотонны.
5. Анализ пропульсивных качеств комплекса должен быть совмещён с дополнительным моделированием характера обтекания судна льдами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрияшин А.В. Теория взаимодействия гребного винта со льдом. Обеспечение эксплуатационной прочности элементов пропульсивного комплекса судов ледового плавания и ледоколов : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : специальность 05.08.01 – теория корабля и строительная механика / Санкт-Петербург, 2006. – 254 с.: ил. РГБ ОД, 71 09-5/118/
2. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. 2 издание, исправленное. – СПб: Судостроение, 2014. – 504 с., ил.
3. Караулин Е.Б., Караулина М.М., Беляшов В.А., Белов И.М. Оценка периодических нагрузок, действующих на гребной винт при взаимодействии со льдом. // Научн. - техн. сборник Российского Морского Регистра Судоходства. Вып. 31. – СПб.: РМРС, 2008. – с. 93-106.
4. Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я. Сопротивление льда движению судна. – Л.: Судостроение, 1968. – 238 с.
5. Лобанов В.А. Оценки ледовых качеств судов с применением САЕ-систем: монография / В.А. Лобанов. – Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2013. – 296 с.
6. Лобанов В.А. Численные оценки ледовых качеств гребных винтов//Интернет-журнал «Науковедение». 2012 №4 (13) [Электронный ресурс].-М. 2012. – с. 1-15. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/51tvn412.pdf>, свободный – Загл. с экрана.
7. Разработать ледовые паспорта танкеров проекта 19614. Выходной документ научно-исследовательской работы по теме №34/09/1101. Научный рук. – Клементьев А.Н. – Н.Новгород.: ВГАВТ, 2012. – 45 с.
8. Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытания судов во льдах. – Л.: Судостроение, 1980. – 208 с., ил. – ИСБН.

9. Сазонов К. Е. Управляемость судов во льдах: методы определения ледовых сил, действующих на движущийся по криволинейной траектории корпус, и зависимости показателей поворотливости судов от характеристик корпуса и внешних условий: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук: Специальность 05.08.01 – теория корабля и строительная механика / Гос. науч. центр РФ.- Санкт-Петербург, 2004.- 285 с.
10. Сандаков Ю.А. Об определении полного ледового сопротивления речных судов в битых льдах // Тр. ГИИВТА. Судовождение на внутренних водных путях. Горький, 1971. Вып. 116. ч. 2. с. 85 – 89.
11. Сливаев Б.Г. Обеспечение безопасной эксплуатации судов ледового плавания при ударном взаимодействии гребных винтов со льдинами : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : специальность 05.22.19 – эксплуатация водного транспорта, судовождение, 05.08.04 – технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства / Владивосток, 2001. – 178 с.: ил. РГБ ОД, 61 02-5/1598-2/
12. Тронин В.А. Повышение безопасности и эффективности ледового плавания судов на внутренних водных путях: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук: специальность 05.22.16 – Судовождение / Горький, 1990. – 414 с.
13. Hallquist J.O. LS-DYNA 950. Theoretical Manual. Livermore Software Technology Corporation. LSTC Report 1018. Rev. 2. USA, 2001. – 498 p.

Рецензент: Тихонов Вадим Иванович, профессор, доктор технических наук, Волжская государственная академия водного транспорта.

Lobanov Vasily Alekseevich

Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education
«Volga State Academy of Water Transport»
Russia, Nizhniy Novgorod
E-mail: lobbas@mail.ru

Propulsion performances of propeller-nozzle complex in ices

Abstract. In work with use of CAE-technologies kind of work of the propulsion and steering complex «propeller-rotary nozzle» in the conditions of clear water and in small ice cakes of various thickness and concentration. Bad fitness of a complex for operation in the studied ices is shown.

Evaluations of a pure hydrodynamic thrust, steering force and ice loadings on a complex are made. By results of the statistical analysis of these numerical tests curves of useful thrust of a complex and its steering force in the studied ice conditions are received. Essential falling of these characteristics of a complex during its work in ices in comparison of clear water conditions is revealed.

A number of numerical experiments for the purpose of check of adequacy of a hypothesis of independence of ice and hydrodynamic impact on the hull of the vessel and its propulsion and steering complex is put. For comparable dynamic conditions, angular displacement of a nozzle influence of ices on character and level of a hydrodynamic thrust and steering force of a complex is analyzed. Essential divergences of existential behavior and average value of these parameters in the water-ice environment and in the conditions of clear water are noted. Earlier drawn conclusion about insolvency of «a hypothesis of independence» is confirmed.

Keywords: vessel; propulsion and steering complex; ice performances; ice condition; thrust; steering force; CAE-systems; finite element modeling.

REFERENCES

1. Andryushin A.V. Teoriya vzaimodeystviya grebnogo vinta so l'dom. Obespechenie ekspluatatsionnoy prochnosti elementov propul'sivnogo kompleksa sudov ledovogo plavaniya i ledokolov : dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk : spetsial'nost' 05.08.01 – teoriya korablya i stroitel'naya mekhanika / Sankt-Peterburg, 2006. – 254 s.: il. RGB OD, 71 09-5/118.
2. Ionov B.P., Gramuzov E.M. Ledovaya khodkost' sudov. 2 izdanie, ispravlennoe. – SPb.: Sudostroenie, 2014. – 504 s., il.
3. Karaulin E.B., Karaulina M.M., Belyashov V.A., Belov I.M. Otsenka periodicheskikh nagruzok, deystvuyushchikh na grebnoy vint pri vzaimodeystvii so l'dom. // Nauchn. - tekhn. sbornik Rossiyskogo Morskogo Registra Sudokhodstva. Vyp. 31. – SPb.: RMRS, 2008. – s. 93-106.
4. Kashtelyan V.I., Poznyak I.I., Ryvlin A.Ya. Soprotivlenie l'da dvizheniyu sudna. – L.: Sudostroenie, 1968. – 238 s.
5. Lobanov V.A. Otsenki ledovykh kachestv sudov s primeneniem CAE-sistem: monografiya / V.A. Lobanov. – N. Novgorod: Izd-vo FBOU VPO «VGAVT», 2013. – 296 s.
6. Lobanov V.A. Chislennye otsenki ledovykh kachestv grebnykh vintov//Internet-zhurnal «Naukovedenie». 2012 №4 (13) [Elektronnyy resurs].-M. 2012. – s. 1-15. – Rezhim dostupa: <http://naukovedenie.ru/PDF/51tvn412.pdf>, svobodnyy – Zagl. s ekrana.
7. Razrabotat' ledovye pasporta tankerov proekta 19614. Vykhodnoy dokument nauchno-issledovatel'skoy raboty po teme №34/09/1101. Nauchnyy ruk. – Klement'ev A.N. – N.Novgorod.: VGAVT, 2012. – 45 s.
8. Ryvlin A.Ya., Kheysin D.E. Ispytaniya sudov vo l'dakh. – L.: Sudostroenie, 1980. – 208 s., il. – ISBN.
9. Sazonov K. E. Upravlyaemost' sudov vo l'dakh: metody opredeleniya ledovykh sil, deystvuyushchikh na dvizhushchiysya po krivolineynoy traektorii korpus, i zavisimosti pokazateley povorotlivosti sudov ot kharakteristik korpusa i vneshnikh usloviy : dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk : Spetsial'nost' 05.08.01 – teoriya korablya i stroitel'naya mekhanika / Gos. nauch. tsentr RF.- Sankt-Peterburg, 2004.- 285 s.
10. Sandakov Yu.A. Ob opredelenii polnogo ledovogo soprotivleniya rechnykh sudov v bitykh l'dakh // Tr. GIIVTA. Sudovozhdenie na vnutrennikh vodnykh putyakh. Gor'kiy, 1971. Vyp. 116. ch. 2. s. 85 – 89.
11. Slivayev B.G. Obespechenie bezopasnoy ekspluatatsii sudov ledovogo plavaniya pri udarnom vzaimodeystvii grebnykh vintov so l'dinami : dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk : spetsial'nost' 05.22.19 – ekspluatatsiya vodnogo transporta, sudovozhdenie, 05.08.04 – tekhnologiya sudostroeniya, sudoremonta i organizatsiya sudostroitel'nogo proizvodstva / Vladivostok, 2001. – 178 s.: il. RGB OD, 61 02-5/1598-2.
12. Tronin V.A. Povyshenie bezopasnosti i effektivnosti ledovogo plavaniya sudov na vnutrennikh vodnykh putyakh: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk: spetsial'nost' 05.22.16 – Sudovozhdenie / Gor'kiy, 1990. – 414 s.
13. Hallquist J.O. LS-DYNA 950. Theoretical Manual. Livermore Software Technology Corporation. LSTC Report 1018. Rev. 2. USA, 2001. – 498 p.