

РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ



РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

ВЫПУСК

19

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
1996

Редакционная коллегия Российского Морского Регистра Судоходства:
Ю.И. Быков (председатель), О.В. Колышкин (зам. председателя), Э.В. Дьяконов,
А.А. Захаров, С.С. Коций, В.В. Беляков, Е.В. Чернявский, М.Н. Мазаев, А.И.
Чульский, М.И. Огнев, Н.Ф. Копилец, Л.Н. Парфенов, В.С. Голубев, Л.А. Трутнев,
В.Ф. Комлев, К.К. Ершиков, В.П. Волков, Е.Б. Мюллер, Г.В. Шелкова

© Российский Морской Регистр Судоходства, 1996

ISBN 5-89331-005-5

Российский Морской Регистр Судоходства
Научно-технический сборник, вып. 19

Ответственный за выпуск: *Е.Б. Мюллер*
Гл. редактор: *Г.В. Шелкова*
Редакторы: *Е.Н. Саложникова, Л.И. Савельева*
Художник: *С.С. Венедиктов*
Н/К

Подп. в печ. 08.01.97. Формат 60 × 84/16. Усл. печ. л. 17,5. Уч.-изд. л. 17,7.
Тираж 700 экз. Гарн. Гельветика. Зак. 3-И

Российский Морской Регистр Судоходства
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 8
ЛР №021056 от 03.06.96

Н.А.Решетов

РОЛЬ НАУКИ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА¹

Активная деятельность и развитие классификационного общества в настоящее время должны постоянно опираться на систематические глубокие и целенаправленные научные исследования. Потребность в результатах исследований возникает во всех направлениях: в нормативной, надзорной и сертификационной работе.

Необоснованно завышенные требования, включенные в правила и нормы, приведут к удорожанию строительства судов, а необоснованно заниженные — к снижению надежности и безопасности.

Надзорная деятельность, в особенности та ее часть, где требуются ответственные инженерные решения, также должна осуществляться на основе руководств, правил и методик, имеющих научное обоснование.

Регистром в настоящее время проводится большая работа по сертификации систем качества промышленных предприятий, а также по сертификации продукции общепромышленного назначения. Это новые сферы деятельности, которые безусловно потребуют новых научных разработок.

Регистр является одним из ведущих классификационных обществ мира и обязан поддерживать свой престиж не только внутри страны, но и в рамках международной деятельности. Работа Регистра в ИМО и МАКО обязывает нас к постоянному поддержанию собственной конкурентоспособности. Здесь позиция Регистра является как бы отражением его связи с наукой. Возможности нашей морской и кораблестроительной науки очень велики. Даже в нынешних непростых условиях основные исследовательские институты и учебные заведения морского профиля сохранили свой научный потенциал, продолжают вести творческий поиск, предлагают новые разработки и выполняют заказы промышленности.

¹В дальнейшем — Регистр.

Регистр работает в тесном содружестве с крупными исследовательскими центрами, такими как ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, ЦНИИМФ, ГМА им. С.О.Макарова, ГМТУ, ГУВК, Институт проблем транспорта РАН. Ведущие ученые этих и других научных центров входят в состав Научно-технического совета Регистра.

Регистр финансирует обширную программу научных разработок (более 40 тем в 1996 г.), из которых можно выделить следующие:

- разработка программного комплекса «Обеспечение прочности корпусов судов»;

- выбор критериев прочности и способа учета износов корпуса;

- гармонизация Правил для судов арктического плавания;

- разработка программного комплекса набора элементов корпусных конструкций;

- разработка требований к валопроводам и гребным винтам ледоколов с ледовыми усилениями категорий ЛЛ6 — ЛЛ9, в соответствии с проектом новой классификации этих судов;

- разработка требований к гребным винтам с лопастями саблевидной формы;

- уточнение концепции безопасности атомного судна.

Благодаря тесной связи с наукой по целому ряду научных проблем, связанных с разработкой своих Правил и Руководств, Регистр занимает лидирующее положение. К таким проблемам можно отнести разработку новой классификации ледоколов и судов с ледовыми усилениями, новых требований к остаточным толщинам корпусов, новой классификации и требований к пожарным судам.

Наиболее перспективными в исследовательской работе Регистра представляются такие направления, как разработка и совершенствование программного комплекса «Обеспечение прочности корпуса и продление жизни судна», участие в подготовке Международного кодекса для судов ледового плавания, разработка требований Регистра по управляемости морских судов. Большое значение Регистр придает роли «человеческого фактора» на море, как составляющей безопасности судоходства в целом. Для изучения вопросов, связанных с этим, в Научно-техническом совете Регистра создана специализированная секция по проблемам человеческого фактора на море.

Символично, что настоящий сборник выходит в год 300-летия Российского флота. Мы пригласили к участию в сборнике ученых и

инженеров-проектировщиков, членов Научно-технического совета и сотрудников Регистра. Все ценные идеи, заключенные в предложенных работах, найдут свое применение и, в конечном итоге, послужат повышению престижа Регистра, российского судостроения, Российского флота.

УДК 629.12.001.33:061

А. А. Луковников

УЧАСТИЕ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА В НОРМИРОВАНИИ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВ НА МЕЖДУНАРОДНОМ УРОВНЕ

Судоходство, будучи одним из наиболее свободных видов рынка, рынка транспортных услуг, в силу своей глобальной деятельности все же неминуемо должно регулироваться на международном уровне. Инструментами такого регулирования являются международные конвенции, соглашения, кодексы и т. п.

Субъектами этого регулирования выступают ряд международных организаций, а также признанные в международном масштабе классификационные организации. Выданные классификационными обществами судовые документы являются неотъемлемой частью доказательства безопасности, надежности, а следовательно, и конкурентоспособности судна. Этот фактор, в свою очередь, обязывает ведущие классификационные общества занимать активную позицию в международном нормотворчестве, уделять этому направлению много времени, трудозатрат и финансовых средств.

К числу ведущих классификационных обществ мира, объединившихся в 1968 г. в Международную ассоциацию классификационных обществ (МАКО), относится и Регистр, являющийся с 1969 г. полноправным членом этой Ассоциации. И хотя участие Регистра в международном процессе регулирования безопасности на море предопределяет необходимость его работы во многих международных организациях, таких как ИМО, МАКО, ЕС, ИСО, МЭК, СИМАК и др., однако наибольший удельный вес по

затрачиваемому времени, трудовым и финансовым затратам, а главное — по значимости и ответственности принимаемых решений, безусловно приходится на участие Регистра в работе двух, уже упомянутых, авторитетных организаций — ИМО и МАКО.

Международная морская организация (ИМО), занимающаяся под эгидой ООН обеспечением безопасности мореплавания в международном масштабе, объединяет более 150 государств. Ее решения, принимаемые в виде международных конвенций, кодексов, резолюций, циркуляров и т. п., являются обязательными для всех ее членов. Их соблюдение — необходимое условие свободного и безопасного торгового мореплавания.

Специалисты Регистра активно работали в составе делегаций нашей страны и сейчас принимают деятельное участие в работе многих определяющих структурных подразделений ИМО, таких как Комитет по безопасности на море, Комитет по предотвращению загрязнения морской среды, Подкомитеты по проектированию и оборудованию судов, по остойчивости и грузовой марке, по противопожарной защите судов, по применению требований ИМО государствами флага, по радиосвязи, поиску и спасению, по перевозке опасных жидкостей и газов наливом, по твердым опасным грузам и контейнерам. В ряде случаев представители Регистра возглавляли национальные делегации.

Как правило, участие специалистов Регистра в работе ИМО сводится к двум направлениям:

экспертизе поступающих технических предложений и участию в разработке на их основе нормативов ИМО, а также участию в подготовке предложений России в рамках, определяемых ее морской Администрацией;

доработке принятых ИМО решений до уровня своих Правил и введение их в Правила и другие нормативные документы Регистра.

Тематика и темпы работ, проводящихся в последние годы как в ИМО, так и в МАКО, прежде всего определяются положением в мировом судоходстве, сложившимся в 90-е годы.

Мировая общественность с тревогой отмечает, что несмотря на значительный прогресс в судостроении и наличие детальных и жестких нормативов, применяемых в судоходстве и судостроении, мировая статистика аварийности морских судов по-прежнему вселяет большие и обоснованные опасения. Уже в течение не одного десятилетия слабо решается проблема «нестандартных» судов, т. е. судов, на которых не полностью выполнены обяза-

тельные для них международные требования; неумолимо развивается процесс старения всех типов судов морского флота.

Наибольшую тревогу в последние годы вызвала аварийность двух типов судов: навалочных и пассажирских паромов. Аварии навалочных судов имеют, как правило, быстротечный характер, с чем связана гибель значительной части экипажа и значительный материальный ущерб в связи с потерей судна и груза.

Многочисленные аварии пассажирских паромов, среди которых наиболее трагичными были аварии «Herold of Free Enterprise» и «Эстония», также привели к большому количеству человеческих жертв. Анализ причин аварийности мирового флота показал, что причиной около 80 % всех аварий служит так называемый «человеческий фактор», т. е. субъективная оценка ситуации и неадекватные ей действия экипажа.

Поэтому в последнее время, особенно после организации нового Подкомитета ИМО по применению требований ИМО государствами флага, круг вопросов, в которых участвует Регистр, значительно расширился. Помимо последних инициатив ИМО, таких как совершенствование безопасности навалочных судов, пассажирских паромов, разработка нового Международного кодекса по безопасности высокоскоростных судов, разработка поправок ко многим действующим конвенциям и кодексам, прибавились проблемы, связанные с «человеческим фактором» и управлением безопасностью судоходства в целом. Ключевым вопросом в этом отношении явилась разработка международного Кодекса по управлению безопасностью, а также ряда руководств ИМО, разработанных в развитие этого Кодекса. Регистр принимал активное участие в этой работе вместе со всеми членами МАКО и самостоятельно в составе делегации России. Значение принятия этого Кодекса, а также повышение его статуса до уровня главы Конвенции СОЛАС, трудно переоценить. С принятием указанного Кодекса морские Администрации получили инструмент для регулирования и контроля всей системы управления судоходством в дополнение к существующим «техническим» конвенциям и к Международной конвенции по стандартам подготовки, дипломирования и несения вахты моряков. Кодекс предусматривает необходимость сертификации Администрациями как самих судоходных компаний, так и освидетельствование и сертификацию судов этих компаний на соответствие требованиям этого Кодекса.

В настоящее время Регистр уже имеет поручение на осуществление надзора за выполнением положений этого Кодек-

са от морской Администрации России, а также от ряда других морских Администраций.

Одним из наиболее важных событий в работе ИМО в последнее время явилась состоявшаяся в ноябре 1995 г. конференция ИМО по Конвенции СОЛАС. Конференция была созвана по инициативе Генерального секретаря ИМО по результатам гибели пассажирского парома «Эстония». Самой конференции предшествовала большая подготовительная работа на 64-й и 65-й сессиях Комитета по безопасности на море, а также работа специально созданной для этой цели комиссии международных экспертов, в которую входили представители морских Администраций, судостроителей, судоходных компаний, классификационных обществ. В результате работы конференции был принят ряд поправок, существенно повышающих безопасность пассажирских паромов, в том числе поправки с требованием к остойчивости, которая должна удовлетворять стандартам Конвенции СОЛАС-90, поправки, предписывающие сроки перевода пассажирских паромов, перевозящих более 400 человек, в двухотсечный стандарт деления на отсеки, а также поправки к требованиям к конструкциям паромов (переборки, аппарели, двери и закрытия), к путям эвакуации пассажиров, средствам сигнализации и связи, спасательным средствам и др. Можно отметить, что хотя конференция созывалась для принятия новых требований, относящихся только к пассажирским паромам, часть принятых требований будет касаться всех пассажирских судов.

Предполагается, что принятые поправки начнут действовать с 1 июля 1997 г.

Ведущие классификационные общества мира, включая Регистр, объединившись в Ассоциацию, что уже отмечалось выше, поставили своей целью внедрение наивысших стандартов безопасности на море и предотвращения загрязнения морской среды. Эта задача решается членами МАКО на различных уровнях:

классификация судов и плавучих сооружений на основе разработанных ими Правил и других нормативов с контролем за их исполнением в течение всей эксплуатации судна (классификационный надзор);

выполнение поручений морских Администраций по контролю за соответствием морских судов требованиям международных нормативов (конвенций, кодексов и т. д.) с выдачей требуемых международных свидетельств (конвенционный надзор).

Для более эффективного достижения этой цели члены МАКО систематически проводят унификацию требований своих Правил, разрабатывают единые методики и интерпретации по применению требований международных конвенций, вырабатывают общие принципы проведения надзора за строительством и эксплуатацией судов.

К настоящему времени МАКО разработало более 175 таких унифицированных требований, множество интерпретаций, руководств, рекомендаций и другого вида нормативных документов, обязательных для ее членов. Подавляющее большинство этих нормативов в полном объеме введено в действующие Правила, Руководства и другие нормативные документы Регистра.

Такая плодотворная самостоятельная нормотворческая деятельность и активное участие в работе других международных организаций, занимающихся регламентацией безопасности морских судов на международном уровне, во многом являются результатом налаженной обратной связи, так как все члены МАКО не только устанавливают нормы безопасности на море, но и ведут контроль за их исполнением, анализируют эффективность их внедрения и по результатам такого контроля и анализа поддерживают свои нормы, Правила на уровне современности, систематически вводя в них требуемые на каждом этапе изменения и дополнения.

Современный уровень развития организационно-управленческих структур требует разработки, внедрения и систематического поддержания на требуемом уровне системы обеспечения качества производимой продукции или предоставляемых услуг. Такая система обеспечения качества была разработана на основе стандартов ИСО серии 9000 и внедрена в МАКО в 1993-1994 гг. Тогда же и Регистр внедрил у себя эту систему МАКО и в подтверждение этого факта получил от МАКО соответствующий сертификат. С 1994 г. наличие такого сертификата стало обязательным и одним из основных критериев членства в Ассоциации.

Впоследствии МАКО предпринимала активные усилия по развитию и совершенствованию своей внутренней системы обеспечения качества работ, добиваясь получения международного признания этой системы, аккредитации ее у морских Администраций ведущих стран. Такое международное признание действующей в МАКО внутренней системы обеспечения качества позволит МАКО, а следовательно и Регистру, приступить к

следующему этапу своей деятельности — сертификации систем обеспечения качества своей клиентуры, судоходных компаний, судостроительных и судоремонтных фирм в соответствии с требованиями Международного кодекса ИМО по управлению безопасностью, о чем уже говорилось выше.

В последние годы, реагируя на беспокойство мировой общественности по поводу аварийности в морском судоходстве, а также на критику в свой адрес, МАКО значительно активизировала усилия по совершенствованию своей деятельности с целью повышения авторитета и доверия у своей клиентуры, придания своей работе большей динамичности, инициативы и эффективности. С этой целью МАКО провела и планирует дальнейшее проведение ряда организационных мероприятий: учреждены постоянный Секретариат и Комитет по качеству, пересматривается организационная структура Ассоциации и критерии ее членства, совершенствуется порядок внедрения принятых унифицированных требований.

В июне 1995 г. МАКО приняла семь новых инициатив, которые направлены на повышение требовательности к квалификации своих инспекторов, определяют их роль в совместной работе с портовыми властями, устанавливают порядок предоставления судовладельцам, страховщикам и другим заинтересованным сторонам необходимой информации при смене класса судна, приостановке действия класса и т. д. Эти семь инициатив конкретно предусматривают:

- порядок оформления документов и предоставления необходимого объема информации при смене класса судна;

- доступность для клиентуры имеющейся у члена МАКО информации, относящейся к классификации и конвенционному надзору;

- процедуру приостановки действия класса при просроченных освидетельствованиях, невыполнении требований классификационного органа и др.;

- условия по найму и контролю за деятельностью внештатных инспекторов;

- контроль за работой (мониторинг) штатных инспекторов;

- требования к квалификации и обучению инспекторского состава;

- взаимодействие классификационных обществ-членов МАКО с портовыми властями.

Эти инициативы, представленные в виде конкретных требований, имеют очень жесткие сроки внедрения и стали

неотъемлемой частью системы контроля качества МАКО; их соблюдение будет неуклонно проверяться при всех видах аудиторских проверок.

С принятием этих инициатив Регистру предстоит проделать очень большую работу как по существу, так и по надлежащему документальному оформлению (централизация данных по надзору, ведение надлежащей системы подготовки кадров). В Главном управлении Регистра уже проводится работа по практическому внедрению положений принятых инициатив в реальную действительность — перерабатывается документация по внутренней системе контроля качества, разрабатываются инструкции и положения по подготовке кадров, разработана программа подготовки специалистов для Регистра в Государственном Морском Техническом Университете Санкт-Петербурга, которая осуществляется в основном сотрудниками ГУР, ведется подготовительная работа по централизации данных по классификационному и конвенционному надзору.

Активное и разностороннее участие специалистов Регистра в международной нормотворческой деятельности было бы невозможно без широкого привлечения отечественных НИИ, КБ и других организаций, которое осуществляется на практике в разных формах: разрабатываются по заказу Регистра отдельные темы для использования полученных результатов и их обоснований при подготовке международных нормативов в ИМО, МАКО и других организациях;

работники отечественных проектно-исследовательских организаций участвуют в составе национальных делегаций России в ИМО; специалисты Регистра проводят консультации по вопросам, прорабатываемым в международных организациях;

результаты ранее выполненных научных исследований и проектных проработок используются с согласия авторов при рассмотрении аналогичных вопросов на международном уровне.

Вполне естественно, что польза от тесного взаимодействия Регистра с отечественной наукой обоюдна, так как Регистр имеет возможность подкреплять свои позиции базовыми научными проработками, а проектно-исследовательские организации получают через Регистр доступ к результатам работ, ведущихся по интересующей их тематике в других странах мира.

Необходимость прямого участия Регистра в международном процессе регулирования безопасности морских судов и

человеческой жизни на море определяется его статусом классификационной организации, осуществляющей свою деятельность в глобальном масштабе без жесткой привязки к отечественным или региональным нормативам. Это выражается в том, что класс Регистра имеют морские суда, плавающие под различными флагами, а надзор за выполнением конвенционных требований поручен Регистру многими морскими Администрациями различных регионов мира.

Конечный эффект от участия Регистра в международной нормотворческой деятельности по обеспечению безопасности морских судов и предотвращению загрязнения окружающей среды находит прямое отражение в основных показателях его работы как классификационной организации.

Сам факт участия Регистра в работе международных организаций не только определяет возможность в порядке обратной связи получать результаты ведущихся в международном масштабе исследований в области повышения безопасности торгового мореплавания, но и вынуждает своевременно приводить свои технические, надзорные и организационные нормативы к передовому мировому уровню. Эти обязательства, в свою очередь, обеспечивают судовладельцам, пользующимся услугами Регистра, получать ощутимые преимущества за счет снижения страховых премий, повышения фрахтовых ставок, уменьшения портовых и других сборов, так как страховщики, фрахтователи судов и портовые власти официально признают приоритет судов с классами членов МАКО. Следовательно, суда с классом Российского Регистра имеют те же льготы и преимущества, что и суда с классом Регистра Судостроительства Ллойда, Дет Норске Веритас и других всемирно признанных классификационных организаций.

В.К. Трунин

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВ СМЕШАННОГО (РЕКА-МОРЕ) ПЛАВАНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Введение

Суда смешанного плавания (ССП) являются одним из наиболее перспективных типов транспортного флота, предназначенных для эксплуатации как в прибрежных морских районах, так и на реках, в озерах и водохранилищах с ограниченными глубинами и габаритами судового хода. Такой широкий диапазон условий не позволяет проектанту в полной мере обеспечить судну необходимые мореходные и прочностные показатели, вследствие чего выход этих судов в морские районы по соображениям безопасности оказывается возможным лишь при определенных ограничениях по погодным условиям. Уровень этих ограничений определяет класс судна, присваиваемый Российским Морским Регистром Судоходства (РС) или Российским Речным Регистром (РРР); районы и сезоны плавания судов, имеющих ограниченные классы, установлены Правилами РС и межведомственным Протоколом [1]. При этом учитываются, с одной стороны, гидрометеорологические факторы (долговременные распределения элементов волн в детализированных районах), и с другой, — навигационное обеспечение плавания в районе (в частности, наличие достаточного числа надежных мест убежища).

Подобный подход реализует оценку безопасности плавания в статистическом смысле и несет в себе как определенные недостатки, так и возможности повышения эффективности работы флота. Первые являются характерными для любой вероятностной модели и связаны с обоснованием нормативных значений сформулированных критериев. Очевидно, что любой назначенный норматив не исключает возможности попадания судна в шторм, сила которого превышает допустимую для судов данного класса в разрешенном районе и сезоне плавания, что хорошо известно из

морской практики. С другой стороны, превышение режимной обеспеченности нормативной величины не отрицает наличия длительных периодов времени, характеризующихся благоприятными погодными условиями. Обширный опыт организации разовых переходов и временной эксплуатации судов свидетельствует о том, что и в этих условиях можно успешно плавать, не снижая уровня безопасности, при выполнении определенных организационно-технических мероприятий.

Каковы же на сегодняшний день резервы повышения безопасности и эффективности эксплуатации судов ограниченного, в том числе и смешанного плавания?

Оценка элементов волнения

Первое направление связано с разработкой методов рациональной оценки ожидаемых элементов волнения по маршруту следования судна. Очевидно, что в практическом мореплавании судно не должно быть захвачено штормом, сила которого превышает допустимую; при возникновении подобной опасности оно должно немедленно направиться в ближайшее место убежища. На основании установленных нормативных расстояний между местами убежища и средних скоростей хода с учетом потери скорости на волнении можно оценить необходимый срок прогнозирования в 6 — 24 ч.

Какой же информацией о гидрометеоусловиях предстоящего плавания практически располагает судоводитель?

Отечественные и зарубежные радиостанции регулярно по расписанию передают подробную или краткую информацию о погоде, при этом, как правило, сообщения подразделяются на три части: в первой сообщаются штормовые предупреждения, во второй — сведения о текущей погоде, в третьей — прогноз погоды; штормовые предупреждения могут быть объявлены самостоятельными внеочередными выпусками. Стандартизация гидрометеопрогнозов для судоводителей в настоящее время осуществлена правилами V/4, IV/7.1.5, IV/7.1.4 Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 г. Последнее, в частности, предусматривает обязательное наличие на всех судах приемника, обеспечивающего прием передач международной службы НАВТЕКС, работающего на частоте

518 кГц. Суточные прогнозы погоды, передаваемые по системе НАВТЕКС, содержат прогноз направления и скорости ветра (в баллах шкалы Бофорта или в м/с) по соответствующим подрайонам. Такого рода информация безусловно полезна для судоводителя, однако она не позволяет оценить с достаточной степенью точности волнение на трассе плавания по следующим причинам:

сила ветра, осредненная по достаточно крупному подрайону, непосредственно не связана с высотой волн в конкретной точке; для определения последней судоводитель должен иметь ту или иную методику пересчета;

суда ограниченного плавания эксплуатируются в прибрежной зоне в условиях ограниченных разгонов, где для оценки высот волн знания только скорости ветра недостаточно;

суда прибрежного и смешанного плавания имеют, как правило, жесткие ограничения по погодным условиям ($h_{3\%} = 2,5; 3,5; 6,0$ м); такой уровень ограничений зачастую лежит ниже уровня штормовых предупреждений и не обеспечивается никакими действующими системами гидрометеопрогнозирования.

Из всех видов гидрометеорологической информации, поступающей на суда, наиболее полный обзор состояния атмосферы и океана предоставляют фактические и прогностические факсимильные карты. Эти карты дают прогноз направления и скорости ветра, а также высот волн по подрайонам на 24, 48, 72 и 96 ч. При этом скорость ветра задается с интервалом 2,5 м/с, а высота волн — с интервалом 0,5 м («значительная», то есть $h_{3\%}$ — с интервалом 0,66 м). Очевидно, что и при получении факсимильных прогностических карт (хотя подобная аппаратура не является обязательной и на большинстве ССП отсутствует) судоводитель будет испытывать серьезные затруднения в оценке высот волн по маршруту следования по следующим причинам:

волнение в прибрежной зоне может быть существенно отличным от осредненного по подрайону вследствие ограниченности разгонов ветра;

точность получения данных с факсимильных карт зачастую не обеспечивает требуемую для судов ограниченного плавания.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при эксплуатации судов, имеющих достаточно жесткие ограничения по допустимым погодным условиям, принимаемая ими гидрометеоинформация не дает возможности судоводителю однозначно и с приемлемой степенью точности оценить высоты волн по

конкретному маршруту следования. Указанное обстоятельство явилось основой для постановки НИР по разработке методических рекомендаций для судоводителя по оценке высот волн с использованием принимаемой судами гидрометеороинформации и навигационной документации. При этом предполагалось, что исполнитель работ — Инженерный центр судостроения (АО ИЦС) — осуществит разработку такой методики на базе существующих методов океанографии и гидрометеорологии с максимально возможным упрощением для практического использования и апробацией на ССП.

Детальное обоснование принятой математической модели и алгоритма расчета высот волн приведено в [2]. Отметим лишь, что в качестве научно-методической основы использовался энергетический подход, позволяющий установить зависимости элементов волн от основных волнообразующих факторов в совокупности с простейшими допущениями, вытекающими из теории размерностей, и методами идентификации модели по имеющимся опытным данным, полученным отечественными и зарубежными океанографами, а также АО ИЦС в процессе проведенных им натурных мореходных испытаний ССП.

Окончательные расчетные формулы для оценки высот волн имеют следующий вид:

для установившегося волнения

$$h_{3\%} = 0,0275W\sqrt{X}, \quad (1)$$

для неустановившегося волнения

$$h_{3\%} = 0,0222W\sqrt{Wt}, \quad (2)$$

где $h_{3\%}$ — высота волн 3 %-ной обеспеченности, м;

W — средняя скорость ветра, м/с;

X — длина разгона, мили;

t — продолжительность действия ветра, ч.

Область применения той или иной формулы определяется соотношением

$$t_{пр} = 1,54X/W. \quad (3)$$

Если фактическая продолжительность действия ветра $t > t_{пр}$, то волнение считается установившимся, и его характеристики определяются в зависимости от разгона (1), в противном случае

волнение рассматривается как развивающееся, и его высота рассчитывается согласно (2). Контроль результатов производится по предельной кривой для полностью развитого волнения, полученной на основе аппроксимации частотного спектра Пирсона-Московица

$$h_{3\% \max} = 0,0325W^2. \quad (4)$$

Детальное сопоставление оценок безразмерных средних высот волн, полученных по известным методам [3,4] и рассчитанных по формулам (1)-(2), выполненное в [2], показало, что предложенный способ в целом находится в соответствии с другими принятыми, несмотря на его существенную простоту. Соответствие экспериментальным данным [5], полученным отечественными океанографами в широком диапазоне условий волнообразования, также показанное в [2], подтверждает достоверность предлагаемого метода. В качестве иллюстрации в табл. 1 приведены некоторые данные, полученные при инструментальных измерениях с помощью системы «Балл» и визуальных оценках в процессе натурных испытаний, в сопоставлении с расчетными данными.

Таблица 1

Сопоставление оценок высот волн

Районы наблюдений	W, м/с		h _{3%} , м		Суда
	расчетная	фактическая	расчетная	фактическая	
Черное море	14	12	3,3	3,0	Генерал Ватутин
Черное море	14	11	3,6	3,3	Сергей Смирнов
Средиземное море	20	19	5,5	5,7	Сергей Смирнов
Северное море	14	15	2,9	2,8	Ладога-106
Северное море	7,5	4	2,0	0,8	Амур-2527
Северное море	10	9	2,2	1,6	Амур-2527
Северное море	10	10	1,9	2,0	Амур-2527

Основным результатом работ АО ИЦС данного направления явилась Методика оценки высот волн [6], в которой приведенный выше алгоритм был реализован в виде удобных для судоводителя номограмм, не требующих прямых вычислений. В процессе внедрения на ССП в соответствии с рекомендациями СПО ГОИН Методика была

откорректирована таким образом, что в качестве исходных данных по ветру приняты не получаемые прогнозы силы ветра, а его фактические характеристики на момент составления прогноза. Результаты, полученные в ходе опытного рейса теплохода «Амур-2527» в Северном море, показали, что в этом случае модель оказывается наиболее эффективной для краткосрочного прогнозирования.

Оценка поведения судна в штормовых условиях

Помимо знания предстоящей гидрометеорообстановки судоводитель должен располагать и информацией о возможном поведении своего судна в этих условиях. Поэтому второе естественное направление связано с разработкой методов рациональной оценки мореходных качеств ССП. На сегодняшний день в Информации для капитана имеются лишь сведения о ходовых и маневренных элементах судна на тихой воде, а также данные, подтверждающие выполнение требований к остойчивости и непотопляемости в нормируемых условиях плавания. Рекомендованные судоводителям методы оценки скорости хода, качки и т.п. в штормовых условиях основаны, как правило, на весьма упрощенных схемах, зачастую не учитывают специфику формы корпуса и нагрузки судна и, кроме того, достаточно сложны для практического использования. Вместе с тем, в настоящее время в области теории корабля достигнут значительный прогресс в оценке мореходных качеств судов: разработан целый ряд хорошо зарекомендовавших себя расчетных методик [7], имеющиеся средства и методы натурного эксперимента позволяют откорректировать расчетные схемы и убедиться в адекватности разработанных моделей [8].

Поэтому имеются все основания сделать вывод о том, что существует реальная возможность выбора достаточно эффективных методов оценки мореходных качеств ССП, и на этой основе представляется целесообразным дополнить имеющуюся судовую документацию необходимой информацией о поведении судна в условиях штормового плавания. Соответствующие работы в этом направлении были выполнены АО ИЦС в 1993-1994 гг. [9].

В качестве основных параметров, характеризующих мореходность судна, рассматривались:

- максимально достижимая судном скорость хода на волнении;
- амплитуды бортовой качки;
- вероятность слеминга и заливаемости палубы.

Статистические данные о снижении скорости хода судов в штормовых условиях [10] свидетельствуют о том, что для ССП, характеризующихся высокой полнотой обводов, потеря скорости весьма значительна, и ее рациональная оценка представляет актуальную проблему, учитывая относительно низкую энерговооруженность таких судов. Уменьшение скорости хода судна при ветре и волнении может быть определено из уравнения

$$R_0(V) + \Delta R_1(V, h_{3\%}, q) + \Delta R_2(V, W, q_1) = ZP_{cp}(V, h_{3\%}, q), \quad (5)$$

где $R_0(V)$ — сопротивление движению судна на тихой воде со скоростью V ;
 $\Delta R_1(V, h_{3\%}, q)$ — дополнительное сопротивление, обусловленное волнением высотой $h_{3\%}$, генеральное направление которого определяется курсовым углом q ;
 $\Delta R_2(V, W, q_1)$ — дополнительное сопротивление, связанное с воздействием ветра, имеющего среднюю скорость W и направление q_1 по отношению к направлению движения судна;
 Z — число движителей;
 $P_{cp}(V, h_{3\%}, q)$ — средний упор движителя.

Сопротивление на тихой воде, как известно, может быть наиболее достоверно определено по данным буксировочных модельных испытаний. При отсутствии таковых методика предусматривает оценку кривой сопротивления, получаемую по приближенным степенным зависимостям с опорной точкой $R_0(V_0)$ (сопротивление при движении с расчетной скоростью V_0 , как правило, содержится в проектных материалах); показатели степени определены в [9] на базе результатов ходовых испытаний ССП.

При определении дополнительных составляющих сопротивления, обусловленных воздействием на судно ветра и нерегулярного волнения, используются известные и хорошо зарекомендовавшие себя методы расчета, в том числе, базирующиеся на данных серийных модельных испытаний Мура и Мюрдоя [7, 11].

Наиболее полно схема работы гребного винта в условиях волнения и качки представлена в работе В.Б.Липиса [12]. Аналогичный подход в несколько упрощенном виде был предложен сотрудниками ЛИВТа [13]. Использование последнего представляется более приемлемым для ССП, поскольку он изначально разрабатывался для судов с ограниченными осадками, а схема расчета достаточна удобна для инженерных оценок.

Решение уравнения (5) позволяет построить штормовые диаграммы, то есть полярные диаграммы достижимой судном скорости хода при различных курсовых углах для заданных, в

частности для стандартных балльности [11], параметров ветра и волн. Проверка адекватности предложенной методики расчета производилась сопоставлением с имеющимися данными натурных мореходных испытаний ССП. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены расчетные и опытные данные для теплохода «Красный Аксай» проекта 92-040 при следующих гидрометеорологических условиях: $W = 16$ м/с; $h_{3\%} = 2,8$ м.

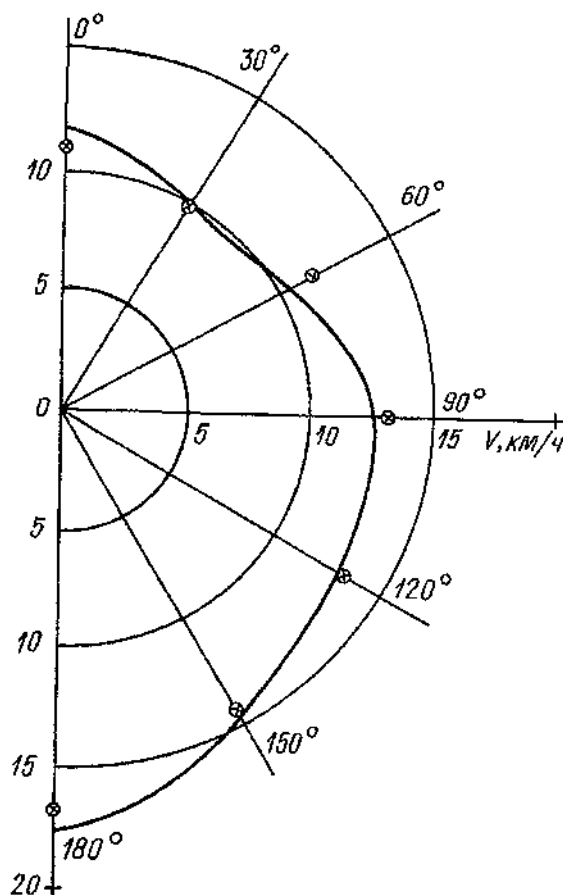


Рис. 1
Скорость при ветре и волнении:
— расчет, ⊗ — эксперимент

Расчет характеристик качки, заливаемости и слеминга производился с использованием хорошо известных спектральных методов [7, 10, 14], при этом отметим лишь то, что гидродинамические характеристики бортовой качки определялись с использованием опытных данных [15], полученных применительно к судам внутреннего и смешанного плавания. В табл. 2 приведено сопоставление расчетных и имеющихся опытных данных по амплитудам бортовой качки судов ограниченного плавания, которое свидетельствует о достаточной надежности методики.

Таблица 2

Сопоставление результатов оценки бортовой качки

Проекты судов	$\eta_{3\%}$, м	$\theta_{3\%}$, град	
		расчет	эксперимент
302	1,2	8,3	7,2
92-040	3,8	15,8	13,5
292	3,3	23,0	23,7
0225	1,7	10,8	9,8
0225	3,8	21,0	20,0
781	2,0	12,0	7,5
1588	3,0	13,5	10,7
1588	5,7	19,7	18,6

Таким образом, разработанная АО ИЦС методика расчета позволяет оценить представляющие интерес мореходные показатели, и уже на стадии проектирования предоставить судовладельцу полезную информацию о поведении судна в штормовых условиях. Как отмечено выше, эта методика целиком базируется на известных теоретических решениях и опытных данных, и принципиально новых научных результатов не содержит, поэтому алгоритм расчета здесь не приводится. Основное ее значение в том, что она предоставляет возможность на базе оперативно получаемых расчетных данных давать судоводителю определенные рекомендации по выбору рациональных режимов штормового плавания.

Рекомендуемые предельные показатели мореходности ССП

В настоящее время из всего комплекса мореходных качеств судна нормирование производится лишь для показателей предельной мореходности: плавучести, остойчивости и непотопляемости. Скорость хода на волнении, качка, заливаемость и слеминг характеризуют техническую мореходность, то есть те качества, недостаток которых непосредственно не влечет гибель судна, но затрудняет выполнение им соответствующих задач. Тем не менее, в последние годы вопрос о необходимости разработки критериев и нормативов технической мореходности постоянно обсуждается специалистами в области безопасности мореплавания и на научно-технических конференциях и в комитетах ИМО. В специальной литературе по этому вопросу имеются многочисленные рекомендации, некоторые из которых уже имеют определенный юридический статус (стандарты НАТО для боевых кораблей, нормативы безопасных условий работы на судах Минрыбхоза СССР и др.) [10,16].

В табл. 3 приведены данные о некоторых рекомендуемых показателях мореходности. Как следует из этих материалов, диапазон изменения рекомендуемых показателей достаточно широк, и их величины существенно различны для судов разных типов. В то же время для ССП подобные рекомендации в специальной литературе отсутствуют, несмотря на то, что для них они имеют едва ли не наибольшее практическое значение. Поэтому представляется актуальным рассмотреть возможность назначения этих показателей, исходя в первом приближении из общих принципов безопасности эксплуатации ССП с использованием известных рекомендаций и хорошей морской практики.

Таблица 3
Рекомендуемые предельные показатели мореходности

Авторы, объекты	Бортовая качка	Заливаемость	Слеминг
Дж. Аертсен и др. (контейнеровозы)	—	$N_z = 7$ за 100 с на НП	$N_c = 3$ за 100 с на 3 шп
Р.Тасаки и др. (транспортные суда)	$P(\theta > 25^\circ) = 0,001$	$P_z = 1\%$	$P_c = 1\%$
В.Липис, Д.Кондриков (транспортные суда)	—	$N_{bz} = 7$ за 100 с на НП	$N_{cc} = 0,2$ за 100 с
Б.Чило и др. (транспортные суда)	—	$P_z = 7\%$ на НП	$P_c = 3\%$ на 3 шп
М.Моисеева (рыбопромысловые суда)	$\theta_{3\%} = 7^\circ$ (трансп.) $\theta_{3\%} = 18^\circ$ (добыв.)	—	—
В.Бикельман (транспортные суда)	$\theta_{1/3} = 12^\circ$	$P_z = 5\%$	$P_c = 3\%$ на 0,1L от НП
НАТО (США) (боевые корабли)	$\theta_{1/3} = 8^\circ$	—	—

Скорость хода на волнении

Популярных рекомендаций по нормированию скорости хода на волнении не имеется. Для судов неограниченного плавания можно полагать, что судну достаточно иметь минимальную скорость для обеспечения безопасных маневров в условиях шторма, в частности оно должно, как минимум, стоять на месте в положении вразрез волнам. Для ССП положение усложняется тем, что они по характеристикам прочности могут выдержать штормование лишь на волнении ограниченной силы, поэтому при опасности усиления шторма они должны следовать в места убежища, то есть иметь более широкие ходовые и маневренные возможности, чем суда неограниченного плавания. Учитывая необходимость наличия определенного резерва для принудительного снижения хода судоводителем при наличии заливаемости, слеминга или разгона винтов, а также с целью сохранения способности маневрировать на ограниченной акватории при малой скорости, представляется в первом приближении рекомендовать в качестве минимально допустимой скорости, достижимой на расчетном волнении, величину $V=4.5$ уз, что близко к фактически имеющей место на судах ограниченного плавания с относительно низкой энерговооруженностью.

Бортовая качка

При выборе ограничений по бортовой качке можно руководствоваться, с одной стороны, средними величинами, приведенными в табл. 3, а с другой, — углами входа палубы в воду с тем, чтобы ограничить возможность заливания палубы через борт. Учитывая конструктивные особенности судов классов М-СП, III-СП и II-СП, можно в первом приближении в качестве рекомендуемого норматива принять величину амплитуды бортовой качки $\theta_{3\%} = \min \{15^\circ, \text{угол входа в воду кромки фальшборта}\}$.

Заливаемость палубы

ССП в большинстве своем имеют небольшой надводный борт при относительно высоком баке. Поэтому для них наиболее характерна заливаемость на косых курсовых углах, в значительной степени обусловленная бортовой качкой. Поскольку при этом возможно поступление на палубу достаточно больших масс воды, и известны имевшие место случаи подмочки палубного груза, представляется целесообразным принять в качестве

расчетной схему заливаемости не через бак, а через главную палубу в носовой части. При этом, по нашему мнению, следует при выборе норматива ориентироваться на меньшие значения вероятности, в частности, принять в первом приближении вероятность заливания $P_z=3\%$ в районе схода с бака на главную палубу. Расчеты, выполненные для ряда ССП класса М-СП, показывают, что на расчетном 5-балльном волнении заливаемость близка к этой величине и может быть как больше, так и меньше в зависимости от режима движения.

Слеминг

Поскольку ССП имеют, как правило, меньшие толщины обшивки и набора корпуса, чем морские транспортные суда и военные корабли, при выборе норматива также следует руководствоваться минимальными значениями. Так, предполагается целесообразным принять в качестве норматива вероятность слеминага на 3-м теоретическом шпангоуте $P_c=1\%$ для судов классов М-СП, III-СП и II-СП и $P_c=2\%$ для судов ограниченного I и II районов плавания. Расчеты показывают, что суда класса М-СП на волнении до 5 баллов включительно испытывают слеминг, близкий к допустимому, только при плавании в балласте.

Вертикальные ускорения

ССП вследствие ограниченности осадки и большой относительной ширины испытывают достаточно большие вертикальные ускорения, обусловленные как вертикальной, так и бортовой качкой. Так замеры ускорений в районе центра тяжести на пассажирском теплоходе проекта 302 на волнении $h_{3\%}=3,0$ м дали величину $a_{3\%}=0,3g$, что свидетельствует о существенно низком уровне обитаемости. Аналогичная картина имеет место и на грузовых судах, особенно при перевозке тяжелых грузов. Вопрос о нормировании вертикальных ускорений тесно связан с обеспечением безопасных условий труда на флоте и, по нашему мнению, должен быть решен отдельно, например, как это было сделано в системе флота рыбной промышленности [17].

Разгон винтов

Этот вопрос в рамках работ, выполненных АО ИЦС, не исследовался, но очевидно, что он представляет актуальность

для ССП, имеющих ограниченную осадку. При обсуждении выполненного комплекса работ на Секции экспериментальной гидромеханики НТО им. акад. А. Н. Крылова авторам было рекомендовано провести в дальнейшем подобные исследования и дополнить методику расчета мореходных показателей соответствующей оценкой эффективности двигателей.

Использование результатов в качестве рекомендаций для судоводителей

Разработанные методы оценки элементов волнения и мореходных показателей судов в совокупности с предложенными критериями и нормативами позволяют дать судоводителю достаточно полную информацию о возможном поведении судна в конкретном рейсе и рекомендации по выбору безопасных режимов плавания. На этой основе предлагается предоставлять судоводителю отдельный документ рекомендательного характера под условным названием «Информация о мореходности судна», в состав которого включаются:

- общие сведения о судне;
- методика оценки элементов волнения;
- диаграммы скорости судна на волнении для основных типовых случаев нагрузки (в балласте, в полном грузу, с палубным грузом);
- диаграммы амплитуд бортовой качки в положении лагом в зависимости от интенсивности волнения и состояния нагрузки;
- общие сведения о качке, заливаемости и слеминге с указанием наиболее опасных режимов плавания;
- рекомендации для капитана по выбору безопасных и эффективных режимов штормового плавания.

Последние могут быть приведены в форме диаграмм, выделяющих благоприятные и неблагоприятные зоны по отношению к бортовой качке, потере скорости, заливаемости и слемингу. Примеры таких диаграмм приведены на рис. 2 и 3 (для теплохода проекта 92-040, имеющего класс М-СП). Из рис. 2 следует, например, что при состоянии нагрузки, характеризующимся начальной метацентрической высотой $h_0 = 2,0$ м, неблагоприятными режимами являются высоты волн $h_{3\%} > 3,3$ м при курсовых углах свыше 60° . Рис. 3 определяет (по заштрихованной огибающей) область опасных режимов движения с позиции потери скорости и заливаемости при различных интенсивностях волнения и курсовых углах (то же судно в полном грузу).

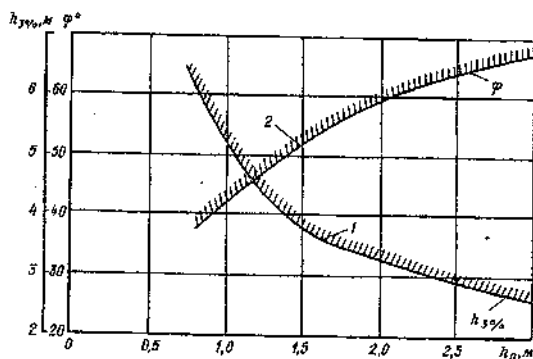


Рис. 2
Рекомендуемые режимы эксплуатации:
1, 2 — области значительной бортовой качки

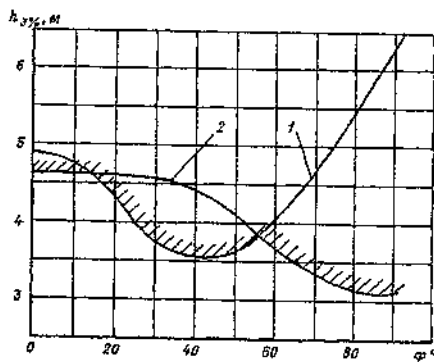


Рис. 3
Рекомендуемые режимы эксплуатации:
1 — область значительной потери скорости;
2 — область значительной заливаемости палубы

Необходимо отметить, что основным недостатком подобной Информации является то, что она может быть составлена только для ограниченного количества типовых параметров волнения, в то время как в реальных условиях параметры волнения, в частности, соотношение между средними периодами и высотами, могут быть отличны от типовых, скажем для полностью развитого волнения. Наиболее приемлемым и перспективным направлением реализации полученных результатов является, очевидно, постановка пакетов прикладных программ на бортовые ЭВМ, что позволит не только существенно повысить точность оценок, но и решить дополнительно ряд практически важных задач.

Выбор оптимальных (экономичных) режимов движения ССП

При движении судна в море в условиях волнения и ветра величина расхода топлива в значительной степени определяется дополнительным сопротивлением, обусловленным этими факторами. Особенно это существенно для ССП, которые характеризуются высокой полнотой обводов и низкой энерговооруженностью, при этом сопротивление на волнении может в 1,5 — 3,0 раза превышать сопротивление на тихой воде. Поскольку его величина сильно зависит от высоты волн и курсового угла, встает вопрос о выборе оптимальных режимов морского перехода, обеспечивающих наилучшие экономические показатели. Определенный опыт в этом направлении накоплен в системе Морфлота. Начиная с 80-х годов ЦНИИМФ проводит работы по созданию информационно-вычислительных комплексов, позволяющих решать широкий круг задач мореходности, в том числе выбирать безопасные и экономичные скорости и курсовые углы при движении судна на волнении [18]. Для ССП подобная задача впервые была поставлена в 1994 г. [19]. Поскольку и характеристики этих судов и условия их эксплуатации существенно отличаются от стандартизируемых в Морфлоте, постановка и решение задачи оказались возможными лишь после того, как был выполнен весь комплекс вышеуказанных работ по оценке гидрометеоусловий по маршруту плавания и мореходных показателей ССП.

В качестве основного принципа выбора оптимальных режимов принято следующее:

величина затрат на расход топлива главными механизмами является определяющей в общесудовых расходах. Из этого следует, что оптимальным режимом будет такой, при котором расход топлива при переходе из пункта А в пункт В будет минимальным, то есть

$$G = G_{\min}, \quad (6)$$

а время перехода — не более допустимого

$$T \leq T_{\max}. \quad (7)$$

Расход топлива при движении судна в различных условиях при работе двигателя по ограничительной характеристике прини-

мается постоянным, что подтверждается результатами натурных испытаний. При этом суммарный расход топлива в рейсе может быть определен по формуле

$$G = G_H [T_x + k(T_x + T_{ст})], \quad (8)$$

где G_H — часовой расход топлива;
 T_x — ходовое время;
 $T_{ст}$ — стояночное время;
 k — коэффициент неходовых затрат.

Решение поставленной проблемы должно осуществляться отдельно в каждом конкретном случае с учетом гидрометеорологических, навигационных и коммерческих условий перехода. Тем не менее, укрупненно можно выделить две основные задачи:

- а) выбор оптимального маршрута;
- б) выбор оптимального времени выхода судна в море с движением по заданному маршруту.

Первая задача решается путем разбивки возможных маршрутов на участки, на протяжении которых характерные элементы волнения $\partial h_{3\%}/\partial t$ и $\partial h_{3\%}/\partial l$ (t — время, l — проходимый судном путь) могут быть приняты постоянными. Это позволяет при наличии соответствующей штормовой диаграммы определить время перехода по i -му участку T_{xi} и путем суммирования рассчитать полное время перехода T и расход топлива G .

В качестве примера в табл. 4 приведены результаты оценки эффективности перехода теплохода проекта 92-040 через Балтийское море от острова Борнхольм до острова Хийумаа в условиях действия устойчивого восточного ветра со средней скоростью 10 м/с. Из приведенных материалов следует, что в данной конкретной ситуации южный маршрут, несмотря на его наибольшую протяженность, является оптимальным и позволяет, по сравнению с кратчайшим центральным, существенно сократить время перехода и расход топлива.

Вторая задача также решается путем разбивки заданного маршрута перехода на отдельные участки с последующим суммированием. При этом в расчет закладывается прогнозируемое распределение высот волн по трассе в реальном времени. В качестве примера рассмотрены переходы теплохода проекта 92-040 от порта Куксхафен до порта Флиссинген в грузу и обратно в балласте при начальном волнении $h_{3\%} = 3,5$ м NNW с последующим ослаблением. При определении элементов волнения

Таблица 4

Оценка эффективности выбора маршрута

Величина	Маршрут			Эффективность южного по отношению к центральному
	Центральный	Северный	Южный	
Протяженность, мили	475	490	530	- 55
Ходовое время, ч	84,5	87,5	71,5	+ 13
Расход топлива, т	18,6	19,2	15,7	+ 2,9
Экономия топлива, %				15,6
Экономия времени, %				15,4

использовались данные СПО ГОИН о средней продолжительности штормов в районе. Результаты оценки приведены на рис. 4 в виде зависимости суммарного расхода топлива и полной продолжительности рейса от времени ожидания выхода. Эти данные свидетельствуют о том, что в данном случае оптимальный по расходу топлива режим соответствует примерно 11-часовому ожиданию, при котором волнение ослабевает до величины $h_{3\%} = 2,0$ м. Экономия топлива составляет при этом 9% в первом случае и 17% во втором. В случае, когда время перехода ограничено по коммерческим соображениям, оптимальный режим соответствует максимально допустимому времени, экономия топлива при этом несколько меньше.

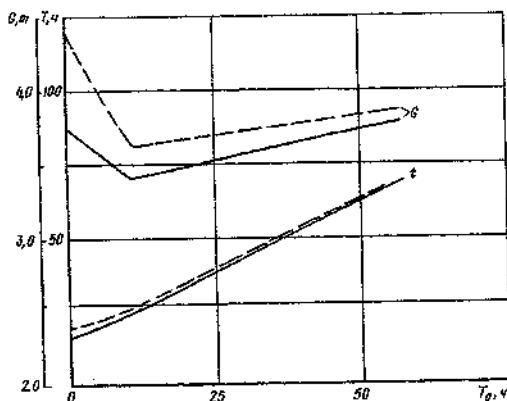


Рис. 4

Расход топлива и время перехода:

— судно в грузу; - - - судно в балласте

Наиболее целесообразно использование предлагаемых методов в том случае, когда суда оснащены бортовыми ПЭВМ. Для упрощения решения последней задачи рекомендуется следующий приближенный алгоритм оценки рационального времени ожидания, основанный на аппроксимации динамики изменения волнения во времени и осредненных оценках 50 %-ного снижения хода ССП: оптимальное время ожидания

$$T_0 = 35(1/h_{opt} - 1/h_t) + \Delta t_0, \quad (9)$$

эффект экономии топлива при этом

$$\Delta G = 35G_h(h_t - h_{opt})[(1+k)/h_{50}/2 - k/h_t/h_{opt}] + G_h[(1+k)(h_t/h_{50})^2/2 - k]\Delta t_0, \quad (10)$$

где h_t — высота волн в начальный момент времени;
 h_{50} — высота волн, соответствующая 50 %-му падению скорости;
 Δt_0 — дополнительное время от начального момента до начала затухания волнения;
 $h_{opt} = h_{50} \sqrt{2k/(1+k)}.$

Заключение

Разработанные практические методы инженерной оценки параметров волнения и мореходности ССП, а также предлагаемые критерии и нормативы, базирующиеся на результатах известных фундаментальных научных работ и данных натурных мореходных испытаний, позволяют решить задачу повышения уровня безопасности и эффективности эксплуатации судов ограниченного плавания.

О важности работ данного направления свидетельствует, к примеру, тот факт, что в 1996 г. АО «Западное пароходство» обратилось в АО ИЦС с просьбой разработать рекомендации по повышению уровня безопасности судов проекта 17310 ограниченного I района при плавании в балласте. По отзывам капитанов головного теплохода «Лава» суда этого типа на умеренном и сильном волнении испытывают интенсивный слеминг, что приводит к необходимости не только снижать скорость хода и изменять курс, но и в ряде случаев принимать решение об уходе судна в места убежища; кроме того, судно в результате сильных ударов и вибрации получило некоторые повреждения. Выполненные исследования показали, что действительно при плавании в балласте суда этого типа испытывают сильный слеминг на

волнении силой 7 баллов, ликвидировать который невозможно ни доступными средствами баллаستировки, ни выбором безопасных скоростей хода и курсовых углов. С другой стороны, было показано, что дополнительное использование в качестве балластной цистерны носового сухого отсека позволяет существенно снизить интенсивность слеминга и обеспечить судну рекомендуемый уровень безопасности на волнении силой 6 баллов практически во всем диапазоне курсовых углов.

В настоящее время работы продолжают в направлении расширения практических возможностей методик и их реализации на бортовых ПЭВМ, хотя последнее пока не нашло широкого применения в связи с финансовыми сложностями судовладельцев.

Список литературы

1. Протокол по установлению условий плавания в море судов с классом Речного Регистра Судов. 1992, 90 с.
2. Разработка и внедрение методики расчетного определения прогнозных высот волн для судоводителей с использованием принимаемой судами гидрометеороинформации. АО ИЦС, отчет по НИР IV-7.7, 1994, 42 с.
3. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л., Гидрометеиздат, 1985, 256 с.
4. Теоретические основы и методы расчета ветрового волнения. Под ред. И.Н.Давидана, Л., Гидрометеиздат, 1988, 264 с.
5. Титов Л.Ф. Ветровые волны. Л.: Гидрометеиздат, 1969, 296 с.
6. Методика оценки высот волн (рекомендации для судоводителей). 5339.42-01, АО ИЦС, 1994, 15 с.
7. Справочник по теории корабля. Под ред. Я. И. Войтунского в 3-х тт., Л.: Судостроение, 1985.
8. Трунин В.К. Задачи и перспективы мореходных испытаний судов смешанного плавания. Тезисы докл. ВНТК Совершенствование средств и методов экспериментальной гидромеханики судна для развития научного прогресса в судостроении, Л.: Судостроение, 1988, с. 14-15.
9. Разработка на базе экспериментально-теоретических исследований методики расчета диаграмм штормового плавания и качки судов смешанного плавания с выпуском Информации о мореходных качествах ССП. АО ИЦС, отчет по НИР XI-3.7, 1994, 82 с.
10. Холодильн А.Н., Трунин В.К. Гидродинамические задачи мореходности и стабилизации судна на волнении. СПб.: 1993, 218 с.
11. Холодильн А.Н., Шмырев А.Н. Мореходность и стабилизация судна на волнении. Л.: Судостроение, 1976, 328 с.
12. Липис В.Б. Гидродинамика гребного винта при качке судна. Л.: Судостроение, 1975, 263 с.
13. Берестецкий А.М., Зорин М.П. и др. Определение скорости хода судов смешанного плавания на встречном волнении. Труды ЛИВТа, вып.148, 1974, с. 30-40.
14. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. Л.: Судостроение, 1982, 287 с.
15. Басин А.М., Анфимов В.Н. Гидродинамика судна. Л.: Речной транспорт, 1961, 684 с.

16. Degtyarev A.B., Kholodilin A.N. Comparative analysis of displacement-type ship operability criteria. Trans. CRF-94, v.2, St.Petersburg: 1994, pp. 129-139.

17. Технические рекомендации по обеспечению здоровых и безопасных условий труда и обитания на промысловых судах при качке и заливаемости. МРХ СССР, М., 1968, 28 с.

18. Липис В.Б., Петров А.А., Силов В.Е. Вопросы диагностики и оптимизации мореходных качеств транспортных судов с помощью бортовой ПЭВМ. Тезисы докл. НТК Проблемы совершенствования комплексных методов прогнозирования мореходных качеств судов и средств освоения океана. СПб.: 1993, с. 76-78.

19. Разработка и внедрение мероприятий по снижению расхода топлива на эксплуатирующихся и создаваемых судах речного флота за счет совершенствования их формы обводов и повышения эффективности пропульсивного комплекса. АО ИЦС, отчет по НИР ИУ-8.4, 1994, 278 с.

УДК 629.12.001:539.4:629.122.1.14

Г.В. Бойцов

О ТРЕБОВАНИЯХ К ПРОЧНОСТИ СУДОВ ОГРАНИЧЕННОГО И СМЕШАННОГО (РЕКА-МОРЕ) ПЛАВАНИЯ

1. Суда указанного типа, отличающиеся относительно меньшими осадками, меньшими (по отношению к длине) высотами корпуса и сравнительно меньшей металлоемкостью конструкций, обладают рядом технико-экономических преимуществ, которые успешно реализуются при соблюдении определенных ограничений по эксплуатации этих судов, регламентируемых Правилами Регистра [1], (см. табл. 1).

Таблица 1
Требования к судам ограниченных районов плавания [1]

Знак ограничения района плавания	Допускаемое удаление от мест убежища	Допустимая высота волны $H_{3\%}^{\text{max}}$, м
I	200 миль	8,5
II	100 миль	7,0
II СП	50 миль в открытых морях 100 миль в закрытых морях	6,0
III СП	50 миль в ограниченных районах	3,5
III	Прибрежное, рейдовое и портовое плавание	—

Выполнение ограничений по максимально допустимой интенсивности волнения, характеризуемый высотой волны 3%-ной обеспеченности

$$h_{3\%} \leq h_{3\%}^{\max}, \quad (1)$$

обеспечивается данными по метеопрогнозам волнений. На их основании выход судна допускается, если прогноз подтверждает соблюдение указанного условия на период времени, достаточный для перехода до следующего места убежища.

Очевидно, однако, что из-за возможных погрешностей метеопрогнозов имеется определенная вероятность, что благоприятный прогноз может не подтвердиться и судно в процессе движения по маршруту может настигнуть волнение, параметры которого будут превышать допустимые Регистром.

При достаточных запасах прочности судов сам по себе факт или вероятность нарушения условия (1) не обязательно связаны с повреждением или, тем более, гибелью судна. Можно лишь считать, что наличие фактов случайного (не преднамеренного) нарушения этого условия приводит к увеличению вероятности таких неблагоприятных последствий.

Очевидно также, что чем больше вероятность случайных нарушений условия (1) на маршруте эксплуатации судна, тем более вероятны подобные последствия.

В связи с этим, наряду с условиями типа (1) должны вводиться ограничения по районам, маршрутам и сезонам эксплуатации судов, которые фактически предназначаются для выполнения дополнительного условия

$$P(h_{3\%}^{\max}) \leq p_0, \quad (2)$$

где $P(h_{3\%}^{\max})$ — общая вероятность невыполнения условия (1) на этих маршрутах с учетом сезонных ограничений;

p_0 — некоторая достаточно малая величина, устанавливаемая с учетом положительного опыта эксплуатации судов рассматриваемого типа и результатов анализа статистики волновых режимов на маршрутах их использования.

Для количественного обоснования требований к прочности судов ограниченных районов плавания, эксплуатация которых удовлетворяет двум указанным ограничениям, естественно принять условие их равной безопасности по показателям эксплуатационной надежности конструкций с судами неограниченного плавания.

Для определения количественных зависимостей, вытекающих из этого условия, которые можно было бы использовать для обоснования возможных изменений требований к прочности судов рассматриваемого типа в зависимости от количественных параметров ограничений (1) и (2), была разработана специальная расчетная методология, основные положения и результаты которой описываются ниже.

2. В качестве базового расчетного аппарата сравнительного анализа уровней волновых нагрузок судов ограниченного и неограниченного плавания были приняты долговременные вероятностные распределения этих нагрузок, широко используемые в мировой практике при разработке расчетных требований к прочности судового корпуса. В общем случае эти распределения имеют вид [2,3]

$$P(Q_i) = \int_0^{q_i^{max}} \dots \int_0^{q_j^{max}} P(Q_i/q_1 \dots q_j) p(q_1 \dots q_j) dq_1 \dots dq_j, \quad (3)$$

где $P(Q_i/q_1 \dots q_j)$ — условное интегральное распределение вероятности (обеспеченность) амплитуд значений рассматриваемых волновых реакций Q_i на квазистационарном режиме эксплуатации судна на нерегулярном трехмерном волнении, характеризуемом совокупностью случайных параметров $q_1 \dots q_j$;

$p(q_1 \dots q_j)$ — плотность вероятности совместного распределения этих параметров;

q_j^{max} — их максимально возможные значения.

При проведении расчетных исследований, направленных на установление общих закономерностей требований, которые нужно предъявлять к характеристикам прочности и усталостного ресурса корпусных конструкций, целесообразно выделять и учитывать минимальное число основных «определяющих» параметров q_j , имеющих наибольшую статистическую изменчивость и в наибольшей мере влияющих на вероятностные распределения анализируемых реакций судов.

Влияние других менее существенно влияющих параметров обычно достаточно оценивать и учитывать с помощью специальных приближенных приемов [2].

В качестве основного определяющего параметра в расчетах согласно алгоритму (3) обычно выбирается параметр интенсивности волнения $h_{3\%}$ или аналогичная ему «значительная высота» волнения

$$h_s \approx 0,76 h_{3\%}. \quad (4)$$

В качестве другого основного определяющего параметра может приниматься курсовой угол φ движения судна по отношению к основному направлению распространения волн. Распределение этого

параметра зависит от интенсивности волнения и ряда других факторов. Однако во многих случаях и, в частности, при исследовании общих нагрузок (изгибающих моментов), действующих на корпус судна, можно ограничиваться оценками в крайних предположениях, полагая движение судна встречным к волнению или все курсовые углы к волнению равновероятными.

Существенна роль объективного задания зависимости от интенсивности волнения его средних периодов соответствующих фиксированным значениям $\tau_m(h_{3\%})$, в особенности при сравнительно невысоких балльности волнения, где изменчивость величин этого параметра велика. Как показал анализ соответствующих данных по волнениям [4] (см. рис. 1), его условная (при фиксированном значении $h_{3\%}$) средняя величина для океанских акваторий $\tau_{m,m}$, с, может оцениваться по формуле

$$\tau_{m,m}(h_{3\%}) \approx 10(h_{3\%}/11)^v, \quad (5)$$

где $v \approx 0,25$.

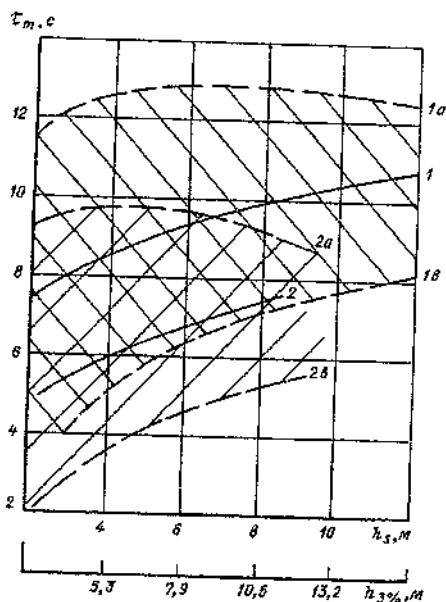


Рис. 1

Распределение средних периодов волнения в зависимости от высот характерных волн согласно [4]:

1 — осредненные значения (математич. ожидания) для океанов; 2 — то же, для морей (Японское, Балтийское, Средиземное); 1а, 1б — практически максимальные и минимальные значения для океанов; 2а, 2б — то же для морей;
 $h_3 = 0,76 h_{3\%}$

При этом случайные отклонения фактических значений $\tau_m(h_{3\%})$ от их указанного среднего значения при сравнительно слабых волнениях, но достаточно существенных для судов ограниченных районов плавания, могут достигать 50% и более. При интенсивных волнениях, близких к предельным, статистическая изменчивость величины $\tau_m(h_{3\%})$ резко снижается.

В связи с рассматриваемой темой следует особо отметить существенное количественное отличие аналогичных данных [4] по морскому волнению (рис.1), согласно которым величина

$$\tau_{m,m}(h_{3\%}) \approx 7(h_{3\%}/8)^v, \quad (6)$$

где также $v \approx 0,25$. Это отражает факт относительно большей крутизны морских волн.

Статистический анализ данных, приведенных в справочной литературе по волнению [4, 5], показал, что в большинстве случаев при движении судов по типовым океанским маршрутам долговременная вероятность параметра $h_{3\%}$ близка к зависимости

$$P(\bar{h}_{3\%}) = \exp[-5,75(\bar{h}_{3\%} - 0,2)], \quad (7)$$

где $\bar{h}_{3\%} = h_{3\%}/h_{3\%}^0$; при $\bar{h}_{3\%} = 1$; $P(1) = 0,01$; $h_{3\%}^0 \approx 7 \div 11$ м.

Возможно также использование аналогичной по результатам аппроксимации

$$P(\bar{h}_{3\%}) = \exp[-4,6\bar{h}_{3\%}^n], \quad (8)$$

где $n \approx 1,2 \div 1,4$ (см. рис. 2).

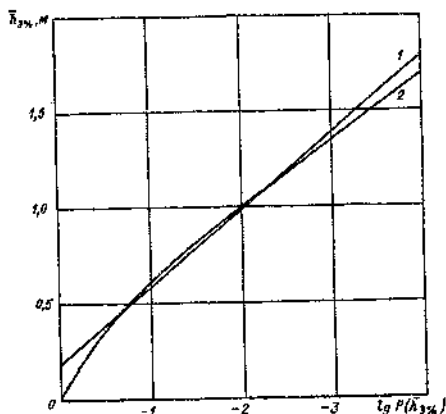


Рис. 2
Зависимость $P(\bar{h}_{3\%})$: 1 — согласно (7); 2 — согласно (8)

В связи с основной задачей описываемой работы — установлением влияния ограничений по эксплуатации судов на волнении на их расчетные волновые нагрузки конкретный порядок построения долговременных распределений нагрузок согласно алгоритму (3) сводился к следующему.

Краткосрочные распределения рассматриваемых линейных общих и местных волновых нагрузок на стационарных режимах волнения как обычно полагались соответствующими закону Релея, дисперсия которого $D_Q(q_1...q_j)$ определялась с помощью известных зависимостей спектральной теории случайных процессов. При этом задача о распределении вероятности амплитуд анализируемых нагрузок подобно тому, как это делается во многих прикладных исследованиях [2, 3, 6], сводилась к аналогичной задаче о распределении амплитуд «эквивалентных волн»

$$r = 0,5h_e, \quad (9)$$

где h_e — высоты этих волн, представляющие собой размахи случайного «выходного процесса» (согласно терминологии статистической динамики), характеризующего рассматриваемую реакцию судна на «входной» процесс волнения.

Дисперсия этого процесса D_r связана с дисперсией нагрузки D_Q зависимостью

$$D_r = (\alpha_Q^*)^{-2} D_Q, \quad (10)$$

где α_Q^* — величина максимума амплитудно-частотной характеристики рассматриваемой нагрузки.

При этом связь амплитудных значений нагрузки краткосрочной или долговременной вероятности P с эквивалентной высотой волны той же вероятности определяется обычной детерминированной зависимостью

$$Q(P) = 1/2 h_e(P) \alpha_Q^*. \quad (11)$$

3. В связи с рассматриваемой проблемой специального внимания требуют данные, характеризующие степень надежности метеопрогнозов параметров интенсивности волнения $h_{3\%}(h_S)$. Выполненные в последние годы статистические исследования погрешностей метеопрогнозов¹, характеризующих разностью

¹Значительный объем соответствующих данных получен, в частности, Дальневосточным региональным научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом. Работа выполнялась под руководством В. Н. Бугакова (ДНИИМФ) по техническому заданию, подготовленному автором настоящей работы.

$\Delta h_{3\%}^f - \Delta h_{3\%}^p$ ($h_{3\%}^f$ и $h_{3\%}^p$ — фактические и ожидаемые значения $h_{3\%}$ согласно суточным метеопрогнозам), показали наличие вполне определенных закономерностей этих параметров.

Установлено, в частности, что имеется определенная тенденция к завышению прогнозируемой интенсивности волнения (средняя величина $\Delta h \approx (-0,1 \div 0,15)h_{3\%}^p$). При этом характеризующий степень

достоверности прогнозов коэффициент изменчивости $\delta_h = \frac{\sqrt{(\Delta h)^2}}{h_{3\%}^f}$

(где $(\Delta h)^2$ — дисперсия значений Δh) имеет тенденцию к снижению по мере увеличения $h_{3\%}^p$ (рис. 3).

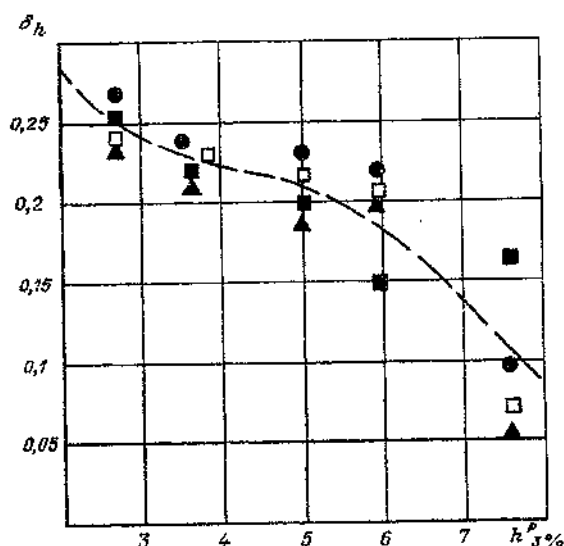


Рис. 3
Значения $\delta_h(h_{3\%}^p)$ согласно данным по Японскому морю:
□, ▲, ■, ● — различные районы этого моря

Расчетный анализ влияния ограничительного условия (1) на изменение (редуцирование) вероятности встречи судов ограниченного плавания с волнением различной интенсивности по сравнению с исходным (истинным) распределением типа (8) был проведен с привлечением указанных данных о параметрах достоверности прогнозов волнения.

Распределение вероятности погрешностей прогнозируемых параметров волнения предполагалось соответствующим нормальному закону со стандартами, соответствующими значениям установленных указанным способом коэффициентов изменчивости δ_h .

Как показали результаты расчетного анализа, некоторые из которых приведены на рис. 4, влияние ограничений рассматриваемого

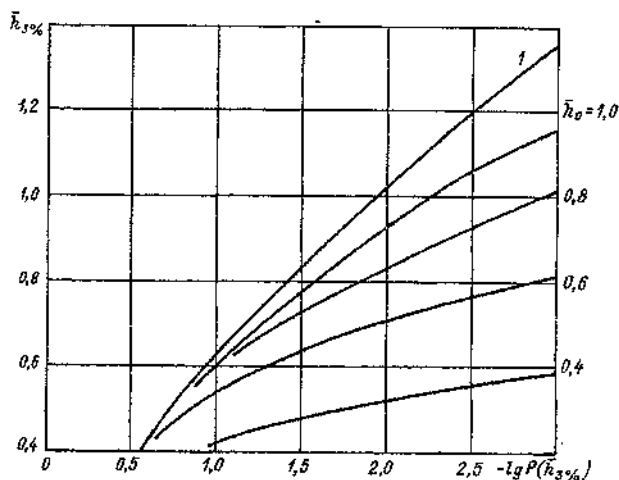


Рис. 4

Изменение вероятностей различной интенсивности волнения на маршруте эксплуатации судна в зависимости от вводимых ограничений при $\delta_h = 0,2$:

$$\bar{h}_0 = \left(1 - \frac{\Delta h}{h_{3\%}}\right) \frac{h_0}{h_{3\%}};$$

$h_0 = h_{3\%}^{\max}$ — максимально допустимая величина $h_{3\%}$;

1 — фактическое распределение $P(h_{3\%})$ на маршруте эксплуатации судна

типа может быть с достаточной степенью точности учтено в выражении (8) уменьшением высоты волны $h_{3\%}^*$ а также увеличением показателя степени « n » этого выражения. Порядок значений соответствующих поправочных коэффициентов, характеризующих снижение масштаба «интенсивности волновых режимов» и степени их статистической изменчивости в связи с вводимыми ограничениями, показан на рис. 5.

4. Полученные таким путем данные использованы для оценки влияния рассматриваемых ограничений на уровни волновых нагрузок, действующих на корпуса судов. Это осуществлялось путем сравнения эквивалентных высот волн заданной долговременной обеспеченности, соответствующих анализируемым нагрузкам согласно (11), для судов ограниченного и неограниченного плавания. Применение этой про-

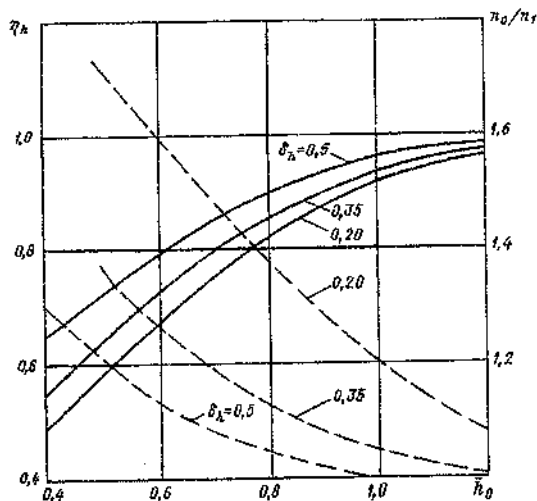


Рис. 5

Поправочные коэффициенты для учета влияния ограничений по волнению на параметры долговременных распределений волновых изгибающих моментов:

— η_k ; — — — n_0/n_1 ;
 n_1 — значения n при отсутствии ограничений;
 n_0 — значения n при наличии ограничений

цедуры связано с необходимостью решения вопроса о выборе обеспеченности (вероятности) эквивалентных высот волн и соответствующих им волновых нагрузок, которые могут считаться наиболее представительными, характерными для принятых в Правилах Регистра [1] расчетных требований к прочности конструкций.

Как показали результаты специального анализа, установленный в Правилах [1] в соответствии с рекомендациями МАКО порядок определения общих волновых изгибающих моментов для корпусов судов неограниченного плавания соответствует вероятности $P \approx 10^{-6,5}$, промежуточной между обычно принимаемыми в расчетной практике при анализе усталостной ($P \approx 10^{-4} \div 10^{-5}$) и предельной ($P \approx 10^{-8}$) прочности. В связи с этим редуцированные коэффициенты общих волновых нагрузок ϕ , отражающие влияние ограничений эксплуатации судов на волнении, принимались равными их среднеарифметическим значениям, соответствующим вероятности $P_1 = 10^{-5}(\mu_1)$ и $P_2 = 10^{-8}(\mu_2)$

$$\phi = 1/2(\mu_1 + \mu_2). \quad (12)$$

Расчетный уровень вероятности местных волновых нагрузок полагается соответствующим $P_1 = 10^{-5}$.

Суда ограниченных районов плавания, в отличие от неограниченных, эксплуатируются только в морских акваториях, для которых, как отмечалось выше, характерны относительно меньшие значения средних периодов волнения и, соответственно, большие крутизны волн. Используемая в описываемом исследовании процедура определения долговременных вероятностных распределений эквивалентных высот волн волновых нагрузок учитывала также и эту особенность эксплуатации судов рассматриваемого типа. Это достигалось при проведении расчетного анализа последовательным использованием безразмерной формы представления параметров, характеризующих относительные размеры судов и масштабные параметры волнения. Один из примеров получаемых таким образом обобщенных закономерностей долговременных распределений эквивалентных высот волн показан на рис. 6.

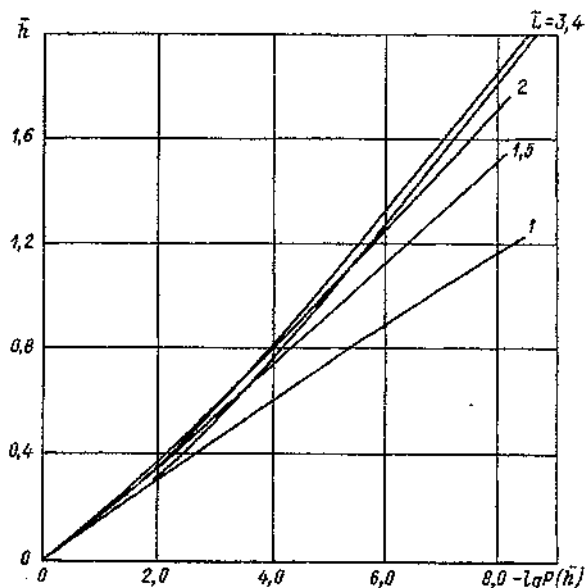


Рис. 6

Относительные значения эквивалентных высот волн для волновых изгибающих моментов с равновероятными курсовыми углами к волнению, равными

$$\bar{L} = (10/\tau \cdot)^2 \cdot L/100; \bar{h} = h_e/h_{3\%}$$

Результаты описанного анализа позволили определить искомые соотношения эквивалентных высот волн ограниченного и неограниченного плавания согласно следующему алгоритму

$$\mu_i = \frac{h_i(P_i)}{h_{ni}(P_i)} = \frac{k(n)_1}{k(n)_{ni}} \times \frac{\eta_h \times (h_{3\%})_1}{(h_{3\%})_{ni}} \times \frac{\bar{h}(P_i; \bar{L})}{\bar{h}(P_i; \bar{L}_{ni})}, \quad (13)^1$$

где $k_i(n)$ — коэффициент, учитывающий влияние различия значений параметра « n » в выражении (8) для судов ограниченного и неограниченного плавания, происходящего из-за различия долговременных распределений интенсивностей волновых режимов на маршрутах эксплуатации сравниваемых судов, а также из-за влияния ограничений по допустимым режимам волнения;

η_h — поправочный коэффициент, учитывающий влияние ограничений по эксплуатации судов на волнении на фактические значения параметра $(h_{3\%})_1$ на маршрутах эксплуатации судов ограниченных районов плавания (см. рис. 5);

$\bar{h}(P_i; \bar{L}) = h_1(P_i; \bar{L})/h_{3\%}$ — относительные значения эквивалентных высот волн заданной обеспеченности P_i в функции от параметра длины судна

$$\bar{L} = (10/\tau)^2 \cdot L/100, \quad (14)$$

где τ — значения средних периодов волнения согласно формулам (5) и (6) для судов неограниченного и ограниченного плавания соответственно при значениях $h_{3\%} = (h_{3\%})_{ni}$ в первом случае и $h_{3\%} = \eta_h(h_{3\%})_1$ — во втором.

При применении описываемой методики и данных по достоверности прогнозов волнения к судам ограниченных районов плавания было принято, что каждому из знаков ограничения [1] соответствуют маршруты морской эксплуатации, интенсивность волнения на которых характеризуется значениями параметра $h_{3\%}$, указанными в табл. 2 согласно известным данным по волнениям в морях, окружающих Евроазиатский материк [4, 5]. Наибольшее из значений $h_{3\%} = 8,5$ м табл. 2 соответствует интенсивным условиям волнения в наиболее бурных морях, таких как Охотское и Японское. Меньшие значения $h_{3\%} = 5,0 - 6,5$ м относятся к более умеренным по волнению морям, таким как Балтийское, Черное, Средиземное.

Таблица 2

Расчетные значения $h_{3\%}$

Знак ограничения района плавания	Принятое расчетное значение $h_{3\%}$, м	h_0 , м
I	8,5	8,5
II	7,0	7,0
II СП	6,5	6,0
III СП	6,0	3,5
III	5,0	2,5

¹Индексы «1» и «ni» относятся к параметрам судов ограниченного и неограниченного плавания.

Значение аналогичного параметра для судов неограниченного плавания принималось равным $(h_3^*)_{nl}=11$ м ($h_3^*=8,3$ м). Согласно результатам специального анализа данных по волнению [4,5] это соответствует условиям эксплуатации судов на маршрутах, проходящих через Северную Атлантику или огибающих Южную Африку.

5. На рис. 7 приведены результаты установленных с помощью описанной методологии редуционных коэффициентов общих и местных волновых нагрузок при различных уровнях ограничения эксплуатации судов на волнении, соответствующих классификации Правил Регистра [1]. Эти результаты предлагается использовать при формулировке новой редакции требований к прочности Правил Регистра к судам ограниченного плавания при определении их расчетных нагрузок.

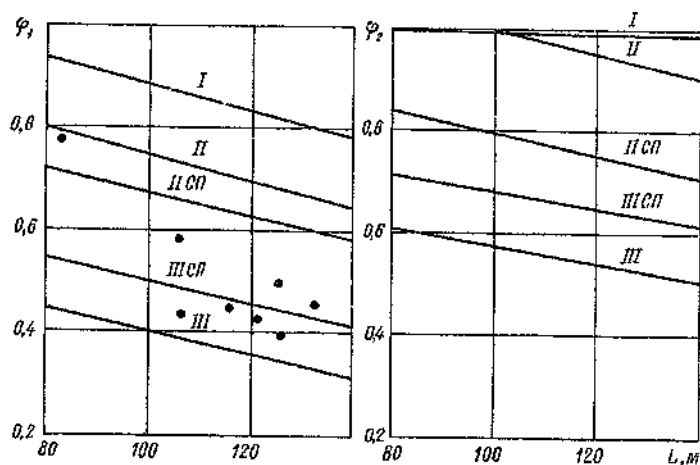


Рис.7

Предлагаемые значения редуционных коэффициентов для расчетных волновых изгибающих моментов и минимальных моментов сопротивления корпуса (φ_1) и местных волновых нагрузок (φ_2);

- — моменты сопротивления корпусов эксплуатирующихся серийных судов смешанного плавания

Предлагается также допускать снижение минимального момента сопротивления корпуса судна W_{min} [1] пропорционально снижению расчетной величины волнового изгибающего момента корпуса. При этом, однако, в выражении для W_{min} должен быть введен откорректированный по результатам натурных испытаний судов смешанного плавания коэффициент φ Правил [1], отра-

жающий повышение циклической нагруженности корпусов судов из-за их упругих колебаний на волнении (волновой вибрации). Это явление особенно характерно для сравнительно менее жестких корпусов судов смешанного плавания, коэффициент ϕ для которых может достигать значения 1,2 — 1,3 и более.

Одновременно следует учитывать также обусловленное повышенной гибкостью корпусов судов снижение волновых изгибающих моментов, которое может достигать для судов указанного типа 5 — 10%.

Описанный подход к редуцированию параметра W_{min} для судов ограниченного плавания основывается на представлении об определяющей роли в формировании параметра W_{min} современных требований МАКО критерия усталостной прочности продольных связей судового корпуса. Это позволяет снижать величину данного параметра практически пропорционально снижению уровня действующих переменных волновых нагрузок. Однако последовательное применение такой концепции требует ограничений снижения W_{min} при применении сталей повышенной прочности (за счет параметра η), что не предусматривается требованиями МАКО. Поскольку подобная непоследовательность указанных требований может особенно неблагоприятно проявиться у судов ограниченного плавания, предлагается для этих судов ввести дополнительное ограничение по минимальным расчетным значениям

$$\eta \geq \eta_{min}.$$

6. При проведении описанного исследования его результаты проверялись и оценивались сравнением с данными о параметрах прочности корпусов судов смешанного (река-море) плавания, по которым имеется длительный положительный опыт регламентированной морской эксплуатации. Как показал этот опыт, при строгом соблюдении предписываемых судам ограничений, параметры прочности их корпусов обеспечивают необходимую безопасность плавания в предписываемым им условиях. Приведенные на рис. 7 данные по редуцированным коэффициентам моментов сопротивления корпусов судов смешанного плавания иллюстрируют достаточную согласованность результатов описанного исследования с практическим опытом эксплуатации судов в условиях заданных ограничений по волнению.

Следует отметить, что большинство иностранных классификационных обществ более консервативно оценивают возможности снижения

требований к прочности судов ограниченного плавания, что, видимо, отчасти объясняется особенностями вводимых этими обществами ограничений. В частности, такие ограничения обычно вводятся только на районы эксплуатации и удаленность от возможных мест укрытия судов от волнения. Исключение в этом отношении представляют Правила Итальянского Морского Регистра [7], отличающиеся расширенной номенклатурой классов судов ограниченного плавания и существенно более детализированным перечнем ограничений по маршрутам их эксплуатации. Соответственно расширены этим обществом возможности снижения расчетных нагрузок и требований к прочности корпусов судов, причем нижний уровень этих требований близок к предлагаемому в настоящей работе.

7. Результаты выполненного исследования и их сопоставление с практикой эксплуатации судов смешанного плавания России и порядком регламентации требований иностранных классификационных обществ к прочности судов ограниченного плавания позволяют сделать следующие выводы.

При конкретизации допустимых условий эксплуатации судов на волнении и строгом соблюдении этих ограничений с использованием действующей системы метеопрогнозов можно обеспечить необходимую эксплуатационную прочность и усталостный ресурс корпусных конструкций судов ограниченного плавания при меньших параметрах их прочности и металлоемкости по сравнению с обычно требуемыми для судов подобного типа большинством классификационных обществ. При этом сравнительно большие возможности относительного снижения массы конструкций имеются у судов большей длины, что так же не учитывается требованиями классификационных обществ.

Количественные результаты описываемого исследования находятся в соответствии с многолетним положительным опытом морской эксплуатации судов смешанного плавания, по уровню запасов прочности и принятым для них ограничениям соответствующим наиболее низким знакам ограничений, принятым Регистром [1], — III СП и III (см. также табл.1). Эти результаты наглядно показывают, что принятая для указанных судов система ограничений по волнению, районам и сезонам морской эксплуатации обеспечивает снижение волновых нагрузок на $\approx 40 \div 60\%$ и более по сравнению с судами неограниченного плавания тех же размерений, что объясняет их достаточную надежность при соответственно более низких запасах прочности конструкций.

В заключение следует особо подчеркнуть, что приведенные теоретические и практические выводы остаются справедливыми только при условии строгого соблюдения устанавливаемых эксплуатационных ограничений судов и поддержании необходимого уровня технического состояния их корпусных конструкций.

Список литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов. Морской Регистр судоходства. СПб.: 1995, том 1. Часть II «Корпус», С. 66-234.
2. Бойцов Г.В., Кноринг С. Д. Прочность и работоспособность корпусных конструкций. Л.: Судостроение. 1972. 264 с.
3. Бойцов Г.В., Палий О.М. Прочность и конструкция корпуса судов новых типов. Л.: Судостроение. 1979. 358 с.
4. «Global Wale Statistics», Compiled and Edited by British Maritime Technology Limited. 1986.
5. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные. Л.: Транспорт, 1974, 359 с.
6. Dynamic Load Approach in Tanker Design ABS. October, 1992.
7. Rules for the Construction and Classification of Ships. Section B — Part I «Rules for the Construction of Steel Hulls of Sea-Going Steel Ships. Requirements Applicable to All Types of Ships». Registro Italiano Navale. 1993.

Е.М. Ашолопов, А.Н. Евдосеев, А.Б. Нестеров, О.Я. Тимофеев

О ПРОЕКТЕ НОВОЙ РЕДАКЦИИ ТРЕБОВАНИЙ ПРАВИЛ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА К ЛЕДОВЫМ УСИЛЕНИЯМ СУДОВ И ЛЕДОКОЛОВ

Введение

Существующая методология регламентации ледовой прочности судов и ледоколов была разработана во второй половине 70-х годов и вошла в Правила Регистра издания 1981 и 1985 гг., а также с некоторыми изменениями Правила Регистра издания 1990 и 1995 гг. [1]. На основе требований данной методологии создавался современный отечественный арктический флот. Вместе с тем расширение районов плавания, осуществленный в 80-х годах переход к продленной, вплоть до круглогодичной, навигации на трассах Северного морского пути (СМП), а также накопленный за этот период опыт эксплуатации арктического флота определили необходимость совершенствования существующей методологии и пересмотра ряда ее концептуальных положений.

1. Основные направления совершенствования требований Правил Регистра к ледовой прочности судов и ледоколов

1.1. Анализ существующей методологии регламентации ледовой прочности и данных о повреждениях арктического флота за последние 15 лет позволил сделать следующие выводы:

а) переход на круглогодичную навигацию в Арктике, а также увеличение скоростей проводки судов более мощными современными ледоколами сопровождались существенным (в 2 — 3 раза) повышением уровня повреждаемости. В таких условиях требование полного исключения ледовых повреждений в виде остаточных пластических деформаций практически невыполнимо даже для ледоколов высших категорий. Поэтому установление достаточного уровня прочности повреждаемых районов корпуса, перераспределение, а не равномерное «размазывание», матери-

ала между различными элементами конструкций ледовых усилений возможно только на основании подходов, учитывающих на уровне расчетных моделей и критериев прочности резервы пластического деформирования материала и действительные формы ледовых повреждений;

б) в Правилах Регистра содержится лишь качественное приблизительное описание допустимых условий эксплуатации, соответствующих ледовым категориям. Для обеспечения обоснованного выбора ледовой категории, способствующего снижению повреждаемости судов и ледоколов в условиях продленной навигации, необходима количественная регламентация допустимых условий ледового плавания, дифференцированная по срокам навигации и арктическим районам;

в) существующий порядок ледовой классификации отдельно судов и ледоколов не согласуется с международной практикой и не отражает современных потребностей в проектировании судов с более высокой по сравнению с категорией УЛА ледовой прочностью. Наряду с этим большинство классификационных обществ для низших (неарктических) ледовых классов использует требования Финско-Шведских Правил о ледовых классах (ФШП) [2]. В связи с изложенным целесообразен переход на единую классификацию судов и ледоколов и согласование требований к низшим ледовым категориям с требованиями Финско-Шведских Правил.

На основании изложенного были установлены следующие направления совершенствования существующих требований Правил Регистра к судам ледового плавания и ледоколам:

введение единой классификации для судов ледового плавания и ледоколов, согласованной с соответствующими подходами ведущих классификационных обществ и учитывающей опыт продленной навигации в Арктике;

переход на физически обоснованные критерии и методы оценки прочности конструкций ледовых усилений, учитывающие резервы пластического деформирования материала и действительные формы ледовых повреждений;

количественная регламентация допустимых условий ледового плавания для различных сроков навигации и районов эксплуатации.

2. Критерии и методы оценки прочности конструкции ледовых усиления

2.1. Анализ данных о ледовых повреждениях, выполненный в работах [3, 4], позволил сформулировать следующие выводы:

а) запасы прочности конструкций ледовых усиления должны обеспечивать исключение глобальных повреждений и повреждений массового характера — обширных районов с гофрировкой наружной обшивки, длинных вмятин, распространяющихся более чем на 6 — 8 шпаций основного набора (см. рис. 1). Появление отдельных повреждений в виде бухтин и локальных вмятин (длиной до 3 — 4 шпаций) с вероятностью реализации (т. е. отношением числа повредившихся конструктивных элементов к их общему числу за нормативный срок службы судна) порядка 7% следует рассматривать как нормальную эксплуатационную практику;

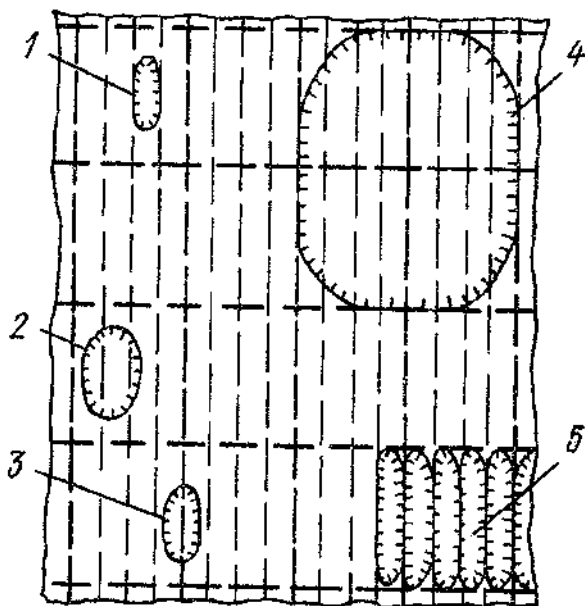


Рис. 1

Допустимые отдельные (1, 2, 3) и допустимые глобальные (4, 5) повреждения конструкций ледовых усиления

б) уровень требований действующих Правил Регистра к прочности конструкций ледовых усиления в среднем обеспечивает выполнение сформулированного положения. Заметное (по сравнению с указанной величиной 7%) снижение вероятности реализации отдельных повреждений связано с неоправданным утяжелением корпуса [4];

в) требование устранения массовых и глобальных повреждений конструкций ледовых усиления определяет рассмотрение их реализации в качестве основного вида отказа. Поскольку эти повреждения, распространяясь на значительных площадях, характеризуются в среднем относительно небольшими стрелками прогибов, то связанный с ними отказ не сопровождается аварийными последствиями, а приводит к частичной утрате работоспособности, проявляющейся в ухудшении внешнего вида судна («ребристый корпус»), увеличении скоростей износа наружной обшивки, повышении ледового сопротивления;

г) отказу в виде массовых повреждений соответствует опасное состояние конструкции, непосредственно предшествующее началу интенсивного нарастания пластических составляющих прогибов. Для относительно жестких конструкций ледовых усиления данному опасному состоянию вполне обоснованно отвечает описываемый в рамках теории предельного равновесия (ТПР) переход конструкции в предельное состояние. Величина предельной нагрузки, вызывающая в конструкции предельное состояние, является интегральной характеристикой ее прочности;

д) анализ влияния факторов повторяемости нагрузок и накопления пластических прогибов показал, что возникновение ледовых повреждений следует рассматривать как результат одноразового воздействия нагрузки, превышающей предельную [3].

2.2. Изложенные соображения позволяют установить в качестве опасного состояния возникновение в конструкциях ледовых усиления в результате одноразового нагружения предельного состояния.

Тогда соответствующий данному опасному состоянию критерий предельной прочности имеет следующую формулировку: расчетная ледовая нагрузка не должна превышать предельной нагрузки конструкции.

Расчетная ледовая нагрузка в Правилах Регистра традиционно характеризуется двумя параметрами. Эти параметры таковы:

- p — интенсивность ледовой нагрузки (давление) в зоне контакта со льдом;
- b — высота распределения нагрузки.

При таком задании расчетной нагрузки математическая формулировка критерия предельной прочности будет иметь вид

$$p \leq p_0(b; \tilde{E}), \quad (1)$$

где $\tilde{E}$ — вектор размеров конструкций ледовых усиления;
 p_0 — предельная нагрузка, определяемая методами ТПР.

Практическое использование (1) предполагает разработку методов, обеспечивающих решение обратной задачи, т. е. проектирование конструкций ледовых усиления на заданную расчетную нагрузку по критерию предельной прочности

$$\tilde{E} = \tilde{E}(p_0; b). \quad (2)$$

Следует отметить, что о целесообразности использования критерия предельной прочности в задачах проектирования конструкций ледовых усиления высказывались еще П.Ф. Папкович и А.К. Осмоловский. В 80-х годах в силу изложенных выше причин актуальность перехода к нормированию по критерию предельной прочности поддерживалась большинством специалистов по ледовой прочности, хотя обоснованность данного перехода не подтверждалась соответствующим анализом, а в значительной степени постулировалась.

Тем не менее, широкого внедрения расчетов по предельной прочности в практику проектирования ледовых усиления добиться пока не удалось. Частично это объясняется спецификой конструкций. Так, повышенная жесткость балочных элементов конструкций и локальность нагрузки требуют при описании предельного состояния учитывать влияние перерезывающих сил, приводящее к нелинейности условий пластичности в пластических шарнирах. Изгибно-сдвиговой характер предельного состояния балочных конструкций определяет в качестве самостоятельной задачи описание предельного равновесия поперечного сечения с учетом конечной жесткости мощного присоединенного пояса. Наряду с этим, необходимо построение расчетных моделей, описывающих предельное состояние кнечных соединений, а также предельное состояние балки при заваливании профиля и совместном смятии и изгибе стенки.

При оценке предельной прочности наружной обшивки учет локализации нагрузки по полю пластины приводит к необходимости отказа от традиционно используемой модели балки-полоски в пользу пластины с конечным соотношением сторон. В расчетных моделях, описывающих предельное состояние листовых конструкций, нельзя

игнорировать фактор поддерживающего влияния, создаваемого для листовой конструкции достаточно жесткой пластиной наружной обшивки или пересекающими ее балками основного набора.

В ТПР постулируется неизменность формы конструкции вплоть до ее превращения в пластический механизм. Выполнение данного постулата связано с необходимостью обеспечения определенного запаса устойчивости сжатых элементов конструкций. В связи с этим система (2), регламентирующая требования к предельной прочности, дополнена соответствующими требованиями к устойчивости конструкций:

$$\tilde{E} \geq \tilde{E}^*(p_0; b), \quad (3)$$

где $\tilde{E}^*$ — вектор размеров конструкций ледовых усилений, регламентируемых требованиями к устойчивости.

В проекте новой редакции требований Правил к ледовой прочности предложены расчетные зависимости для определения размеров связей, учитывающие все указанные выше особенности конструкций. При этом, благодаря правильному учету взаимовлияния изгиба и сдвига при переходе балок в предельное состояние по изгибно-сдвиговому пластическому механизму, удалось разработать расчетные зависимости, учитывающие имеющийся запас по площади стенки при регламентации требуемого пластического момента сопротивления (см. рис. 2). Таким образом, требования проекта новой редакции задают совокупность значений пластического момента сопротивления и площади стенки балки, из которых проектантом может быть выбрана пара величин, являющаяся по тем или иным соображениям оптимальной.

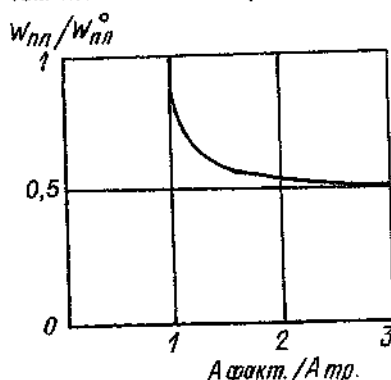


Рис. 2

Снижение требований к пластическому моменту сопротивления балки за счет учета имеющегося запаса по площади стенки

3. Новая ледовая классификация

3.1. Классификация действующих Правил Регистра была построена на основе задания для каждой ледовой категории фиксированного значения условного параметра ледовой прочности, зависящего от скорости движения судна и прочности льда. Его увеличение от низших категорий к высшим отражало повышение способности судов более высоких категорий плавать в более прочных льдах с более высокими скоростями. Однако, как показал дальнейший анализ, такое построение ледовой классификации не обеспечивает в рамках одной категории для судов разных длин и водоизмещений одинаковые допустимые (или опасные) условия плавания во льдах. Тем не менее, это различие не входило в противоречие с принятым в действующих Правилах приближенным качественным характером описания допустимых условий плавания согласно табл. 1, а также положением о том, что условия плавания конкретного судна устанавливаются на основании ледового паспорта.

Таблица 1

Описание допустимых условий плавания во льдах
согласно действующим Правилам Регистра

Категория ледовых усилий	Самостоятельное плавание	Плавание под проводкой ледокола
УЛА	В летне-осенний период навигации во всех районах Мирового океана	Определение возможных сроков и районов плавания, а также режимов плавания под проводкой ледокола является компетенцией судовладельца
УЛ	В летне-осенний период навигации в Арктике в легких ледовых условиях и круглогодично в замерзающих неарктических морях	
Л1	В летний период навигации в Арктике в разреженных битых льдах и круглогодично в замерзающих неарктических морях в легких ледовых условиях	
Л2	В мелкобитом разреженном льду неарктических морей	
Л3	То же	
Л4	Эпизодическое в мелкобитом разреженном льду неарктических морей	

Как отмечалось выше, основным недостатком такого подхода к ледовой классификации является существенная ограниченность информации для обоснованного выбора заказчиком или проектантом судна необходимой ледовой категории. При этом переход к подробному количественному описанию допустимых ледовых условий вступает в явное противоречие с принятым условным способом построения ледовой классификации. В данном случае принципы построения ледовой классификации и описания допустимых условий ледового плавания должны быть строго согласованы в рамках следующего требования: в пределах одной ледовой категории для всех судов, независимо от типа и размерений, должны быть гарантированы одинаковые допустимые условия ледового плавания.

Из этого требования следует, что ледовая категория рассматривается прежде всего как гарантия безопасности судна в установленных допустимых условиях ледового плавания, и, следовательно, между уровнем прочности конструкций ледовых усиления, требуемым для данной ледовой категории, и допустимыми ледовыми условиями существует непосредственная количественная зависимость. Естественно, что при этом повышается ответственность принимаемых нормативных решений и требуется переход от использования некоторых условных измерителей к более обоснованным расчетным моделям.

3.2. Общая методология построения ледовой классификации, удовлетворяющей указанным требованиям, изложена в [5] и сводится к следующему.

3.2.1. Нормативно-количественная база новой ледовой классификации устанавливается на основании следующих положений:

а) действующие Правила Регистра отражают накопленный на настоящий момент опыт проектирования и эксплуатации российского арктического флота. Регламентируемый ими уровень прочности конструкций ледовых усиления в целом является удовлетворительным и может быть принят за основу при разработке новой редакции Правил;

б) требования ФШП для неарктических морей используются большинством классификационных обществ. Поэтому уровень прочности конструкций ледовых усиления низших ледовых категорий новой редакции Правил Регистра должен быть согласован с ледовыми классами ФШП;

в) Правила Американского Бюро Судостроительства (АБС) [6], как и действующие Правила Регистра, базируются на гидродина-

мической модели удара судна о лед [7], но в них использована единая классификация судов ледового плавания и ледоколов. Поэтому их требования целесообразно принимать во внимание при регламентации прочности конструкций ледовых усилений судов высших ледовых категорий.

3.2.2. Расчетные параметры прочности льда задаются в рамках принципа детерминированного увеличения прочности льда с ростом ледовой категории

$$\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}_{oi} \times \varphi(H; H_{oi}), \quad (4)$$

где i — индекс ледового класса судна;
 $\tilde{\sigma}$ — вектор параметров прочности льда;
 H — толщина льда;
 $\tilde{\sigma}_{oi}, H_{oi}$ — наиболее характерные для i -го ледового класса значения параметров прочности и толщины льда;
 $\varphi(H; H_{oi})$ — функция, учитывающая влияние толщины льда на параметры прочности льда через функциональную связь толщины с возрастом льда (одно-, двух- и многолетний лед) [8].

3.2.3. Методическую основу построения ледовой классификации составляет специально разработанный пакет следующих программ:

а) программы проектирования конструкций ледовых усилений на основе требований Правил ведущих классификационных обществ;

б) программы расчета предельной прочности конструкций ледовых усилений, позволяющие построить кривые предельной прочности, представляющие собой зависимость $p^{\circ}(b)$ предельного давления p° от высоты распределения нагрузки (основной геометрический размер эпюры ледовой нагрузки) b ;

в) программы построения опасных режимов движения судов во льдах $v^{\circ}(H)$ (где v° — опасная скорость плавания, H — толщина льда) по заданным расчетным параметрам прочности льда и кривой предельной прочности, характеризующей уровень прочности корпуса (в соответствии с алгоритмом [8]).

3.2.4. Построение ледовой классификации осуществлялось на основе расчетного анализа, включавшего следующие этапы:

а) формируется представительская сетка судов с вариацией длин в пределах 50—300 м. В рамках сетки учитывается зависимость основных общепроектных характеристик судов (водоизмещения, формы обводов корпуса, шпации основного набора, длин пролетов балок, предела текучести материала) от

ледовой категории и длины судна. Для ледоколов в соответствии со сложившейся практикой проектирования сетка трансформируется в ледокольный ряд, в котором возрастание ледовой категории сопровождается увеличением водоизмещения, длины и мощности энергетической установки;

б) выполняется проектирование конструкций ледовых усиления на ледовые категории и классы рассматриваемых Правил применительно к сформированной сетке судов;

в) регламентируется процедура учета износа конструкций ледовых усиления, единая для требований различных Правил. Определяются размеры конструкций без добавок на износ, при этом считается, что данные размеры регламентируются только требованиями к прочности конструкций;

г) выполняются расчеты кривых предельной прочности для всей сетки судов применительно к прочным размерам конструкций ледовых усиления. В результате этих расчетов формируется банк кривых предельной прочности для всех рассматриваемых Правил классификационных обществ

$$p_{ki}^{oj} = p_{ki}^{oj}(b), \quad (5)$$

где j — индекс классификационного общества, по требованиям которого спроектированы конструкции ледовых усиления ($j=1$ — Правила Регистра, $j=2$ — Правила АБС, $j=3$ — Финско-Шведские Правила);
 k — номер судна в сетке ($k=1$ при $L=50$ м ..., $k=9$ при $L=300$ м);
 i — индекс ледовой категории или класса;

д) выполняются расчеты опасных режимов движения применительно к сетке судов для банка кривых предельной прочности (5).

Для судов ледового плавания опасные режимы строятся для случая прямого удара корпуса о льдину. Для ледоколов учитывается возможность реализации вслед за прямым отраженным ударом противоположным бортом о кромку соседнего ледового поля. Учет данной возможности отражает специфику работы ледоколов во льдах.

При построении кривых опасных режимов используются последовательные приближения, в процессе которых устанавливается соответствие между ледовыми категориями Правил Регистра и ледовыми классами других классификационных обществ; для последних определяются нормативные характеристики ледовых условий и уровни износа связей. В результате формируется банк кривых опасных режимов движения

$$v_{ki}^{oj} = v_{ki}^{oj}(H); \quad (6)$$

е) банк кривых (6) группируется по ледовым категориям и ледовым классам. В рамках фиксированной ледовой категории (класса) имеет место разброс кривых опасных режимов для судов различных длин

$$v_{ik}^{ij}(H) \neq v_{2k}^{ij}(H) \neq \dots \neq v_{jk}^{ij}(H) \neq \dots v_{9k}^{ij}(H), \quad (7)$$

где $i = \text{const}$; $j = \text{const}$.

Наличие разброса (7) свидетельствует об определенном несовершенстве требований соответствующего классификационного общества, поскольку при этом в рамках одной категории (класса) не обеспечена идентичность условий плавания во льдах судов с различными длинами, водоизмещениями, формами обводов и т. п. (см. рис. 3);

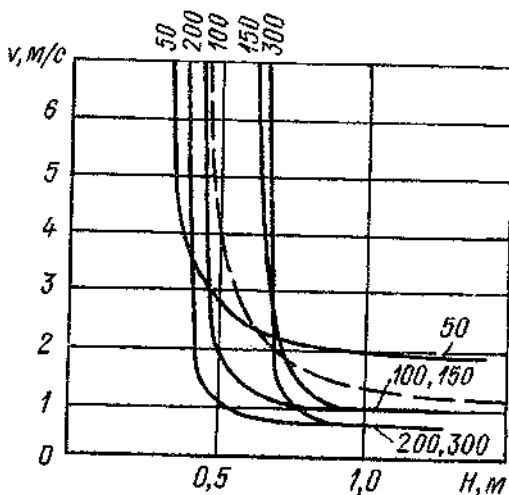


Рис. 3

Сопоставление базового режима для категории Л2 проекта новой редакции (---) с опасными режимами движения для категории 1В Финско-Шведских Правил (—) судов различных длин (от 50 до 300 м)

ж) выполняется процедура осреднения кривых опасных режимов в рамках каждой категории или класса, которым должны соответствовать категории новой редакции Правил Регистра. В результате осреднения определяются базовые кривые опасных режимов движения (сокращенно — базовые режимы):

$$v_{bk}^i(H) \approx \frac{1}{9} \sum_{k=1}^9 v_{ki}^{ij}(H). \quad (8)$$

Базовый режим является интегральной количественной характеристикой ледовой категории новой редакции Правил. Им устанавливаются осредненные условия плавания судна во льдах, превышение которых связано с возможностью получения ледовых повреждений. Построение новой ледовой классификации на основе базовых режимов обеспечит:

регламентацию в рамках каждой ледовой категории одинаковых для всех судов допустимых условий плавания во льдах, независимо от размерений и формы обводов конкретного судна;

установление стабильного гарантированного запаса допустимых условий плавания судов по отношению к опасным, приводящим к ледовым повреждениям корпусов.

В проекте новой редакции вводится девять категорий ледовых усилений: Л1 — Л9, при этом больший номер соответствует более тяжелым условиям ледового плавания. Если судно является ледоколом, символ категории записывается как ЛЛ6, ЛЛ7, ЛЛ8 или ЛЛ9. Соответствие категорий новой редакции Правил категориям действующих Правил Регистра, а также классам АБС и ФШП показано в табл. 2.

Таблица 2

Соответствие ледовых категорий (классов) проекта новой редакции Правил Регистра и действующих Правил ведущих классификационных обществ

Новая редакция Правил Регистра России	Правила Регистра СССР издания 1995 г.	Финско-Шведские Правила	Правила Германского Ллойда	Правила Американского Бюро Судостроения
Суда ледового плавания				
Л1	-Л4	1С	Е1	—
Л2	-Л3	1В	Е2	—
Л3	-Л2	1А	Е3	—
Л4	-Л1	1А Super	Е4	—
Л5	УЛ	—	—	-А2
Л6	—	—	—	-(А2 ÷ А3)
Л7	УЛА	—	—	-(А3 ÷ А4)
Л8	—	—	—	А4
Л9	—	—	—	А5
Ледоколы				
ЛЛ6	ЛЛ4	—	—	А2
ЛЛ7	ЛЛ3	—	—	А3
ЛЛ8	ЛЛ2	—	—	А4
ЛЛ9	ЛЛ1	—	—	А5

Как видно из табл. 2, неарктические ледовые категории Л1, Л2, Л3, Л4 согласуются с классами ФШП 1С, 1В, 1А 1А Super и приближенно соответствуют категориям Л4, Л3, Л2, Л1 действующих Правил Регистра. Категория Л4 новой редакции является промежуточной между неарктическими и арктическими, то есть допускает эксплуатацию как в замерзающих неарктических морях, так и на трассах СМП. Суда категории Л5 и выше новой редакции предназначены для плавания в арктических морях.

Для категорий Л5, Л7 новой редакции обеспечивается соответствие по базовым режимам категориям УЛ, УЛА действующих Правил Регистра; категория Л6 вводится как промежуточная между Л5 и Л7, поскольку между категориями УЛ и УЛА имеет место неоправданно большой диапазон; наряду с этим обеспечивается приблизительное соответствие по базовым режимам категорий Л5, Л6, Л7 с классами А2, А3, А4 Правил АБС. Суда категорий Л8, Л9 новой редакции по базовым режимам соответствуют классам А4, А5 Правил АБС. Ледоколы категорий ЛЛ6, ЛЛ7, ЛЛ8, ЛЛ9 новой редакции по базовым режимам соответствуют категориям ЛЛ4, ЛЛ3, Л2, ЛЛ1 Правил Регистра и ледовым классам А2, А3, А4, А5 Правил АБС.

4. Определение расчетной ледовой нагрузки

Расчетные нагрузки на корпус судна или ледокола регламентировались при создании проекта новой редакции Правил в соответствии с выбранными базовыми режимами движения. При этом как для каждой точки кривой базового режима (то есть для каждой толщины льда и соответствующей ей скорости хода), так и для каждой рассматриваемой точки корпуса судна (практически рассматриваются точки грузовой ватерлинии на каждом теоретическом шпангоуте в пределах носового заострения) расчетными методами определяется своя пара значений параметров ледовой нагрузки p и b (ледового давления и высоты его распределения). Однако, для регламентации размеров связей в рамках Правил традиционно задается лишь пара характерных параметров ледовой нагрузки (p_n , b_n), что позволяет разумным образом ограничить необходимый объем расчетов. Поэтому неизбежно принятие ряда нормативных решений, основанных на расчетном анализе существующей практики. При этом необходимо учитывать как

наиболее типичные значения параметров ледовой нагрузки для рассматриваемого района, так и особенности конструкции ледовых усиления судов, чтобы избежать ситуации, когда неудачный выбор расчетной точки (p_n , b_n) приводит к заметным ошибкам в регламентации уровня прочности конструкций (см. рис. 4). Так, для участков корпуса, близких к форштевню, наибольшие нагрузки возникают при ударе с большой скоростью о сравнительно тонкий лед, то есть ледовые нагрузки отличаются высокой интенсивностью p и сравнительно малой высотой распределения b . Напротив, для участков носового заострения корпуса, расположенных близко к переходу в цилиндрическую вставку, характерны большие значения b и меньшие p , что соответствует удару с умеренной скоростью о толстый лед. Для более правильного учета этого обстоятельства в проекте новой редакции Правил предусмотрено обязательное выделение промежуточного района ледовых усиления для судов арктических ледовых категорий (включая промежуточную категорию Л4).

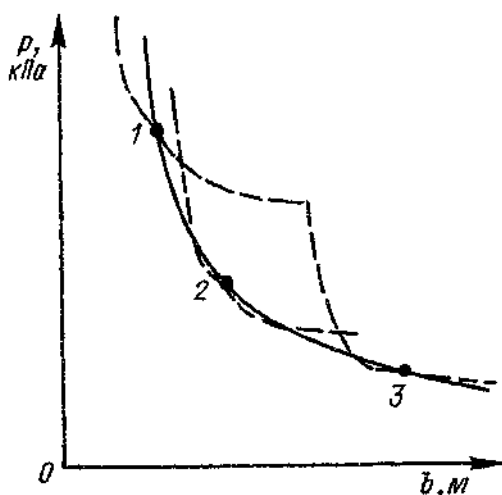


Рис. 4

Выбор расчетной точки на кривой предельной прочности конструкций ледовых усилений:

- исходная кривая, определяемая базовым режимом движения во льдах;
- - - кривые, регламентируемые прочностью конструкций, размеры которых выбраны по расчетным точкам p_n , b_n ;
- — расчетные точки (2 — правильно выбранная; 1, 3 — неудачно выбранные)

Расчетная зависимость для определения параметров ледовой нагрузки (p_n , b_n) имеет вид:

$$\begin{cases} p = 2500 a_i v_m^6 \sqrt{\Delta/1000}, \\ b = c_i k_\Delta u_m, \end{cases} \quad (9)$$

где $k_\Delta = \sqrt[3]{\Delta/1000}$, но не более 3,5;

Δ — водоизмещение, т;

v_m , u_m — максимальные в пределах района (носового или промежуточного) значения коэффициентов формы v и u ;

a_i , c_i — коэффициенты, зависящие от ледовой категории.

Степени $1/6$ и $1/3$, в которых входит в формулы (9) водоизмещение, приняты такими же, как в расчетных зависимостях гидродинамической модели [7]; коэффициенты формы v и u определяются так же, как и в действующих Правилах Регистра, лишь для углов наклона шпангоута меньше 7° вводится поправка к u , учитывающая модель удара о лед вертикальным (или близким к вертикальному) бортом; ограничение $k_\Delta \leq 3,5$ введено для того, чтобы избежать ситуации, когда для крупных судов расчетная высота распределения ледовой нагрузки превышает пролет шпангоута.

Регламентация ледовых нагрузок, исходя из базовых режимов для первичного удара о лед на прямом курсе, возможна лишь применительно к району носового заострения. Средний же район (в пределах цилиндрической вставки) подвергается действию ледовых нагрузок при ударе обломками льда, на циркуляции, а также при ледовом сжатии. В настоящее время отсутствует научно строгая и хорошо апробированная теория, описывающая эти виды нагрузок. С другой стороны, обширный опыт эксплуатации судов, спроектированных по Правилам Регистра, показывает, что прочность средней части судов ледового плавания вполне достаточна, поскольку даже в тех случаях, когда суда эксплуатировались в более тяжелых условиях, чем предусматривала их категория, повреждаемость среднего района была относительно невысока. Поэтому структура расчетных зависимостей для определения ледовых нагрузок на средний район принимается в виде, подобном (9):

$$\begin{cases} p_B = 1500 a_i^B \sqrt[6]{\Delta/1000}, \\ b_B = c_i^B k_\Delta c_B, \end{cases} \quad (10)$$

где Δ , k_Δ — соответствует (9);

c_B — коэффициент, зависящий от наклона борта в средней части;

a_i^B , c_i^B — численные коэффициенты, зависящие от категории ледовых усилений.

Природа нагрузок на кормовую оконечность для судов низших ледовых категорий та же, что и на средний район, поэтому для этих категорий высота распределения ледовой нагрузки может приниматься равной 80% высоты распределения для среднего района, а интенсивность — в долях от интенсивности среднего района, так как за счет влияния углов наклона ватерлинии к ДП можно несколько снизить нагрузки на кормовую оконечность по сравнению со средней частью.

Для высших ледовых категорий нагрузки на кормовую оконечность связаны с прямыми ударами кормой о ледовое поле при движении задним ходом, маневрировании в канале и т. п. Поэтому для них высота распределения ледовой нагрузки может быть принята такой же, как и в носовом районе, а ее интенсивность — в долях от интенсивности нагрузки носового района.

Применительно к ледоколам переход к новой редакции Правил Регистра связан только с изменением принципов нормирования ледовых нагрузок, поскольку опыт эксплуатации российских ледоколов является наиболее представительным и подтверждает сбалансированность требований Правил Регистра к ледовой прочности ледоколов.

Прогрессивными особенностями проекта новой редакции в отношении нормирования ледовых нагрузок на ледоколы можно считать унификацию расчетных формул для нагрузок на носовой район судов и ледоколов, учет в явном виде зависимости расчетного ледового давления от мощности ледокола, а также нормирование нагрузок на среднюю часть корпуса, исходя из расчета отраженного удара.

5. Регламентация допустимых условий ледового плавания

Количественное описание допустимых условий ледового плавания, обеспечивающее возможность обоснованного выбора заказчиком судна необходимого ледового класса, разработано с учетом особенностей эксплуатации ледокольного и транспортного флота на трассах СМП. К данным особенностям относятся следующие:

- необходимость выполнения определенного объема перевозок независимо от сложности ледовых условий;
- большая протяженность трасс;

эксплуатация в условиях продленной (вплоть до круглогодичной) навигации;

существенная изменчивость ледовых условий, регулярное появление на трассах многолетних арктических льдов, реализация с периодичностью порядка 10 лет навигаций с экстремальными по тяжести ледовыми условиями.

В основу процедуры регламентации допустимых условий плавания, подробно описанной в [9], положены методы определения допустимых скоростей плавания судов во льдах и статистические данные о параметрах ледовой обстановки. В итоге в проекте новой редакции Правил представляется информация о предельно допустимых типах льдов, допустимых скоростях плавания в зависимости от толщины и торосистости льда, а также времени навигации, допустимых районах плавания в зависимости от времени плавания, способов ледового плавания и типа навигации.

Среди перечисленных видов количественной информации наибольшую ценность для выбора ледовой категории представляют данные о допустимых районах плавания, при определении которых рассматриваются:

пять районов плавания (моря СМП: Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское);

два сезона плавания (зимне-весенняя и летне-осенняя навигация);

четыре типа навигации по тяжести: экстремальная (Э) (например, навигация 1983 г.) с периодичностью раз в 10 лет, тяжелая (Т), средняя (С) и легкая (Л) с периодичностью раз в 3 года каждая;

два варианта тактики ледового плавания (самостоятельное плавание (СП) и плавание под проводкой ледокола (ПЛ).

В проекте новой редакции Правил информация о допустимых районах плавания представлена в виде табл. 3.

Заключение

Разработанный проект новой редакции требований Правил Регистра обеспечит повышение эффективности и эксплуатационной надежности судов ледового плавания и ледоколов благодаря положенной в его основу прогрессивной методологии нормирования на базе физически обоснованных критериев и методов оценки прочности конструкций ледовых усилений, учитывающих резервы

Таблица 3

**Допустимые районы эксплуатации судов арктических ледовых категорий
согласно проекту новой редакции Правил Регистра**

Ледо- вая кате- гория	Спо- соб ледо- вого плава- ния	Зимне-весенняя навигация в морях					Летне-осенняя навигация в морях				
		Барен- цево	Карс- кое	Лап- тевых	Восто- чно- Сибир- ское	Чукот- ское	Барен- цево	Карс- кое	Лап- тевых	Восто- чно- Сибир- ское	Чукот- ское
		ЭТСЛ	ЭТСЛ	ЭТСЛ	ЭТСЛ	ЭТСЛ	ЭТСЛ	ЭТСЛ	ЭТСЛ	ЭТСЛ	ЭТСЛ
Л4	СП	---+	----	----	----	----	++++	--++	----	--++	--++
	ПЛ	*++	---+	----	----	---	++++	*+++	--++	*++	*++
Л5	СП	--++	---+	----	----	----	++++	+++	--++	--++	--++
	ПЛ	*+++	--*	---+	---+	--*	++++	*+++	*+++	*+++	*+++
Л6	СП	*+++	---+	---+	---+	---+	++++	++++	+++	+++	+++
	ПЛ	++++	*+++	--*	--*	*++	++++	++++	++++	++++	++++
Л7	СП	++++	--++	---+	---+	---+	++++	++++	++++	++++	++++
	ПЛ	++++	++++	*+++	*+++	*+++	++++	++++	++++	++++	++++
Л8	СП	++++	++++	--*	*+++	*+++	++++	++++	++++	++++	++++
	ПЛ	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++
Л9	СП	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++
	ПЛ	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++
Условные обозначения: + — эксплуатация разрешена; * — эксплуатация связана с повышенным риском получения повреждений; - — эксплуатация запрещена.											

пластического деформирования материала и действительные формы ледовых повреждений. Обоснованность принятых в проекте нормативных решений обеспечивается представительным анализом опыта эксплуатации и данных о повреждаемости российского арктического флота, статистических данных о толщинах и параметрах прочности льда на трассах СМП, действительных запасов предельной прочности конструкций ледовых усилений, заложенных в требования действующих Правил Регистра и ведущих классификационных обществ.

В проекте новой редакции Правил реализована новая концепция ледовой классификации по базовым режимам движения судов во льдах, обеспечивающая:

регламентацию в рамках каждой ледовой категории одинаковых для всех судов допустимых условий плавания во льдах, независимо от их размерений и формы обводов;

установление стабильного гарантированного запаса допустимых условий плавания судов во льдах по отношению к опасным, приводящим к ледовым повреждениям корпусов;

реализацию единого подхода к нормированию ледовой прочности судов и ледоколов;

согласование на основе сопоставления базовых режимов движения требования к низшим ледовым категориям (Л1, Л2, Л3, Л4) с требованиями к ледовым классам (1С, 1D, 1А, 1А Super) Финско-Шведских Правил для Балтики.

К несомненным достоинствам предлагаемой новой редакции Правил следует отнести концепцию ледовой категории как гарантии безопасности плавания в количественно регламентированных ледовых условиях.

Список литературы

1. Морской Регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. СПб.: 1995.

2. Finnish-Sweden Ice Class Rules, Finnish Board Navigation. Helsinki: 1985.

3. Апполонов Е. М. Проектирование конструкций ледовых усилений по критерию предельной прочности. СПб.: Судостроение, №2, 1992. С. 9-13.

4. Appolonov E. M., Nesterov A. B. The investigation of ice damage and increase of the requirements to ice strength of Arctic ships. Proc. of the 13 th int. conf. POAC'95. Vol. 1, pp. 42-51. Murmansk, Russia: 1995.

5. Appolonov E. M., Nesterov A. B., Timofeyev O. Y. Ice strength in connection with classification of ships and icebreakers. Proc. of int. conf. «The Centenary of the Krylov SPI». Section C, pp. 47-54. St. Petersburg: 1994.

6. American Bureau of Shipping. Rules for Building and Classing Steel Vessels. Part 5, Section 1, Strengthening for Navigation in Ice. New York: 1992.

7. Курдюмов В. А., Хейсин Д. Е. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед. Прикладная механика, т. XII, вып. 10. Киев: 1978. С. 103-109.

8. Апполонов Е. М., Нестеров А. Б. Уточненный метод определения расчетных скоростей движения судов во льдах. В сб. ВНТО им. акад. А. Н. Крылова, вып. 514, Л.: 1991. С. 4-16.

9. Appolonov E. M., Nesterov A. B., Stepanow I. V., Timofeyev O. Y. The way of regulation of allowable ice conditions for operation in ice within the framework of the requirements to the Arctic class of Arctic ship. Proc. of the 13 th int. conf. POAC'95. Vol. I, pp. 52-61. Murmansk, Russia: 1995.

О.Е. Литонов

ПРОБЛЕМЫ ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕДОСТОЙКИХ ПЛАТФОРМ

Введение

Освоение ресурсов континентального шельфа в замерзающих акваториях требует создания принципиально новых технических средств, способных работать в сложных климатических условиях. Необычность и суровость этих условий чрезвычайно осложняют проектирование новых видов инженерных сооружений, а далеко не полные сведения об окружающей среде усугубляют картину. Между тем уже сегодня в связи с началом создания первых отечественных ледостойких платформ совершенно необходимо знание особенностей ледового режима шельфовых зон северных акваторий, физико-механических характеристик льда, оказывающих влияние на ледовые воздействия, методов определения реакций сооружений на ледовые воздействия, эффективности конструктивных мероприятий, нормативных показателей, обеспечивающих безопасную эксплуатацию экологически ответственных сооружений.

Несмотря на то, что освоение северного шельфа по мировым меркам занимает весьма небольшой промежуток времени, уже сегодня можно говорить о некоторых тенденциях в конструктивно-архитектурном облике технических средств, способных работать в условиях замерзающих морей. Доминирующим фактором, определяющим конструктивные типы этих средств, естественно, является необходимость обеспечения восприятия неизмеримо большего внешнего давления, чем это приходилось делать ранее в морских условиях.

Конечно, для восприятия огромных ледовых давлений, более чем на порядок превосходящих волновые, необходимо иметь соответствующие конструктивные формы и размеры элементов. В настоящее время можно говорить о следующих классах ледостойких сооружений, имеющих связь с грунтом:

- опертые на дно (А);
- острова (Б).

Каждый из этих классов можно подразделить на следующие категории:

в класс А входят гравитационные — А1, на сваях — А2 и смешанные — А3;

в класс Б входят насыпные — Б1 и укрепленные острова — Б2.

Каждая из категорий подразделяется на дополнительные.

Например, категория А1 может содержать в себе стационарные и передвижные сооружения, а по архитектурно-конструктивному типу включать в себя моноподы, многоопорные платформы и платформы типа кессонов. В табл. 1 и 2 представлены характерные силуэты ледостойких сооружений, заимствованные из работы П. Трускова [1].

Одной из основных трудностей проектирования ледостойких платформ служит отсутствие последовательной нормативно-методической базы, что вынуждает проектантов прибегать к использованию отдельных документов, имеющих то или иное отношение к проектированию ледостойких сооружений как отечественного, так и зарубежного производства. Однако, совершенно очевидна практическая невозможность получения эффективных решений вопросов обеспечения надежности и безопасности сооружения на базе эклектически собранных, взаимно не согласованных методик и нормативов. Поэтому на повестке дня остро стоит вопрос разработки нормативно-методической основы проектирования ледостойких платформ, имеющих следующие принципиальные особенности:

работа сразу в четырех средах: атмо-, гидро-, лито-, криосферах (практически невозможно назвать другое инженерное сооружение, находящееся под влиянием такого большого числа внешних факторов, включая ветер, волнение, течение, лед, грунт, температуру, сейсмическую обстановку);

невозможность уклонения от внешних воздействий (например, по сравнению с судами) или хотя бы смягчения этих воздействий (например, режим штормового отстоя у плавучих буровых установок);

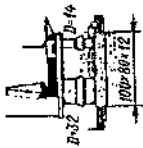
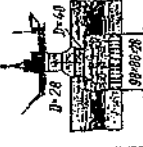
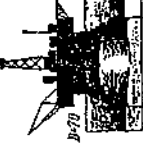
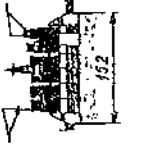
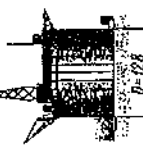
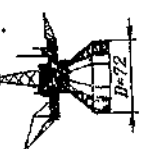
отсутствие доковых освидетельствований;

трудности, а порой невозможность осмотра и ремонта большинства несущих конструкций;

большие толщины, что приводит к проблеме хрупкости из-за объемного напряженного состояния и необходимости использования сталей с Z-свойствами;

чрезвычайно малый опыт эксплуатации подобного рода сооружений, тем более в экстремальных условиях;

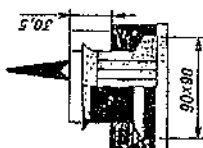
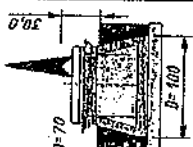
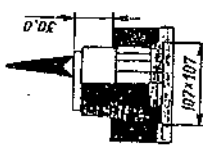
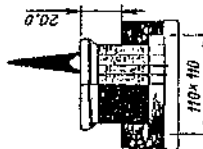
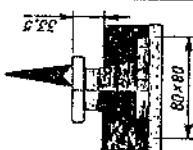
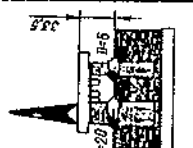
Таблица 1
Параметры различных вариантов ледостойких стационарных платформ для освоения шельфа России (1980-1998 гг.)

Компания	ВНИПИморнефть (Россия)	ВНИПИморнефть (Россия)	«Еврол» (США) — «SODECO» (Япония)	ВНИПИморнефть (Россия) — норвежский контрагент	СахалинНИПИ-морнефть — ЦНИИПСК (Россия)	ВНИПИморнефть (Россия)
Варианты платформ, месторождение	Базовый вариант: Пилтун-Астоховское (Сахалин) 	Базовый вариант: Лунское (Сахалин) 	Базовый вариант: Чайво (Сахалин) 	Приразломное (Печора море — арктический шельф) 	Стальной остров (Сахалин) 	Астрахановское (Сахалин) 
Параметры						
1. Глубина воды, м	28,75	49,0	25,0	20,0	25,0	15-20
2. Количество скважин	36	24	60	62	60	16
3. Количество платформ	2	1	2	2	2	1
4. Автономность, дни	120	120	120	120	120	120
5. Масса стали опорного блока, т	35,0·10 ³	42,0·10 ³	9,2·10 ³	20,0·10 ³	20,2·10 ³	6,0·10 ³
6. Объем железобетона в опорном блоке, м ³	22,7·10 ³	21,0·10 ³	53,0·10 ³	105,0·10 ³	15,0·10 ³	10,0·10 ³
7. Масса твердого балласта, т	125,5·10 ³	—	—	65,0·10 ³	510,0·10 ³	68,0·10 ³
8. Масса оборудования верхнего строения, т	15,6·10 ³	13,5·10 ³	40,0·10 ³	35,0·10 ³	40,0·10 ³	15,6·10 ³
9. Масса платформы (пункты 5-8), т	218,2·10 ³	76,5·10 ³	176,2·10 ³	273,0·10 ³	606,0·10 ³	113,0·10 ³

Примечание. Базовые варианты ледостойких стационарных платформ для месторождений Пилтун-Астоховское, Лунское, Приразломное и Чайво были выбраны из пяти-шести типов.

Таблица 2

Параметры различных вариантов платформ, предлагаемых в качестве ледостоек

Компания	«Ishikawajima», «Mitsubishi», «Mitsui», «Nippon Kokan», «Nippon Steel» (Япония)				«Taylor Woodrow» (Великобритания), «Mitsui» (Япония)	A.C.G. (Финляндия)	«John Brown» (Великобритания)	«Blohm + Voss + Ferrostaal» (Германия)
Варианты платформ								
Параметры								
1. Глубина воды, м	30	30	30	30	30	30	30	30
2. Количество свай	49	49	49	49	49	49	49	49
3. Количество платформ	2	2	2	2	2	2	2	2
4. Автономность, дни	180	180	180	180	180	180	120	120
5. Масса стали опорного блока, т	2,5·10 ³	20,0·10 ³	3,6·10 ³	5,0·10 ³	5,4·10 ³	18,3·10 ³	1,5·10 ³	15,3·10 ³
6. Объем железобетона в опорном блоке, м ³	40,5·10 ³	64,0·10 ³	43,0·10 ³	42,5·10 ³	26,0·10 ³	1,5·10 ³	15,3·10 ³	15,3·10 ³
7. Масса оборудования верхнего строения, т	15,3·10 ³	15,3·10 ³	15,3·10 ³	15,3·10 ³	15,3·10 ³	15,3·10 ³	15,3·10 ³	15,3·10 ³

повышенная экологическая ответственность таких сооружений, представляющих собой не только буровую платформу, но, в ряде случаев, и нефтехранилище.

Эти особенности наряду с высокой стоимостью и ответственностью ледостойких платформ стимулируют повышение уровня их надежности. С другой стороны, неоправданные затраты материалов могут обернуться существенным удорожанием платформ и резким снижением их технико-экономических показателей. Поэтому стоящая перед проектантами задача создания надежных и экономичных сооружений в принципе должна решаться в оптимизационном плане.

В качестве механизма сбалансированного подхода к диктуемой временем тенденции к снижению металлоемкости конструкций и обеспечению их надежности следует использовать условие безотказной работы конструкций в течение установленного срока их эксплуатации

$$P(Y_{1i} > Y_{2i}) = [p_i], \quad (1)$$

где Y_{1i} — несущая способность по i -му предельному состоянию;
 Y_{2i} — i -е внешнее воздействие;
 P_i — математическая модель по i -му предельному состоянию;
 $[p_i]$ — нормативная вероятность.

Реализация лаконичного условия (1) применительно к безотказной эксплуатации ледостойких платформ требует увязки решения ряда проблем исследовательского характера.

Если попытаться наглядно представить совокупность проблем прочности и надежности ледостойких платформ, то можно прийти к блок-схеме, изображенной на рис. 1. Блок-схема иллюстрирует взаимозависимость задач, стоящих перед создателями методических и нормативных документов, естественным образом демонстрируя необходимость применения системного подхода при постановке и решении отдельных задач. Она показывает место исходной информации по внешним условиям и характеристикам ледостойких платформ, целесообразность разработки тех или иных теоретических моделей в связи с режимами эксплуатации, предельными (опасными) состояниями и критериями прочности и надежности.

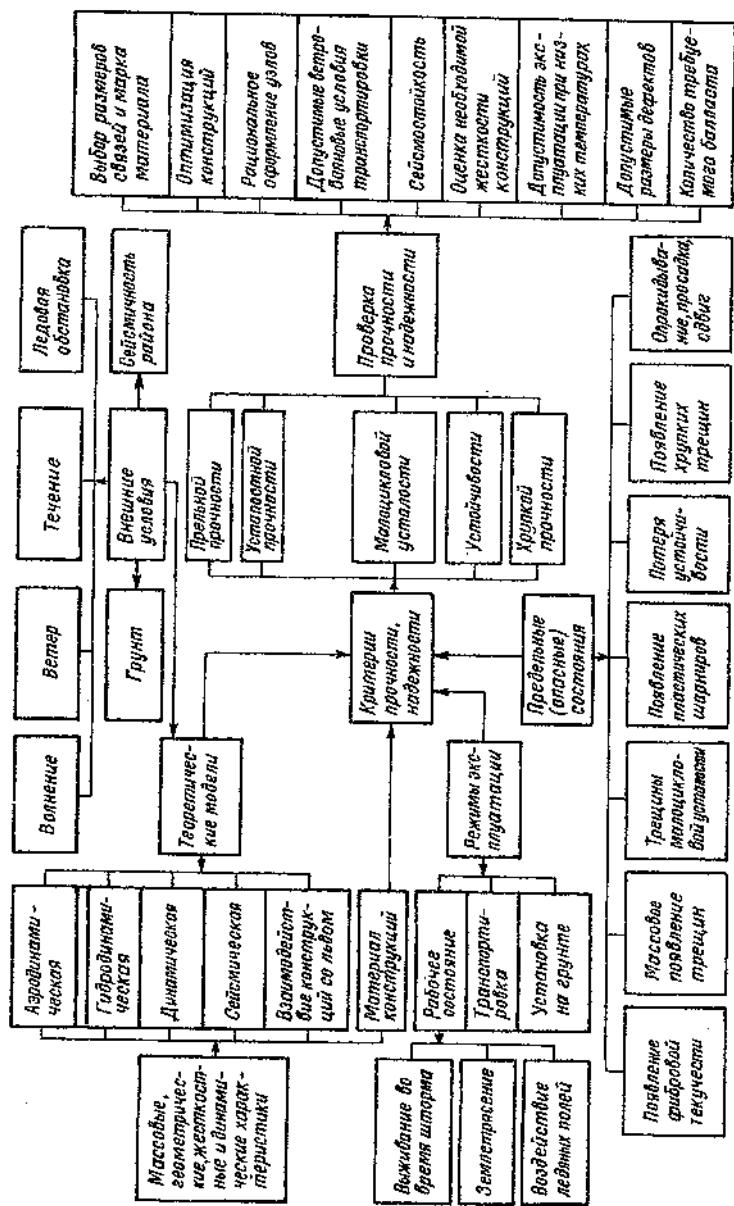


Рис. 1
Блок-схема расчета прочности и надежности конструкций ледостойких платформ

Внешние воздействия

Сложившиеся на сегодняшний день представления о внешних воздействиях на ледостойкие платформы заключаются в том, что доминантными нагрузками являются ледовые и волновые, соотношение между которыми зависит от архитектурно-конструктивного облика платформы и сравнительной интенсивности ледовых и волновых условий. Действительно, нагрузки от течения и ветровые нагрузки составляют обычно не более 3 — 4 % от суммарной нагрузки, и их определение не вызывает особых трудностей. Ледовые нагрузки, иллюстрирующие мысль о том, что наука об определении ледовых воздействий в настоящее время граничит с искусством, в настоящее время являются объектом различного рода дискуссий.

Что касается оценок волновых нагрузок, то здесь хотя и существуют проблемы, например, адекватного учета дифракционной составляющей для протяженных конструкций типа кессонов, но они больше связаны с разработкой единой методологической основы определения внешних нагрузок.

В сейсмически активных районах сейсмические нагрузки могут стать не менее важными, чем ледовые и волновые.

Статические ледовые воздействия

Можно назвать не так много достаточно разработанных нормативных документов, имеющих отношение к проектированию конструкций ледостойких платформ. К ним прежде всего относятся:

отечественные — СНиП 02.06.04-82 [2] и ВСН.41.88 [3];

зарубежные — Правила Американского института нефти [4] и CAN/CSA-5471-92 [5].

Отметим, что по формальным признакам, обозначенным в самих документах, и СНиП, и ВСН имеют существенные ограничения и не учитывают ряд важных явлений, характерных для ледовых воздействий.

Начиная с К.Н. Коржавина, формализованная запись ледовых нагрузок содержит практически одни и те же параметры, а именно: для цилиндрических опор

$$P_{\text{ц}} = P_{\text{ц}}(\sigma_{\text{л}}, h, m);$$

для конических опор

$$P_{\text{к}} = P_{\text{к}}(\sigma_{\text{л}}, h, \varphi, f),$$

где σ_c и σ_u — соответственно, предел прочности на сжатие и изгиб;
 h — толщина ровного или наслоенного льда;
 m — параметр формы преграды;
 φ — угол наклона образующей конуса к горизонту;
 f — коэффициент трения.

Однако, если сопоставить результаты расчетов по имеющимся в мире методикам для цилиндрических и конических конструкций при воздействии ровного льда, то разброс расчетных величин оказывается очень большим. Достаточно сказать, что отношение самой высокой оценки к самой низкой превышает 10, т. е. оценки могут разниться на порядок [6].

Динамические ледовые воздействия

До недавнего времени считалось, что динамическое колебательное взаимодействие льда и сооружений характерно только для случая гибких, с малыми поперечными размерами опорных конструкций, обладающих определенными динамическими характеристиками (см. табл. 1 и 2). Освоение Арктических районов (например, моря Бофорта) вызвало необходимость строительства массивных гравитационных опор кессонного типа (см. табл. 1 и 2), которые рассматривались как жесткие конструкции и рассчитывались на однократное экстремальное воздействие льда при глобальной горизонтальной нагрузке в несколько десятков тысяч тонн.

Однако, в течение зимы 1985-1986 гг. кессонная платформа «Molikraaq», установленная на месторождении Amauligak в канадской части моря Бофорта, была подвергнута значительным воздействиям дрейфующего льда, вызвавшим динамическую реакцию платформы и ее критическое состояние, близкое к потере устойчивости [7]. Экстремальная ситуация возникла при действии на кессон многолетнего ледяного поля размерами 1 x 2 км. Вибрация конструкции в диапазоне 0,5 — 3 Гц привела к повышению порового давления в песчаном ядре, к его разжижению, и несущая способность кессонного основания достигла критической величины. Ограниченность во времени процесса воздействия льда до 2 мин в момент разжижения грунтов позволила избежать печальных последствий, хотя и имело место резкое снижение сопротивления на сдвиг песчаного ядра, передающего нагрузку на грунтовое основание.

Сказанное свидетельствует о необходимости не просто обсуждения динамического аспекта ледовых воздействий, а получения конкретных решений применительно к различным типам ледостойких платформ. В настоящее время недостатка в предложениях моделей динамического взаимодействия морских конструкций со льдом нет. Однако, общепризнанного описания динамических ледовых воздействий на платформы также нет. Исследование процесса динамического взаимодействия льда и платформы необходимо вести с позиций современных методов теории автоколебаний. Одной из особенностей ледовых воздействий на морские сооружения служит следующий факт: поступательное движение — движение ледового поля, имея неколебательную природу воздействия, вызывает колебательный процесс системы «лед — сооружение» за счет отбора энергии от движущегося ледового поля в зоне его контакта с платформой. Из физических соображений ясно, что автоколебания платформы и ледового поля могут существовать при определенных соотношениях параметров платформы и льда.

Динамическое взаимодействие льда и платформы делает необходимым формулировку двух задач: построение моделей механизма разрушения и деформирования льда в зоне контакта, а также построение собственно моделей самого процесса взаимодействия ледового поля и платформы. К известным моделям разрушения льда в зоне контакта можно отнести как деформационные, так и прочностные. В любом случае при решении вопроса динамических реакций платформ должны быть получены следующие характеристики:

- критическая скорость дрейфа (определяет начало процесса автоколебаний),

- критическое значение параметра демпфирования конструкций, коэффициент динамичности воздействия льда.

Локальные ледовые воздействия

Вопрос оценки локальных давлений льда на шельфовые конструкции является в настоящее время одним из самых спорных. Этому способствует как недостаточно ясный механизм взаимодействия льда с конструкциями, так и изменчивость ледовых характеристик. Однако, практически все исследователи

сходятся на том, что локальные давления зависят от площади контакта, и качественная картина имеет вид, изображенный на рис. 2. Количественная оценка этого явления далеко не однозначна, о чем свидетельствует рис. 2. Именно это обстоятельство вносит неопределенность в выбор расчетных значений; причем неопределенность локального силового воздействия существенно выше, чем глобальной силы. Это вызвано прежде всего интегральным характером глобальных оценок и особой «деликатностью» адекватного их дифференцирования.

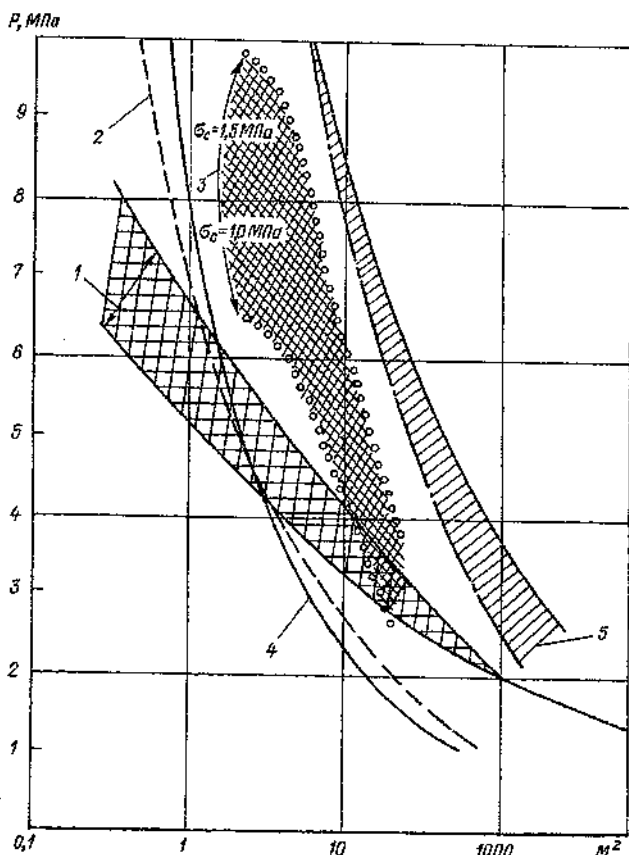


Рис. 2

Зависимость локальных давлений от площади контакта.

Предложения: 1 — Вудри; 2 — Эши; 3 — ВСН;

4 — Мастерсон, Фредекин; 5 — Сандерсон

Наблюдаемое разнообразие результатов невозможно осмыслить, не используя какую-либо модель явления. Априори ясно, что искомая модель должна отражать два основных фактора:

изменчивость выходных характеристик;

регрессионное уменьшение давлений с возрастанием площади соприкосновения.

В связи со сложностью явления альтернативных моделей может быть несколько. Представляется, однако, что расчетные значения ледовых давлений должны быть выражены в функции от предела прочности льда, площади контакта, соотношения поперечного размера всей конструкции и толщины льда, угла наклона конструкции к горизонту, расчетной обеспеченности.

Категории связей

По-видимому, при разработке нормативных показателей для педостойких платформ целесообразно в принципе придерживаться привычного деления связей на специальные, основные и второстепенные. Можно отметить, что в процессе эволюции Правил Регистра для буровых платформ самоподъемного и полупогружного типов принцип отнесения связей к той или иной категории не претерпел особых изменений. Некоторой корректировке подверглась лишь запись в отношении специальных связей. Так, в первом издании Правил [8] к специальным были отнесены связи, характеризующиеся повышенным уровнем напряженности, к основным — обеспечивающие общую прочность, к второстепенным — связи, повреждение которых не оказывает существенного влияния на безопасность установки в целом. Во втором издании Правил [9] к специальным отнесены основные элементы, которые характеризуются повышенным местным уровнем напряженности.

Понятно, что проблема деления связей на категории, являющаяся составной частью проблемы нормирования, должна получить соответствующее развитие и опираться на серьезную теоретическую базу. В качестве таковой естественно использовать теорию надежности, позволяющую решать изначально противоречивую задачу, — обеспечение необходимого уровня безопасности и приемлемого уровня металлоемкости.

Напомним, что под надежностью сооружений понимается их свойство выполнять заданные функции с достаточной степенью

гарантии в течение заданного срока в определенных условиях эксплуатации.

Понятие надежности включает в себя в качестве основного понятие отказа. Полная или частичная утрата качества сооружения называется отказом. К отказам относятся недопустимые отклонения параметров сооружения от расчетных значений, приводящих к появлению предельных (опасных) состояний. Примерами таких состояний, связанных с выходами из строя либо с прекращением эксплуатации платформ, могут служить недопустимый сдвиг сооружения, потеря устойчивости сжатых элементов, чрезмерные пластические деформации, усталостные трещины, хрупкие разрушения.

Наметившийся прогресс в нормировании прочности конструкций стимулирует отказ от использования условных схем назначения коэффициентов запасов для определения уровня допускаемых напряжений, приводя к существенному уменьшению доли волевого начала в проблеме нормирования.

В немалой степени этому должно способствовать внедрение вероятностно-экономической концепции определения оптимальных запасов прочности.

Рассмотрение вопроса о допускаемых напряжениях под углом зрения выявления всех особенностей нормирования приводит к выводу, что коэффициент запаса η (или обратный ему коэффициент безопасности $\chi = 1/\eta$) не является постоянной величиной. Принципиально уровень коэффициентов запаса зависит от ответственности связи в общей конструктивной схеме (другими словами, от категории связи), стоимостных показателей, средних (постоянных) напряжений, изменчивости предела текучести, степени обеспеченности внешних нагрузок, типа несущих конструкций, точности расчетной схемы (степени закругления при определении внутренних усилий), стоимостных показателей.

Как свидетельствует некоторый опыт эксплуатации ледостойких платформ, при разработке нормативной базы для их конструирования необходимо обратить особое внимание на нерегулярный характер и динамический аспект ледовых воздействий.

Усталостный критерий прочности конструкций

Важность учета требований обеспечения усталостной долговечности в настоящее время признана всеми ведущими классификационными обществами. В правилах классификационных обществ определяется, что целью оценок усталостной прочности конструкций буровых платформ является обеспечение такого положения, чтобы в конструкциях, подверженных действию переменных нагрузок, по возможности не возникало трещин за весь период эксплуатации при ожидаемых за это время внешних условиях. Причем проектирование за это время предлагается вести по критерию безопасного повреждения (так называемому «fail-safe»), в соответствии с которым появление усталостной трещины не считается катастрофическим событием, но признается нежелательным.

Обеспечение необходимого уровня усталостной прочности предполагает решение, по крайней мере, двух самостоятельных проблем: отработки конструктивных узлов с точки зрения их работоспособности при циклических нагрузках и разработки мероприятий по снижению общего уровня напряженности. Понятно, что снижение эффективного коэффициента концентрации напряжений, определяющего степень работоспособности, для всех узлов до минимального уровня ($\alpha_s = 1$) невозможно, в связи с чем в качестве меры предотвращения появления массовых усталостных трещин приходится использовать изменение уровня напряженности, что, как правило, сопряжено с увеличением металлоемкости конструкций.

В связи с той ролью, которую призван играть усталостный критерий, представляется целесообразным его ориентирование на обе стадии образования макротрещин: инициирование и распространение.

Учитывая особенности ледостойких платформ (высокий уровень нагруженности, большие толщины материала, большое число циклов переменных напряжений, динамический характер ледового воздействия при наличии отрицательных температур), должно быть обращено особое внимание на усталостный критерий прочности конструкций.

Условия нагружения элементов конструкций определяются на основании зависимостей

$$Q_n(S) = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l p_{nijkl} q_{nijkl}(S) \leq [Q];$$

$$Q_a(S) = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l p_{aijkl} q_{aijkl}(S) \leq [Q];$$

где $ijkl$ — стационарный режим ледового воздействия, характеризуемый i -ой интенсивностью (толщиной льда ровного или наслоенного, толщиной консолидированного споя и величиной килля), j -ой прочностью льда, k -ым курсовым углом, l -ой скоростью дрейфа;

q_{nijkl} — обеспеченность величины S на $ijkl$ -ом ледовом сценарии;

p_{nijkl} — повторяемость $ijkl$ -го ледового сценария;

$Q_n(S)$ — обеспеченность величины S за весь период эксплуатации;

$ijkl$ — стационарный режим волнового воздействия, характеризуемый i -ой высотой волны 3%-ной обеспеченности, j -ым периодом волны, k -ым курсовым углом к волне;

q_{aijk} — обеспеченность величины S на ijk -ом стационарном волновом режиме;

p_{aijk} — повторяемость ijk -го волнового режима;

$Q_a(S)$ — обеспеченность величины S за весь период эксплуатации.

Если про волновую часть можно с уверенностью говорить, что долговременное распределение напряжений следует распределению Вейбулла (накоплено достаточно много убедительных данных по реакциям морских сооружений на волновые воздействия), то про ледовую часть можно сказать с уверенностью, что распределение напряжений, возникающих при реализации всех ледовых сценариев, еще предстоит оценить.

Заключение

В заключение подчеркнем еще раз конкретные узловые проблемы, с которыми предстоит определиться при разработке нормативной базы для ледостойких платформ:

уточнение ледовой нагрузки на стационарных режимах ледовых воздействий (ровный наслоенный лед, торосы с неконсолидированной частью, торосы с консолидированной частью), определение горизонтальной и вертикальной составляющих при произвольном курсовом угле;

оценка ледовых нагрузок при летнем сценарии (импульсное воздействие ледового образования с остановкой);

интерпретация результатов модельных испытаний применительно к получению расчетных ледовых нагрузок;

разработка статистической модели глобальных и локальных ледовых нагрузок;

оценка периодного состава ледовых воздействий в зависимости от толщины льда, прочности льда и скорости движения;

оценка частотного состава платформ как твердого тела при горизонтальных, вертикальных, вращательных и крутильных колебаниях;

оценка частотного состава отдельных перекрытий и стенок платформы;

разработка динамической модели ледовых реакций платформ;

корректировка взаимодействия конструкций с грунтом с учетом динамического характера ледовых воздействий;

создание единой методологической основы для определения напряжений от ледовых, волновых и сейсмических воздействий применительно к реализации усталостного критерия;

создание усталостной модели для стадий инициирования и распространения трещин; разработка рекомендаций по оценке усталостной долговечности конструкций в условиях низких температур;

обоснование принципа разделения связей на категории;

разработка системы допускаемых напряжений для различных категорий связей и критериев прочности;

оценка сейсмостойкости конструкций платформ.

Список литературы

1. Трусков П.А. Исследование ледовых условий для проектирования технических средств обустройства месторождений нефти и газа (на примере Охотского моря). Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Оха: 1996.
2. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Нормы проектирования. СНиП 02.06.04-82, Госстрой СССР, М.: Стройиздат, 1983.
3. Ведомственные строительные нормы (экспериментальные) «Проектирование ледостойких стационарных платформ». Миннефтегазпром. ВСН.41.88, 1988.
4. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Structures in Ice Environments. API 2N (RP 2N), 1992.
5. National Standard of Canada, Can/CSA-5471-92. General Requirements. Design Criteria. The Environments and Loads, 1992.
6. Shkhinek et al. Comparison of the Russian and Foreign Codes and Methods for Global Load Estimations. Proceedings of the 13th OMAE, 1993.
7. Jefferies H.G., Wright W.H. Dynamic Response of «Molikpaq» to Ice-Structure Interaction. Proc. 7th Int. Offshore Mech. and Arct. Eng. (OMAE) Symp., Houston, Texas, 1988, v. 4.
8. Правила классификации и постройки плавучих буровых установок. Регистр СССР. Л.: Транспорт, 1983.
9. Правила классификации и постройки плавучих буровых установок. Регистр РФ. М.: Транспорт, 1992.

УДК 629.12.001.11

В.В. Луговский

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ НОРМ ОСТОЙЧИВОСТИ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

В год, когда отмечается 300-летие Российского флота, полезно вспомнить историю создания и совершенствования одного из важнейших документов, обеспечивающих безопасность плавания, — отечественных норм остойчивости морских судов в неповрежденном состоянии. Систематическая работа по нормированию остойчивости в нашей стране началась в 30-е годы и продолжается более 60 лет. Еще в 1932 г. С.Н. Благовещенский [1] предложил оценивать остойчивость судна с помощью коэффициента запаса остойчивости, представляющего собой отношение максимального плеча статической остойчивости к суммарному приведенному плечу кренящих моментов от статического действия ветра, центробежной силы на циркуляции, перемещения пассажиров к одному борту, возможного смещения груза и действия волн. В этом предложении впервые учитывалась расчетным путем вся совокупность физических факторов, влияющих на остойчивость судна, правда, методами статики. Динамическое действие кренящего момента от давления ветра было учтено в предложении Л.М. Ногида [2] по нормированию остойчивости траулеров, разработанном по инициативе Регистра в связи с гибелью нескольких серийных дизельных траулеров немецкой постройки в штормовых условиях. Кроме ветровой нагрузки в этом предложении нормировались углы максимума диаграммы статической остойчивости, а также надводный борт траулеров. Следует отметить, что эти нормы

были рассмотрены специальной комиссией под руководством А.Н.Крылова, одобрены Регистром и использовались им при оценке остойчивости рыболовных судов.

Работа по установлению норм остойчивости для широкого класса судов была проведена Регистром в 1938-1939 гг., когда П.Г. Авотин [3] составил законченный проект норм остойчивости для морских и рейдовых судов, регламентирующий как расчеты, так и критерии остойчивости и требующий составления информации об остойчивости судна для капитана, базирующейся на нормативной оценке остойчивости. Война помешала официально утверждению этого проекта, однако почти сразу по ее окончании Регистр возобновил работу над нормами, в результате которой при активном участии С.Н. Благовещенского в 1948 г. были выпущены Временные нормы остойчивости для торговых морских и рейдовых судов [4].

Нормы содержали общие и особые требования к остойчивости. Судно признавалось достаточно остойчивым, если оно способно, не опрокидываясь, противостоять динамически приложенному давлению ветра и удовлетворять ряду особых требований, в том числе учитывающих специфику эксплуатации различных типов судов. Согласно общим требованиям, остойчивость судна считалась достаточной, если кренящий момент от давления ветра меньше минимального опрокидывающего момента, определенного по диаграмме остойчивости для наихудшего случая загрузки судна с учетом возможности приема водяного балласта. Ветровой кренящий момент определялся по простой формуле, в которой величина давления ветра зависела от района плавания судна и возвышения его центра парусности. Для неограниченного плавания она соответствовала силе ветра 12 баллов, для ограниченных — 10 и 8 баллов по шкале Бофорта. Нормы содержали конкретные указания по учету надстроек и рубок, а также влияния жидких грузов и углов заливания судна при расчетах диаграмм остойчивости. Согласно особым требованиям, максимум диаграммы статической остойчивости должен быть при крене не меньше 30° , а ее закат — не меньше, чем при крене 60° , по возможности приближаясь к 90° . Остойчивость пассажирских и грузопассажирских судов проверялась также по крену от скопления пассажиров у борта и от циркулярции. Суммарный угол крена при этом не должен превышать 10° . Остойчивость буксирных судов проверялась на действие условного рывка буксировочного троса, для

кренящего момента которого предлагалась простая расчетная формула. Во Временных нормах подчеркивалось, что удовлетворение судна их критериям не освобождает капитана судна от ответственности в процессе эксплуатации. Для оценки остойчивости в различных условиях плавания все суда должны снабжаться Информацией об остойчивости для капитана, типовой пример которой прилагался к Нормам. Другим приложением к ним была инструкция для опытного определения центра тяжести судна, упорядочившая проведение очень важной для оценки остойчивости операции — опыта кренования.

Введение официальных норм остойчивости заставило проектные, судостроительные и эксплуатационные организации более ответственно подходить к вопросам обеспечения остойчивости гражданских морских судов. Опыт применения норм показал, что введение численных критериев остойчивости в целом повышает безопасность плавания, не нанося значительного ущерба другим эксплуатационным качествам флота. Неудивительно поэтому, что в ближайшие годы официальные нормы остойчивости были разработаны и утверждены еще в ряде стран: США (1952 г.), ГДР (1953 г.), Польше (1957 г.), Японии и Югославии (1958 г.), Китае (1959 г.).

С выпуском Временных норм не прекратилась работа по нормированию остойчивости и в нашей стране. Опыт применения этих Норм уже в начале 50-х годов показал, что они нуждаются в совершенствовании, прежде всего в отношении более полного учета внешних факторов, влияющих на остойчивость судна в штормовых условиях плавания, особенно главного из них — морского волнения. Поэтому в секторе мореходных качеств судов ЦНИИ Морского Флота под руководством С. Н. Благовещенского к 1956 г. был разработан проект новых норм остойчивости [5], в котором действие волнения учитывалось как в основном критерии остойчивости — отношении минимального опрокидывающего момента к ветровому кренящему моменту, так и в дополнительных требованиях к диаграмме статической остойчивости.

В основном критерии действие волнения учитывалось через амплитуду бортовой качки, снижающей величину минимального опрокидывающего момента. Расчетная амплитуда качки в нормах определялась как резонансная амплитуда на регулярных волнах характерной длины — 100 м для судов неограниченного плавания и 60 м — ограниченных районов плавания. Осреднение результатов расчетов для большого числа судов позволило представить

формулу для расчетной амплитуды качки в очень простом, хотя и условном виде. Однако опыт эксплуатации судов, особенно рыболовных, показал, что опасное наклонение судна в условиях волнения часто происходит не в результате совместного действия бокового ветра и интенсивной бортовой качки, а при движении судна на попутном волнении со скоростью, близкой к скорости бега волн. В таком случае остойчивость судна может существенно снизиться, плечи восстанавливающего момента стать очень малыми, и воздействие небольшого кренящего момента — от ветровой нагрузки или перемещения груза на судне — может привести к его опрокидыванию. Это обстоятельство было учтено в проекте новых норм введением критерия максимального плеча диаграммы статической остойчивости: требовалось, чтобы оно было не менее 0,20 — 0,25 м, в зависимости от длины судна.

Существенной переработке подвергся критерий остойчивости буксирных судов при рывке троса. Новый критерий, предложенный В.М. Лаврентьевым [6], был основан на гораздо более строгом учете гидромеханики динамического крена буксира при поперечном рывке быстро натянутого троса. В проекте Норм 1956 г. был также дан ряд важных указаний по расчету плеч остойчивости формы, учету углов заливания и влияния свободных поверхностей жидких грузов при больших углах крена. Этот проект был детально рассмотрен созданной в 1958 г. при Регистре СССР межведомственной комиссией, в работе которой приняли участие известные специалисты по остойчивости — С.Н. Благовещенский, Л.М. Ногид, Г.А. Фирсов, Д.А. Орлов, М.А. Губин, К.С. Козлов, Д.Я. Эйдельман, А.С. Фишер и др. Участвовал в ней и автор настоящей статьи. В итоге работы комиссии текст Норм был тщательно откорректирован и утвержден Министерством Морского Флота в 1959 г. [7]. Годом позже были приняты и нормы остойчивости плавучих кранов, разработанные также в ЦНИИМФ под руководством С.Н. Благовещенского [8]. Помимо практического, введение новых норм имело и принципиальное значение: учет амплитуды качки явился определенным стимулом к улучшению мореходности судов, проведению мероприятий по умерению их бортовой качки. Теперь суда с более умеренной качкой получали некоторые преимущества при оценке их остойчивости по нормам Регистра.

Начало шестидесятых годов и следующее десятилетие были примечательны, с одной стороны, существенным пополнением морского флота, появлением новых типов судов, увеличением

объема и географии перевозок, а с другой — расширением международных контактов организаций, отвечающих за безопасность плавания, как по линии СЭВ, так и по линии Межправительственной Морской Консультативной Организации (ИМКО)¹. Это наложило заметный отпечаток на дальнейшее совершенствование Норм остойчивости. В основном, оно шло по двум направлениям.

Первое ставило задачей более полно учесть физическую картину штормования судна, которое в большинстве случаев происходит в условиях нерегулярного, ветрового волнения. С этой целью в ЦНИИ Морского Флота под руководством автора был проведен цикл исследований и расчетов, включающий серийные модельные испытания в опытовом бассейне ЛКИ, в результате которых были изменены схема определения амплитуд бортовой качки и нормы расчетного давления ветра при оценке остойчивости по основному критерию [9]. Последний был назван в соответствии с его физическим содержанием критерием погоды. Амплитуда бортовой качки определялась как амплитуда 2%-ной обеспеченности нерегулярной качки на ветровом боковом волнении, балльность которого отвечала скорости устойчивого ветра, соответствующего нормам ветровой нагрузки (10 баллов для судов неограниченного плавания, 8 и 6 баллов — для судов ограниченных районов плавания). Для упрощения достаточно сложного расчета нерегулярной качки были предварительно проведены массовые расчеты качки ряда характерных судов, результаты их осреднены, что в итоге привело к простой расчетной формуле норм для амплитуды бортовой качки. Второе направление совершенствования Норм было связано с уточнением критериев остойчивости и условий нагрузки для отдельных типов судов. Это непосредственно вытекало из практики эксплуатации морского флота. Так, в середине 60-х годов в условиях сильного обледенения на Дальнем Востоке погибло несколько небольших рыболовных судов. Проведенные Гипрорыбфлотом и другими организациями исследования позволили уточнить нормы обледенения для опасных районов плавания и откорректировать соответствующий раздел Норм. Модернизация и развитие технического флота потребовали разработки специальных требований к остойчивости

¹ В 1983 г. Межправительственная Морская Консультативная Организация переименована в Международную Морскую Организацию (ИМО).

грунтоотвозных шаланд, включая корректировку методики расчета амплитуд качки, которая была выполнена С.М. Паненко. Массовые перевозки зерна и других сыпучих грузов, которые зачастую смещались во время рейса, заставили ввести в Нормы требования, учитывающие кренящее действие сыпучих грузов на остойчивость судов и предусматривающие составление специальных планов загрузки. Появление плавучих кранов большой грузоподъемности, работающих в условиях ветра и волнения, привело к существенному пересмотру севастопольскими организациями при участии Ю.И. Нечаева, Н.Д. Великосельского и В. Г. Зиньковского-Горбатенко Норм остойчивости плавучих кранов.

Широкие и планомерные работы по нормированию остойчивости, проведенные в 60-е годы рядом организаций, позволили отечественным специалистам и Регистру активно выступить с предложениями по установлению международных норм остойчивости. После тщательной проработки экспертами был составлен и в 1970 г. утвержден проект согласованных правил обеспечения остойчивости судов стран-членов СЭВ. Его основу составили нормы Регистра с новым критерием погоды и рядом дополнительных требований к отдельным типам судов. Однако для каждой страны предусматривались национальные отклонения от общих правил, учитывающие специфику эксплуатации ее судов. Нормы остойчивости вошли составной частью (часть IV «Остойчивость») в общие Правила классификации и постройки морских судов [10], которые с начала 70-х годов регулярно переиздавались с некоторыми дополнениями, в частности, специфическими требованиями к остойчивости контейнеровозов, судов смешанного плавания, судов обеспечения [11].

Одновременно отечественные специалисты принимали активное участие в разработке международных стандартов остойчивости по линии ИМКО, включающей практически все развитые судостроительные страны. Первые официальные рекомендации ИМКО по остойчивости судов в неповрежденном состоянии были приняты в 1968 г. В них лимитировались минимальные параметры диаграмм статической и динамической остойчивости пассажирских и грузовых судов длиной менее 100 м, а также углы крена на циркуляции и от скопления пассажиров у борта. Эти рекомендации сыграли большую роль в упорядочении расчетов остойчивости, особенно для тех стран, где официальные нормы отсутствовали. Они позволили также провести обширный

сравнительный анализ остойчивости судов разных типов при различных условиях эксплуатации, включая материалы аварийной статистики. Анализ убедительно показал, что критерии остойчивости в рекомендациях ИМО нуждаются в дальнейшем совершенствовании, прежде всего в направлении разработки международного критерия погоды, учитывающего совместное действие на судно ветра и волн.

Отечественная делегация в ИМО занимала активную позицию. Она выдвигала обоснованные предложения по критерию погоды, базирующиеся на согласованных правилах обеспечения остойчивости [10], а также по дополнительным критериям остойчивости для лесовозов, промысловых судов и судов с динамическими принципами поддержания. Последние были реализованы в Кодексе по безопасности судов с динамическими принципами поддержания и в Кодексе по безопасности рыбаков и рыболовных судов. Для лесовозов также были приняты дополнительные рекомендации по остойчивости, учитывающие специфику их эксплуатации, — возможность намокания и обледенения каравана леса, его проницаемость и малые значения поперечной метацентрической высоты [12]. С большим трудом, вследствие плюрализма мнений специалистов разных стран, проходила отработка критерия погоды, затянущаяся до 1984 г. В итоге он был принят и подключен к рекомендациям ИМО, однако расчетная схема, учитывающая совместное действие на судно ветра и волн, оказалась существенно отличной от схемы норм Регистра. В основном она базируется на динамическом критерии японских норм остойчивости [13], в котором рассматривается не шквалистый, а устойчивый порывистый ветер, хотя при расчете амплитуды нерегулярной качки использованы некоторые формулы и таблицы отечественных норм. В разработке рекомендаций, кодексов и критериев остойчивости ИМО активное участие принимали С.Н. Благовещенский, В.С. Дорин, Н.Б. Севастьянов, В.В. Сутуло, В.К. Дьяченко, Н.Н. Рахманин, В.Б. Липис, А.М. Спасский, В.Н. Голеншин, автор настоящей статьи и другие специалисты.

В 1995 г. Регистром изданы новые Правила классификации и постройки морских судов [14], часть IV которых содержит требования к остойчивости в неповрежденном состоянии, существенно отличающиеся от прежних тем, что они имеют альтернативный характер: остойчивость судов неограниченного района плавания должна удовлетворять либо критериям отечественных норм,

которые описаны выше и содержатся в предыдущих изданиях Правил [10, 11], либо критериям принятого в 1993 г. Кодекса по остойчивости судов ИМО. Последние отличаются от отечественных критерием погоды, требованиями к диаграммам остойчивости и к метацентрической высоте, причем для некоторых типов судов отличие может быть значительным. Ясно, что для перехода от альтернативных, не всегда удобных на практике требований, к единым, соответствующим как принятым международным стандартам остойчивости, так и многолетнему опыту строительства и эксплуатации отечественных судов, необходимо согласовать критерии Кодекса по остойчивости судов ИМО и Правил Регистра. Этот путь совершенствования норм остойчивости связан с определенными практическими затруднениями, в частности, с распространением критериев ИМО на суда ограниченных районов плавания, удовлетворением требований к плечам диаграммы динамической остойчивости при углах крена 30 и 40° для ряда судов, перевозящих палубные грузы, применением расчетной формулы ИМО для амплитуды качки к судам дноуглубительного флота, буксирам-спасателям, морским плавучим кранам и крановым судам, для которых она совершенно не приспособлена.

Более глубокие, перспективные пути совершенствования как отечественных, так и международных норм остойчивости, помимо отмеченных в статье [15], могут идти в двух направлениях, базирующихся на современных методах нелинейной теории мореходности и возможностях компьютерной техники. Первое из них основано на выявлении хаотических режимов бортовой качки, исследовании их устойчивости и возможностей опрокидывания судна в условиях регулярного волнения и шквалистого ветра. Как показывают результаты работ американских и японских специалистов [16, 17], этот путь может привести к существенной корректировке критерия погоды для неповрежденных судов и требований к аварийной остойчивости, однако, на наш взгляд, в достаточно отдаленном будущем.

Более реальным представляется второй путь, основанный на исследованиях динамической остойчивости и качки судов на попутных курсах по отношению к волнению. Практика мореплавания подтверждает большую опасность такой ситуации: по материалам ИМО около 40 % аварий, связанных с потерей остойчивости, приходится на случаи движения на попутном волнении. В частности, в условиях интенсивной бортовой качки на косых

кормовых курсовых углах к волне в сентябре 1993 г. в Южной Атлантике потерял остойчивость и затонул российский теплоход «Полесск». Есть основания считать, что он попал в режим параметрического резонанса, хорошо известный в теории качки и неоднократно наблюдавшийся в практике мореплавания [18]. Для оценки возможности конкретного судна попасть в этот опасный режим необходимо рассчитать порог его возбуждения. Формулы для такого расчета есть в Справочнике по теории корабля [19], «Прикладных задачах динамики судов на волнении» [20] и в других публикациях лишь для положений судна лагом и вразрез волне.

Приведем недавно полученную нами формулу для порога возбуждения параметрического резонанса на любых курсовых углах к волнению (для сокращения текста ее достаточно громоздкий вывод, основанный на нелинейной гидродинамической теории качки [21], опущен):

$$\alpha_0 > \frac{4\mu_0 k h_0}{\sqrt{\left(\frac{\xi_{gm}}{\xi_A}\right)^2 \left(\left|\frac{Z_p}{\chi T}\right| + \left|\frac{dZ_m}{dT}\right|\right)^2 + \left(\frac{Z_p}{T} d_2 + k T \overline{M}_x^{23}\right)^2} - 2\left(\frac{Z_p}{T} d_2 + k T \overline{M}_x^{23}\right) \frac{\xi_{gm}}{\xi_A} \frac{Z_p}{T} \frac{h_0}{\xi_A} \cos \delta_\xi} \quad (1)$$

где в обозначениях Справочника [19]:

α_0 — амплитуда волнового склона;

ξ_A — амплитуда набегающих волн;

μ_0 — безразмерный коэффициент сопротивления бортовой качки при линейном законе, определяемый по результатам модельных испытаний с учетом скорости хода [19-21];

k — частота формы волны;

h_0 — начальная метацентрическая высота;

χ — коэффициент вертикальной полноты;

B — ширина судна;

T — осадка судна;

Z_p — отстояние центра тяжести судна от плоскости равновесной ватерлинии, положительное ниже ватерлинии;

ξ_{gm} — амплитуда вертикальной качки, рассчитанная по формулам линейной теории [19-20];

δ_ξ — ее начальная фаза, в случае резонанса вертикальной качки равная $\pi/2$;

dZ_m/dT — производная по осадке аппликаты Z_m поперечного метацентра как функции осадки, определяемая по углу наклона касательной к кривой $Z_m(T)$ в точке ее пересечения со следом равновесной ватерлинии [20];

$$d_2 = \frac{1}{\chi} \alpha_\beta^{\parallel} - \frac{1}{2} (k_1 T)^2 \frac{r}{T} \alpha_\beta^{\parallel} + \frac{1}{24} (k_1 B)^4 \alpha_\beta^{\parallel} \frac{f_3(\alpha)}{\chi} \quad (2)$$

r — начальный метацентрический радиус;

$\alpha_{\beta}^I, \alpha_{\beta}^{II}, \alpha_{\beta}^{III}$ — поправочные коэффициенты, учитывающие влияние курсового угла волны β_B и соотношение между длиной судна и длиной набегающих волн; определяются по формулам (VI.32) Справочника [19] или по графикам книги [21];

$k_1 = k|\sin\beta_B|$ Для положения судна лагом к волне $\beta_B = -\pi/2$, $k_1 = k$; вразрез волнам — $\beta_B = \pi$, $k_1 = 0$; по волне — $\beta_B = 0$, $k_1 = 0$;

$f_4(\alpha)$ — функция коэффициента полноты α равновесной ватерлинии, определяемая формулой

$$f_4(\alpha) = \frac{3\alpha^4}{2(\alpha+1)(2\alpha+1)(3\alpha+1)(4\alpha+1)}, \quad (3)$$

полученной с использованием параболической аппроксимации судовых обводов [19];

$\bar{M}_x^{23}$ — безразмерная характеристика (аналог поправочного коэффициента) той части возмущающего момента, которая связана с орбитальным движением судна в составе частиц волны и возникновением параметрических колебаний, определяемая формулой (VI.34) Справочника [19].

По формуле (1) без особых затруднений могут быть проведены компьютерные расчеты для характерных типов судов при разных вариантах нагрузки и различных курсовых углах, в том числе попутных, по отношению к волнам мертвой зыби определенной высоты и крутизны, выявлены реальные возможности возникновения параметрического резонанса бортовой качки и указаны мероприятия по его предотвращению. Обобщив результаты по типам и размерам судов, можно затем сформулировать соответствующие дополнения к нормам остойчивости Регистра и к инструктивным указаниям по составлению информации об остойчивости. Такую работу вполне возможно и целесообразно провести уже в ближайшие годы.

Список литературы

1. Благовещенский С.Н. О методе нормирования остойчивости. Тр. НИСС. Вып. 12. Л.: 1932. С. 3-16.
2. Ногид Л.М. Нормы остойчивости траулеров и их теоретическое обоснование. Тр. ВНИИТОСС. Вып. 1. Т. I. 1934. С. 44-62.
3. Авотин П.Г. Об изменении величины кренящего момента от давления ветра при наклонениях судна. Л.: Судостроение, №11. 1940. С. 8-11.
4. Временные нормы остойчивости для торговых морских и рейдовых судов. Морской Регистр СССР. Л.: Морской транспорт. 1948. 91 с.
5. Благовещенский С.Н. О новых нормах остойчивости для гражданских морских судов. Тр. ЦНИИМФ. Вып. 7. Л.: 1956. С. 3-35.
6. Лаврентьев В.М. Нормирование остойчивости буксирных судов по рыску буксирного троса. Тр. ЦНИИМФ. Вып. 5. Л.: 1958. С. 3-21.
7. Нормы остойчивости морских и рейдовых судов. Регистр Союза ССР. Л.: Морской транспорт. 1959. 56 с.
8. Нормы остойчивости плавучих кранов. Регистр Союза ССР. Л.: Морской транспорт. 1960. 32 с.

9. Луговский В.В. Корректировка методики определения условной расчетной амплитуды качки и величин условного давления ветра в нормах остойчивости морских судов. Регистр СССР, в сб.: «Теоретические и практические вопросы мореходных качеств судов». Л.: Морской транспорт. 1987. С. 3-44.
10. Правила классификации и постройки морских судов. Регистр СССР. Ч.IV «Остойчивость», Л.: Транспорт. 1970. С. 274-336.
11. Правила классификации и постройки морских судов. Регистр СССР. Ч.IV «Остойчивость», Л.: Транспорт. 1990. С. 406-463.
12. Луговский В.В. Изменение требований Правил Регистра СССР и согласованных Правил ОТНК ЕЭК к остойчивости лесовозов. Регистр СССР. Науч.-техн. сб., вып.4. Л.: 1976. С. 15-26.
13. Jamagata M. Standard of Stability Adopted in Japan. TJNA. 1959, pp. 417-443.
14. Правила классификации и постройки морских судов. Морской Регистр судоходства. Т.I, ч. IV «Остойчивость», СПб.: 1995. С. 309-353.
15. Луговский В.В. Сорокалетие отечественных норм остойчивости морских судов. Л.: Судостроение, №7. 1990. С. 6-8.
16. Nayfeh A.H. and Sanohez N.E. Chaotic Stability and complicated Rolling Response of Ships in Regular Beam Seas. JSP, v. 3. 1990, pp. 177-191.
17. Kan M. and Tagushi H. Chaos and Fractals in Nonlinear Roll and Capsize of a Damaged Ships. «Otradnoe-93». International Workshop, Proceedings, v.2, 1994, pp. 1-19.
18. Александров К.К. О параметрическом резонансе. Мортехинформ-реклама, ЭИМТ, вып. 9. М.: 1993. С. 5-32.
19. Справочник по теории корабля. Под ред. Я.И. Войткунского. Т. 2. Л.: Судостроение. 1985.
20. Бородай И.К., Мореншильд В.А., Вилекский Г.В. и др. Прикладные задачи динамики судов на волнении. Л.: Судостроение. 1989. 258 с.
21. Луговский В.В. Нелинейные задачи мореходности корабля. Л.: Судостроение. 1966. 234 с.

В.Б. Липис, А.И. Богданов

О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА И МЕЖДУНАРОДНОЙ МОРСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ К ОСТОЙЧИВОСТИ МОРСКИХ СУДОВ В НЕПОВРЕЖДЕННОМ СОСТОЯНИИ

Обеспечение остойчивости судна — одна из наиболее ответственных задач сложнейшей комплексной научно-технической проблемы его рационального проектирования и эксплуатации, противоречивые условия решения которой принципиально не исключают пусть малый, но всегда остающийся риск опрокидывания судна в неповрежденном состоянии.

Какая остойчивость может считаться достаточной?

В практическом смысле сегодня ответ ясен — такая, которая установлена требованиями официальных норм, прежде всего национальными Правилами классификации и постройки морских судов и международными конвенциями, кодексами и резолюциями Международной Морской Организации (ИМО). Достижения отечественной научной школы, практики и опыта нормирования остойчивости легли в основу содержания части IV «Остойчивость» Правил классификации и постройки морских судов Регистра, а также одноименной главы 2.4 Правил обеспечения безопасности судов с динамическими принципами поддержания¹. Они нашли свое отражение и в предложениях делегации РФ (СССР) в ИМО (ИМКО), начиная со времени создания в нашей стране первых в мире национальных правительственных норм, обсуждения Конвенции СОЛАС и создания Подкомитета ИМО по остойчивости и грузовым маркам судов² в 1960 г. [1 — 7]. За последние 15-20 лет в направлении совершенствования нормирования остойчивости и мореходности транспортных судов в неповрежденном состоянии

¹ В дальнейшем — Правила СДПП.

² В дальнейшем — Подкомитет SLF.

в ЦНИИ Морского Флота для Регистра выполнено более 20-ти научно-исследовательских работ по следующим основным направлениям [8 — 22]:

сопоставительный расчетный анализ остойчивости морских судов по требованиям Регистра и рекомендациям ИМО, охватывающий результаты для 55 типов грузовых и пассажирских судов, т. е. основной транспортный флот СССР 1982 — 1985 гг.;

предложения по нормированию остойчивости на основе вероятностной оценки воздействия окружающей среды и реакции судна;

расчетно-экспериментальный (с проведением модельных и натурных испытаний) анализ и предложения по совершенствованию и разработке новых физических критериев остойчивости для учета условий попутного волнения, влияния порывистости ветра, уточнения учета нерегулярности морского волнения;

расчетно-экспериментальный анализ и предложения по требованиям к остойчивости судов, перевозящих палубный груз (контейнеровозы, лесовозы) по критериям начальной остойчивости (норматив по метацентрической высоте, углу крена на циркуляции, углу крена от постоянного ветра), охватывающий 11 типов контейнеровозов и 16 типов лесовозов, т. е. основной отечественный флот для перевозки палубных грузов;

обоснование и разработка требований к остойчивости скелетных и амфибийных СВП на базе теоретико-расчетного и экспериментального анализа особенностей остойчивости и качки судов этого типа;

натурные исследования и расчетное обоснование для разработки новых нормативных требований к современным бортовым автоматизированным средствам контроля остойчивости и мореходности судов.

В этих работах ЦНИИМФ принимали участие Ленинградское, Черноморское и Дальневосточное ЦКБ, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, ЛКИ, ЦКБ «Балтсудопроект», ОВИМУ, ОИИМФ, ЛИВТ, Болгарский институт гидродинамики судна.

Результаты этих работ послужили основанием для корректировок, внесенных Главным управлением Регистра в часть IV «Остойчивость» Правил издания 1990 и 1995 гг., для разработки в 1980 г. главы 2.4 «Остойчивость» в первых Правилах СДПП Регистра и внесения корректировок в их издание 1990 г., а также для активного участия делегаций РФ (СССР) в разработке нового Кодекса по остойчивости судов всех типов в неповрежденном

состоянии¹, а также Кодекса ИМО по безопасности СДПП² и нового Кодекса ИМО по безопасности высокоскоростных судов³ [23 — 26].

Не излагая в этом кратком обзоре подробностей, отметим, что лейтмотив этих исследований — гармонизация требований Регистра и ИМО при стремлении всемерно сохранить и распространить на международную регламентацию дух и научную базу отечественных норм, имеющих многолетний положительный опыт обеспечения безопасной эксплуатации транспортного флота [27 — 33].

Наиболее существенной особенностью части IV Правил классификации и постройки морских судов Регистра издания 1995 г. является включение базовых рекомендаций Кодекса в виде отдельного раздела (раздел 5) со статусом альтернативных требований к судам неограниченного плавания. Характерно, что концепция нововведений в Правила Регистра и Кодекс едина: уровень безопасности новых судов должен быть не ниже, чем у судов старой постройки. Хотелось бы, чтобы современные суда всегда имели большие резервы устойчивости, но это не так, особенно для судов с палубным или накатным грузом и судов новых конструктивных типов. При этом, если классическая нормативная база для традиционных судов длиной до 100 м имеет солидную статистическую основу, то для современных крупных судов опыт еще не накоплен. Конечно, новые рекомендации готовятся со всеми возможными обоснованиями, и все же степень приближения к опасной границе остается более условной, в особенности для крупных судов, аварии которых практически всегда связаны с подвижкой груза, а первопричина в 70 % случаев — ошибки управления (так называемый «человеческий фактор»). В Кодексе, поэтому, отражена общая позиция ИМО в отношении повышения уровня обеспечения безопасности судов и защиты природы на море: равный учет технического, оперативного и «человеческого» факторов. Если Правила Регистра направлены в первую очередь на надзорную деятельность за конструктивным обеспечением устойчивости судов, то цель Кодекса состоит в рекомендациях критериев устойчивости и других мер по «обеспечению безопасной эксплуатации судов» [23]. В Кодексе, поэтому, больше внимания уделено рекомендациям оперативно-эксплуатационного характера, а вопросы технологии проектирования не столь преобладают, как в Правилах Регистра.

¹ Далее — Кодекс.

² Далее — Кодекс СДПП.

³ Далее — Кодекс ВСС.

Структура общих для всех типов судов критериев остойчивости в Правилах и в Кодексе отличается приоритетами. В Правилах на первое место поставлен критерий погоды, а требования к элементам диаграмм остойчивости как бы на втором месте. В Кодексе, наоборот, преимущество отдается нормативам по параметрам диаграмм остойчивости, отражающих структуру безопасного плавания и аварий при всех условиях погоды. Критерий бокового ветра и бортовой качки (критерий погоды) играет роль дополнительного. Сопоставление основных конкретных норм остойчивости приведено в таблице. Указаны общие параметры и нормативы Регистра, ИМО и использованные в альтернативном разд. 5 части IV Правил Регистра издания 1995 г. Площади диаграмм статической остойчивости «а», «b» и формпараметр «с» определяются по методике ИМО [23].

Таблица

Требования к остойчивости морских транспортных судов

Параметры остойчивости	Морские транспортные судна неограниченного плавания								
	все пассажирские и грузовые			контейнеровозы с $L > 100$ м			лесовозы		
	Регио- наль- ные	ИМО	Альтер- натив- ные	Регио- наль- ные	ИМО	Альтер- натив- ные	Регио- наль- ные	ИМО	Альтер- натив- ные
GM , м	+0	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
(1)	—	—	—	—	—	—	0,10	0,10	0,10
(2)	—	—	—	—	—	—	0,05	+0	0,05
$GZ_{\min}$, м	0,20* 0,25**	0,20	0,20	0,20	0,042/C	0,20	0,20* 0,25**	0,25	0,25
θ_m , град при $B/D > 2,0$	30 до 25	30 —	30 —	30 до 25	30 —	30 —	30 до 25	30 —	30 —
θ_v , град при $B/D > 2,0$	60 (55) до 50	— —	60 до 50	60 до 50	~60 по L_a, GZ_m	60 до 50	60 до 25	— —	60 до 50
θ_f , град	θ_v	—	θ_v	θ_v	—	θ_v	θ_v	—	θ_v
I_{30} , град	—	0,055	0,055	—	0,009/C	0,055	—	—	—
I_{40}/θ_f	—	0,090	0,090	—	0,016/C	0,090	—	0,080	0,080
I_{Δ}	—	0,030	0,030	—	0,006/C	0,030	—	—	—
$I_{a, \theta}$	—	—	—	—	0,029/C	—	—	—	—

Параметры стойчивости	Морские транспортные суда неограниченного плавания								
	все пассажирские и грузовые			контейнеровозы с $L > 100$ м			лесовозы		
	Регио- наль- ные	ИМО	Альтер- натив- ные	Регио- наль- ные	ИМО	Альтер- натив- ные	Регио- наль- ные	ИМО	Альтер- натив- ные
Z_v , м	Z	$Z + d/2$	$Z + d/2$	Z	$Z + d/2$	$Z + d/2$	Z	$Z + d/2$	$Z + d/2$
P_{vs} , ПА	—	504	504	$0,6P_v(Z)$	504	504	—	504	—
P_{vg} , ПА	$P_v(Z)$	756	756	$P_v(Z)$	756	756	$P_v(Z)$	756	756
	706-1216								
θ_0 , град	—	$16^\circ/0,8\theta_0$	$15^\circ/0,8\theta_0$	$15^\circ/0,8\theta_0$	$16^\circ/0,8\theta_0$	$16^\circ/0,8\theta_0$	—	$16^\circ/0,8\theta_0$	—
θ_r	θ_r^R	θ_r^I	θ_r^I	θ_r^R	θ_r^I	θ_r^I	θ_r^R	θ_r^I	θ_r^I
$K > 1$	M_d/M_v	b/a	b/a	M_d/M_v	b/a	b/a	M_d/M_v	b/a	b/a
Примечания: (1) — с лесом и 100% запасов (на отход); (2) — с лесом и 10% запасов (на приход); * — при $L \geq 105$ м; ** — при $L \leq 80$ м; (55) — с обледенением. Условные обозначения в таблице приняты согласно Правилам Регистра (часть IV, таблица обозначений), кроме того: $P_v(Z)$ — согласно табл. 2.1.2.2; θ_r^R — согласно 5.4.5; θ_r^I — согласно 2.1.3; P_{vs} — расчетное давление постоянного ветра; P_{vg} — расчетное давление ветрового шквала; θ_0 — статический крен судна от постоянного ветра.									

Следует отметить, что критерий погоды K по Регистру и ИМО при равном ограничении (единица) имеет известные принципиальные различия по физическому смыслу. Критерий ИМО предусматривает, по существу, два норматива — норму для отношения работ восстанавливающего и кренящего моментов при действии шквалистого ветра и бортовой качки на судно с креном θ_0 от постоянного ветра, и норму для самой величины θ_0 (см. таблицу). По-разному определяется также ветровая нагрузка и расчетная амплитуда качки θ_r . Расчетная формула для θ_r по Регистру (θ_r^R) и ИМО (θ_r^I) может быть приведена к общему виду:

$$\theta_r = 24^\circ K (A_K/LB) X_1 (B/d) X_2 (C_B) X_3 (\sqrt{GM_0/B}), \quad (1)$$

где безразмерные коэффициенты по Регистру определяются согласно табл. 2.1.3.1-1, 2.1.3.1-2, 2.1.3.1-3 и 2.1.3.2 части IV «Стойчивость» Правил Регистра [4], приведенным к единице.

При этом коэффициенты K , X_1 и X_2 в Правилах Регистра и Кодексе ИМО одинаковы, а отличается только коэффициент X_3 , который согласно Кодексу ИМО зависит дополнительно от отношения аппликаты центра тяжести судна KG к осадке d (см. рис. 1).

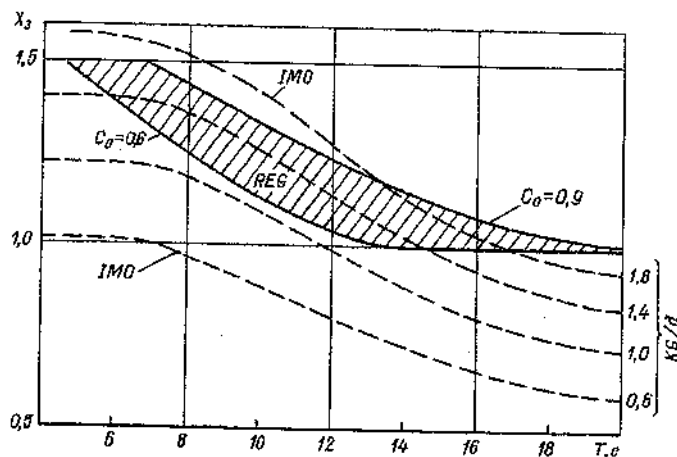


Рис. 1
Сопоставление коэффициента X_3 по требованиям Правил Регистра и Кодекса ИМО, причем

$$T = C_0 B / \sqrt{GM_0},$$

- где T — период собственных бортовых колебаний, с;
 C_0 — безразмерный коэффициент;
 B — ширина судна, м;
 GM_0 — метацентрическая высота, м;
 KG — аппликата центра тяжести судна, м;
 d — осадка судна, м

На рис. 1 видно, что значения θ_r и θ_r могут совпадать при $KG > d$ и $\theta_r < \theta_r$ при $KG < d$, причем, так как в (1) коэффициенты K , X_1 , $X_2 < 1,0$, максимум возможного значения θ_r не превышает $\theta_{r,\max} = 36^\circ$. В практическом отношении существенна количественная оценка запаса остойчивости по критерию погоды, т. е. соотношение между числовыми значениями K по Регистру и ИМО. В работе [14] на большом расчетном материале показано, что величина K по Регистру как правило ниже, чем по ИМО, в среднем на 30% с коэффициентом вариации 0,36, и даны предложения по согласованию схем определения K . В результате достигается сближение этих величин со средним отношением 0,85 при коэффициенте вариации 0,28.

Наконец, нужно специально отметить, что в отличие от Правил Регистра в Кодексе не предусматривается классификация морских судов по районам плавания и нет общих требований по эксплуатационным ограничениям по погоде или удалению судов от берега.

Общая задача гармонизации требований к остойчивости судов в Правилах Регистра и Кодексе ИМО, таким образом, более сложна и многогранна, чем это отражено в разд. 5 части IV Правил [4], который введен как первый шаг для возможности проектной апробации. Исследования этого направления продолжаются и дают «выход» как для совершенствования Правил Регистра, так и для ревизии Кодекса ИМО, который считается «живым» документом, открытым для дальнейших улучшений.

Кодекс ИМО содержит специальные нормативы для судов различных типов, причем особо выделены морские суда с динамическими принципами поддержания (СДПП), а затем — высокоскоростные суда (ВСС), требования к остойчивости и мореходности которых входят в общий комплекс Норм по обеспечению безопасности судов этого типа, регламентируемых отдельными международными документами [24, 25].

В нашей стране работа по созданию первых национальных требований к остойчивости морских СДПП [5] производилась в ЦНИИМФ с 1974 г. по заказу Регистра практически одновременно с разработкой первого Кодекса ИМО по СДПП [24]. Как и этот Кодекс, российские Правила распространяются, главным образом, на пассажирские суда на воздушной подушке (СВП) и суда на подводных крыльях (СПК). Сложность разработки первых Правил по СДПП и требований к их остойчивости и безопасности заключалась в том, что эти суда в отличие от водоизмещающих судов обладают малым весом, необычной формой и конструкцией корпуса, сравнительно высоким расположением центра тяжести и парусности, значительно более высокой относительной энерговооруженностью и скоростью, чувствительностью к внешним и управляющим воздействиям, а также несколькими режимами движения — водоизмещающим, переходным и эксплуатационным. Причем последние два режима существенно отличаются от режима плавания обычных судов.

Кодекс СДПП содержит лишь общие положения и рекомендации по обеспечению остойчивости СДПП. Российские Правила им не противоречат, однако они являются более детально разрабо-

танным документом, включающим достаточно конкретные и поддающиеся проверке требования к остойчивости. При их разработке была, по возможности, сохранена логическая структура и принципы нормирования, положенные в основу хорошо апробированных Правил Регистра для водоизмещающих судов [4], разработаны основные и дополнительные требования, требования к диаграммам остойчивости и предложены близкие по общей концепции оценки безопасности критерии остойчивости [27]. Наиболее важным из них является критерий погоды для СДПП в эксплуатационном режиме K' [21], отсутствующий в Кодексе СДПП. Он основан на предположении, что достаточный уровень безопасности при движении на высокой скорости в наихудших допускаемых условиях погоды может быть обеспечен, если СДПП сохраняет эксплуатационный режим и устойчиво в нем движется, выдерживая внешние возмущения, вызванные воздействием на судно ветра и волнения.

Остойчивость СДПП по критерию K' считается достаточной, если динамический момент $M's$, определенный с учетом амплитуды бортовой качки в точке «срыва» с режима, больше или равен кренящему моменту $M'v$ от динамически приложенного давления бокового ветра, соответствующего по балльности наихудшим допускаемым условиям погоды, т. е. когда выполняется соотношение

$$K' = M's/M'v \geq 1,0. \quad (2)$$

В качестве характерного параметра, определяющего момент срыва СДПП с эксплуатационного режима, условно принята точка пересечения диаграмм остойчивости (ДО), построенных для водоизмещающего и эксплуатационного режимов на тихой воде.

Минимальный момент «срыва» $M's$ определяется путем построений на диаграмме статической или динамической остойчивости (см. рис. 2), как и на диаграммах с обрывом при угле заливания для обычных водоизмещающих судов. Различие состоит в том, что эти диаграммы обрываются при углах крена, соответствующих: для СВП — точке пересечения ДО в водоизмещающем режиме (кривая 1) и в положении на воздушной подушке (ВП) без хода (кривая 2), а для СПК — предельному углу крена, на которые рассчитаны гидродинамические характеристики крыльевой системы на эксплуатационной скорости. Указанные углы крена определяют на ДО условную точку отсчета, которая теоретически

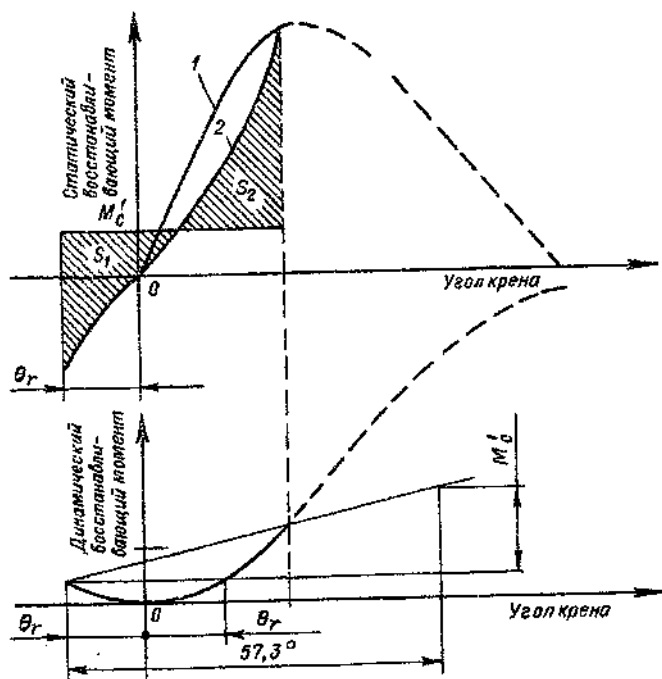


Рис. 2

Схема определения минимального момента M'_0 в эксплуатационном режиме

для расчетных условий соответствует либо потере воздушной подушки, либо потере возможности продолжить движение на подводных крыльях.

Ветровой кренящий момент СДПП определяется по формуле

$$M'v = 0,001 \cdot P'v \cdot A'v \cdot Z' \cdot f' \cdot \varphi', \quad (3)$$

где $A'v$, Z' — площадь и плечо парусности СДПП в этом режиме. Плечо Z' считается равным расстоянию по вертикали в прямом положении судна между центром парусности и точкой приложения гидродинамической реакции бокового сопротивления дрейфу. Эта точка принимается в центре боковой проекции площади корпуса ниже ватерлинии (для амфибийных СВП — в центре объема вытесненной ВП воды);

$P'v$ — давление ветра, определяемое по специальной таблице;

f' — коэффициент обтекания, определяемый для осадки в эксплуатационном режиме;

φ' — коэффициент влияния аэродинамической нагрузки, учитывающий скорость судна.

В Правилах предусмотрено, что способность судна сохранять эксплуатационный режим должна быть подтверждена экспериментально в процессе сдаточных испытаний судна. Это осуществляется практической демонстрацией стабильности режима в реальных ветроволновых условиях, соответствующих наилучшим допускаемым условиям погоды.

В период 1986 — 1989 гг. глава 2.4 «Остойчивость» Правил СДПП была нами переработана и откорректирована с учетом опыта ее использования и новых исследований [15 — 21] и включена Регистром в ныне действующие Правила по СДПП издания 1990 г. [6].

Согласно положениям Кодекса ИМО по СДПП предусматривался его пересмотр каждые два года. Однако это требование в силу ряда причин выполнено не было и только в 1989 г. этот вопрос был поставлен в ИМО на повестку дня. В силу значительного прогресса СДПП за период с 1977 г., появления новых проектов и типов быстроходных судов, совершенствования материалов, оборудования, технологии и методов проектирования потребовался практически полный пересмотр всех глав Кодекса и некоторых его принципиальных положений. Это привело к изменению названия Кодекса. Теперь он называется Международным кодексом по безопасности высокоскоростных судов или Кодексом ВСС [25].

В 1995 г. пересмотр Кодекса был завершен, он был принят Комитетом по безопасности на море (MSC) и утвержден Ассамблеей ИМО с вводом в действие с 1 января 1996 г.

Новый Кодекс ВСС имеет ряд принципиальных отличий от Кодекса СДПП. Не останавливаясь на этом подробно, перечислим только самые главные из них:

1. Исключено определение СДПП и введено новое определение — «высокоскоростное судно» (ВСС). Это — судно, совершающее международные рейсы и имеющее скорость, равную или превышающую $V > 3,7 \cdot \nabla^{0,1667}$, где ∇ — максимально допустимое водоизмещение судна, м^3 ; V — скорость при этом водоизмещении, м/с ;

2. Используются два различных принципа обеспечения безопасности и спасения:

первый соответствует старому Кодексу, когда судно не обязано нести на себе полный комплект средств, предусмотренных Международной конвенцией по охране человеческой жизни на море, но за судном требуется постоянное наблюдение, и внешние средства спасения должны находиться в постоянной готовности («обеспечиваемые суда»);

второй, когда необходимые средства спасения находятся на самом судне, и постоянного наблюдения за ним и готовности внешних спасательных служб не требуется («не обеспечиваемые суда»);

3. Введены две категории пассажирских («А» и «В») и категория грузовых ВСС, безопасность которых обеспечивается в соответствии с этими принципами. Суда категории «А» относятся к «обеспечиваемым», а суда категории «В» и грузовые — к «не обеспечиваемым»;

4. В соответствии с новой концепцией ВСС значительно расширен диапазон типов судов, подпадающих под действие Кодекса. Теперь к ВСС могут быть отнесены пассажирские, грузовые и грузопассажирские: СПК, СВП, экранопланы, быстроходные катамараны и тримараны, комбинированные суда, суда с малой площадью ватерлинии и многие другие, что потребовало введения в Кодекс ВСС, в том числе и в главу 2 «Плавучесть, остойчивость и деление на отсеки», дополнительных требований, отражающих специфику отдельных типов судов.

Вместе с другими странами Российская Федерация активно участвовала в разработке и обсуждении требований нового Кодекса ВСС ИМО [26], представив свои предложения в Подкомитет по проектированию и оборудованию (далее — Подкомитет DE), который координировал всю работу по переработке Кодекса, и Подкомитет SLF, который рассматривал вопросы мореходных качеств ВСС. Предложения разрабатывались ЦНИИМФ (координатор — А.И. Богданов) по заказу Департамента морского транспорта России. В них принимали участие ЦНИИМФ, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, «ЦКБ по СПК» им. Р.Е. Алексеева, АОЗТ «Технологии и Транспорт», ЦМКБ «Алмаз», ИНМОРТРАНС и ГУ Регистра.

Предложения России со вниманием были рассмотрены в ИМО и частично включены в Кодекс. Одним из наиболее интересных было предложение о включении в Кодекс нового перспективного типа ВСС — «экраноплана» (далее — ЭП), в разработке которого Россия на данный момент занимает ведущее положение в мире. Данное предложение было внесено по инициативе «ЦКБ по СПК» им. Р.Е. Алексеева — первого разработчика и строителя этого типа судов. Основной базой для такого предложения послужила работа [30]. В ней была обоснована и доказана принципиальная возможность классифицировать ЭП не как самолет, а как судно на воздушной подушке, но не на статической (хотя и она присутствует на определенных режимах), а на динамической. Показано, что

Российские Правила обеспечения безопасности СДПП приблизительно на 50-60% могут быть полностью применены к ЭП, 20-30% из них потребует незначительной корректировки, а 10-15% требований необходимо значительно переработать или разработать вновь для учета специфических особенностей ЭП. Были разработаны основные положения концепции безопасности и использования ЭП как нового морского высокоскоростного транспортного средства, предложены необходимые определения и формулировки основных требований безопасности, намечены пути разработки правил сертификации ЭП. В последующих работах по разработке правил безопасности ЭП самое активное участие принимает АОЗТ «Технологии и Транспорт» (Нижний Новгород), специализирующееся по проектированию и строительству ЭП гражданского назначения и организовавшее в России с 1993 г. три международные конференции, посвященные актуальным проблемам мореходности и развития этих судов. По его заказу и с его участием ЦНИИМФ разработал для Регистра проект Временных правил обеспечения безопасности малых судов на динамической подушке [31].

В настоящее время в ИМО под руководством Российской Федерации разрабатываются требования Международного кодекса по безопасности экранопланов (WIG craft Code), срок завершения которого — 1998 г. Об активизации интереса в мире к этому новому высокоскоростному виду транспорта свидетельствует включение этого вопроса с 1993 г. во многие международные конференции и симпозиумы по быстроходным судам. Особый интерес вызывают проблемы обеспечения безопасности, мореходных качеств и сертификации этих судов [32]. В связи с этим отсутствие национальных Правил обеспечения безопасности экранопланов в России вызывает законное удивление и должно быть поставлено на повестку дня Регистра в ближайшее время.

Несмотря на огромный прогресс в деле обеспечения безопасности ВСС, достигнутый при разработке нового Кодекса ВСС, этот документ, к сожалению, оказался еще далек от полного совершенства. Имеются недоработки и в главе 2 «Плавучесть, остойчивость и деление на отсеки». Об этом свидетельствует опыт использования нового Кодекса ВСС и заявления ряда стран (Франция, Дания), выступивших в ИМО на 39-й сессии Подкомитета DE с инициативой о продолжении работ по интерпретации и изменению (расширенному пересмотру) Кодекса ВСС. Предложе-

ние было поддержано многими странами, и в настоящее время имеется решение 66-й сессии Комитета по безопасности мореплавания (MSC) о включении в повестку дня соответствующих подкомитетов ИМО (в том числе и Подкомитета SLF, на котором уже сформирована соответствующая корреспондентская группа) на приоритетных основах пункта о пересмотре Кодекса ВСС.

Российским Регистром планируется переработка Правил обеспечения безопасности СДПП в соответствии с положениями нового Международного кодекса по безопасности высокоскоростных судов. Перед тем, как приступить к переработке национальных требований с учетом Кодекса ВСС, принимая во внимание его предстоящую переработку, представляется целесообразным тщательно сопоставить и проанализировать их требования, чтобы выбрать лучшие и обоснованно использовать в российских Правилах. Это свидетельствует о необходимости продолжить работу по совершенствованию отечественных требований к остойчивости ВСС с учетом накопленного на сегодняшний день опыта.

В заключение отметим, что совершенствование отечественных норм остойчивости морских судов всех типов в неповрежденном состоянии сегодня развивается прежде всего в направлении взаимовлияния и гармонизации с международными требованиями ИМО, что связано с возможностью дать судовладельцам экономические стимулы применения Правил Регистра при сохранении высокого уровня обеспечения конструктивной надежности судов с учетом современных достижений теории корабля и технологии средств обеспечения безопасности мореплавания.

Список литературы

1. Благовещенский С. Н. Принципы, заложенные в основу нормирования остойчивости морских судов. В сб.: Нормы остойчивости морских судов. Л.: Морской транспорт, 1963. С. 105-140.
2. Луговский В. В. Теоретические основы нормирования остойчивости морских судов. Л.: Судостроение, 1971. 246 с.
3. Луговский В. В. История создания и пути совершенствования норм остойчивости Российского Морского Регистра Судоходства (см. настоящий сборник). С. 83-93.
4. Правила классификации и постройки морских судов, часть IV «Остойчивость». Л.: Регистр СССР, т. 1, 1995. 464 с.
5. Правила обеспечения безопасности судов с динамическими принципами поддержания, глава 2.4 «Остойчивость». Л.: Регистр СССР, 1980. 247 с.
6. Правила обеспечения безопасности судов с динамическими принципами поддержания, глава 2.4 «Остойчивость». Л.: Регистр СССР, 1990. 345 с.
7. Consolidated text of the 1974 SOLAS convention, IMO, 1993.

8. Орлов Д.А., Шестериков О.В., Каменская Е.Н. Сопоставительный анализ остойчивости транспортных судов по различным критериям. Тр. ЦНИИМФ. Л.: Транспорт, вып. 295, 1984. С. 68-80.
9. Кондриков Д.В. Вероятностный критерий остойчивости судна в штормовых условиях. Л.: Судостроение, 1980, №4, С. 12-13.
10. Кондриков Д.В., Волосенко Е.Е., Озимова О.В. Остойчивость судна по критерию погоды с учетом действия ветра с порывами. Тр. ЦНИИМФ, Л.: Транспорт, 1985. С. 90-97.
11. Богданов А.И. Нормирование остойчивости. Диаграммы безопасных скоростей и курсовых углов при штормовом плавании судна на попутном волнении. Науч.-техн. сб. Регистра СССР, вып. 17, Л.: 1991. С. 20-44.
12. Bogdanov A.I. Stability criterion. Safe Speed and Wave-to-Course Angle Diagrams for a Ship Sailing in Storm Following Sea. 18 SMSSH, v. 3, pp. 81-1-81-9, BSHC, Varna, 1989.
13. РД 31.00.57.2-91 «Выбор безопасных скоростей и курсовых углов при штормовом плавании судна на попутном волнении». М.: В/О «Мортехинформреклама», 1993. 59 с.
14. Lipis V. Correlation of IMO and Russian Register Weather Criteria for Ship Stability Requirements. Proceedings of International Workshop «OTRADNOE-93», v. 2, Kaliningrad, 1993.
15. Богданов А.И. Статическая остойчивость скеговых судов на воздушной подушке. Науч.техн. сб. Регистра СССР, вып. 8, 1978. С. 85-101.
16. Корабли и суда на воздушной подушке скеговых. Остойчивость на плавучей подушке без хода. Методика расчета. ОСТ 5.0275-79. М.: 1980. 71 с.
17. Амфилохийев Л.Б. Остойчивость судов на воздушной подушке амфибийного типа над твердым экраном. Научно-техн. сб. Регистра СССР, вып. 8, 1978. С. 78-85.
18. Богданов А.И. Расчетная оценка влияния скорости хода на остойчивость скеговых СВП на конечных углах крена. Тезисы Всесоюзной науч.-техн. конференции «Проблемы совершенствования ходкости и мореходности морских судов». Л.: Судостроение, 1985. С. 126-129.
19. Богданов А.И. Остойчивость СВП скегового типа на попутном волнении. Тр. ЦНИИМФ, Л.: Транспорт, 1985. С. 97-108.
20. Богданов А.И. Особенности поперечной качки СВП скегового типа, свободно дрейфующего лагом к регулярному волнению. Тр. ЦНИИМФ, Л.: Транспорт, 1986. С. 97-108.
21. Богданов А.И., Стреляев Л.Н. Критерий погоды для морских судов с динамическими принципами поддержания. Тр. ЦНИИМФ, вып. 258, Л.: Транспорт, 1980. С. 60-65; науч.-техн. сб. Регистра СССР, вып. 16, 1988. С. 38-64.
22. Lipis V., Palekhov S., Peresypkin V. Operational Stability and On-Board Computer, International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB 94), Florida, USA, 1994, v. 3.
23. Code of Intact Stability for All Types of Ships. IMO, Res. A.749 (19), 1993.
24. Кодекс по безопасности судов с динамическими принципами поддержания (резолюция ИМКО А.373). Регистр СССР, Л.: 1978, 137 с.
25. International Code of Safety for High Speed Craft (HSC Code), Resolution MSC. 36(63) on 20 May 1994, IMO.
26. Documents of SLF IMO Sub-committee, submitted by the Russian Federation. SLF 15/Add 1, 1983; SLF 33/inf 6, 1988; SLF 33; inf 7, 1988; SLF 33/inf 4, 1988; SLF 34/W.P.4/Add1, 1989; SLF 36/3/9, 1991; SLF 37/3/6, 1992; SLF 37/inf 1, 1992; SLF 37/3/7, 1993; SLF 38/3/, 1994; SLF 40/, 1996; SLF 37/15, SLF 37/3/5, SLF 37/3/5 Add 1,2,3; SLF 39/18, 1995.
27. Богданов А.И. Принципы нормирования, положенные в основу требований к остойчивости Правил обеспечения безопасности судов с дина-

мическими принципами поддержания и пути их дальнейшего развития. Науч.-техн. сб. Регистра СССР, вып. 16, Л.: 1988. С. 38-64.

28. Гаврилов А. Ю., Липис В. Б. Основные положения нового Кодекса ИМО по остойчивости судов всех типов в неповрежденном состоянии. Тезисы НТК «Крыловские чтения». СПб.: 1993.

29. Липис В. Б. О гармонизации требований к остойчивости судов в Правилах Регистра и Кодексе ИМО. Тезисы НТК «Крыловские чтения». СПб.: 1995.

30. Богданов А. И. Разработка предложений по концепции и основным принципам нормирования остойчивости и обеспечения безопасности пассажирских экранопланов. НИР ЦНИИМФ, ХД-4-315, Л.: 1992.

31. Богданов А. И. Разработка временных Правил обеспечения безопасности малых судов на динамической воздушной подушке. НИР ЦНИИМФ, ХД-4-318, СПб.: 1996.

32. Bogdanov A.I. (November 7-8, 1995): «The Problems of Ekranoplans Certification. Conception and Development of IMO Safety Requirements», Proceeding of a Workshop on Twenty-First Century Flying Ships, University of NSW, Sydney, NSW, Australia, 1995, pp. 128-147.

33. Lipis V., Saiov V. Problem of the Stability Control on Transport Ships in Operation, Fifth International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB 90), Naples, Italy, 1990, v. 1.

О НОРМИРОВАНИИ МАНЕВРЕННЫХ КАЧЕСТВ МОРСКИХ СУДОВ

1. Введение

При перечислении классических разделов корабельной гидродинамики управляемость корабля¹ всегда упоминают последней, что, в общем-то, соответствует исторической реальности: этот раздел начал сколько-нибудь интенсивно развиваться лишь после второй мировой войны, причем похоже, что это происходило под сильным влиянием прогресса в области динамики подводных лодок и даже — динамики летательных аппаратов. Не удивительно, что заметно запоздала и постановка проблемы нормирования управляемости судов (особенно морских) по сравнению с нормированием остойчивости и прочности, хотя влияние маневренных качеств судов на безопасность их эксплуатации представляется очевидным. Но при ближайшем рассмотрении дело обстоит не так просто.

В отчете [1] на основе изучения обширной базы данных по навигационным авариям морских транспортных судов, которая включала в себя 835 аварий типа столкновений, навалов и посадок на мель, был сделан вывод о том, что в среднем каждое судно за 20 лет эксплуатации претерпевает 8 аварий такого типа (к счастью, далеко не все из них бывают катастрофическими). Это качественно согласуется с данными А. Б. Юдовича [2]. Изучение описаний конкретных аварий, в том числе приводимых в книге [2], наводит на мысль о том, что почти все они могли бы быть предотвращены хотя бы при помощи маневра последнего момента, если бы суда обладали лучшими маневренными характеристиками (лучшей

¹ Некоторые специалисты различают *управляемость* и *маневренность* судов, полагая, что второй термин несколько шире, так как включает в себя дополнительно рассмотрение маневров, связанных с изменением режима работы главного двигателя, в том числе активное торможение. Автор, однако, придерживается другой точки зрения и полагает, что оба эти термина практически синонимичны и эквивалентны английскому термину *manoeuvrability*.

поворотливостью, меньшей длиной выбега при экстренном торможении и т. д.). На самом деле это не совсем так: маневренные качества не могут улучшаться безгранично, и по приведенной в [1] оценке лучшая (но реалистичная!) управляемость судов позволила бы предотвратить менее 40 % произошедших аварий. Впрочем, и эта оценка представляется завышенной, так как человек (судоводитель или рулевой) адаптивен, и при управлении судном с лучшими маневренными характеристиками часто бывает и более беспечным, т. е. большая часть навигационных аварий имеет чисто судоводительскую природу. Эта адаптивность и была одной из причин позднего осознания необходимости нормирования управляемости судна¹. Осознание это все же пришло в силу целого ряда причин. Во-первых, усложнилось управление морскими судами как ввиду роста их размеров и/или скоростей, так и вследствие увеличения интенсивности судоходства. Во-вторых, увеличилась возможная цена аварии (возможность загрязнения окружающей среды, появление особо опасных грузов типа сжиженных газов, все более отчетливое осознание высокой ценности человеческой жизни и т. д.). Наконец, видимо, сыграли свою стимулирующую роль: существование норм летной годности летательных аппаратов (в том числе по критериям устойчивости и управляемости) [3] и появление в России в начале семидесятых годов норм управляемости судов внутреннего плавания (см. [4]).

Но даже сейчас еще нельзя говорить о сколько-нибудь устоявшемся нормировании маневренности морских судов, хотя количество различных предлагавшихся критериев и мер управляемости составляет несколько десятков (довольно полный аналитический обзор таких критериев может быть найден в работе автора [5]; некоторые дополнительные сведения приводятся ниже). Настоящая работа посвящена анализу современного состояния проблемы и возможностей развития и совершенствования (перспективного и ближайшего) норм управляемости.

¹ В качестве других причин в [1] приводилось то, что при грамотном следовании многовековому опыту судостроения неприемлемые по маневренным качествам суда появлялись редко, а также то, что судовладельцы не видели экономической выгоды от подобных мероприятий.

2. Национальные нормы управляемости морских судов

2.1. Общие замечания

В отчете [1] выстроена иерархия понятий, относящихся к нормированию маневренных качеств судов: различают *критерии управляемости (criteria)* (например, устойчивость на курсе, поворотливость, способность нормально управляться в условиях действия ветра и т. д.), *количественные меры (measures)* (высота петли гистерезиса диаграммы управляемости, относительный диаметр установившейся циркуляции, предельная скорость ветра, при которой судно может двигаться произвольным курсом и т. п.) и *нормативные уровни (levels)* или конкретные числовые значения мер управляемости.

Представляется очевидным, что в любых нормах управляемости все эти понятия должны так или иначе фигурировать. Но анализ существующих Правил классификации и постройки морских судов различных классификационных обществ [6-14] приводит специалиста к парадоксальному выводу о том, что национальных норм управляемости морских судов не существует вовсе¹! Но это не совсем так. Эти нормы присутствуют *неявно* в норвежских, германских и российских Правилах в виде требований к площади или эффективности руля или поворотной насадки. Такая «инкапсулированность» норм хотя и находится в соответствии с духом Правил классификации и постройки морских судов, которые в любой стране являются скорее юридическим, чем техническим документом, по мнению автора приводит к их крайней негибкости, сильно препятствует их совершенствованию и значительно снижает достоверность суждений о действительных маневренных качествах судов. Другим досадным обстоятельством, связанным, впрочем, с предыдущим, является то, что упомянутые неявные нормы помещены в разделах «Судовые устройства», «Руль и рулевое устройство» и им подобных, хотя в концептуальном отношении нормирование управляемости судов лежит гораздо ближе к нормированию, скажем, их остойчивости, чем к нормированию прочности и надежности тех же устройств.

¹ Некоторое исключение представляют Правила Российского Морского Регистра Судоходства, о чем речь пойдет ниже.

2.2. Зарубежные требования к площади руля

«Нормы», содержащиеся неявно в норвежских и немецких Правилах, выражаются в виде некоторых требований (к тому же необязательных!) к площади руля, которые настолько просты, что могут быть здесь воспроизведены почти полностью.

В норвежских Правилах [9] рекомендуется, чтобы расчетная площадь руля A_1 (помимо площади пера руля эта площадь включает в себя половину площади рудерпоста или ту часть площади кронштейна, которая заглублена больше верхнего торца пера) была не меньше определенной по формуле

$$A_1 = 0,01cLT[1 + 25(B/L)^2], \quad (1)$$

где $c = 1,0$ для руля, работающего в струе за гребным винтом, и $c = 1,3$ для руля вне струи;

L — длина судна между перпендикулярами;

T — осадка судна;

B — ширина судна.

Нетрудно видеть, что нормируется по существу соотношение между площадью руля и площадью диаметрали судна.

Сходная формула приведена в Правилах Германского Ллойда [10]:

$$A_2 = 0,0175c_1c_2c_3c_4LT, \quad (2)$$

где в расчетную площадь руля A_2 входит площадь пера и половина площади кронштейна, если таковой имеется;

c_1 — коэффициент, учитывающий тип судна (изменяется в пределах от 1,0 до 1,7);

c_2 — коэффициент, учитывающий тип руля (0,7 — 1,0);

c_3 — коэффициент, учитывающий профиль руля (0,8 — 1,0);

c_4 — коэффициент, учитывающий расположение руля относительно струи гребного винта (равен 1,0 для руля, работающего в струе и 1,5 — в противном случае).

Крайняя схематичность обеих рекомендаций не позволяет говорить, что следование им позволит с уверенностью удовлетворить каким бы то ни было критериям управляемости, хотя при эскизном проектировании приведенные формулы могут оказаться полезными.

2.3. О требованиях Регистра к эффективности средств управления судном

Российские национальные требования к эффективности рулей и поворотных насадок изложены в 2.10 части III «Устройства, оборудование и снабжение» Правил (см. [14]) и выглядят значительно более совершенными по сравнению с немецкими и норвежскими¹.

Согласно этим требованиям производится сравнение условной меры эффективности средств управления (СУ) E , которая приближенно пропорциональна градиенту поперечной силы СУ, с тремя нормативными значениями этой меры: E_1 (предполагается, что это нормативное значение назначено по критериям устойчивости на прямом курсе и достаточной поворотливости судна; оно зависит от коэффициента полноты кормовой части диаметрали и коэффициента продольной полноты корпуса); E_2 (отражает способность судна не терять управляемость при ходе спецификационной скоростью в балласте в условиях действия ветра; зависит от относительной площади парусности, положения центра парусности и относительного удлинения руля²) и, наконец, E_3 (этот нормативный параметр подобен E_2 , но рассматривается движение судна малым ходом в полном грузу в условиях гидродинамического взаимодействия со стенкой канала).

Это беглое описание российских требований к эффективности СУ (неявных норм управляемости) создает впечатление того, что Российский Регистр находится на передовых по сравнению с другими классификационными обществами позициях, а проблема совершенствования этих норм по меньшей мере неактуальна. К сожалению, это далеко не так — можно привести целый ряд

¹ Требования были разработаны проф. Ю. М. Мاستушкиным в 1972 — 1978 гг. и предназначались первоначально только для судов рыбной промышленности. Значительную роль в их доводке, апробации на специально созываемых совещаниях и внедрении (в качестве Временных норм [15] — с 1979 г., а с 1986 г. они вошли непосредственно в Правила) сыграл сотрудник Регистра СССР Ш. А. Урусов. С теоретическими основами нормирования можно познакомиться в статье [16], а их подробный критический анализ может быть найден в нашем отчете [17].

² Последняя зависимость любому специалисту представляется странной, тем более, что чем удлинение руля больше, тем ситуация становится как бы хуже. Действительно, в нашей работе [17] показано, что подобного влияния быть не должно. Замечание по этому поводу было сделано ЦКБ «Восток» в отзыве на вторую редакцию требований (норм управляемости) [18], но, к сожалению, разработчиком на него был дан лишь формальный ответ.

соображений в пользу необходимости не просто совершенствования, но даже коренной переработки норм. Соображения эти следующие.

1) Уже говорилось, что принятые нормы носят неявный характер, т. е. в них не фигурируют непосредственно какие-либо меры критериев управляемости¹. Это не просто вопрос формы представления норм, и это далеко не так безобидно, как кажется на первый взгляд. Дело в том, что в этом случае в нормы неизбежно инкорпорируются (опять-таки неявно) методы расчета тех показателей маневренности, которые должны ими регламентироваться. Методы эти волей-неволей были применены очень простые и грубые, которые для любого конкретного судна могут привести к погрешности, скажем, в 50 % для диаметра циркуляции². То есть действующие требования обеспечивают выбор достаточно (и не чрезмерно) эффективных средств управления только в *статистическом* смысле, что вполне приемлемо для целей проектирования, особенно на стадии эскизного проекта, но вряд-ли приемлемо для нормирования, так как руль, удовлетворяющий всем требованиям Правил [14], может не обеспечить удовлетворительных маневренных характеристик судна (это могло произойти, например, в 1992 г. на судне проекта 15760 — по счастью для любого сколько-нибудь серьезного проекта маневренные качества обычно проверяются при помощи модельного эксперимента). Часто встречается и ситуация, когда Правила предъявляют избыточные требования к площади руля. Так, с участием автора в 1979 г. было выполнено тестирование Временных норм [15], которые, впрочем, практически не отличаются от

¹ Исключение представляют суда массой свыше 60 кт при коэффициенте общей полноты более 0,75, для которых требуется путем модельных испытаний показать, что их диаметр установившейся циркуляции при перекладке руля на борт составляет не более четырех длин (критерий поворотливости), а диаметр самопроизвольной циркуляции при нейтральном положении руля составляет не менее 6,7 диаметра циркуляции при перекладке на борт (критерий устойчивости на прямом курсе). Неплохо было бы эти требования распространить на все суда! Примечательно, что только эти нормативные требования и приводятся в первом, по-видимому, упоминании о российских нормах в зарубежной научной печати [19], что не удивительно, так как иначе их затруднительно даже сравнивать с альтернативными предложениями по нормированию.

² Проблема точного расчета параметров движения надводного водонемещающего судна без использования данных модельных испытаний конкретной гидродинамической конфигурации вообще достаточно далека от разрешения: см. по этому поводу работу [20].

действующих, на выборке из 40 морских транспортных судов [17]. При этом для судов типа «Славянск», «Юшар», «Кегумс» и «Белоруссия» было выявлено, что они существенно (до 30 %) не удовлетворяют Временным нормам. Провести их натурные испытания, правда, не удалось, но непосредственно в парокходствах были собраны данные по их маневренным элементам, и были опрошены плававшие на них капитаны и старшие помощники. Никаких существенных нареканий на их управляемость не было, а их объективные маневренные характеристики оказались удовлетворительными и даже очень хорошими.

2) Действующие требования на стадиях их подготовки и согласования многократно подвергались статистической корректировке (подробнее об этом см. в отчете [17]), что, собственно и предопределило их практическую приемлемость. Базой для разработки служили, однако, некоторые теоретические и физические предпосылки, отражавшие состояние управляемости корабля как научной дисциплины на начало семидесятых годов, да и то преимущественно принимались во внимание лишь отечественные разработки. Например, в качестве меры устойчивости судна на прямом курсе (точнее — допустимой степени его неустойчивости) принималась предложенная Е. Б. Юдиным еще в 1967 г. [21] мера, равная отношению угловой скорости самопроизвольной циркуляции к угловой скорости установившейся циркуляции при перекладке руля на борт или, что то же самое, — относительной полувысоте петли гистерезиса диаграммы управляемости. При этом для всех судов предлагалось одно и то же предельное нормативное значение указанного параметра, равное 0,2. Полученный критерий был достаточно удачным, но за последние тридцать лет выявились некоторые дополнительные обстоятельства. Во-первых, было обнаружено, что поведение судна на прямом курсе зависит не только от высоты, но и от ширины петли гистерезиса, которая хотя и скоррелирована с высотой, но жестко все же с ней не связана. Во-вторых, было осознано, что необходимая степень устойчивости на прямом курсе зависит от так называемого характерного времени судна¹ $T_{REF} = L/V$, где V — скорость судна [5]. Характерное время даже для надводных водоизмещающих судов гражданского назначения меняется в довольно широких пределах: от 2 с для

¹ Характерное время имеет очень простой физический смысл — это время, за которое судно проходит расстояние, равное своей длине.

быстроходных катамаранов на полном ходу до 100-120 с для крупнотоннажных судов на малых ходах. Чем меньше характерное время, тем больше должен быть запас динамической устойчивости судна.

Нет сомнений в том, что любые современные нормы управляемости должны бы учитывать описанные эффекты, но это не так для действующих норм.

3) Но решающим доводом в пользу необходимости переработки российских национальных норм управляемости служит принятие в 1993 г. Международной морской организацией (ИМО) «Временных норм управляемости судов» [22]. Поскольку эти нормы явные (они будут кратко описаны в следующем разделе) и рекомендованы к использованию всеми странами, то присутствие в Правилах Регистра устаревших неявных норм становится практически лишним смыслом (если не считать использования их как подспорья при проектировании). В то же время было бы очень заманчивым, если бы новые отечественные нормы были полностью согласованы с нормами ИМО и предъявляли бы к маневренным качествам судов по крайней мере не менее жесткие требования. Очевидно, что они должны носить явный характер, но так как тогда они по своему характеру никак не будут вписываться в раздел «Судовые устройства», в Правилах должен быть создан новый раздел под соответствующим названием.

3. Международные нормы управляемости

Отказываясь от полного описания норм ИМО, которое может быть найдено в документе [22], приведем здесь все же их основные положения, сгруппировав по использованным критериям управляемости.

1. В качестве мер достаточной поворотливости приняты:

- (а) выдвиг (не должен превышать 4,5 длин судна),
- (б) тактический диаметр (должен быть не более 5 длин).

Эти нормативные значения примерно соответствуют тому, что принято (точнее подразумевается) в российских нормах управляемости, хотя точное сравнение и затруднено, поскольку меры поворотливости приняты разные.

2. В качестве мер устойчивости на курсе и способности судна к одерживанию предложено использовать углы заброса (*overshoot*)

angles) при выполнении маневров «зигзаг» 10° - 10° и 20° - 20° , причем часть нормативных значений зависит от характерного времени судна в интервале 10-30 с.

3. Нормирование по критерию быстроты изменения курса¹ реализуется посредством выполнения требования, чтобы судно прошло путь не более, чем в 2,5 длины за время изменения курса на 10° и при перекаладке руля также на 10° .

4. Выбег судна при экстренном активном торможении должен составлять не более 15 длин.

Нормы ИМО разрабатывались в течение ряда лет группой высококвалифицированных японских гидродинамиков (с теоретическими основами их можно познакомиться в работе [23]) и представляются наиболее совершенными из всех существовавших. Но и они не лишены некоторых недостатков:

нормы не включают критериев, связанных с окружающей средой (*environmental criteria*), хотя важность таких критериев, особенно учитывающих влияние ветра, очевидна и подчеркнута, например, в отчете [1];

хотя нормы и учитывают влияние характерного времени, само это влияние было установлено на основе небезупречных соображений (подробнее см. в [5]), что заставляет подвергнуть сомнению количественную достоверность соответствующей зависимости;

нормы никак не регламентируют поведение судна при углах перекаладки руля менее 10° , хотя реально применяются и значительно меньшие углы, особенно в режиме стабилизации на курсе. То есть, вполне возможна ситуация, когда судно полностью удовлетворяет нормам, но плохо управляется при малых углах перекаладки.

Этих-то недостатков и следует избежать при разработке новых российских норм.

¹ Национальные нормы подобного критерия не содержат. Частично это обусловлено тем, что во время их разработки большинство отечественных специалистов считали, что те динамические свойства судна, которые не могут быть полностью описаны диаграммой управляемости судна (к ним как раз и относится рассматриваемый критерий), несущественны.

4. Возможные подходы к разработке новых норм управляемости морских водоизмещающих судов

Применить какой-то единый подход при разработке норм управляемости, видимо, невозможно, поскольку природа различных критериев управляемости также очень различна. Так, например, критерии поворотливости и тормозных качеств судов целесообразно, наверное, принять такими же как в международных нормах, хотя быть может и с незначительной количественной коррекцией в сторону ужесточения. Можно быть уверенным, что никогда не удастся однозначно «вывести» нормативные значения мер управляемости по этим критериям, исходя из анализа тех или иных навигационных ситуаций — здесь гораздо более эффективным будет принцип нормирования «от достигнутого», причем следует иметь в виду, что опасной может, например, оказаться как недостаточная, так и чрезмерно высокая поворотливость, так как поведение такого чересчур поворотливого судна станет тогда менее предсказуемым для других судов.

Что касается управляемости в условиях действия ветра, то здесь использованные неявно в Правилах Российского Регистра расчетные ситуации представляются вполне разумными. Правда, соответствующие критерии должны быть переформулированы в явном виде в терминах предельной относительной скорости ветра (проверка соответствия нормам должна тогда производиться при помощи расчетного метода и/или компьютерной программы, сертифицированных Регистром).

Значительно сложнее обстоит дело с нормированием динамических свойств судна при малых углах перекадки, в частности, — в режиме удержания судна на прямом курсе (управляемость «в малом»). Здесь для разработки норм предлагается использовать подход, который довольно давно применяется в авиации для нормирования показателей устойчивости и управляемости самолетов [24]. Этот подход существенно базируется на использовании компьютеризованных пилотажных стендов¹ и включает в себя следующие этапы:

¹ Пилотажный стенд — это тот же тренажер, но предназначенный для исследовательской работы. Аналогичную установку в кораблестроении можно было бы назвать, скажем, маневренным стендом.

1) на стенде реализуются математические модели самолетов с варьируемыми значениями параметров;

2) при каждом сочетании параметров группа летчиков (пилотов) дает субъективную оценку качеству управления моделируемым объектом, причем используется специальная десятибалльная шкала Купера — Харпера;

3) в пространстве параметров строятся (гипер)поверхности равных оценок и устанавливаются области допустимых сочетаний параметров.

Принципиальная возможность реализации такого подхода для нормирования управляемости морских судов¹ в настоящее время существует, так как компьютерные тренажеры, которые можно было бы использовать в качестве маневренных стендов, получают все большее распространение (см., например, [25]). В то же время очевидно, что этот путь требует довольно больших, хотя, видимо, и неизбежных, затрат.

Более того, перед собственно разработкой норм необходимо провести следующие предварительные исследования:

1) подбор или разработку математической модели, позволяющей за счет варьирования параметров охватить весь возможный диапазон изменения динамических характеристик судна;

2) разработку шкалы оценок судов операторами (вариант такой шкалы, включающей в себя оценки от одного балла «Прекрасно, исключительно хорошая управляемость» до десяти баллов «Судно не слушается руля!» уже был нами разработан [5], но окончательная структура шкалы должна быть уточнена посредством экспертных оценок и пробного использования);

3) формирование наиболее удобной полной минимальной системы мер управляемости судна «в малом».

¹Впервые этот подход, который можно назвать «эргономическим», был предложен автором в 1984 г. и впоследствии был апробирован на всесоюзной научной конференции «Безопасность на море» (гор. Николаев, 1991) и на международном симпозиуме «Manoeuvrability'95» (гор. Илава, Польша, 1995) [5].

5. Заключение

В настоящей статье выполнен краткий анализ существующих национальных и международных норм управляемости морских судов и намечены пути их совершенствования. Основные выводы могут быть сформулированы следующим образом:

передовые позиции Правил Регистра в отношении нормирования маневренности судов носят весьма условный и относительный характер;

в связи с принятием резолюции ИМО А.751(18) российские нормы управляемости морских судов нуждаются в коренной переработке;

новые нормы должны быть согласованы с международными, формулироваться в явном виде и располагаться во вновь образованном особом разделе Правил Регистра;

разработка новых норм в отношении критериев устойчивости на курсе и скорости изменения курса должна вестись на основе математического моделирования на компьютерных тренажерах (маневренных стендах).

Автор выражает благодарность ученому секретарю Регистра А.А. Захарову и проф. Ф. М. Кацману за содействие в подготовке настоящей статьи.

Список литературы

1. Bart R. A. et al. Technical Basis for Maneuvering Performance Standards: Technical Report 8103-3/Hydro-nautics Inc. CG-M-8-81. s.l., 1981.
2. Юдович А. Б. Предотвращение навигационных аварий морских судов. М.: Транспорт, 1988.
3. Нормы летной годности гражданских самолетов СССР. 2-е изд. Межведомственная комиссия по нормам летной годности гражданских самолетов и вертолетов СССР, 1974.
4. Гофман А. Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Л.: Судостроение, 1988.
5. Sutulo S. V. On the Ergonomic Approach to Evaluation of Ship Manoeuvring Criteria. Trans. International Symposium on Manoeuvrability of Ships at Slow Speed "Manoeuvrability'95". 16-19 October 1995. Iława-Poland: Ship Handling Research and Training Centre, s.a.
6. American Bureau of Shipping: Rules for Building and Classing Steel Vessels. 1994. New York, N.Y.: ABS, 1994.
7. Bureau Veritas: Rules and Regulations for the Classification of Ships 1992. Paris: 1992.
8. China Classification Society: Rules and Regulations for the Construction and Classification of Sea-Going Steel Ships 1991. Beijing: 1991.
9. Det Norske Veritas: Rules for the Construction and Classification of Steel Ships, January 1990. Oslo: 1990.

10. Germanischer Lloyd: Правила классификации и постройки 1992. Hamburg: 1992.
11. Lloyd's Register: Rules of Regulations for the Classification of Ships, January 1995. London: 1995.
12. Nippon Kaiji Kyokai: Rules for the Survey and Construction of Steel Ships. Tokyo: 1995.
13. Registro Italiano Navale: Rules for the Construction and Classification of Ships, January 1993. Roma: 1993.
14. Морской Регистр Судоходства: Правила классификации и постройки морских судов. Т. 1. СПб: МРС, 1995.
15. Временные нормы минимальной эффективности рулей и поворотных насадок морских самоходных судов, плавающих в водоизмещающем состоянии. Приложение к циркуляру Регистра СССР №2 от 22 марта 1979 г.
16. Мاستушкин Ю. М. Основы нормирования управляемости рыболовно-промысловых судов. Судостроение. 1975. №7. С. 37-38.
17. Расчетный анализ норм эффективности рулевых устройств Регистра СССР применительно к морским транспортным судам. Отчет ЛВИМУ им. адм. С.О. Макарова; Руководитель Ф. М. Кацман, отв. исполнитель С. В. Сутуло. Тема №981; № г.р. 79014343. Л.: 1979. 102 с.
18. Мастушкин Ю. М. Сводка замечаний и предложений заинтересованных организаций по второй редакции норм управляемости морских судов. 1976.
19. Baquero A. Consideraciones sobre la maniobrabilidad del buque durante la fase de anteproyecto del mismo. Ing. Nav., 1982. V. 50. No. 566, pp. 284-295.
20. Söding H. Seakeeping and Manoeuvring of Ships. 19th WEGEMT School «Numerical Simulation of Hydrodynamics: Ships and Offshore Structures». Nantes 20-24 September 1993.
21. Юдин Е. Б. Показатель эксплуатационной устойчивости судна на курсе. Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 1967. Вып. 239. С. 72-81.
22. Interim Standards for Ship Manoeuvrability. IMO Resolution A.751(18) adopted on 4 November 1993.
23. Nobukawa T. et al. Studies on Manoeuvrability Standards From the Viewpoint of Marine Pilots. Proceedings MARSIM & ICSM 90 (Joint International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability). June 4-7, 1990. Tokyo. The Society of Naval Architects of Japan, s.a, pp. 59-66.
24. Гульников Ю. П., Загайнов Г. И. Управление полетом самолетов. М.: Машиностроение, 1980.
25. Norcontrol bridge simulators: Product description. Norcontrol DSC/SHI/06-0, s.l., 1989.

Н.Н. Рахманин, Г.В. Виленский

ПОПУТНОЕ ВОЛНЕНИЕ И ВАЛКОСТЬ СУДНА

«Валкий, шаткий, производящий качку, или подверженный качке, колебанию с боку на бок. Валкость, свойство, качество это, недостаток остойчивости».

В. Даль. Толковый словарь живого великорусского языка. СПб., изд-во М.О. Вольфа, 1880, т. 1, с. 164.

1. Введение

Проблема обеспечения безопасности плавания судов при движении на волнении попутными курсами продолжает сохранять актуальность по сей день, хотя она стала привлекать внимание специалистов еще в середине 50-х годов. Накоплен большой объем знаний в области остойчивости и динамики поведения судов в условиях попутного волнения, систематизированы неблагоприятные и опасные ситуации, с которыми судоводитель может столкнуться в море, найдены отдельные рекомендации, помогающие капитану избежать некоторых опасностей плавания в таких условиях. Однако многообразие упомянутых опасных ситуаций и сложность их математического описания создают немало трудностей на пути отыскания практически приемлемых нормативов безопасности плавания судна на попутном волнении. Эти нормативы должны отражать наиболее существенные связи между критериями безопасности и теми конструктивными характеристиками судна, изменение которых на стадии проектирования позволяет исключить опрокидывание.

Даже неполное перечисление имен ученых, занимавшихся изучением проблемы, говорит о ее сложности и многогранности. Большой вклад в ее исследование внесли у нас в стране

С.Н. Благовещенский, И.К. Бородай, В.В. Луговский, Н.В. Севастьянов, Ю.И. Нечаев, Д.М. Ананьев, Н.Я. Мальцев, В.Н. Салтовская, Ю.Л. Маков, за рубежом — Б. Арндт, К. Вендель, О. Грим, Дж. Поллинг, С. Кастнер, С. Мотора и в последние годы — С. Ренильсон, Н. Умеда, Г. Томас, М. Кан. Обзоры работ и публикаций по обсуждаемой теме можно найти в книгах [4, 7] и трудах Международной конференции по остойчивости 1990 и 1994 гг., например [27].

Хрестоматийным является факт уменьшения остойчивости при попадании судна на вершину волны. Понижение остойчивости сказывается на всем диапазоне углов крена и может повлечь за собой опрокидывание судна. Особенно опасной в этом отношении является ситуация, когда его длина и скорость равны длине и скорости волны. Это случается при числах Фруда, близких к 0,4.

Другую опасность для судна при движении на попутном волнении представляет явление «брочинг», составляющее совокупность его захвата и разворота попутной волной [8]. При движении попутными курсами волны сообщают судну дополнительную энергию. При длине судна, равной длине волны, этой энергии может оказаться достаточно для того, чтобы судно двигалось вместе с волной. В захваченном состоянии судно может потерять курсовую устойчивость и самопроизвольно развернуться лагом к волнам. При этом иногда возникают большие крены, чреватые опрокидыванием. Однако эти крены отнюдь не связаны со снижением остойчивости на гребне волны, а являются результатом внешних динамических нагрузок, возникающих в процессе самопроизвольного разворота. Эта ситуация особенно важна для небольших промысловых или иных типов судов (длиной $L \leq 60$ м) в связи с их относительно высокими числами Фруда и частой работой в условиях волнения при $\lambda \geq L$. По этой причине Правилами Регистра [14] (см. 3.9.11 части IV «Остойчивость») для малых судов предусмотрено на попутной волне, равной или большей длины судна, ограничивать скорость величиной $1,4\sqrt{L}$, в узлах. При этом скорость судна составит 0,58 от скорости бега волн или меньше, и захвата судна волной, как правило, можно не опасаться [12].

«Кроме двух указанных выше факторов, сопровождающих движение судна на попутном волнении, — уменьшения остойчивости и потери управляемости с разворотом, известную угрозу его безопасности может в отдельных случаях оказывать также параметрически возбуждаемая бортовая качка», — указывается в [4]. И далее там же:

«Из перечисленных факторов, которые могут способствовать опрокидыванию судна в условиях волнения, первый — изменение

его поперечной остойчивости — представляется наиболее существенным, проявляясь особенно ярко при следовании судна на попутном волнении, этот фактор в сочетании с ухудшением управляемости приводит иногда к губительным последствиям: по данным ИМКО около 50% судов длиной до 60 м опрокинулось на волнении, двигаясь попутными курсами.».

Сказанное отражает два основных мировоззренческих аспекта, сложившихся в конце 70-х годов. Во-первых, опасность плавания на попутном волнении связывалась в первую очередь с эксплуатацией небольших (длиной 60 — 80 м) судов промыслового флота. Во-вторых, считалось общепризнанным [10], что при параметрическом возбуждении амплитуды бортовой качки не возрастают бесконечно в соответствии с известным решением уравнения Матве в зоне неустойчивости, а остаются ограниченными из-за проявления нелинейности восстанавливающего и демпфирующего моментов. Иными словами, при ходе на попутном волнении параметрическая раскачка рассматривалась лишь как обстоятельство, снижающее сопротивляемость судна кренящим нагрузкам, а не как прямая угроза его безопасности [4, 10].

В результате оказалось, что в настоящее время во многих национальных правилах по остойчивости, — как у нас в стране, так и за рубежом, за редким исключением, отсутствуют критерии, прямо отражающие физику опасных ситуаций, обязанных своим появлением плаванию попутными курсами. Встречаются, как правило, косвенные рекомендации, подобные 3.9.11 части IV «Остойчивость» Правил [14] и направленные на выбор безопасных скорости и курсового угла или вообще предупреждения общего характера. В качестве примера сошлемся еще на Кодекс ИМО по остойчивости неповрежденных судов всех типов [17] и Руководство ИМО для капитана с рекомендациями по управлению судном, чтобы избежать опасных ситуаций при следовании попутными курсами [27].

Первые свидетельства о том, что попутное волнение может причинить неприятности крупным судам современного морского флота длиной $L \geq 100$ м появились в ИМО на рубеже 70-х и 80-х годов, когда эта организация приступила к работе по совершенствованию требований к остойчивости транспортных судов на основе внедрения критерия погоды в международную практику. Делегация Германии (в те годы — ФРГ) неоднократно обращала внимание Подкомитета ИМО по остойчивости и грузовой марке на опасную валкость контейнеровозов при плавании на попутном волнении и на необходимость изучения этой

проблемы применительно к крупным судам. Начальник отдела безопасности судов Германского Ллойда В. Хойслер, член немецкой делегации на Подкомитете по остойчивости и грузовой марке, неоднократно говорил о поступающих в отдел донесениях, в которых плавающие капитаны сообщали о потере контейнеров в открытом море из-за внезапно возникавших кренов порядка $30 \div 45^\circ$. На фоне обычной небольшой качки, характерной для плавания на попутных волнах [6], такие крены без видимой причины (ветрового шквала, захвата волной, маловероятного для больших судов) могли повергнуть команду в состояние паники. И надо отметить — не без основания.

В середине 80-х годов появились достаточно надежные экспериментальные и полученные численным моделированием теоретические данные [9, 20, 26], подтверждающие возможность опрокидывания судна на строго попутном волнении только в результате бортовой качки в режиме параметрического резонанса, возникающего вследствие периодического изменения остойчивости. В частности, Поллинг [26] показал опасность главного параметрического резонанса на примере анализа динамики на волнении судна типа «Маринер» с диаграммой статической остойчивости (ДСО), отвечающей всем требованиям ИМО для неповрежденного состояния. Длина регулярных волн при этом равнялась длине судна, их крутизна составляла $1/17$. В условиях тихой воды, на вершине и подошве волны ДСО имела, соответственно, следующие характеристики: максимальные плечи — 0,43, 0,06 и 0,85 м; углы максимума — $38, 16$ и 40° ; углы заката — $59, 29$ и 70° . О динамике опрокидывания дает представление рис. 1, где точками обозначены результаты расчета, сплошными линиями — данные модельного эксперимента. Как видно, фатальное наклонение может наступить после 3 — 4 размахов бортовой качки и избежать его изменением курса судна практически невозможно.

Аналогичные результаты были получены в опытах с радиоуправляемыми самоходными моделями в Севастопольской бухте [9] и мореходном бассейне [20]. В первом случае испытывались модели контейнеровоза, грузового судна и сейнера в условиях волнения силой 5 — 7 баллов в пересчете на натуру. Всего наблюдалось 300 случаев опрокидывания, из них $\sim 2/3$ приходилось на попутные волны, включая волны кормовой четверти. Опрокидывание в режиме параметрического резонанса наблюдалось на всех моделях в пределах $10 \div 15\%$ от общего числа случаев плавания попутными курсами. Во втором случае за

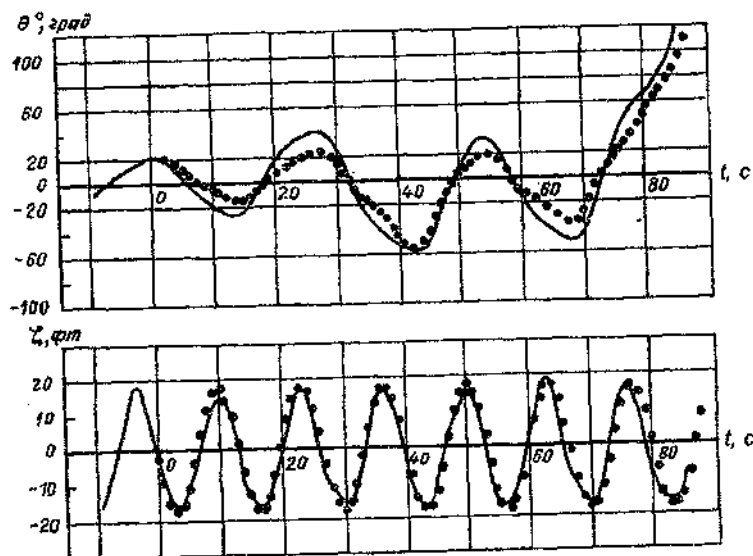


Рис. 1

Результаты экспериментального и численного определения амплитуд бортовой качки на попутном волнении в режиме главного параметрического резонанса [26]:

— эксперимент, ● — моделирование; ζ — ордината волны

182 пробега на попутных волнах с крутизной от $1/29$ до $1/9$ в режиме параметрического резонанса модель опрокинулась 11 раз. Случаев с большими наклонениями без опрокидывания в обеих работах отмечалось гораздо больше.

Таким образом, при плавании в штормовых условиях со средними длинами волн, равными длине судна, риск столкнуться с опасным наклонением на судне, подверженном валкости, может оказаться весьма высоким, в пределах от $1/100$ до $4/1000$, если за крупные волны принимать значительные (обеспеченность $\sim 14\%$). Это гораздо выше, чем вероятность попасть в аварию пассажиру автомобиля в течение года ($\sim 10^{-3}$).

Далее предлагается анализ наиболее известных попыток нормирования остойчивости с целью учета ее изменчивости на попутном волнении и причин валкости судна в этих условиях. Высказывается новое соображение о нормировании безопасности судна на попутном волнении посредством ограничения амплитуд качки судна в режиме параметрического резонанса.

2. Об учете эффекта попутных волн в нормах остойчивости

Расчетная ситуация, предполагающая движение судна на гребне попутной волны, длина которой приблизительно равна длине судна, прямое отражение в наши дни находит только в национальных нормах остойчивости для кораблей ВМФ Германии [18, 19].

В нормах Российского Регистра эта ситуация не сформулирована, но вытекает из приложения, поясняющего принципы построения этих норм [13]. В них требуется, чтобы максимальное плечо ДСО было не менее 0,2 м при длине судов более 100 м и не менее 0,25 м для судов меньшей длины. Дополнительно оговаривается для судов менее 20 м уже упоминавшееся ограничение скорости.

Аналогичные требования можно найти в нормах остойчивости Японии для пассажирских судов.

Критерии проверки остойчивости на волнении для кораблей Германии [18, 19] содержат:

во-первых, требования к диаграмме остойчивости на вершине или подошве волны: максимальное плечо ДСО при этом должно быть не менее 0,05 м, протяженность ее положительной части — не менее 10° в диапазоне углов от нуля до 45° . Расчетная волна принимается в форме трохойды с длиной, равной длине корабля, и высотой

$$2r_0 = 0,328\lambda^{0,63}; \quad (1)$$

во-вторых, восстанавливающий момент на волнении, определяется как средний арифметический момент на вершине и подошве. Его плечи l_{cp} при нормативном угле крена θ_N регламентируются в зависимости от угла крена θ_S , вызванного статическим приложением кренящего момента от жидких грузов и ветра

$$l_{cp} \geq 0,10 \text{ м для } \theta_S = 15^\circ \text{ при } \theta_N = 37,5^\circ,$$

$$l_{cp} \geq 0,14 \text{ м для } \theta_S = 20^\circ \text{ при } \theta_N = 45^\circ,$$

$$l_{cp} \geq 0,20 \text{ м для } \theta_S = 25^\circ \text{ при } \theta_N = 55^\circ.$$

Кренящий момент от ветра принимается по формуле

$$M_w = pA_1 Z_A (0,25 + 0,75 \cos^3 \theta), \quad (2)$$

где p — давление ветра, принимаемое в зависимости от группы судов (А, В и т. д.);
 A_1 — площадь парусности;
 Z_A — расстояние от центра площади A_1 до половины осадки.

К группе А отнесены суда неограниченного плавания (скорость ветра соответствует 90 уз), к группе В — суда, плавающие в Северной Атлантике, Северном и Балтийском морях (скорость ветра — 70 уз).

Согласно [19] принятый в этих нормах подход явился обобщением результатов серии экспериментов. Первый критерий гарантирует определенный запас остойчивости против опрокидывания при ходе попутными к волне курсами и низких частотах встречи с ней. Понятие средней ДСО, по мнению авторов, полезно при анализе возможности опрокидывания при высоких кажущихся частотах.

Помимо сказанного, отметим ряд предложений, не нашедших отражения в нормах, но поучительных в методическом плане [15, 16, 21, 22, 24].

К первой группе отнесем предложения КГТУ (КТИРПХ) [15], ГДР [23], Стратклайдского университета [24] и Польского Регистра [16], авторы которых в качестве расчетной ситуации принимают прежде всего воздействие шквала на судно, испытывающее качку при ходе попутным с волнами курсом. По-видимому, такой подход обусловлен, с одной стороны, традицией отечественных норм и влиянием основного критерия ИМО, а с другой стороны — распространенным, но ошибочным мнением, что качка сама по себе, тем более в условиях попутного волнения, опрокидывания вызвать не может. В некоторых предложениях [23] качка не учитывалась вовсе, в других [15] — условно или на основе рекомендаций критерия погоды ИМО [24].

Наиболее последовательный, на наш взгляд, подход, учитывающий нерегулярный характер волн и весьма высокую вероятность реализации резонансных бортовых колебаний, в том числе и параметрических, характерных для условий плавания на попутных волнах, принят в польских предложениях [16]. Их рассмотрим подробнее.

Способность судна противостоять динамически приложенному кренящему моменту, равному 0,7 ветрового момента, установленного по нормам Российского Регистра [14], предлагалось проверять для положения на гребне расчетной волны при отсутствии качки, а также при качке в режиме основного и параметрического резонанса. Реальное морское волнение аппроксимировалось эффективной волной по Гриму [22], высота которой имела обеспеченность 3 %. Влияние времени опрокидывания и измене-

ния диаграммы остойчивости за этот интервал условно учитывалось с помощью редукционного коэффициента, зависящего от числа Фруда и уменьшающего высоту расчетной волны. Критерий весьма жесткий даже в той части, где качку предлагается не учитывать.

Амплитуды бортовой качки определялись на основании изолированного дифференциального уравнения, отвечающего условиям движения судна на попутном волнении и имеющего следующий общий вид:

$$A_{44}\ddot{\theta} + M(\dot{\theta}) + M_B(\theta, t) = 0, \quad (3)$$

где $M(\dot{\theta})$ — демпфирующий момент,
 $M_B(\theta, t)$ — восстанавливающий момент.

Уравнение допускает учет влияния вертикальной и килевой качки на восстанавливающий момент в рамках физически обоснованного допущения о том, что обратным влиянием бортовой качки на указанные виды колебаний судна можно пренебречь. Следуя общей теории [4], восстанавливающий момент можно представить в форме

$$M_B(\theta, t) = D[l_{cp}(\theta) + \Delta l(\theta)\cos(\omega_K t + \varepsilon_l)], \quad (4)$$

где D — водоизмещение;
 ω_K и ε_l — частота и фаза изменения восстанавливающего момента;
 $l_{cp}(\theta)$ и $\Delta l(\theta)$ — среднее плечо этого момента и амплитуда его изменения, определяемые соотношениями

$$\begin{aligned} l_{cp}(\theta) &= F(\theta) + \overline{\Delta l(\theta)}, \\ \overline{\Delta l(\theta)} &= \frac{1}{2} [\Delta l_{max}(\theta) + \Delta l_{min}(\theta)], \\ \Delta l(\theta) &= \frac{1}{2} [\Delta l_{max}(\theta) - \Delta l_{min}(\theta)], \end{aligned} \quad (5)$$

где $F(\theta)$ — плечо ДСО на тихой воде;
 $\Delta l_{max}(\theta)$ и $\Delta l_{min}(\theta)$ — максимальное и минимальное приращение восстанавливающего плеча на попутном волнении при произвольном угле крена θ .

Использование уравнения (3) для определения характеристик качки составляет главное достоинство предложений Польского Регистра, так как оно отражает все наиболее существенные особенности динамики судна на попутном волнении и позволяет отразить в нормах те характеристики судна (относительную глубину модуляции остойчивости, демпфирование и т. д.), которые оказывают наиболее сильное влияние на кинематические параметры качки в рассматриваемых режимах.

Для расчета амплитуд качки в параметрическом резонансе ($\omega_K = 2n_\theta$) в польском предложении ДСО заменялась параболой 3-й степени, обеспечивающей одинаковые с реальной метacentрическую высоту и плечо $P(\theta)$ при крене 40° , демпфирование принималось линейным, и уравнение (3) преобразовывалось к виду

$$\ddot{\theta} + 2\nu_{\theta 0} n_\theta \dot{\theta} + n_\theta^2 (1 + \beta \theta^2 + \frac{\Delta h}{h_{cp}} \cos \omega_K t) = 0. \quad (6)$$

Для отыскания кинематических характеристик качки в режиме основного резонанса ($\omega_K = n_\theta$) это уравнение линеаризировалось следующим образом:

$$\ddot{\theta} + 2\nu_{\theta 0} n_\theta \dot{\theta} + n_\theta^2 \theta = -n_\theta^2 \theta_{ст} \frac{\Delta h}{h_{cp}} \cos \omega_K t, \quad (7)$$

где $\theta_{ст}$ — статический угол крена от ветровой нагрузки.

В уравнениях (6) и (7) использованы также обозначения: $2\nu_{\theta 0}$ — линейный безразмерный коэффициент сопротивления и n_θ — частота собственных бортовых колебаний; h_{cp} — начальная метacentрическая высота и Δh — амплитуда ее модуляции на попутном волнении, определяемая соотношением

$$\Delta h = \frac{|h_{max} - h_{min}|}{2}. \quad (8)$$

Как видно из уравнения (7), в режиме основного резонанса качка могла возникнуть только из-за наличия начального крена. При этом нелинейностью по углу крена в волновом возмущении авторы пренебрегают, что приводило к погрешностям при определении амплитуд качки как в основном, так и в параметрическом резонансах. В последнем случае полученные теоретически формулы

$$\theta_0^{пар} = 4 \sqrt{\frac{16}{\beta^2} \left[\left(\frac{\Delta h}{h_{cp}} \right)^2 - (2\nu_{\theta 0})^2 \right]}, \quad (9)$$

$$\beta = \frac{162}{4\pi^2} \left(1 - \frac{162}{4\pi^2} \frac{P(40^\circ)}{h_{cp}} \right) \quad (10)$$

могли приводить при определенных значениях h_{cp} и $P(40^\circ)$ к бесконечно большим амплитудам качки.

Однако вместо того, чтобы обратить внимание проектанта на высокую опасность параметрического резонанса, авторы пошли на искусственное изменение формул в сторону снижения амплитуд, видимо считая, что опрокидывание в результате развивающейся

качки невозможно. Вопрос о снижении величины ветрового момента при этом не обсуждался. В тексте предлагаемых Правил [16] рекомендовалось даже больше, а именно: принимать амплитуду равной 30° , если ее расчетные значения превышали эту величину. Тем самым влияние качки на оценку остойчивости заметно снижалось, а роль ветрового момента в условиях попутного волнения неоправданно завышалась. В результате критерий получился чрезвычайно жестким.

В заключение анализа предложений первой группы отметим, что все попытки создания критериев безопасности плавания на попутном волнении на основе использования идеи основного критерия погоды следует признать неудачным.

Ко второй группе отнесены предложения [3, 21], авторы которых сосредотачивают внимание на обстоятельствах, связанных прежде всего с изменением гидростатических характеристик судна в условиях плавания на попутном волнении без дополнительных внешних воздействий.

В немецких предложениях [21] была предпринята попытка найти условия безопасности судна на основе анализа материалов систематических модельных испытаний контейнеровозов различной формы на попутном двухмерном нерегулярном волнении. Исследовались четыре модели при различных осадках и положениях центра тяжести по высоте на курсовых углах от нуля до 30° относительно направления бега волн. Наблюдались все виды опасных наклонений, присущие попутному волнению, включая бродинг с разворотом и последующим опрокидыванием модели. Авторы, по их словам, «не смогли найти соотношение между ДСО на гребне» и безопасностью против опрокидывания. Свое внимание они сосредоточили на определении минимально допустимой диаграммы статической остойчивости для тихой воды. Для этого на диаграмме остойчивости фиксировался максимальный за каждый пробег модели угол крена и определялся сохранившийся запас остойчивости как ее площадь E_R между указанным углом и углом заката. Одновременно определялась величина среднеквадратичного отклонения S для этой площади по результатам повторных пробегов при заданной загрузке модели. Минимальная (в смысле опрокидывания) диаграмма определялась из условия

$$\bar{E}_R - 3S = 0, \quad (11)$$

которое проверялось при различных метacentрических высотах и неизменных других характеристиках каждой модели. Здесь $\bar{E}_R$ — среднее значение величины E_R .

Оказалось, что разные модели имеют различные минимальные ДСО. Установленное влияние формы корпуса и положения центра тяжести по высоте авторы предложили учитывать с помощью так называемого форм-параметра — безразмерной функции от характеристик судна. Умножение его величины на нормируемые характеристики минимальных ДСО позволило в полученных произведениях свести к минимуму разброс между моделями различных форм. Это дало возможность авторам предложить для нормирования не характеристики ДСО непосредственно, а величины указанных произведений.

Найденная структура форм-параметра качественно хорошо согласуется с функцией, определяющей зависимость амплитуды бортовой качки от характеристик судна и приведенной в отечественных нормах остойчивости [2]. В то же время сопоставление предлагаемых критериев, взятых непосредственно по эксперименту, с данными по судам, находящимся в эксплуатации, показали, что у последних все нормируемые величины примерно в два раза ниже, т. е. предложенная структура форм-параметра нуждалась в уточнении. Это было сделано позднее и нашло отражение в Кодексе ИМО по остойчивости неповрежденных судов [17]. Тем не менее остается сомнение в общности и наглядности критериев, что немаловажно.

Не исключено, что в опытах реальная опасность плавания на попутных курсах была завышена за счет выбора в качестве основных волновых условий длинногребневого нерегулярного волнения и за счет весьма высокой вероятности опасных наклонений, связанных с брочингом.

В предложениях ЦНИИМФ содержится эмпирический критерий проверки остойчивости в условиях попутного волнения [3] с целью включения в Информацию об остойчивости для капитана соответствующих ограничений по скорости и курсовым углам судна. Недопустимым авторы считают сочетание скоростей и курсовых углов, при которых время пребывания судна в состоянии пониженной остойчивости ($k(\theta) < 0,1$ м) становится больше времени наклонения судна из прямого положения на опасный угол. В качестве длительности такого наклонения принимается $1/4$ периода соответственных бортовых колебаний на тихой воде. Этот

подход близок к описанному Л.М. Ногидом [11]. Он основан на стремлении обеспечить такие условия плавания, при которых судно не успевало бы опрокинуться.

В целом критерии 2-й группы, будучи полезными, как обобщение известного опыта, носят весьма условный характер и не всегда правильно помогают предвидеть опасность, связанную с попутным волнением. Стремление оценить угрозу последнего по совокупности опасных явлений, присущих плаванию в этих условиях, приводит либо к неоправданному ужесточению требований к остойчивости [21], либо, напротив, допускает снижение остойчивости до весьма низких пределов, оправдывая их допустимость малой продолжительностью существования при плавании надлежаще выбранным курсом и скоростью хода [3].

Для валкого судна такой подход может оказаться недопустимым. Резонансная бортовая качка, возбуждаемая посредством кратковременных, но глубоких изменений восстанавливающего момента в условиях попутного волнения, при недостаточном уровне остойчивости на тихой воде может, как уже говорилось, сама по себе привести судно к опрокидыванию в течение нескольких периодов колебаний. При этом у команды не будет времени изменить курс или скорость на безопасные.

3. Валкость судна

Валкость, как свойство судна проявлять склонность к большим наклонениям на борт без видимых внешних причин, с позиций современной теории качки достаточно полно можно объяснить динамической неустойчивостью судна по крену, возникающей вследствие периодических изменений его остойчивости при плавании на волнении. Особенно ярко она проявляется при ходе судна попутным с волнами курсом.

Задача о бортовой качке, вызванной переменностью восстанавливающего момента во времени, сводится к хорошо изученному уравнению Матье [1], представление о котором дает уравнение (6), если в нем коэффициент β принять равным нулю. Из теории этих уравнений известно, что при определенном сочетании его параметров, характеризующих демпфирование $\nu_{\theta 0}$, собственную частоту n_{θ}^2 бортовых колебаний и глубину модуляции остойчивости $\Delta h/h_{cp}$, могут возникнуть неустойчивые, склонные к

возрастанию колебания. Области неустойчивых решений уравнения, указывающих на валкость судна, расположены около следующих относительных частот.

$$\frac{\omega_K}{n\theta} = \frac{n}{2}, \quad (12)$$

где $n = 0, 1, 2 \dots$

Случай, когда $n=0$, т. е. кажущаяся частота встречи с волной $\omega_K \rightarrow 0$, соответствует условию полной потери остойчивости, которое согласно уравнению (6) записывается в виде очевидного соотношения для статической неустойчивости

$$\Delta h/h_{cp} \geq 1. \quad (13)$$

При низких значениях начальной остойчивости $h/B < 0,02 - 0,03$, характерных для валких судов, оно реализуется с большой степенью вероятности.

Для ненулевых значений кажущейся частоты ω_K возможность реализации различных неустойчивых решений неодинакова. При малых значениях демпфирования $\nu_{\theta 0}$ и уровнях возмущений $\Delta h/h_{cp}$ ширина областей неустойчивости соответственно пропорциональна $(\Delta h/h_{cp})^n$, а необходимая для развития неустойчивых колебаний глубина модуляции остойчивости (порог возбуждения параметрических колебаний) оказывается пропорциональной 1-й или 1/2-й степени коэффициента демпфирования. В частности, для главного параметрического резонанса ($n=1$) порог возбуждения определяется условием [1]

$$\Delta h/h_{cp} \geq 4\nu_{\theta 0}. \quad (14)$$

Для однокорпусных судов без скуловых килей безразмерный линейный коэффициент погашения качки $2\nu_{\theta 0}$ находится в пределах 0,05 — 0,10, поэтому условие (14) представляется более мягким, чем условие статической неустойчивости (13), и реализуется в весьма широком диапазоне значений параметра $\Delta h/h_{cp}$.

В настоящее время известны не только приведенные выше результаты, устанавливающие наличие или отсутствие валкости и области проявления параметрических колебаний, но и разработаны расчетные методы определения амплитуд этих колебаний, дающие представление о степени валкости и ее опасности [5, 16, 25, 26].

Кервин [25] рассчитал амплитуды качки в режиме главного параметрического резонанса на основе уравнения Матье, учтя при этом нелинейный характер демпфирования путем использования двухчленной формулы с линейным и квадратичным членами для закона сопротивления. Польские специалисты [16] при линейном законе демпфирования учли нелинейный характер восстанавливающего момента (6). Поллинг [26] исследовал нелинейное по демпфированию и восстанавливающему моменту уравнение качки судна численным методом с учетом изменения остойчивости на волнении и получил хорошее согласование с опытом (см. рис. 1). Г.В. Виленский [5] установил общее аналитическое решение нелинейного уравнения бортовой качки (3) для случая движения судна на регулярном волнении попутными курсами. Им учтены форма ДСО и ее модуляции путем удачного использования тригонометрических рядов, возмущающий волновой момент и статическая ветровая нагрузка.

Расчетные исследования [5] и модельные испытания в мореходном бассейне показали, что в условиях чисто попутного волнения параметрические колебания с частотой ω_K значительно слабее колебаний, происходящих с частотой $\omega_K/2$. Однако на волнах кормовой четверти параметрическое возбуждение с частотой ω_K может суммироваться с резонансным действием возмущающего момента. Этот случай комбинационного резонанса (см. рис. 2) не совпадает с известными решениями уравнения Матье и может

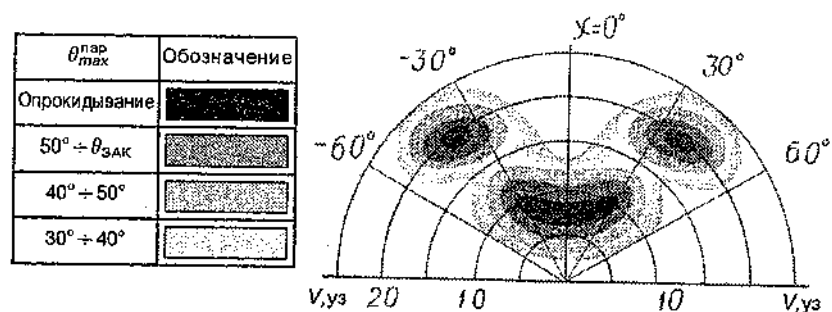


Рис. 2
Зависимость максимальных углов крена при параметрической качке $\theta_{max}^{пар}$ от скорости судна и угла курса χ к волне:
 $\theta_{зак}$ — угол заката ДСО;
 $h = 0,3$ м — метacentрическая высота;
 $H_{1/3} = 6,5$ — значительная высота волн

приводить к опасным углам крена ($\sim 60^\circ$). Характерным для этого режима является существенная доля нулевой гармоники (постоянной составляющей). Значительная постоянная составляющая, усугубляющая валкость судна, возникает даже при отсутствии ветра [5].

Выполненные в последнее время в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова экспериментальные и расчетные исследования с использованием аналитического метода [5] подтвердили известные факты, что при параметрическом возбуждении на попутном волнении бортовые колебания могут развиваться вплоть до опрокидывания. Было установлено, что с ростом отношения $\Delta h/h_{\text{ср}}$ и с уменьшением коэффициента $\gamma_{\theta 0}$ максимальные наклонения или валкость судна возрастают, расширяется диапазон кажущихся частот встречи с волной, при которых существуют указанные колебательные режимы и увеличивается быстрота нарастания их амплитуд. При этом на кинематику качки и опрокидывания оказывают влияние также и другие (уточняющие) параметры, характеризующие форму средней ДСО и ее модуляции на волнении, а также зависимость безразмерного коэффициента сопротивления от амплитуды качки.

Получило подтверждение известное мнение, что на встречном волнении параметрический резонанс в режиме $\omega_k/2$ не опасен. В этом случае он возникает при достаточно высокой остойчивости, следовательно, относительно малых $\Delta h/h_{\text{ср}}$ и больших собственных частотах Ω_{θ} и протекает с малыми амплитудами или не возникает вовсе. Напротив, бортовая качка, возникающая в режиме главного параметрического резонанса на попутном волнении, как правило, в несколько раз превышает по амплитудам обычную, вызванную возмущающим моментом, и служит признаком опасной валкости судна.

В качестве иллюстрации сказанному на рис. 3 показаны результаты испытаний почти трехметровой модели многоцелевого балкера проекта 15760 при неблагоприятных условиях нагрузки, связанных с перевозкой контейнеров на верхней палубе ($l_{\text{max}}=0,35$ м, угол заката ДСО 65° и $h=0,67$ м). Испытания проводились с целью проверки валкости судна при различных модификациях конструктивных элементов и нагрузки модели, а также для разработки рекомендаций по ограничению валкости в условиях плавания на чисто попутном волнении силой 7 баллов (значительная высота $H_{1/3}=6,5$ м). Данные опытов неплохо согласуются с результатами расчета максимальных амплитуд качки в режиме главного параметрического резонанса, выполненного с учетом рекомендаций Кервина [25]. На рис. 4 показана зависимость амплитуд параметрической бортовой качки от скорости

хода судна, а также приведены результаты расчета амплитуд 3%-ной обеспеченности обычной вынужденной качки судна на попутном нерегулярном волнении при ходе резонансными курсовыми углами.

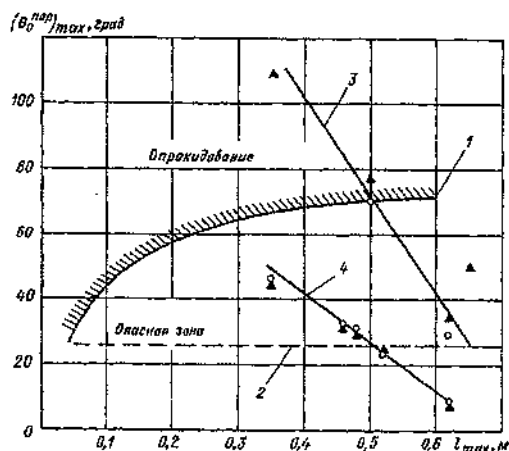


Рис. 3

Зависимость максимальных амплитуд параметрической бортовой качки на попутном волнении ($\omega_K = 2p_0$) от величины максимального плеча ДСО на тихой воде по данным эксперимента — (○) и расчета [25] — (▲):

- 1 — линия углов заката; 2 — линия условного ограничения углов крена;
3 — данные для модели без скуповых килей; 4 — данные для модели с киллями

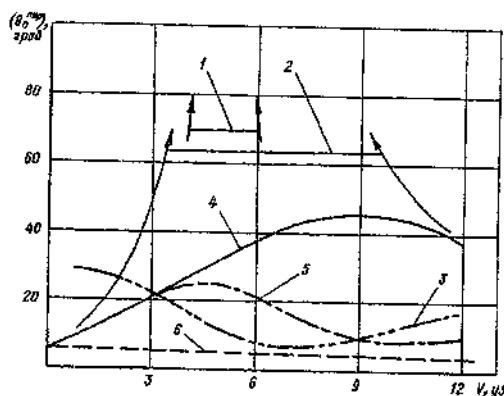


Рис. 4 Зависимость амплитуд параметрической бортовой качки на попутном волнении от скорости хода судна по данным модельных испытаний:

- 1 — область опрокидывания при $l_{max} = 0,5$ м и при отсутствии килей; 2 — то же, при $l_{max} = 0,35$ м; 3 — кривая для случая судна без килей при $l_{max} = 0,62$ м; 4 — судно с киллями при $l_{max} = 0,35$ м; 5 — судно с киллями при $l_{max} = 0,52$ м; 6 — наибольшие амплитуды вынужденной бортовой качки при резонансном угле курса

Анализ приведенных на рис. 3 и 4 данных показывает.

во-первых, амплитуды параметрической качки заметно выше амплитуд вынужденной бортовой качки. В резонансных условиях эта разница может достигать 10-кратных размеров, если качка не завершается опрокидыванием;

во-вторых, видно, что амплитуды параметрической качки весьма чувствительны к изменению параметров, характеризующих порог возбуждения колебаний (14), и потому очень удобны для использования в качестве меры валкости судна. Последней можно управлять на стадии проектирования — рациональным выбором формы корпуса (с целью уменьшения относительной глубины модуляции ДСО), путем увеличения площади скуловых килей, а в условиях эксплуатации — повышением остойчивости, а так же путем рационального изменения скорости хода и курсового угла;

в-третьих, становится ясной возможность и целесообразность ограничения максимальных значений амплитуд параметрической качки.

Очевидно, что валкость судна можно считать безопасной, если ее мера $(\theta_0^{\text{пар}})_{\text{max}}$ не будет превышать разумных пределов (рис. 3). Таким образом, по мнению авторов, можно подойти к вполне реальному и физически обоснованному критерию для попутного волнения

$$(\theta_0^{\text{пар}})_{\text{max}} \leq \theta_0^{\text{норма}}. \quad (15)$$

При этом в качестве нормы валкости можно принять величину

$$\theta_0^{\text{норма}} = K\theta_{\text{лт}},$$

где $\theta_{\text{лт}}$ — предельно допускаемый угол крена, равный, например, углу заката ДСО, углу смещения груза, углу заливания и т. д., смотря по тому, что меньше;

K — коэффициент запаса, учитывающий неточности расчетной схемы вычисления амплитуд качки, в частности, погрешность определения коэффициента демпфирования, изменения остойчивости на волнении или погрешность опытов в случае экспериментального определения амплитуды $(\theta_0^{\text{пар}})_{\text{max}}$.

Предложенный критерий учитывает весьма важную специфику бортовой качки на попутных и встречных к волне курсовых углах. Его выполнение не исключает возможности дополнительной проверки остойчивости судна в условиях продолжительного снижения восстанавливающего момента при ходе на попутном волнении по другим рациональным критериям или требованиям

официальных Норм остойчивости. Вместе с тем можно ожидать, что при разумно выбранной норме валкости безопасность судна в какой-то степени повысится и в других тяжелых ситуациях попутного волнения, связанных, например, с захватом или бросингом.

Список литературы

1. Басин А.М. Качка судов. М.: Транспорт, 1969. 272 с.
2. Благовещенский С.Н. Национальные требования к остойчивости неповрежденных судов. В сб.: Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости морских судов. Регистр СССР, М.-Л.: Транспорт, 1965. С. 3-52.
3. Богданов А.И. Регрессионная формула для расчета коэффициента изменения остойчивости судов на попутном волнении. Тезисы докладов. Науч.-техн. конф. «Крыловские чтения-93», СПб.: 1993. С. 71-74.
4. Бородай И.К., Нацветаев Ю.А. Мореходность судов. Л.: Судостроение, 1982. 288 с.
5. Виленский Г.В. Причины опасной бортовой качки на попутном волнении. Тр. межд. конф. по судостроению, посвященной 100-му юбилею ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Секция В-Гидродинамика судов. СПб.: 1994. С. 265-271.
6. Кубланов Я.М., Рахманин Н.Н. К вопросу об угловом энергетическом спектре поверхностных волн и его использовании в судостроительных расчетах. В науч.-техн. сб.: Вопросы судостроения, серия: «Проектирование судов». Вып. 10. Л.: ЦНИИ «Румб», 1976. С. 3-12.
7. Луговский В.В. Нелинейные задачи мореходности корабля. Л.: Судостроение, 1966. 235 с.
8. Липис В.Б., Ремез Ю.Ф. Безопасные режимы штормового плавания судов. М.: Транспорт, 1982. 117 с.
9. Медведь А.Ф. Исследование общего поведения и опрокидывания радиоуправляемых моделей на естественном волнении. Кибернетика на морском транспорте. Вып. 9. 1980. С. 55-60.
10. Нечаев Ю.И. Остойчивость судов на попутном волнении. Л.: Судостроение, 1976. 272 с.
11. Ногид Л.М. Остойчивость судна и его поведение на взволнованном море. Л.: Судостроение, 1967. 241 с.
12. Севастьянов Н.В. Остойчивость промысловых судов. Л.: Судостроение, 1970. 255 с.
13. Регистр Союза ССР. Правила классификации и постройки морских судов, часть IV-1 «Нормы остойчивости». Л.: Транспорт, 1967. 311 с.
14. Регистр СССР. Правила классификации и постройки морских судов, часть IV «Остойчивость». Л.: Транспорт, 1990. С. 406-496.
15. Регистр СССР. Методика оценки остойчивости судов на попутном волнении. Л.: Транспорт, 1977.
16. Польский Регистр Судов. Разработка методов расчета и оценки остойчивости неповрежденного судна на попутном волнении. Тема 5.4м-1, план №5. Гданьск, 1984.
17. Code of Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments. Annex to Report of Ad hoc Intact Stability working Group, SLF-36/3, July 1991.
18. Arndt B. Ausarbeitung einer Stabilitätsvorschrift für die Handelsmarine. Jahrbuch der STG, 59 Band, 1965.
19. Arndt B., Brandt H., Vogt K. 20 Years of Experience Stability Regulations of the West-German Navy. 2nd International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, proceedings. Tokyo: 1982, pp. 765-775.

20. Allievi A.G., Calisal S.M., Rohling G.F. Motions and Stability of a Fishing Vessel in Transverse and Longitudinal Seaways, proceedings. 11th Ship Technology and Research (STAR) Symp., 1986.

21. Blume H., Hattendorf H. An Investigation on Intact Stability of Fast Cargo Liners, proceedings. 2nd International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles. Tokyo: 1982, pp. 171-183.

22. Grim O. Rollschwingungen, Stabilität und Sicherheit im Seegang, Schiffstechnik. V. 1, 1952; S. 10-15.

23. Helas G. Intact Stability of Ships in Following Waves, proceedings. 2nd International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles. Tokyo: 1982, pp. 669-700.

24. Martin J., Kuo Ch., Welaya Y. Ship Stability Criteria Based on Time-Varying Roll Restoring Moments, proceedings. 2nd International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles. Tokyo: 1982, pp. 227-242.

25. Kerwin J.E. Notes on Rolling in Longitudinal Waves. International Shipbuilding Progress. V. 2, №16, 1955, pp. 3-27.

26. Paulling J.R. A Comparison of Stability Characteristics of Ships and Offshore Structures, proceedings. 2nd International Conference on Stability of Ship and Ocean Vehicles. Tokyo: 1982, pp. 581-588.

27. Umeda N. Operational Stability in Following and Quatering Seas: A Proposed Guidance and Its Validation, proceedings. 5th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles. V. 2. Florida: 1994, pp. 71-85.

УДК 629.125.63:658.516.2

Л.П. Ковчegov

СЕРТИФИКАЦИЯ СПАСАТЕЛЬНЫХ ШЛЮПОК СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

С момента принятия в 1983 г. Поправок к главе III Конвенции СОЛАС-74 [1], допускавших использование спасательных шлюпок, спускаемых методом свободного падения, последние получили широкое распространение и завоевали признание моряков мира. Прежде всего, это объяснялось тем, что эффективность шлюпок тросового спуска всегда вызывала тревогу из-за сложности их спуска во время аварии в штормовую погоду. По оценках разных иностранных источников эффективность спасательных шлюпок тросового спуска едва превышает 50 %. При спуске шлюпки свободным падением исключается главный отрицательный фактор, понижающий эффективность спасательных шлюпок, — удар о корпус судна и возможность разрушения шлюпки, что сразу же повышает эффективность таких шлюпок почти в два раза. Кроме того, использование спасательных шлюпок свободного падения давало возможность ограничиваться одной шлюпкой вместо двух бортовых, размещая ее в корме судна, где она более защищена от разрушающего воздействия волн и, будучи установленной в диаметральной плоскости судна, имеет более благоприятные возможности для спуска даже при значительном крене судна.

Известно, что первая система спуска спасательной шлюпки свободным падением была запатентована около ста лет тому назад шведом А. Фальком (1897 г.), но первая реальная сбрасываемая шлюпка была построена в 1962 г. в Голландии. При проектировании первой шлюпки решались только вопросы гидродинамики, поскольку высота сброса была мала (шлюпки предназ-

начались для низкосидящих каботажных судов) и медико-биологических проблем не возникало.

В конце 70-х годов в Норвегии была создана, испытана и установлена штатно на судно по решению Норвежского Морского Директората первая спасательная шлюпка свободного падения, рассчитанная для сброса с высоты 20 м. При разработке этой шлюпки норвежские ученые и специалисты-кораблестроители в содружестве со специалистами других скандинавских стран не только отработали вопросы баллистики и гидродинамики, но также решили и медико-биологические проблемы, касающиеся переносимости перегрузок людьми в шлюпке, возникающих при приводнении шлюпки. Значения безопасных перегрузок, полученные в результате этой работы, впоследствии были приняты ИМО.

Обычно все нововведения принимаются весьма осторожно, тем более, что они, как это имело место в данном случае, вводились как альтернатива традиции. Однако, как только было принято дополнение 1.2 к правилу 26 главы III Конвенции СОЛАС, ряд стран приняли правительственные решения о применении на строящихся судах только шлюпок свободного падения (Федеральный закон Германии VGBLIS2361 [2], решение Норвежского Морского Директората и др.). В настоящее время более 2000 судов в мире оснащены такими шлюпками и более 150000 моряков прошли обучение по сбросу на шлюпке в различных учебных центрах мира.

Согласно регламенту ИМО [3] каждая вновь создаваемая спасательная шлюпка свободного падения должна пройти комплекс испытаний на спуски с сертификационной высоты при различных нагрузках, в том числе с креном 20° и стартовым дифферентом, уменьшенным на 10°. Кроме того, должны быть проведены испытания на прочность при сбросе с высоты, превосходящей сертификационную на 30%. Учитывая, что сертификационная высота проектантами шлюпки выбирается из расчета наивысшего расположения ее на судне, она, в большинстве случаев, равна 20 м. Для выполнения указанного комплекса испытаний с натурной шлюпкой требуется сооружение весьма дорогостоящей испытательной вышки и подбора водной акватории с определенными глубинами, закрытой от движения судов. Таким образом, оборудование испытательного полигона по стоимости может в несколько раз превосходить стоимость разработки и постройки самой шлюпки. Учитывая это обстоятельство, в регла-

менте ИМО предусмотрена возможность замены некоторых видов испытаний на модельные, причем длина модели шлюпки должна быть не менее 1 м. Полный комплекс испытаний на сброс спасательной шлюпки свободного падения, согласно циркуляру 616 Комитета по безопасности на море [3] ИМО должен включать:

- сброс при полной нагрузке с сертификационной высоты;
- сброс шлюпки с полным снабжением и только со спусковой командой, с той же высоты;

- сброс шлюпки с полным снабжением и половиной всего числа людей, размещенных на сидениях в нос от центра тяжести шлюпки;

- сброс шлюпки с полным снабжением и половиной всего числа людей, размещенных на сидениях в корму от центра тяжести шлюпки.

Кроме того, должны быть проведены сбросы с креном 20° и дифферентом 10° при указанных выше нагрузках шлюпки.

При проведении этих испытаний должно быть доказано, что возникающие ускорения соответствуют условиям «Тренировки», указанным в табл. 3 разд. 6.18 Рекомендаций по испытаниям ИМО [4], а при испытаниях в условиях неблагоприятного крена и дифферента судна — условию «Аварийная ситуация» (см. там же).

Для того, чтобы удостовериться в прочности конструкции шлюпки, последняя должна быть сброшена с высоты, превышающей в 1,3 раза спецификационную.

Таким образом, полный комплекс испытаний должен включать 8 сбросов с сертификационной высоты и один сброс с высоты, превышающей сертификационную на 30%.

Так какая же роль модельных испытаний в этом перечне? И что можно достоверно принять за основу при испытании масштабных моделей, чтобы иметь уверенность, что это будет соответствовать натурным испытаниям?

Согласно теории подобию физических явлений при моделировании, кроме размерных соображений необходим и анализ условий однозначности.

Как правило, модель и натура должны соответствовать критерию гравитационного подобию

$$V_{\text{нат}}^2 / g l_{\text{нат}} = V_{\text{мод}}^2 / g l_{\text{мод}},$$

где V^2 — скорость приводнения;
 l — длина шлюпки;
 g — ускорение свободного падения.

Иначе говоря, квадраты числа Фруда природы и модели должны быть равны. Однако, учитывая, что движение шлюпки при сбросе не прямолинейно, указанное подобие не в полной мере раскрывает гравитационное. Возникающая в момент прохождения центра тяжести шлюпки среза слипловой дорожки угловая скорость вращения, которая зависит от положения центра тяжести по длине шлюпки, может существенно повлиять на результат.

Поэтому для установления гравитационного подобия следует сравнивать моменты инерции J модели и природы, между которыми по теории подобия масштабный фактор λ при принятии, например, масштаба 1:5, должен быть равен пяти

$$0,00032 J_{\text{нат}} = J_{\text{мод}}.$$

Таким образом, для принятия масштабной модели как объекта, заменяющего испытание природы, необходимо:

по теоретическому чертежу шлюпки с учетом принятого масштаба проверить геометрию обводов, что обеспечит равенство коэффициентов продольной остроты (призматических коэффициентов)

$$\delta_{\text{нат}}/\beta_{\text{нат}} = \delta_{\text{мод}}/\beta_{\text{мод}},$$

где δ — коэффициент полноты водоизмещения;
 β — коэффициент полноты α ;

сопоставить координаты положения центра массы природы (по расчету нагрузки) и модели (путем вывески), принимая линейный масштабный коэффициент. Например, при масштабе 1:5

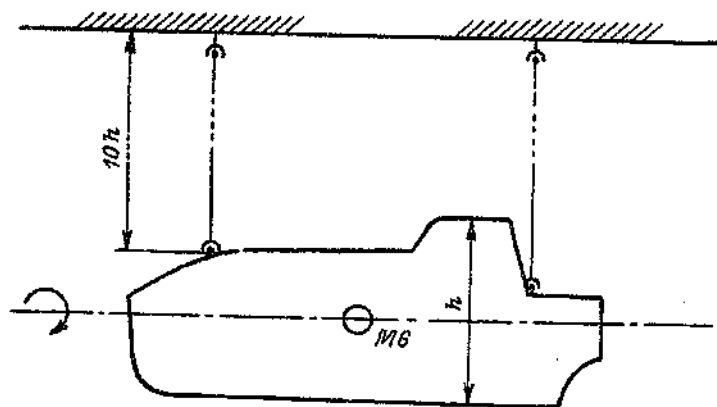
$$0,2(x, y, z)_{\text{нат}} = (x, y, z)_{\text{мод}};$$

сравнить продольный и поперечный моменты инерции природы и модели. Момент инерции, например, относительно продольной оси натурального образца может быть вычислен по формуле

$$J = \frac{M}{12g} (B_2 + 4Zg^2),$$

где M — общая масса шлюпки с людьми и снабжением;
 B — ширина шлюпки;
 Zg — ордината центра тяжести;
 g — ускорение свободного падения.

Продольный момент инерции модели определяется по периоду качки, для чего модель подвешивается на двух тросах, имеющих длину, равную не менее десяти полных высот модели, с шарнирами в точке подвески. Модель свободно раскачивается вокруг продольной оси на двух высотах, попеременно отстоящих друг от друга на две высоты модели (см. рис.). Среднее значение



периода качки τ_m определяется по формуле

$$\tau_m = \frac{2\tau_1\tau_2}{\tau_1 + \tau_2},$$

а момент инерции при этом будет равен

$$J = \frac{M\tau_m}{2\pi}.$$

Моменты инерции, приведенные с помощью масштабного коэффициента, как было указано ранее, не должны различаться более, чем на $\pm 2\%$.

Установив таким образом геометрическое и гравитационное подобие, масштабная модель может быть допущена для проведения испытаний.

Прежде всего, должны быть проведены сбросы с различных высот (в масштабе) модели, имитирующей полную нагрузку шлюпки, для построения кривой изменения перегрузок в зависимости от высоты установки. Измерение перегрузок должно быть выполнено в трех точках (в носу, корме и на миделе).

Затем следует провести сбросы с проектной высоты установки (в масштабе) с креном и дифферентом при различных вариантах нагрузки, что весьма затруднительно выполнить с натурной шлюпкой.

Завершить модельные испытания необходимо сбросами с проектной высоты установки (в масштабе) при четырех указанных ранее вариантах нагрузки.

Если результаты всех проведенных модельных испытаний удовлетворяют нормативам, указанным в резолюции ИМО А.689(17) и приведенным в главе 6.18 части II «Спасательные средства» Правил по оборудованию морских судов [6] Регистра, такие испытания вместе с проверкой прочности натурного образца при сбросе с высоты, превышающей на 30% проектную (по баллистической кривой или вертикально с дифферентом, соответствующим углу входа в воду), являются основанием для выдачи документа о типовом одобрении с указанием о контрольных испытаниях натуре при установке на судно.

Контрольные испытания шлюпок на судне со штатной высоты установки, используя штатное спусковое устройство, должны включать:

- сброс с полной нагрузкой;

- сброс с 50% людей, сидящих в корму от центра тяжести.

Замеренные при этих сбросах перегрузки проверяются по кривым, полученным при модельных испытаниях.

Кроме указанных выше натурных сбросов следует провести еще два сброса с 50% людей, сидящих в нос от центра тяжести, и со спусковой командой.

Эти два испытания, хотя и внесены в перечень испытаний ИМО, существенного значения не имеют, так как в первом случае перегрузки меньше, чем при полной нагрузке, более чем на 20% (из анализа технических отчетов Дет Норске Веритас и Германского Флойда). Изменяется только угол входа шлюпки в воду, что достаточно достоверно проверяется при испытаниях модели. Второй сброс, только со спусковой командой, является вообще не штатным. Очевидно, что введение этого испытания ИМО предполагает в дальнейшем отказ от дежурных шлюпок на судах, имеющих спасательные шлюпки свободного падения.

После проведения контрольных испытаний на шлюпку выдается сертификат с указанием штатной высоты сброса.

Введение модельных испытаний в процесс сертификации спасательных шлюпок свободного падения позволяет более

полно и с меньшими затратами выявить все моменты, влияющие на безопасность шлюпок свободного падения.

Список литературы

1. Международная Морская Организация: Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 г.
2. Федеральный закон ФРГ «Декрет о безопасности морских судов» от 08.12.1986 г. (BGBl.IS2361).
3. Международная Морская Организация: «Оценка исполнения спасательных шлюпок свободного падения», MSC/Circ.616 от 22.06.1993 г.
4. Международная Морская Организация: «Рекомендации по испытаниям спасательных средств», Резолюция A.689(17) от 06.11.1991 г.
5. Технические отчеты по НИР и ОКР АО «Редан» за 1990 — 1994 гг.
6. Морской Регистр Судоходства: Правила по оборудованию морских судов. Часть II «Спасательные средства». СПб.: 1995. С. 35-117.

УДК 662.7:621.181

*И. И. Костылев, А. Ю. Смольник***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
ОРГАНИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ НА СУДАХ**

В последние годы в парокходствах России начали эксплуатироваться суда зарубежной постройки, на которых в котельных установках, а также системах обогрева применяются ВОТ — высокотемпературные органические теплоносители (используются также термины «thermal oil» — термомасла и «thermal fluid» — термальные жидкости).

Несмотря на то, что по теплофизическим характеристикам ВОТ уступают такому распространенному теплоносителю как вода (см. таблицу), эксплуатационные характеристики ВОТ, как минераль-

Таблица

Основные теплофизические характеристики ВОТ и воды

Показатели	ВОТ	Вода
Плотность, кг/м ³ при 15°C при 250°C	861—1391 698—1110	999 794
Удельная теплоемкость, кДж/кг·°C при 15°C при 250°C	1,15—2,3 1,5—2,91	4,18 4,85
Кинематическая вязкость, сСт при 15°C при 250°C	8—800 0,4—1,2	1,137 0,14
Удельная теплопроводность, Вт/м·K при 200°C	0,66	0,12

ных (полученных на нефтяной основе), так и синтетических, являются основной причиной их применения в судовых энергетических установках. Среди этих причин в первую очередь необходимо отметить следующие:

возможность получения высокой температуры греющей среды (до 350°C) без повышения давления, т. е. в открытой циркуляционной системе. На рис. 1 показано изменение давления водяного пара и ВОТ при различных рабочих температурах, из которого следует, что для получения пара, имеющего температуру 300°C , требуется повышение давления до 8,6 МПа, в то время, как давление ВОТ практически не зависит от рабочей температуры и определяется главным образом сопротивлением системы;

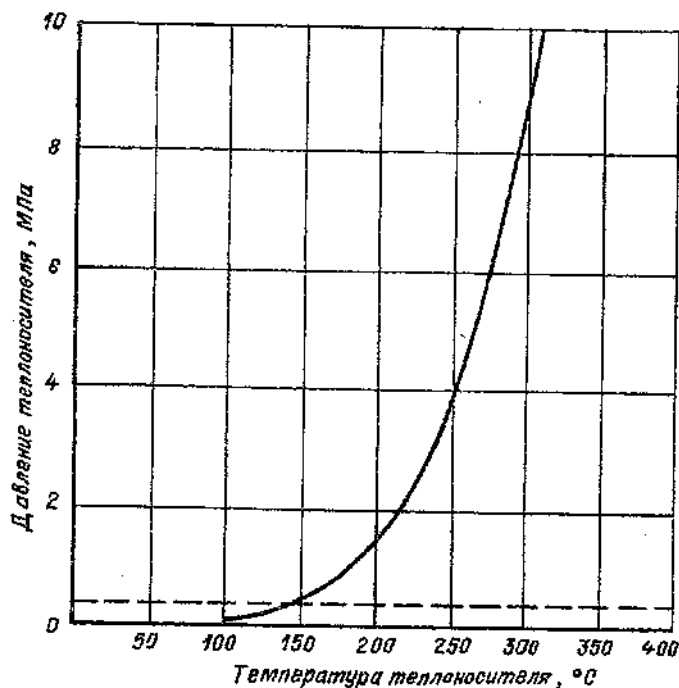


Рис. 1
Зависимость давления теплоносителя от температуры:
——— водяной пар; ---- ВОТ

низкую температуру застывания (до -55°C), что обеспечивает безопасную работу системы при низких температурах наружного воздуха;

сохранение агрегатного состояния среды при всех рабочих температурах, что упрощает управление и позволяет создавать котельные установки, способные суммировать теплоту разнопотенциальных источников, в том числе работающих при переменной нагрузке. Так, при необходимости, в единый контур циркуляции могут быть объединены вспомогательные котлы на жидком топливе, а также утилизационные котлы, установленные за главными и вспомогательными двигателями;

возможность, если этого требуют потребители, создания в одной системе нескольких контуров циркуляции с различными температурами ВОТ;

отсутствие коррозионной активности по отношению к стали.

Наряду с перечисленными характеристиками, являющимися основанием для применения систем с ВОТ и выбора конкретной марки теплоносителя, а также необходимых конструктивных и схемных решений, необходимо учитывать следующие данные:

объемное расширение ВОТ составляет 7,5 — 10 % при нагреве на 100°C. Поэтому в системах предусматривают расширительные цистерны необходимого объема. Так, в соответствии с Правилами Регистра [1] вместимость расширительной цистерны должна не менее, чем в 1,5 раза превышать увеличение объема теплоносителя при нагреве его до рабочей температуры;

способность ВОТ интенсивно окисляться при контакте с воздухом при температуре, превышающей 60°C. Поэтому в системах с ВОТ обычно предусматривается использование одного или нескольких деаэраторов, в которых происходит выделение воздуха и водяного пара из теплоносителя. В соответствии с Правилами классификационных обществ, в частности Дет Норске Веритас [4], для предотвращения интенсивного окисления ВОТ температура теплоносителя, находящегося в непосредственном контакте с воздухом, не должна превышать 50°C. По этой же причине расширительная цистерна, а также трубопровод подвода теплоносителя к ней обычно выполняются неизолированными. Применяются также расширительные цистерны, работающие под давлением инертного газа;

в технических характеристиках ВОТ часто приводится температура, при которой его вязкость составляет 300 сСт. Это минимальное значение температуры, при котором возможен пуск холодной системы, так как при этой вязкости еще возможно перекачивание теплоносителя центробежными насосами. Часто

приводится также температура, при которой вязкость теплоносителя составляет 5 сСт. Это — нижний предел рабочей температуры, при которой нет опасности его крекинга из-за перегрева, возможного при малой скорости движения теплоносителя в трубах;

в зависимости от типа и состава ВОТ может подвергаться крекингу при температуре 360—400° С. Поэтому в соответствии с Правилами Регистра максимальная рабочая температура теплоносителя должна быть ниже его термостойкости не менее, чем на 50° С. Кроме того, конструкция топок и топочных устройств котлов должна обеспечивать равномерное распределение тепловых потоков. Допускается только такая неравномерность, при которой в любой точке обогреваемых поверхностей температура пограничного слоя жидкости не будет превышать установленное для применяемого теплоносителя значение. По этой же причине пуск циркуляционных насосов необходимо производить до начала обогрева котлов, а останов — не ранее, чем через 15 мин после прекращения обогрева, а также следить за тем, чтобы скорость циркуляции в котлах была не менее 3—3,5 м/с;

ВОТ является горючей жидкостью, часто используемой при температуре, превышающей температуру вспышки. Пожары возникают, как правило, при нарушениях герметичности системы. Из-за высокой рабочей температуры ВОТ пламя быстро распространяется по всей поверхности разлившегося теплоносителя, и пожар быстро принимает большие размеры. Для тушения пожаров ВОТ в полной мере применимы рекомендации по тушению нефтепродуктов;

при распылении теплоносителя, а также при конденсации его паров в воздухе может образовываться мелкодисперсный аэрозоль, обладающий взрывоопасными свойствами;

в системе не должны использоваться медь, алюминий, цинк, а также сплавы этих металлов. В качестве прокладок обычно применяются Klingerit, Klingerolit, Klingerit 100, фибра, специальные металлические кольца.

На судах применяются системы теплоснабжения с ВОТ, в которых:

все потребители тепловой энергии используют ВОТ, нагреваемый в котлах;

часть потребителей тепловой энергии использует ВОТ, нагреваемый в котлах, а часть потребителей (паротушение, подогрев и пропаривание танков, обогрев забортных отверстий и др.) использует пар, получаемый в парогенераторе, обогреваемом ВОТ;

часть потребителей тепловой энергии использует пар, получаемый в котлах, а часть потребителей — ВОТ, нагреваемый паром в специальном теплообменнике.

Судовые системы теплоснабжения с ВОТ отличаются большим разнообразием в зависимости от назначения и состава применяемого оборудования. Ниже приводятся схемы некоторых таких систем, позволяющие показать основные технические решения, используемые в них.

Схема простейшей системы теплоснабжения с использованием ВОТ представлена на рис. 2, а. Эта схема применяется при низких температурах теплоносителя (в установках, в которых подогрев ВОТ осуществляют паром).

В установках, где подогрев ВОТ производится в котлах, принимаются специальные меры для предотвращения крекинга теплоносителя из-за перегрева и обеспечения надежной работы самих котлов. Особое внимание уделяется возможности изменения суммарного расхода теплоносителя через потребители при сохранении расхода его через котлы на безопасном уровне. На рис. 2, б приведена схема установки, в которой при уменьшении расхода ВОТ через потребители минимально допустимый поток теплоносителя через котел поддерживается за счет перепуска части его мимо потребителей с помощью клапана, нагруженного пружиной, или регулятора давления другого типа.

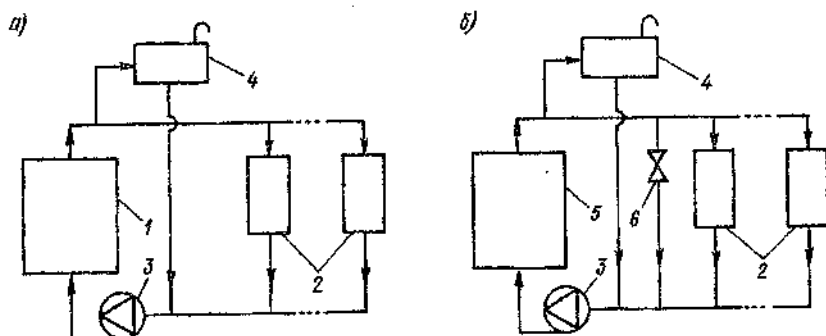


Рис. 2

Принципиальные схемы простейших систем теплоснабжения с нагревом ВОТ в подогревателе (а) и котле (б): 1 — подогреватель; 2 — потребитель; 3 — циркуляционный насос; 4 — расширительная цистерна; 5 — котел; 6 — перепускной клапан

На рис. 3 приведена схема котельной установки, в которой входящие в ее состав утилизационный котел, а также котел на жидком топливе образуют единый циркуляционный контур с потребителями. Схема допускает как одиночную работу каждого из входящих в ее состав котлов, так и совместное их использование. Несмотря на то, что система трубопроводов допускает как последовательное, так и параллельное включение котлов в контур циркуляции, нормальным является последовательное включение котлов с перепуском части теплоносителя мимо утилизационного котла, так как при параллельном соединении не обеспечивается минимально допустимый поток теплоносителя через котлы при работе одного циркуляционного насоса. При этом контроль потока через каждый из котлов осуществляется по перепаду давлений на дроссельных шайбах, установленных на трубопроводах выхода теплоносителя из котлов. Для уменьшения влияния контура потребителей на поток теплоносителя через котлы в системе предусмотрено автоматическое поддержание перепада давления на измерительной дроссельной шайбе, установленной на общем трубопроводе выхода теплоносителя из котлов. Регулирование осуществляется перепуском части теплоносителя

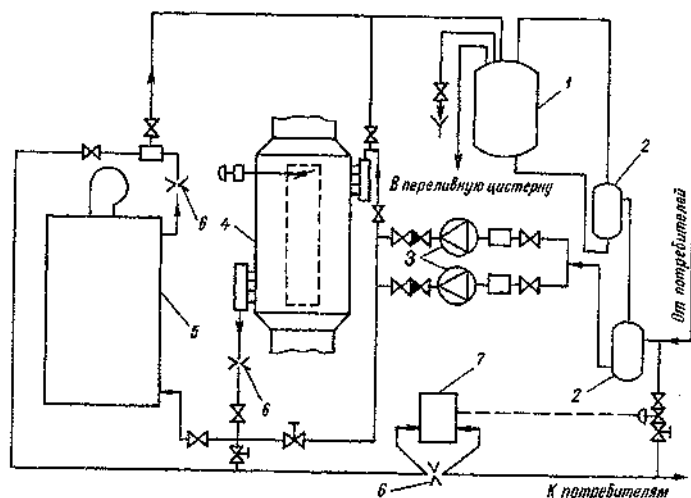


Рис. 3

Схема судовой котельной установки с регулированием потока теплоносителя через котлы:

- 1 — расширительная цистерна; 2 — деаэрактор; 3 — циркуляционные насосы;
- 4 — утилизационный котел; 5 — котел на жидком топливе; 6 — дроссельная шайба;
- 7 — регулятор потока

теля из трубопровода подачи его к потребителям на линию всасывания циркуляционных насосов. При больших нагрузках системы регулятор обеспечивает поддержание заданного перепада давления на шайбе, что при рабочей температуре теплоносителя соответствует номинальному расходу ВОТ. При малых нагрузках системы регулятор занимает крайнее положение, при котором обеспечивается поддержание расхода теплоносителя через контур котлов не ниже минимально допустимого.

В состав системы входят также деаэратор и расширительная цистерна. Деаэратор в данной системе выполнен двухступенчатым и установлен в непосредственной близости от циркуляционных насосов. Расширительная цистерна расположена на значительной высоте по отношению к деаэратору (в дымовой трубе судна) и сообщена со второй его ступенью как по жидкостной, так и по воздушной частям. Благодаря такой схеме в первой ступени деаэратора имеет место интенсивная циркуляция теплоносителя, обеспечивающая отделение воздуха и пара, а вторая ступень и расширительная цистерна служат для вывода воздуха и пара из системы и создания подпора на всасывании циркуляционных насосов. Таким образом достигается исключение циркуляции и поддержание допустимой температуры теплоносителя в расширительной цистерне, т. е. в части системы, где деаэратор находится в непосредственном контакте с воздухом.

Для удаления воздуха и пара из системы в процессе ее ввода в действие из холодного состояния предусмотрены так называемые «выпарные» трубопроводы, соединяющие трубопровод подвода теплоносителя к утилизационному котлу и отвода его из вспомогательного котла с расширительной цистерной. После ввода установки в действие клапаны на выпарных трубопроводах должны быть закрыты, и дегазация системы должна производиться исключительно через деаэратор.

Теплообменники всех потребителей включены параллельно и снабжены необходимой запорной и регулирующей арматурой. Для предотвращения остывания теплоносителя в системе при малой тепловой нагрузке в машинном отделении и в носовой части судна предусмотрены перепускные трубопроводы с клапанами, соединяющие подводящий и отводящий трубопроводы.

На рис. 4 показана схема котельной установки парома, особенностью которой является то, что при ее работе теплоноситель непрерывно циркулирует по двум контурам:

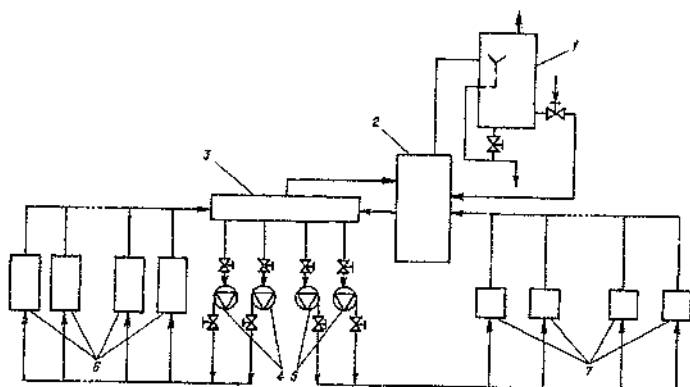


Рис. 4

Схема котельной установки парама: 1 — расширительная цистерна; 2 — деаэрактор; 3 — смешивательный коллектор; 4 и 5 — циркуляционные насосы; 6 — котлы; 7 — потребители

контур котлов, в который параллельно включены два котла на жидком топливе, четыре утилизационных котла, установленных за главными двигателями, и два утилизационных котла, установленных за вспомогательными дизель-генераторами;

контур потребителей, сообщенному с контуром котлов с помощью смешивательного коллектора.

Каждый из названных контуров обслуживается своей группой насосов, благодаря чему расход теплоносителя в контуре котлов не зависит от количества, состава и нагрузки включенных потребителей.

В состав системы входят также деаэрактор и расширительная цистерна. Используется наиболее распространенный тип деаэрактора — одноступенчатый. Потребителями являются подогреватели воды в расширительных цистернах охлаждения главных и вспомогательных двигателей, подогреватели топлива, подогреватели воды системы кондиционирования воздуха, подогреватели сепараторов топлива и масла, и другие. В состав потребителей входит также парогенератор, производящий пар для обогрева шпигатов, а также пропаривания и паротушения топливных танков. Предусмотрен полный перепуск теплоносителя мимо каждого из котлов, входящих в состав установки (на схеме не показано).

В установках, приведенных на рис. 3 и 4, регулирование температуры теплоносителя на выходе из утилизационных кот-

лов, установленных за главными двигателями, производится с помощью газоперепускных заслонок. Получает также распространение регулирование температуры теплоносителя, нагреваемого в утилизационных котлах, охлаждением его в специальных теплообменниках, прокачиваемых забортной водой. В любом случае, для приоритетного использования теплоты выпускных газов в утилизационных котлах температура теплоносителя на выходе из них должна быть задана более высокой, чем температура, при которой происходит включение форсунки котла на жидком топливе.

Нормально все котлы, входящие в состав установок с ВОТ, постоянно прокачиваются теплоносителем. При этом в части котлов происходит подогрев теплоносителя, остальные готовы к немедленному включению обогрева, благодаря чему существенно уменьшаются затраты труда на решение основной задачи — непрерывного обеспечения потребителей теплоносителем спецификационных параметров при смене режимов работы энергетической установки.

Благодаря высоким эксплуатационным качествам следует ожидать широкого применения систем с ВОТ на судах флота России, в связи с чем необходимы постоянный анализ и обобщение опыта их эксплуатации и надзора.

Список литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов. Морской Регистр Судоходства. Том 2. СПб.: 1995. 442 с.
2. A.P.W. Slauter. Marine Application of Thermal Fluid Heating. Trans. 1. Mar. E. Vol. 90, №3, 1978, pp. 117-136.
3. Gerrit de Weerd. Heat Transfer Media and Heat Transfer Plants. Публикация фирмы «Konus-Kessel», Нидерланды. 19 с.
4. Rules for Classification of Steel Ships. Det Norske Veritas. Part. 4, chapter 3, 1987.

АНАЛИЗ НОРМ ПРОЧНОСТИ ЛОПАСТЕЙ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ

Нормы прочности различных классификационных обществ регламентируют минимальную толщину лопастей гребных винтов в расчетных спрямленных цилиндрических сечениях. Нормы требуют, чтобы толщина лопасти была не менее полученной расчетным путем по соответствующей формуле, содержащейся в Правилах Регистра.

Требования Правил Регистра разрабатывались в 1967 году и с тех пор не пересматривались. В целях определения уровня требований Регистра по отношению к требованиям Правил других классификационных обществ представляется полезным произвести сопоставительный анализ этих норм. При этом следует иметь в виду, что увеличение толщины лопастей по отношению к минимально необходимой приводит к падению КПД гребного винта, к увеличению нагрузок на вал, к удорожанию гребного винта. Занижение же этой толщины по отношению к обеспечивающей прочность приводит к разрушению лопасти в эксплуатации.

Сравнение норм прочности лопастей гребных винтов, содержащихся в Правилах различных классификационных обществ, должно производиться в сопоставимых условиях, поэтому на первом этапе исследования осуществлялись применительно к работе гребных винтов в чистой воде. Однако, позже, для ориентации, сравнивались и гребные винты судов ледовых классов с учетом специфики их работы.

Для сопоставления результатов расчета использовались требования классификационных обществ, входящих в МАКО: Российский Морской Регистр Судоходства (RS), Регистр судоходства Ллойда (LR), Норвежский Регистр (DNV), Американское Бюро судоходства (ABS), Германский Ллойд (GL), Японский Регистр (NKK), а также Финско-Шведские и Канадские Правила (F-S) [1] — [7]. При анализе также использовались Правила Итальянского Регистра (RINA), Бюро Веритас (BV), Регистра КНР и Польского Регистра (PRS) [8] — [10].

В качестве исходного статистического материала были рассмотрены проекты 97-ми судов, отобранных по принципу полноты

информации, необходимой для расчета по различным формулам, гребные винты которых надежно зарекомендовали себя в эксплуатации.

Расчетные формулы и обозначения

Все Правила классификационных обществ имеют свои формулы для расчета толщины сечений, которые содержат различные обозначения соответствующих величин и их размерности. Поэтому, в целях сравнения, для удобства алгоритмизации необходимо было привести все формулы к единой размерности и единым обозначениям.

В таблице 1 приводится перечень характеристик, их обозначения, размерность, а также указывается классификационное общество, в формулу которого данная величина входит. Пробелы в отдельных графах указывают на то, что величина входит во все формулы (например, диаметр гребного винта, число лопастей и т.д.). В приводимых ниже расчетных формулах обозначения и размерности соответственно унифицированы и откорректированы согласно данным таблицы 1. Численные значения коэффициентов, зависящих от относительного радиуса $\bar{r} = r/R$, взяты для радиуса $\bar{r} = 0,25$ (ВФШ) и $\bar{r} = 0,35$ (ВРШ). Минимальная толщина на $\bar{r} = 0,6$ не определялась. Также не определялись минимальные кромочные размеры ввиду отсутствия специальных требований к ним у Регистра. Определение коэффициентов, зависящих от механических характеристик материалов, а также от ледовых усилений, представлены отдельно.

В таблице 2 представлены расчетные формулы различных классификационных обществ, обозначения и размерности которых соответствуют приведенным в таблице 1.

Значения коэффициентов, определяемых по особым формулам или задаваемых численно, приводятся ниже.

В формулах (1 — 8) рассчитываются или вводятся численно следующие коэффициенты, не вошедшие в таблицу 1:

— RS (1):

- A_{pp} — коэффициент, определяемый по графику в зависимости от $\bar{r}$ и $(H/D)_p$. Для ВРШ принимается шаговое отношение основного проектного режима;
- C_p — коэффициент центробежных напряжений, зависящий от $\bar{r}$;
- σ_p — характеристика материала;
- k_1 — коэффициент ледовых усилений.

Таблица 1

Обозначения

№	Величина	Символ	Размерность	Классификационное общество
1	Диаметр гребного винта	D	м	GL
2	Число лопастей	Z		
3	Ширина лопасти в расчетном сечении	b_p	м	
4	Уклон лопасти (плюс — в корму)	m	мм	
5	Угол уклона лопасти	ε	град.	
6	Шаг расчетный	H	м	
7	Шаговое отношение на радиусе $\bar{r}$	$(H/D)_p$	—	
8	Мощность	Ne	кВт	
9	Частота вращения	n	об/мин	
10	Упор гребного винта	P	Н	DNV, GL
11	Момент сопротивления вращению	M_p	Н/м	DNV
12	Скорость судна расчетная	V_s	уз	GL
13	Дисковое отношение	θ	—	LR, ABS, NKK
14	Центральный момент инерции сечения лопасти	J_o	мм ⁴	ABS
15	Максимальное расстояние от центральной оси инерции до поверхности лопасти	a_o	мм	ABS
16	Площадь сечения лопасти	S_o	мм ²	ABS
17	Толщина лопасти по чертежу	t_o	мм	NKK
18	Воображаемая толщина лопасти на оси винта	t_o	мм	
19	Ширина судна	B	м	NKK
20	Осадка расчетная	d	м	NKK
21	Высота борта	H_b	м	NKK
22	Коэффициент общей полноты	C_b	—	NKK
23	Общая масса всех лопастей	M_n	т	NKK

Таблица 2

Расчетные формулы

№	Классификационное общество	Расчетная толщина лопасти, мм	Примечание
1	RS	$t_p = 9,8[A_{pp}\sqrt{(0,14k_1Ne)/(Zban)} + C_p \frac{m}{\sigma} (Dn/300)^2]$	
2	F-S	$t_p = 100\sqrt{\frac{C_1(2Ne/Zn + C_2k_3D^2)}{b_p R_m[0,65 + 0,7(H/D)_p]}}$	
3	LR	$t_p = \frac{aem}{EFb_p ZU} + 100\sqrt{\frac{3150NeM}{EFUB_p Zn}}$	Без ледовых подкреплений
4	DNV	$t_p = C_1\sqrt{\frac{D(U_2K_3 + m_1K_1)}{Zb_p(U_1 - U_2S)}}$	Без ледовых подкреплений
5	DNV	$t_p = C_1\sqrt{\frac{DK_1(U_2C_4 + 0,2) + K_4}{Zb_p(U_1 - U_2S)}}$	
6	ABS	$t_p = S_A[K\sqrt{\frac{ANe}{C_n C_n Z} + \frac{C_s}{C_n} \frac{Bm}{ac}}]$	Без ледовых подкреплений
7	GL	$t_p = K_0 k K_1 C_G C_{dim.}$	Без ледовых подкреплений
8	NKK	$t_p = 10\sqrt{\frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{Ne}{Zb_p n}} SW$	Без ледовых подкреплений

Правила Регистра предусматривают для судов ограниченных районов плавания уменьшение толщины, определенной по формуле (1), на 5%. Также допускается обоснованное расчетом прочности уменьшение толщины лопасти, например, в случае применения специального профиля.

— $F\text{-}S(2)$:

R_m — предел прочности материала;

k_3 — составляющая ледового момента;

C_1 и C_2 — коэффициенты, зависящие от $\bar{r}$.

В оригинальной формулировке Финско-Шведских Правил проверяется не минимальная толщина лопасти в расчетном сечении t_p , а основная составляющая момента сопротивления — $b_p t_p^2$. Однако, в целях сопоставления, величина t_p в формуле (2) представлена в явном виде.

Для винтов регулируемого шага в расчетное значение $(H/D)_p$ подставляется шаг, равный $0,7H$ номинального.

— $LR(3)$:

В формуле (3) параметры F и M зависят от $\bar{r}$, а E — от уклона лопасти m ;

U и γ — характеристики материала;

$e = f(\gamma; \theta; n; D)$.

LR требует представления подробных расчетов прочности как для винтов нетипичной конструкции, так и для работающих в переменных режимах (например, гребные винты буксиров, траулеров и т.д.).

— $DNV(4)$ и (5):

Толщина лопастей гребных винтов у судов, имеющих ледовый класс, рассчитывается по формуле (5). Входящий в эту формулу коэффициент K_4 пропорционален составляющей ледового момента.

В формулах (4) и (5) U_1 и U_2 — характеристики материалов.

Остальные параметры зависят от расположения расчетного сечения ($\bar{r}$), скорости хода судна V_s , а также от характеристик гребного винта, указанных в Правилах DNV [4].

В Правилах DNV отмечается, что гребные винты судов, имеющих ледовый класс, должны изготавливаться из стали. Высокопрочные бронзы считаются эквивалентными стали.

Отклонения в меньшую сторону от t_p для обычных винтов без ледовых подкреплений не допускаются. Винты в насадках, винты глиссерсов и т.п. требуют специального рассмотрения.

Винты судов, имеющих ледовый класс, могут иметь толщины лопастей меньше t_p , но такая возможность должна быть специально обоснована.

— ABS (6):

В формуле (6) параметры B и C зависят от характеристик винтовых материалов, геометрии гребного винта и $\bar{r}$; C_s и C_n — от геометрии расчетного сечения лопасти; A и K — от $\bar{r}$. Множитель $S_d = 1$ для винтов диаметром не более 6,1 м. Для винтов $D > 6,1$ м S_d рассчитывается по Правилам ABS [5].

Следует отметить, что правила ABS регламентируют толщину лопасти только в корневом сечении ($\bar{r} = 0,25$ — для ВФШ, $\bar{r} = 0,35$ — для ВРШ!).

Для винтов необычной конструкции необходимо представить подробный расчет прочности.

— GL (7):

Расчетная толщина лопасти t_p определяется по формуле (7) без учета ледового класса судна. Для судов, имеющих ледовый класс, t_p умножается на ледовый коэффициент C_E , зависящий от фактора ледового класса GL.

Входящие в формулу (7) параметры:

$K_0 = f(m; H_p; n; \bar{r})$;

K_0 — коэффициент формы профиля;

K_1 — зависит от характеристики материала;

C_G — масштабный фактор;

$C_{дин.}$ — динамический коэффициент, зависящий от отношения максимальных и средних напряжений (σ_{max}/σ_m), определяемого Правилами GL.

Следует иметь в виду, что ледовый коэффициент должен отвечать условию $C_E \geq C_{дин.}$. В этом случае принимается $C_{дин.} = 1$. При $C_E < C_{дин.}$ расчет ведется по формуле (7).

— NKK (8):

В расчетную формулу NKK в качестве сомножителей входят:

K_1 — зависит от $\bar{r}$ и $(H/D)_B$;

K_2 — зависит от характеристики материала K_m , $\bar{r}$ и геометрии лопасти;

$S = f(H_0, d)$

W — зависит от $\bar{r}$, C_b , B , d и геометрии гребного винта.

Коэффициенты, учитывающие свойства материалов, принимались в каждом отдельном случае в полном соответствии с требованиями Правил [1] — [7].

Оценка влияния на прочность лопастей ледового класса судна

Оценка минимально допустимой толщины лопастей применительно к судам, имеющим ледовые классы, приведена только для сопоставления уровня требований Правил Регистра с анало-

гичными требованиями других классификационных обществ. Здесь не приводится критика сущности этих требований, которые не отражают реального механизма взаимодействия лопастей со льдом.

Правила различных классификационных обществ при определении минимально допустимой толщины лопасти учитывают ледовый класс судна следующим образом:

— RS. Основная составляющая формулы (1) включает в форме коэффициента запаса прочности ледовый коэффициент k_1 , возрастающий с усилением ледовых подкреплений судна от 8 (винт судна без ледовых усилений) до 16 (средний винт ледокола) [1];

— F-S. Составляющая, зависящая от ледового момента, умножается на ледовый коэффициент k_3 , возрастающий от 1 (без ледовых усилений) до 2,15 (класс IAS-Super). В дальнейшем эти требования обозначаются ICE.

— DNV. В расчетную формулу (5) входит коэффициент K_4 , пропорциональный ледовому моменту, определенному по Правилам ICE, т.е. k_3 . Ледовые классы судов по DNV соответствуют F-S ледовым классам. Из двух толщин, определенных по формулам DNV (4) и (5) без учета ледового класса, принимается наибольшая.

— GL. Правила требуют увеличения толщины лопасти t_p , определенной по формуле без учета ледовых усилений, путем умножения ее на ледовый фактор $C_E \geq 1$ [6]. В Правилах GL, коэффициент k_4 , входящий в выражение C_E , примерно равен $10k_3$. Ледовые классы судов по GL соответствуют классам, принятым в Правилах F-S.

Для удобства сопоставления толщин лопастей, рассчитанных по Правилам ICE, с толщинами, рассчитанными по Правилам RS, DNV и GL, вводится понятие приведенного ледового коэффициента $\bar{k} = k_3 = k_1/8 = 0,1k_4$, определенного из предположения, что гребные винты судов без ледовых усилений работают в чистой воде.

Это дает возможность рассчитать минимальную толщину лопасти t_p конкретного судна, имеющего ледовый класс, по формулам различных классификационных обществ. С другой стороны, представляется возможным сравнить требования, предъявляемые Регистром к толщине лопастей гребных винтов судов различных классов RS, с требованиями ICE и сопоставить ледовые класса RS и ICE применительно к минимальной толщине лопастей. С этой целью вводится понятие относительной толщины лопасти $\bar{t}$, пропорциональной $\sqrt{\bar{k}}$.

В таблицах 3 и 4 приводятся соотношения ледовых коэффициентов, ледовых классов и относительных толщин, определенных по различным Правилам.

Таблица 3
Относительная толщина лопастей, рассчитанная по Правилам RS

Ледовый класс RS	Без ледовых усиления	ЛЗ	Л2	Л1	УЛ	УЛА	Ср. винт ледокола
k_1	8	9	10	11,2	12,5	14	16
$\bar{k}$	1,00	1,12	1,25	1,40	1,56	1,75	2,00
$\bar{i}$	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,41

Таблица 4
Относительная толщина лопастей, рассчитанная по ICE

Ледовый класс	Без ледовых усиления	IC	IB	IA	IA Super
Ледовый класс GL	—	E1	E2	E3	E4
$k_1 \approx 10k_3$	10	12	13	16	21
$\bar{k} = k_3$	1,00	1,22	1,33	1,60	2,15
$\bar{i}$	1,00	1,10	1,15	1,26	1,47

На рис.1 представлен график зависимости относительной толщины лопасти $\bar{i}$ от приведенного ледового коэффициента $\bar{k}$. На этом же графике отмечены точки, соответствующие ледовым классам RS и ICE.

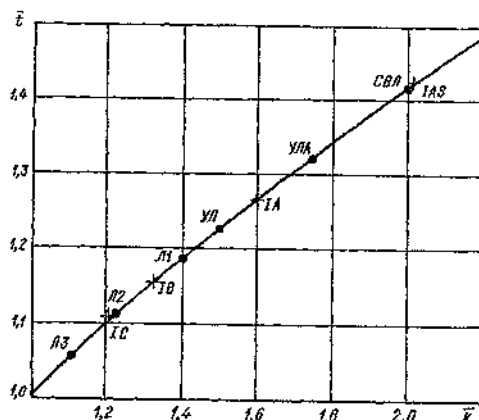


Рис. 1
Зависимость относительной толщины лопасти от приведенных ледовых коэффициентов
● — класс RS; + — класс ICE

Анализ существа требований к прочности лопастей по Правилам классификационных обществ.

Практически все используемые в рассмотренных Правилах классификационных обществ формулы основаны только на влиянии гидродинамических сил и моментов на прочность лопастей гребных винтов.

Рассмотренные расчетные формулы всех классификационных обществ структурно подобны.

В большинстве Правил (за исключением PRS и GL) учитываются напряжения от центробежных сил, о чем свидетельствует член, пропорциональный Dn^2 .

В большинстве Правил требуется выполнение расчетов минимальной толщины лопасти не только в корневом сечении, но также на радиусе $\bar{r}=0,6$ и на кромке лопасти. Толщины в остальных сечениях определяются графической интерполяцией. NKK — во всех случаях, а ABS, RINA и BV — при отсутствии ледовых подкреплений требований к толщине на $\bar{r}=0,6$ не предъявляют. Эти требования не рассматривались и в данной статье, так как в формулах для определения $t_{\bar{r}=0,6}$ меняются только коэффициенты, зависящие от $\bar{r}$ (в Правилах RS коэффициент центробежных сил $C_p=0$ уже при $\bar{r}=0,47$).

Существенным недостатком Правил RS и PRS является отсутствие требований к кромкам лопастей.

Во всех Правилах классификационных обществ, кроме GL, не учитываются циклические нагрузки. В формулу GL (7) в качестве сомножителя входит коэффициент $C_{дин.}$, пропорциональный отношению максимальных и средних напряжений (σ_{max}/σ_m), который в свою очередь зависит от скорости, частоты вращения, диаметра винта, коэффициента попутного потока и упора.

Однако, в некоторых Правилах наблюдается тенденция к учету цикличности внешних сил, так как допускаемые напряжения назначаются на основании предела выносливости, определенного испытаниями в коррозионной среде.

По степени сложности алгоритмов внешне более простыми кажутся Правила RS. Однако, ряд коэффициентов в них определяется по таблицам и номограммам, что затрудняет автоматизацию расчетов и требует численного ввода дополнительных исходных данных. В этом отношении наиболее предпочтителен достаточно

сложный алгоритм GL, где задаются только исходные величины, а все коэффициенты рассчитываются по простым формулам. В то же время число учитываемых параметров больше, что позволяет более полно учесть геометрические и физические особенности винта.

Все классификационные общества допускают отступления от требований Правил. Помимо этого, все Правила требуют специальных расчетов прочности гребных винтов для судов, на которые Правила не распространяются. Подобные расчеты также обязательны для винтов специальной конструкции или винтов, работающих в необычных условиях.

Расчет минимальных толщин лопастей гребных винтов

Для 97-ми реальных морских судов различных классов RS расчетом на ЭВМ были определены толщины лопастей гребных винтов в следующих вариантах:

- по формулам RS, F-S, LR, DNV, GL, ABS и NKK в предположении отсутствия у судов ледовых подкреплений;

- по формулам RS, ICE, DNV и GL для судов всего диапазона ледовых классов ($\bar{k} = 1,0 \div 2,2$);

- по формулам RS, ICE, DNV и GL для судов применительно к реальным ледовым классам судов (Л1, Л2 и Л3), вошедшим в выборку.

Результаты расчетов толщин лопастей по 1-му варианту (в предположении отсутствия ледовых подкреплений) были осреднены по каждому из семи классификационных обществ и представлены на гистограмме рис.2.

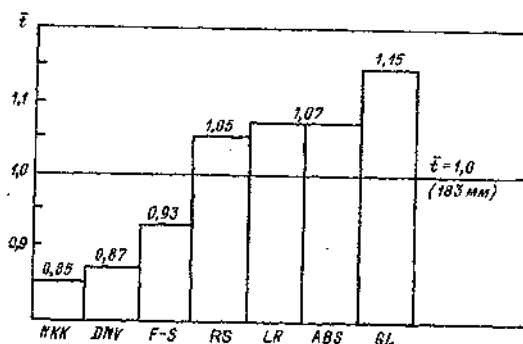


Рис. 2

Средние толщины лопастей гребных винтов, рассчитанные по различным Правилам без учета ледовых усилений.

По второму варианту был построен график зависимости средних толщин лопастей от приведенного ледового коэффициента для четырех классификационных обществ (рис.3).

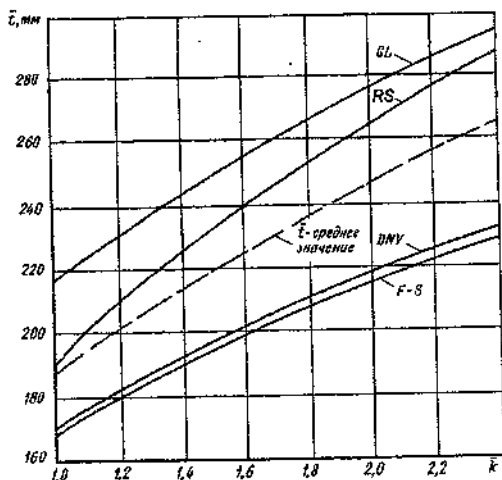


Рис. 3

Зависимость расчетной толщины лопасти от ледового класса для различных классификационных обществ.

Результаты расчета по третьему варианту отражают сопоставление толщин реальных лопастей с полученными по Правилам различных классификационных обществ. Так как рассмотренные суда относятся только к классам Регистра Л3, Л2 и Л1, то средние значения расчетной толщины определялись для этих классов. Построенные гистограммы (рис.4) иллюстрируют соотношения между средними расчетными и реальными толщинами лопастей применительно к соответствующим классам Регистра.

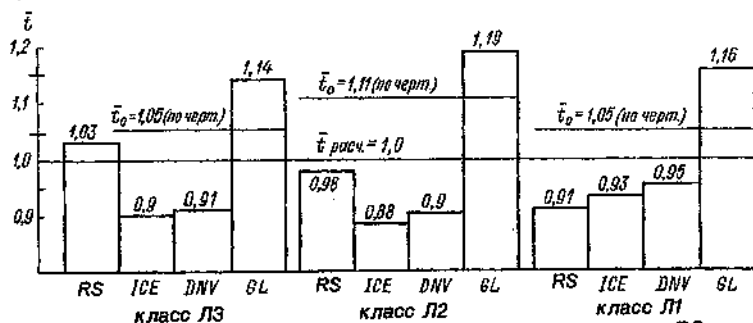


Рис. 4. Средние толщины гребных винтов для судов класса RS, рассчитанных по различным Правилам.

Для удобства сопоставления расчетная толщина лопастей представлялась относительными величинами.

Анализ результатов расчетов по формулам различных классификационных обществ позволяет сделать следующие выводы:

1. Во всех Правилах используется детерминированный подход к определению внешних сил на основе методов стержневой модели расчетов напряжений в лопасти. В основе всех требований лежит статический подход к расчету прочности гребного винта, хотя отдельные Правила пытаются учесть цикличность нагрузок назначением допускаемых напряжений, исходя из условного предела выносливости в коррозионной среде.

2. Для винтов, работающих на чистой воде, завышенными представляются требования GL, заниженными — NKK и DNV ($\pm 15\%$). Требования F-S, RS, LR и ABS близки к среднему значению $\pm 7\%$.

3. Для судов, имеющих ледовые классы, наибольшими оказались толщины, рассчитанные по Правилам GL (примерно 12% выше среднего). Несколько ниже (в среднем на 8%) требования RS.

4. Все алгоритмы, содержащиеся в Правилах, имеют разную трудоемкость, но предназначены, в основном, для ручного счета. Наиболее легко приспособляются для расчета на ЭВМ алгоритмы, содержащие минимум табличного и графического материала. В этом отношении Правила RS наименее удобны, так как коэффициенты A_{pp} , определяемые по сложным номограммам, вводились численно в качестве дополнительной исходной величины.

5. Большие затруднения вызывают различные обозначения и размерности одинаковых величин в различных Правилах.

6. Правила Регистра должны быть дополнены следующими требованиями:

- к прочности гребных винтов ледоколов и судов активного ледового плавания;

- к кромкам лопастей гребных винтов для всех судов;

- к гребным винтам скоростных судов.

Помимо этого, желательно, разработать по инициативе Регистра отдельные инструктивные материалы по эксплуатации судов, рекомендации которых окажут влияние на надежность гребных винтов [14].

Список литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов, Морской Регистр судоходства. В 2-х т.Т.2, 1995. 442 с.
2. Board of navigation rules for assigning ships separate ice-due classes (Finnish-Swedish ice class rules). Helsinki, 1971.
3. Lloyds Register of Shipping. Rules and regulations for the construction and classification of steel ships 1995, London, 1995.
4. Det Norske Veritas. Rules for the construction and classification of steel 1995. Oslo, 1995.
5. American Bureau of Shipping. Rules for building and classing steel vessels 1995. New York, 1995.
6. Germanischer Lloyd. Rules for the classification and construction of sea-going steel ships, v.II. Hamburg. 1995.
7. Nippon Kaiji Kyokai. Rules and regulations for the construction and classification of ships 1995. Tokyo. 1995.
8. Polski Rejestr Statkow. Przepisy klasyfikacji i budowy statkow morskich 1990. Gdansk. 1991.
9. Registro Italiano Navale. Regolamenti per la costruzione e la classificazione delle navi, v.II. Roma. 1994.
10. Bureau Veritas. Reglement pour la construction et la classification des navires en acier. 1991. Paris. 1994.
11. Бискуп Г.А. и др. Прочность гребных винтов Л.: Судостроение. 1973. С. 134.
12. Кацман Ф.М., Коннов А.В. Расчетная оценка эксплуатационной надежности гребных винтов при коррозионно-усталостной природе отказа. Сборник «Вопросы прикладной гидромеханики судна». Л.: Судостроение. 1975. С.289-349.
13. Кацман Ф.М., Кудреватый Г.М. Конструирование винто-рулевых комплексов морских судов (изд.2). Л.: Судостроение. 174. С.376.
14. Кацман Ф.М. Обслуживание и ремонт гребных винтов фиксированного шага из цветных сплавов (инструкция и рекомендации). СПб. ГМА им.адм.С.О.Макарова. 1993. С.54.

Ф.М.Кацман, А.В.Андрюшин, В.А.Беляшов

ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЧНОСТИ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ ЛЕДОКОЛОВ И СУДОВ АКТИВНОГО ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ

Россия — ведущая морская держава в строительстве и эксплуатации ледоколов и судов активного ледового плавания.

Одна из главных задач современного ледоколостроения — обеспечение надежности эксплуатации в ледовых условиях винто-рулевого комплекса. Надежность винто-рулевого комплекса ледоколов и судов активного ледового плавания является одним из основных факторов, который определяет их экономическую эффективность, а во многих случаях и безопасность эксплуатации. Например, поломка гребного винта ледокола в процессе проводки каравана приводит к большим временным и материальным потерям, а в некоторых случаях, как показывает опыт навигации на трассе «Северный морской путь» в 1983 г., может привести к гибели судов.

При эксплуатации ледоколов и ледокольных судов в ледовых условиях гребные винты взаимодействуют со льдом. Лед представляет собой чрезвычайно прочную среду. Поэтому силы и моменты, возникающие на гребных винтах при взаимодействии лопастей со льдом, существенно отличаются от соответствующих величин, наблюдаемых при работе судна на чистой воде. Для арктических ледоколов ледовые силы и моменты на гребных винтах могут быть в 2-3 раза выше, чем соответствующие гидродинамические. Поэтому научно обоснованный подход к оценке надежности ледокольных гребных винтов и разработка их норм прочности обуславливают в первую очередь необходимость учета реальных эксплуатационных ледовых нагрузок. При этом оценка прочных размеров гребных винтов должна осуществляться на основе обоснованной гипотезы статической или усталостной прочности. Корректное определение эксплуатационных ледовых нагрузок и соответственно разработка обоснованных норм прочности невозможны без учета реальных физических процес-

сов, происходящих при взаимодействии лопастей со льдом. Правила, нормативы, требования Классификационных обществ обязаны отражать реальные физические явления и обеспечивать регламенты, исключающие, по возможности, эксплуатационные повреждения при соблюдении целевой эффективности.

Необходимость нормирования прочности гребных винтов, взаимодействующих со льдом.

В настоящее время для ледоколов и судов активного ледового плавания прочные размеры гребных винтов регламентируются Правилами Регистра (RS), Правилами Американского Бюро Судостроительства (ABS), Финско-Шведскими классификационными правилами (F-S), Норвежскими Правилами (DNV) и Канадскими Правилами (ASPPR). В Правилах ABS, DNV, ASPPR, (F-S), расчетная ледовая нагрузка для определения прочных размеров лопастей задается в виде момента сопротивления льда вращению гребного винта. Ниже будет показано, что такой подход является некорректным и не соответствует современным научным воззрениям и требованиям проектирования ледокольных гребных винтов.

В Правилах Регистра, а также в правилах подавляющего большинства Классификационных обществ нормы прочности лопастей задаются в форме расчетных формул, регламентирующих минимальную толщину лопастей. Эти формулы получены на основе учета только гидродинамических сил, воздействующих на лопасть.

Учет ледовых нагрузок для судов низких ледовых классов в правилах этих Классификационных обществ осуществляется в виде процентных надбавок, полученных сугубо эмпирическим путем. В Правилах Регистра подобная форма процентных надбавок применена к гребным винтам ледоколов и судов активного ледового плавания. Соответствующие формулы Правил Регистра не предусматривают вычисление расчетных ледовых нагрузок на гребном винте в зависимости от его основных геометрических характеристик. Подобный подход нельзя считать научно обоснованным, так как он не обеспечивает возможности корректно назначать прочные размеры лопастей, исходя из условия одновременного обеспечения максимальной эффективности движительного комплекса и его достаточной прочности. Необоснованное

увеличение толщины лопастей гребного винта приводит к существенному снижению его эффективности, что естественно ухудшает технико-экономические характеристики судна. По данным исследований увеличение толщины лопастей по сравнению с «гидродинамической» на 60% приводит к снижению тяги на 12%, кпд на 5% при увеличении опасности кавитации. В настоящее время разработка научно обоснованных нормативов для прочных размеров гребных винтов ледоколов и судов активного ледового плавания с учетом реального взаимодействия лопастей со льдом представляет собой нерешенную задачу обеспечения прочности и является одной из наиболее сложных научно-технических проблем в строительстве и эксплуатации ледоколов и судов ледового плавания.

Можно констатировать, что существующие нормы прочности Регистра для гребных винтов ледоколов и судов активного ледового плавания не отражают физических явлений, которые происходят при взаимодействии лопастей со льдом, и по этой причине не удовлетворяют своему назначению.

Для Правил Регистра такое положение вещей является недопустимым. Россия — одна из немногих крупнейших морских держав, суда которой эксплуатируются во льдах. Поэтому Правила Регистра должны содержать нормы, которые опираются на реальные физические процессы и учитывают современные достижения науки и практики в области проектирования и эксплуатации ледоколов и судов активного ледового плавания.

Учет гидродинамических сил.

При эксплуатации гребные винты ледоколов и судов активного ледового плавания испытывают воздействие как гидродинамических, так и ледовых нагрузок. В общем случае, те и другие являются случайными процессами. Для ледоколов и судов ледового плавания одной из основных причин колебаний гидродинамических сил на лопастях гребного винта является неравномерность натекающего на винт внешнего потока. Кроме этого, необходимо учитывать нестационарность режимов эксплуатации ледоколов и судов ледового плавания. Как показывают натурные испытания ледоколов и судов ледового плавания, даже в тяжелых ледовых условиях, значения гидродинамических нагрузок на

гребных винтах и, соответственно, напряжений в их лопастях могут быть соизмеримы по величине с ледовыми [1]. Последнее, а также наличие колебаний гидродинамических сил, обуславливает в общем случае необходимость их учета при оценке надежности лопастей гребных винтов ледоколов и судов активных ледовых классов на основе критериев усталостной и статической прочности. Поэтому целесообразно дать краткий анализ методов учета гидродинамических сил при определении прочных размеров лопастей гребных винтов.

Применительно к гребным винтам, работающим в чистой воде, наиболее точным представлением является подход к лопасти, как геликоидальной оболочке переменной толщины, жестко закрепленной по внутренней части своего контура. Однако, для практических целей при проектировании гребных винтов и разработке норм прочности лопасти в правилах Классификационных обществ исходят из следующих упрощенных предположений:

лопасть гребного винта рассматривается в виде жестко заделанного на конце прямого стержня с переменной площадью поперечных сечений;

расчет напряжений производится, исходя из принципа Сен-Венана, только от действия изгибающего лопасть момента (балочная теория);

расчетные напряжения определяются для цилиндрических сечений;

момент инерции цилиндрического сечения для определения расчетных напряжений определяется в предположении, что главная центральная ось инерции сечения является параллельной его хорде. Другая главная центральная ось перпендикулярна хорде.

Эти упрощенные предположения положены в основу таких распространенных методов оценки прочности гребных винтов, как методы Тейлора, Ромсона, Резинга [2].

Согласно этим предположениям, наибольшие нормальные напряжения будут соответствовать точке профиля ξ , которая наиболее удалена от нейтральной оси. Обычно точка ξ соответствует координате максимальной толщины профиля s . Поэтому для судов, предназначенных для эксплуатации на чистой воде, в правилах всех Классификационных обществ при заданной длине хорды сечения b прочность лопастей гребных винтов нормируется путем соответствующего выбора максимальной толщины s на

расчетном радиусе. Таким образом задается величина момента сопротивления $W \sim bs^2$, которая определяется из условия обеспечения статической или усталостной прочности.

В настоящее время для определения напряженного состояния лопасти, как геликоидального тела, получил широкое распространение метод конечных элементов (МКЭ). Результаты расчетов по МКЭ показали, что изложенный выше «балочный» подход может быть принят с точностью, необходимой для практики, если значения скручивающего момента от действия внешних сил относительно центра жесткости сечения значительно меньше изгибающего лопасть момента относительно оси ее наименьшей жесткости. Наличие скручивающего момента в плоскости сечения обуславливает появление дополнительных касательных и нормальных напряжений. Последние определяются деформацией сечения. В этом случае точка максимальных напряжений может не совпадать с точкой ξ . Она может значительно смещаться в сторону выходящей (входящей) кромки лопасти от точки ξ . Последнее характерно для гребных винтов с большой саблевидностью.

Существующие гипотезы взаимодействия гребных винтов со льдом и требования к определению ледовых нагрузок для расчета прочных размеров лопастей.

Существующие гипотезы отражают сложившиеся в результате наблюдений, испытаний, эксплуатации физические представления о механизмах взаимодействия гребного винта со льдом.

Не рассматривая в историческом аспекте этот вопрос, кратко изложим существо принятых в настоящее время гипотез.

Первым научным представлением о механизме взаимодействия гребного винта со льдом была гипотеза М.А.Игнатьева, который предложил практическую схему расчета на прочность гребного вала и лопасти гребного винта [3]. Этот подход нашел широкое распространение за рубежом в странах, в которых строятся и эксплуатируются ледоколы и суда активного ледового плавания, т.е. в Финляндии, Швеции, США, Канаде, Голландии. На его основе разработаны нормативы прочности гребных винтов ледоколов и судов активного ледового плавания. В основу расчетной схемы ледовых нагрузок, воздействующих на гребной винт, положена физическая модель «фрезерования» льда. Ее сущность заключается в следующем: при взаимодействии лопастей

гребного винта с крупными льдинами последние не могут быть отброшены в сторону или расколоты вследствие большой массы. В этом случае лопасть прорезает (фрезерует) лед. На рис.1 представлен вид профрезерованной лопастями гребного винта ледокола «POLAR STAR» льдины (4). В результате на гребном

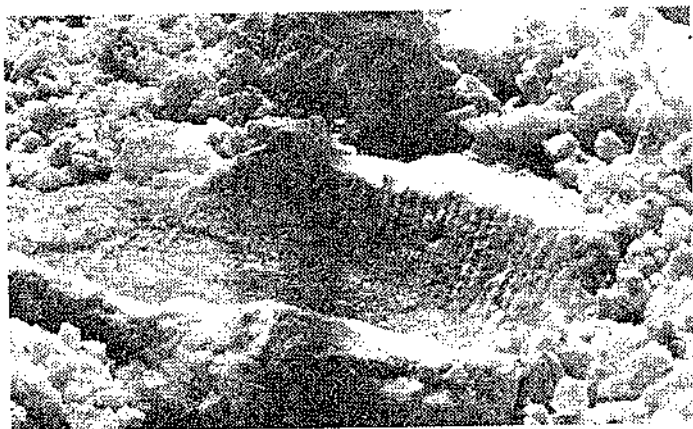


Рис. 1

Вид профрезерованной лопастями гребного винта ледокола «Polar Star» льдины

винте возникает ледовый момент сопротивления льда вращению гребного винта $M_{\text{л}}$, который при постоянной мощности двигателя приводит к падению частоты вращения гребного вала и винта. Величина $M_{\text{л}}$ обуславливается смятием льда по площади контакта, которая определяется толщиной лопасти и ее длиной врезания в лед. По результатам натурных испытаний ледоколов в тяжелых ледовых условиях М.А.Игнатьев установил наличие линейной зависимости $M_{\text{л}}$ от диаметра гребного винта D . Величина $M_{\text{л}}$, по его мнению, определяет значение ледовой силы $T_{\text{лв}}$ в плоскости вращения гребного винта. Дополнительно на лопасть действует аксиальная ледовая сила $P_{\text{л}}$, направление которой совпадает с гидродинамическим упором, а величина определяется из условия скалывания лопастью прорезанной толщины льда $s = V/(nz)$ (V — скорость судна, n — частота вращения гребного винта, z — число лопастей гребного винта). Изгибающие лопасть и вал ледовые моменты определяются через значения $T_{\text{лв}}$, $P_{\text{л}}$. Важно отметить, что расчетная схема М.А.Игнатьева для определения ледовых нагрузок на гребном винте решена в статической постановке и не

учитывает процесс их изменения во времени, а также случайный характер. В качестве расчетного режима рекомендуется принимать движение ледокола или судна ледового плавания со скоростью $V=4-6$ узлов. Расчетные напряжения в корневом сечении лопасти определяются по балочной теории от действия изгибающего момента ледового момента в плоскости наименьшей жесткости. Величина расчетного изгибающего момента определяется через значения натурных моментов $M_n = f(D)$.

Если опираться на изложенную схему статического определения ледовых нагрузок и расчета прочности, то изломы лопастей должны носить мгновенный хрупкий характер. Они должны исключать характерные площадки и зоны усталостного разрушения. Однако отдельные лопасти гребных винтов ледоколов и судов активного ледового плавания, сломанные во льдах, имеют характер усталостного излома. На рис.2 представлен характерный излом лопасти гребного винта ледокола «Мурманск», который носит следы развития усталостной трещины.

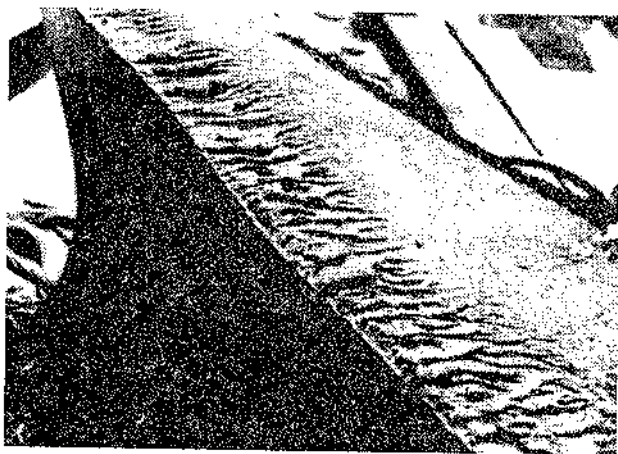


Рис. 2

Усталостное разрушение лопасти гребного винта ледокола «Мурманск»

В противовес статической методике М.А.Игнатьева, Ф.М. Кацман и С.В. Яконовский предложили динамическую (ударную) гипотезу взаимодействия гребного винта со льдом [5]. Эта гипотеза, научно развитая С.В. Яконовским, давала возможность

учесть изменение ледовой нагрузки во времени и нашла подтверждение в результатах натурных испытаний в Арктике, в частности, на ледоколе «Капитан Воронин» и др. [6].

Сущность динамической схемы С.В.Яконовского заключается в следующем: гребной винт, совершая вращательное и поступательное движение, в некоторый момент сталкивается со льдиной и ударяется об нее одной из своих лопастей. Лопасть разрушает лед, врезаясь в льдину. При этом скорость вращения винта резко затормаживается. Падение скорости происходит в среднем на величину 10 — 15% за промежуток вращения менее чем 0,04 — 0,05 сек. По мере врезания в лед гребной винт поворачивается на некоторый угол, не превышающий 20° — 30° . Так как валопровод продолжает вращаться, а скорость гребного винта резко уменьшается, то валопровод начинает скручиваться и волна деформаций кручения пробегает от гребного винта к гребному валу (ротору электродвигателя). Скорость вращения ротора электродвигателя уменьшается, причем на величину меньшую, чем у винта, так как масса ротора больше. Но в момент времени, когда скорость вращения ротора только начинает снижаться, лед в месте удара лопасти уже разрушился, и односторонняя связь между винтом и льдом, возникшая при ударе, исчезла. Гребной винт получил свободу и, благодаря наличию в валопроводе потенциальной энергии деформации, стремительно раскручивается в сторону, противоположную полученной при ударе, т.е. в сторону вращения всей системы. Скрученный валопровод стремится вновь прийти в состояние равновесия и, если бы этому ничто не препятствовало, то колебания винта и ротора продолжались бы до затухания. Однако система продолжает вращаться, и винт ударяет о лед следующей лопастью, что вызывает повторение описанного процесса. Если промежуток времени между двумя ближайшими ударами гораздо больше, чем длительность приложения ударных сил, то энергия деформации вала высвобождается полностью и средняя скорость вращения гребного винта сохраняется постоянной.

Как показывают результаты испытаний, скорость вращения может снижаться за время, соответствующее двум-трем оборотам гребного винта (1 — 2 сек), до величины в 3 — 4 раза меньше первоначальной.

Вследствие снижения скорости вращения винта удары становятся менее резкими и, строго говоря, уже не могут называться

ударами. Степень динамичности приложения ледовых нагрузок снижается. Процесс соударений гребного винта со льдом переходит в процесс фрезерования.

Таким образом, можно утверждать об отсутствии антагонистического противоречия в рассматриваемых гипотезах. Более того, изложенное свидетельствует об их взаимной связи и праве совместного существования.

Взаимосвязь между ударной гипотезой и гипотезой фрезерования позволяет для разработки норм прочности гребных винтов и валов выбрать любую из них. Однако, более обоснованно остановиться на гипотезе фрезерования льда, как более научно исследованной и распространенной при проектировании гребных винтов. Зарубежные и отечественные исследования и испытания развили и углубили обе гипотезы, многократно доказав их взаимную совместимость. Последнее подтверждается результатами натурных испытаний арктического ледокола, которые были проведены ЦНИИ им. ак. А. Н. Крылова в 1977 г. с целью определения напряжений в лопасти при ее взаимодействии со льдом. Результаты этих испытаний показывают, что дополнительные ледовые напряжения в лопасти обусловлены как процессами фрезерования, так и ударами (1).

В настоящее время на основе физической модели фрезерования В. А. Беляшовым разработана расчетная схема по определению ледовых нагрузок на гребном винте и на его лопастях. Из разработанных методов данная схема наиболее полно учитывает физические процессы, происходящие при взаимодействии лопастей гребных винтов со льдом (7). Эта схема учитывает влияние геометрических характеристик гребного винта и параметров его взаимодействия со льдом (скорость движения судна, обороты гребного винта, глубина врезания в лед) на уровень ледовых нагрузок. Эта расчетная схема также дает возможность определять ударные ледовые нагрузки, которые, как указывалось выше, предшествуют процессу фрезерования. Указанный расчетный метод по определению ледовых нагрузок на гребном винте позволяет рассмотреть процесс их изменения во времени при заданных параметрах взаимодействия лопастей со льдом.

При взаимодействии гребного винта со льдом на режимах фрезерования действие ледового момента сопротивления $M_{\text{л}}$ на гребной вал при постоянной мощности двигателя приводит к снижению частоты вращения гребного винта. Это положение

полностью совпадает с механизмом «ударной» гипотезы. Снижение средней скорости вращения гребного винта n при его взаимодействии со льдом имеет важнейшие эксплуатационные последствия. Уменьшение n приводит к значительному росту ледовых нагрузок, действующих на гребной винт, что необходимо учитывать при оценке надежности лопастей. В качестве примера на рис.3 представлена запись натурных ледовых нагрузок в системе гребной винт — валопровод арктического ледокола на режиме фрезерования льда лопастями гребного винта. Увеличение ледового момента сопротивления $M_n(n)$ при относительно малой мощности двигателя и превышение $M_n(n)$ номинального момента двигателя может привести к остановке вращения гребного винта (заклинке), что резко увеличивает вероятность поломки лопастей.

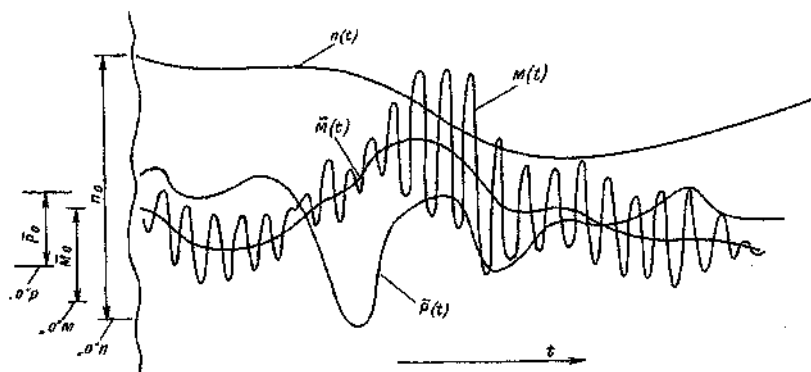


Рис. 3

Процесс изменения нагрузок в системе гребной винт-валопровод арктического ледокола на режиме фрезерования льда лопастями гребного винта.

$n(t)$ — обороты гребного винта; $M(t)$ — крутящий момент на валу;

$\bar{M}(t)$ — средний момент на валу; $\bar{P}(t)$ — средний упор на валу;

$\bar{P}_0, \bar{M}_0, n_0$ — значения $\bar{P}(t), \bar{M}(t), n(t)$ на чистой воде до взаимодействия со льдом; «0» — нули

В результате натурных испытаний ледокола с целью определения напряжений в лопасти при взаимодействии гребного винта со льдом получен важный вывод, что наибольшие напряжения возникают несколько впереди от центра хорды корневого сечения (1). Это обусловлено тем, что ледовая нагрузка на лопасти гребного винта при его взаимодействии со льдом приложена в основном на ее входящей (выходящей) кромке. Поэтому дополнительно к изгибающему лопасть ледовому моменту возникает

значительный скручивающий лопасть момент. Выше указывалось, что появление скручивающего момента приводит к появлению дополнительных касательных и нормальных напряжений в плоском сечении лопасти. Последние обусловлены деформацией плоского сечения. В этом случае в отличие от балочной теории точка максимальных напряжений сдвигается в сторону входящей (выходящей) кромки. Исходя из изложенного, целесообразно для определения прочных размеров лопастей ледоколов и судов активного ледового плавания принять в качестве расчетных ледовых нагрузок ледовый момент, изгибающий лопасть в плоскости наименьшей жесткости и ледовый момент, который скручивает лопасть относительно ее центральной оси.

Наиболее принципиальным и крайне важным оказалось уточнение зависимости ледового момента, возникающего при фрезеровании льдин, от диаметра гребного винта. Исследования показали, что зависимость $M_n(D)$ имеет не линейный характер, как предполагал М.А. Игнатьев и как утверждал В.Я. Ягодкин, а представляет собой квадратичную зависимость $M_n = mD^2$. Большой теоретический вклад в решение этой проблемы взаимодействия лопастей гребных винтов со льдом и в практические предложения по расчетным методам оценки ледовых нагрузок внес А.В. Андрюшин (8). Установлено, что уровень ледовых нагрузок на режимах фрезерования в основном определяется прочностью льда на смятие $f_{см}$, которая является функцией от площади контакта лопасти со льдом s , т.е. имеет место масштабный эффект. Величина $f_{см}$ пропорциональна $1/(s^{0.5})$. В этом случае ледовые силы на гребном винте прямо пропорциональны линейному размеру, а значения моментов ледовых сил пропорциональны квадрату линейного размера. Этот вывод подтверждается результатами последних исследований по механизмам разрушения натурального льда, которые определяют уровень ледовых нагрузок на лопастях гребных винтов на режимах фрезерования [9, 10]. Учитывая принципиальную важность этих результатов для определения ледовых нагрузок является целесообразным продолжить изучение проблемы масштабного фактора.

Частота и уровень ледовых нагрузок, воздействующих на гребные винты ледоколов и судов ледового плавания являются случайными характеристиками, а их вероятностные параметры определяются особенностями корпуса, движительного комплекса и режимами эксплуатации судна. Поэтому обеспечение надежност-

ти гребных винтов из условия усталостной, а также статической прочности требует определения вероятностных параметров ледовых нагрузок. Такая информация может быть получена на основе натурных и модельных самоходных испытаний в ледовом опытном бассейне. Наиболее доступным является второй способ. В настоящее время А.В. Андрушиным разработана методика проведения этих модельных испытаний и метод пересчета значений ледовых нагрузок на гребных винтах, включая их вероятностные характеристики, с модели на натуру.

Удар лопасти о лед плашмя и режим «навала».

При эксплуатации ледоколов и судов активного ледового плавания в тяжелых ледовых условиях наиболее опасными режимами считаются удар лопасти о лед плашмя и режим «навала».

Первый режим может иметь место при несоответствии вращения гребного винта направлению движения судна — судно движется по направлению вперед, а винт вращается на задний ход и наоборот. В этом случае удар от крупной льдины или куска тороса может произойти перпендикулярно плоскости наименьшей жесткости лопасти. Возникновение таких случаев наиболее вероятно при работе ледокола набегам, работе бортовых винтов враздрай. Значения ледовых нагрузок на лопасти гребного винта в таких ситуациях могут быть настолько велики, что приведут к поломке лопасти. Последнее можно иллюстрировать несложными расчетами оценки прочности лопасти гребного винта ледокола применительно к вышеописанным случаям. В качестве примера рассмотрим работу ледокола «Арктика» набегам при форсировании тороса. Масса обломков льда в торосе может составлять 50 т. При скорости ледокола на передний ход $V \sim 3$ м/сек и скорости вращения гребного винта на задний ход $n \cong 1,5$ об/сек величина ледовой силы при ударе лопасти плашмя о край обломка составляет ≈ 1500 т. В этом случае напряжения в корневом сечении лопасти от действия изгибающего момента в несколько раз превышают предел текучести стали 1Х14 НДЛ, из которой изготовлены лопасти гребного винта. Такая ситуация, как показывает опыт натурной эксплуатации, приводит к поломке лопасти. На рис.4 представлена фотография излома корневого сечения поло-

манной в такой ситуации лопасти ледокола «Арктика», который имеет характер мгновенного хрупкого разрушения.

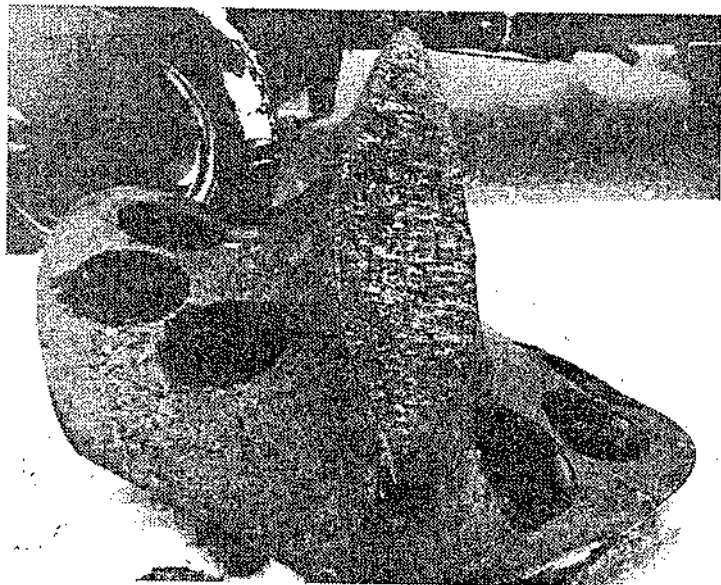


Рис. 4

Хрупкое статическое разрушение лопасти гребного винта ледокола «Арктика»

Второй режим, так называемый «навал», соответствует движению судна во льдах с остановленными винтами. В этом случае ледовые силы, воздействующие на гребной винт при его взаимодействии, например, со смерзшимися кусками тороса, обуславливаются в основном инерционными характеристиками движения ледокола. Ввиду большой его массы, значения ледовых сил достигают таких величин, при которых происходит поломка лопастей. Такие случаи были наиболее характерны для ледоколов, которые оборудованы носовыми гребными винтами.

Опыт натурной эксплуатации показывает, что гарантировать на этих режимах неповреждаемость гребных винтов, спроектированных на основе разработанных в настоящее время классификационных правил, не представляется возможным из-за чрезвычайно высоких уровней осевых ледовых нагрузок, воздействующих на лопасть. Обеспечение в этих случаях достаточной

прочности приведет к резкому ухудшению пропульсивных характеристик движителя за счет увеличения диаметра ступицы и толщины лопастей. Это также потребует проектирования особо прочного вала для соблюдения условия пирамидальной прочности.

Учитывая изложенное, для определения сил, необходимых для расчетов прочных размеров лопасти, представляется целесообразным принять в качестве основного расчетного режима процесс фрезерования льда. В рамках традиционно принятых требований к пропульсивным характеристикам обеспечить достаточную прочность лопастей гребного винта для режимов «навала» и удара лопасти о лед плашмя и дать гарантию, что гребные винты не будут повреждаться, не представляется возможным [3].

Расчетные схемы Правил классификационных обществ для определения прочных размеров лопастей гребных винтов ледоколов и судов активного ледового плавания.

В основу Правил ASPPR, (F-S), ABS, DNV применительно к определению прочных размеров гребных винтов, как указывалось выше, положена расчетная схема М.А.Игнатьева. В указанных Правилах прочные размеры лопастей определяются по балочной теории из условия статической прочности. В качестве нормативной расчетной ледовой нагрузки используется момент сопротивления льда вращению гребного винта $M_{ice} = mD^2$, коэффициент m определяется ледовой категорией судна.

В Правилах ASPPR, ABS, (F-S) прочность лопасти регламентируется на 4-х относительных радиусах: $r = 0,25, 0,35, 0,6, 0,95-1$. Рассмотрим структуру расчетных зависимостей, которые используются в Правилах ABS, (F-S) и ASPPR на примере последних. (Далее будут использоваться обозначения, применяемые в Правилах).

В ASPPR прочные размеры лопастей на $r = 0,25, 0,35, 0,6$ определяются моментом сопротивления цилиндрического сечения. Момент сопротивления по формуле, применяемой в ASPPR для $r = 0,25, 0,35, 0,6$:

$$WT^2 = \frac{a}{S(0,65 + 0,7P)} (dH/RN + emD^2) \quad (1)$$

где W — ширина профиля лопасти, см;

T — максимальная толщина профиля, мм;

S — предельная прочность материала лопасти на растяжение (временное сопротивление), кг/см²;

P — шаговое отношение;
 H — мощность на гребном валу (л.с.);
 R — обороты гребного винта (об/мин);
 N — число лопастей;

a, d, e — коэффициенты, относящиеся к профилю сечения.

Выражение (1) состоит из двух частей. Первая часть (см.(2) определяет размеры лопасти гребного винта, которая предназначена для эксплуатации на чистой воде:

$$(WT^2)_1 = \frac{a}{S(0,65 + 0,7P)} (dH/RN) = \frac{a}{S(0,65 + 0,7P)} d(K_t/K_Q)TD/N, \quad (2)$$

где K_t, K_Q — коэффициенты упора и момента гребного винта на чистой воде;
 T — упор гребного винта на чистой воде.

Вторая часть (см.(3) представляет добавку к первой от действия ледовых сил.

$$(WT^2)_2 = \frac{a}{S(0,65 + 0,7P)} e m D^2 \quad (3)$$

Значение величины $WT^2 = (WT^2)_1 + (WT^2)_2$, которая в конечном счете регламентирует прочность лопасти, в основном, определяется ледовым моментом $M_{ice} = mD^2$. Мощность оказывает небольшое влияние.

В правилах (F-S), ABS для определения прочных размеров лопасти используются аналогичные зависимости.

В правилах DNV (пункт J400) для определения прочных размеров лопасти, исходя из условия статической прочности, предлагается формула

$$F_{ice} = 0,3 \frac{\sigma_n c_r t_r^2}{D[0,9 - (R_R/R)]} 10^{-6} \text{ [кН]} \quad (4)$$

где $\sigma_n = 0,37\sigma_b + 0,6\sigma_y$, н/мм²;
 σ_y — предел текучести материала, н/мм²;
 σ_b — предел прочности материала (временное сопротивление), н/мм²;
 t_r — максимальная толщина профиля на относительном радиусе r ;
 c_r — ширина профиля на относительном радиусе r ;
 D — диаметр гребного винта;
 R_R — радиус корневой сечения лопасти.

Значение F_{ice} определяется через $M_{ice} = mD^2$.

Необходимо отметить, что использование в расчетных формулах Правил ABS, ASPPR, (F-S), DNV в качестве нормативной расчетной ледовой нагрузки для назначения прочных размеров лопастей ледового момента $M_{ice} = mD^2$ вызывает возражение, так как данная величина не является определяющей при решении этой

задачи. Выше было показано, что для корректного ее решения необходимо знание ледового момента, изгибающего лопасть в плоскости наименьшей жесткости и ледового момента, который скручивает лопасть относительно ее центральной оси. Учет скручивающего момента обуславливает появление дополнительных напряжений в лопасти, которые не могут быть рассчитаны по балочной теории.

Требования по Правилам RS являются противоположностью нормам (F-S), ABS, DNV, ASPPR. Если не принимать во внимание откидку лопастей, формула RS для определения прочных размеров лопастей на $r=0,3-0,6$ может быть упрощена до следующей

$$bS^2 = 13,45A^2 kP / z\sigma n = 13,45A^2 k / \sigma (K_Q/K_T) T / zD, \quad (5)$$

где b — ширина спрямленного сечения лопасти, м;
 S — наибольшая толщина профиля, мм;
 P — мощность на гребном валу, кВт;
 z — число лопастей;
 n — частота вращения гребного винта, об/мин;
 A — коэффициент, определяемый шагом винта на расчетном сечении;
 k — коэффициент, который определяется классом судна, мощностью P и расположением вала;
 $\sigma = 0,6R_{m1} + 175$ [МПа];
 R_{m1} — временное сопротивление материала лопасти, МПа.

Выражение (5) RS по структуре соответствует первой части формулы правил ASPPR, ABS, (F-S) (см.(1), которая определяет прочные размеры лопастей для эксплуатации на чистой воде. Прочные размеры при заданном шаговом отношении и n в основном определяются величиной мощности на гребном валу P или значением изгибающего момента от действия гидродинамического упора T . Степень ледового усиления лопасти определяется косвенно через условный коэффициент запаса прочности K , соответствующий ледовой категории судна. Уровень ледовых нагрузок в зависимости от основных геометрических характеристик гребного винта не учитывается.

В настоящее время наметилась тенденция существенного уменьшения мощности современных ледоколов за счет снижения ледового сопротивления путем улучшения обводов корпуса и соответственно ледопроеходимости. Например, использование упущенных обводов может снизить потребляемую мощность на 30% при заданной ледопроеходимости [11]. Снижение мощности на 30% по формуле (5) также снизит необходимую прочность лопасти

на 30% (без учета изменения K) при заданном D , в то время как интенсивность ледовых нагрузок, воздействующих на гребной винт, существенно не изменится, особенно при работе задним ходом.

В Правилах ABS, ASPPR, DNV, (F-S) и RS прочные размеры лопастей гребных винтов определяются из условия только статической прочности. Выше отмечалось, что причиной поломки лопастей ледоколов и судов активного ледового плавания может быть усталостное разрушение. Последнее необходимо учитывать при разработке новых норм для определения прочных размеров гребных винтов ледоколов и судов активного ледового плавания.

Расчетные формулы Правил ABS, ASPPR, DNV и (F-S) для определения толщины t концевых кромок лопастей на радиусе $D/2$ однотипны и являются функциями от диаметра гребного винта и прочности материала. Например, в правилах DNV толщина t определяется выражением

$$t = (m + 2D) \sqrt{490/\sigma_b},$$

где m — коэффициент, определяемый классом судна;
 σ_b — прочность материала на растяжение.

В Правилах RS при определении t прочность материала не учитывается, что является малоприемлемым с точки зрения обоснованного подхода к назначению прочных размеров.

Учитывая изложенное, можно констатировать, что расчетные зависимости Правил ABS, ASPPR, DNV, (F-S), RS для определения прочных размеров лопастей ледокольных судов усиленных ледовых классов не соответствуют современным представлениям, на которые должны быть ориентированы современные нормы прочности. Для ледоколов и судов активных ледовых классов в основу разработки норм прочности лопастей гребных винтов должны быть положены ледовые силы и моменты, которые реально определяют соответствующие прочные размеры. Определение прочных размеров должно осуществляться из условий усталостной и статической прочности.

В таблице 1 представлено сравнение требований Правил классификационных обществ ABS, ASPPR, DNV и методики М.А. Игнатьева к величине расчетной ледовой нагрузки $M_{ice} \sim D^2$ (момент сопротивления льда вращению гребного винта) на гребной винт, которая используется при определении прочных размеров

его лопастей. Сравнение выполнено для арктических ледоколов «Арктика», «Polar Star», субарктического ледокола «Мудьюг» и СЛП СА-15 («Норильск»). Сопоставление ледовых классов для различных Правил с целью сравнительного анализа выполнено на основе тяжести ледовых эксплуатационных условий. Как видно из таблицы 1, значения M_{ice} , определенное по различным правилам, могут отличаться в 2 раза.

Таблица 1

Сравнение результатов расчетов по требованиям классификационных обществ к величине расчетной ледовой нагрузки M_{ice}

Судно	Классификация по существующим Правилам				Диаметр гр. винта	Мощность	Ледовый момент сопротивления льда вращению гребного винта $M_{ice}[TM]$			
	ABS	ASPPR	RS	DNV			ABS	ASPPR	DNV	Игнатьев
«Арктика»	A5	10	ЛП1	Polar	5,7	3×18666	285	109	129	137
«Polar Star»	A5	10	ЛП1	Polar	4,7	3×14912	193	74	88	110
«Мудьюг»	A3	6	ЛЛЗ	ICE-15	4	2×4600	48,6	47	48	80
СА — 15	A3	3	УЛА	Polar	5,6	15400	158	67	100	125

На рис. 5 для ледокола «Арктика» представлены требования к прочным размерам лопасти гребного винта в соответствии с Правилами ABS, ASPPR, RS и методикой М.А.Игнатьева. На этом же рисунке также нанесены прочные размеры действительных лопастей. Из рис.5 видно, что правила ABS определяют наиболее крупные поперечные сечения лопастей. Прочные размеры действительных лопастей гораздо меньше требуемых ABS. Положительный опыт их эксплуатации свидетельствует, что Правила ABS имеют чрезмерные запасы по прочности. Наименее жесткие требования налагаются методикой М.А.Игнатьева и Правилами ASPPR. Правила RS лежат между ASPPR и ABS. Можно видеть, что значения $WT^2(bs^2)$, определенные в соответствии с Правилами одних классификационных обществ (ABS), отличаются от аналогичных значений, вычисленных по другим Правилам (ASPPR, RS), в 2-3 раза. Аналогичные результаты были получены в работах различных исследователей.

Таким образом, имеются значительные расхождения в требованиях классификационных обществ разных стран к прочным размерам гребных винтов ледоколов и судов активного ледового

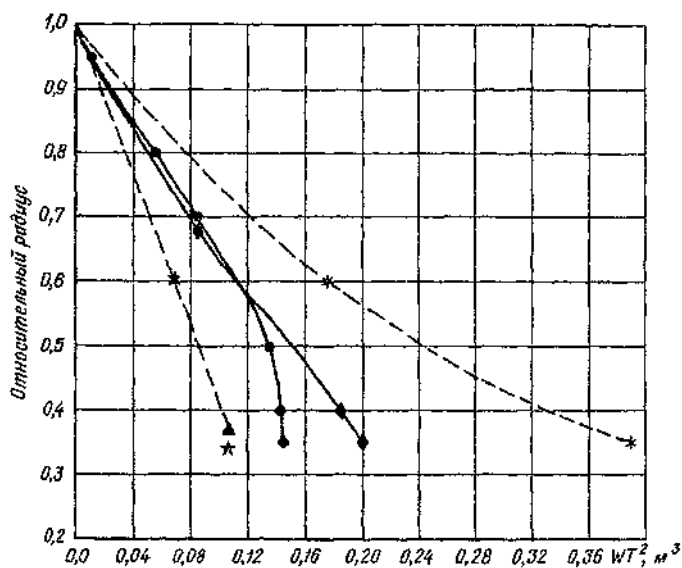


Рис. 5

Прочные размеры лопасти гребного винта ледокола типа «Арктика» в соответствии с классификационными правилами ABS, ASPPR, RS и методикой Игнатьева:

* — ABS; ◆ — RS; ★ — ASPPR; ▲ — Игнатьев; ● — действительная лопасть

плавания. Поэтому назрела необходимость выработать единые комплексные, научно обоснованные нормативы прочности гребных винтов, взаимодействующих со льдом, в основу которых будут положены современные знания о характере этого взаимодействия.

Необходимо отметить, что в настоящее время ведутся активные работы, направленные на ревизию Правил ASPPR в части прочных размеров элементов пропульсивных комплексов, в том числе гребных винтов. Работа осуществляется на базе совместной научно-исследовательской Канадско-Финской программы (Joint Research Project Arrangement-JRPA#6) по созданию методов расчета ледовых нагрузок на гребные винты. Выполнение программы JRPA позволит также гармонизировать Правила ASPPR и (F-S) в части разделов, которые регламентируют ледовые усиления гребных винтов [12].

Выводы и рекомендации для разработки норм прочности гребных винтов ледоколов и судов активного ледового плавания.

Для ледоколов и судов активного ледового плавания нормы, регламентирующие прочные размеры гребных винтов, должны отражать реальные физические явления, происходящие при эксплуатации, и в первую очередь — процессы взаимодействия гребных винтов со льдом.

Существующие требования Регистра к прочным размерам гребных винтов ледоколов и судов активного ледового плавания разработаны на основе статической прочности и воздействия на лопасть изгибающего момента только от гидродинамического упора. Необходимое увеличение толщины лопастей для работы гребных винтов во льдах учитывается в форме эмпирических коэффициентов запаса прочности. Такой подход не соответствует современным представлениям о путях создания норм прочности для лопастей гребных винтов ледоколов и судов ледового плавания. Поэтому требуется разработка новых требований Регистра для определения прочных размеров гребных винтов ледокольных судов, которые опирались бы на реальные физические процессы и учитывали современные достижения науки и практики в области проектирования и эксплуатации ледоколов и судов ледового плавания. Такие требования в настоящее время разрабатываются.

В основу этих разработок, которые завершатся предложениями новых норм прочности гребных винтов для ледокольных судов, положены ледовые нагрузки, которые возникают при взаимодействии лопастей со льдом. Расчетные ледовые силы и моменты на гребном винте определяются в зависимости от основных геометрических характеристик гребного винта. Для определения прочных размеров лопастей осуществляется учет как изгибающего, так и скручивающего лопасть ледовых моментов.

В основу расчетной схемы ледовых нагрузок для определения прочных размеров лопастей гребных винтов положены физические процессы, которые соответствуют ударам кромки лопасти о лед и режимам резания льда лопастями. Современные исследования показали, что эти две физические модели взаимно совместимы и могут быть рассмотрены в рамках единой теории фрезерования льда лопастями гребных винтов. Теория фрезеро-

вания льда дает возможность вычисления ледовых нагрузок, возникающих как при ударе обломка льда о кромку лопасти, так и на режиме прорезания крупных льдин.

Прочные размеры лопастей гребных винтов ледоколов и судов активного ледового плавания определяются из условия усталостной и статической прочности.

При эксплуатации ледоколов и судов активного ледового плавания во льдах наиболее опасные ситуации с точки зрения возможности поломки гребного винта возникают при несоответствии направления его вращения направлению движения судна или при движении судна с остановленными винтами. При традиционных требованиях к пропульсивным характеристикам обеспечить достаточную прочность гребных винтов для этих режимов и дать гарантию, что они не будут повреждаться, не представляется возможным. В этих случаях безопасность эксплуатации судна может быть обеспечена за счет минимизации возникновения подобных ситуаций. Для этого необходима разработка подробных инструкций для судоводительского состава ледокольных судов. Такая инструкция может быть разработана под руководством Регистра в плане МКУБ.

Список литературы

1. Алексеев Ю.Н., Беляшов В.А., Шапов В.С. Исследование напряжений в лопасти гребного винта ледокола в натурных условиях//Вопросы судостроения. Сер. «Проектирование судов». Вып.19, 1978. С.30-37.
2. Бискуп Б.А., Терлецкий Б.М., Никитин М.Н., Попов С.И. Прочность гребных винтов. Л.: Судостроение. 1973. С.161.
3. Игнатъев М.А. Гребные винты судов ледового плавания. Л.: Судостроение. 1966 г. С.113.
4. Langrock D.G., Wuehrer W., Vassilopoulos L. — The Performance of controllable pitch propellers on the U.S. Coast Guard Polar Class icebreakers. — Proceedings, Sixth Ship Technology and Research (Star) Symposium, Ottawa Ontario, June 17-19, 1981, pp.171-191.
5. Яконовский С.В. Метод расчета прочности ледовых гребных винтов. Научно-технический сборник НТО Судпрома. 1967. №2.
6. Яконовский С.В. Внешние силы, действующие на лопасть гребного винта при работе во льдах и их зависимость от геометрических и кинематических параметров винта. Материалы по обмену производственно-техническим опытом. Вып.8. Л.: ЛБНТОВТ. 1969.
7. Belijashov V.A. Method for calculating ice loads encountered by propeller blades. — The 12 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC-93) 17-20 August 1993, Hamburg, Proceedings Volume 2, pp. 359-368.
8. Андришин А.В. Отработка движительно-рулевых комплексов судов ледового плавания и ледоколов по результатам экспериментальных исследований. С-Петербург, СПбГМТУ, 1995. С.254.

9. Frederking R. Effect of Scale on the Indentation Resistance of Ice — The 12 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC-93) 17-20 August 1993, Hamburg, Proceedings Volume 1, pp. 23-37.

10. Brian Veith Results of ice cutting experiments with cutting tools representing propeller blade section. — IAHR ice Symposium, Trondheim, Norway, 1994, pp.886-895.

11. Enkvist E. Model and full-scale Tests with an innovative icebreaker Bow. — SNAME Transactions, Vol.94, 1986, pp.325-355.

12. Examination of «TYPE» ship machinery requirements for the Arctic Pollution Prevention Regulations (ASPPR) — Final report TP"125277, Fleet Technology Limited, March 1995, Submitted to: Canadian Coast Guard Northern.

ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ТЕПЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Наличие объективных данных о параметрах, характеризующих тепловую напряженность деталей цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) в эксплуатационных условиях, является важным звеном при решении задач повышения надежности дизеля. Существующие методы контроля не предусматривают, как правило, непосредственного измерения составляющих тепловой напряженности — температур и температурных напряжений в стенках деталей ЦПГ.

Оценка по косвенным показателям таким, как температура охлаждающей жидкости, выпускных газов, среднее индикаторное давление и положение указателя подачи топлива на ряде режимов (обрастание корпуса, ухудшение состояния моря, работа во льдах, повреждения гребного винта, буксировка воя и т.д.) не позволяет объективно характеризовать тепловую напряженность дизеля.

Отсутствие объективного контроля уровня тепловой напряженности может явиться причиной преждевременной потери работоспособности деталей ЦПГ.

Так, например, дизели К 5 SZ 70/125 В не имеют индикаторного привода и контроль за величиной нагрузки рекомендуется проводить по диаграмме $N_e = f(n, S_{тр.})$, разработанной заводом-строителем, с использованием значений относительной мощности. Такой способ контроля требует оценки ряда погрешностей, связанных с соответствием действительного положения реек топливных насосов их положению на момент стендовых испытаний, технического состояния топливной аппаратуры и ее регулировки. Кроме того, по мере ухудшения пропульсивных качеств комплекса «корпус-винт-дизель» изменяется соотношение между мощностью, средним индикаторным давлением и параметрами тепловой напряженности.

Практика показала (это подтверждается результатами обработки данных в течение длительных периодов эксплуатации судов), что с утяжелением винта превышение относительного уровня тепловой напряженности по сравнению с соответст-

вующей относительной мощностью доходит до 20%, т.е. контроль уровня тепловой напряженности недостаточно эффективен.

Расчетные и экспериментальные исследования показали, что на режимах, близких к номинальному, существует устойчивая взаимосвязь между изменением среднего удельного теплового потока q_{cp} , максимальных рабочих температур t_{max} и температурных напряжений σ_t в деталях ЦПГ

$$\frac{q_{cp.1}}{q_{cp.0}} \approx \frac{t_{max1}}{t_{max0}} \approx \frac{\sigma_{t1}}{\sigma_{t0}},$$

где индексы «0» и «1» обозначают базовый и рассматриваемый режимы работы дизеля, соответственно.

Результаты многократных испытаний подтверждают, что приближенное выражение для q_{cp} может быть представлено в следующем виде

$$q_{cp.} = K_1 \frac{q_{ц} T_s \sqrt{n}}{\sqrt[3]{p_s}} = K_2 \frac{T_K T_s \sqrt{n}}{\sqrt[3]{p_s}} = K_3 \frac{p_i T_s \sqrt{n}}{\sqrt[3]{p_s}} = K_4 \frac{S_{тр.} T_s \sqrt{n}}{\sqrt[3]{p_s}},$$

где K_1 — постоянные (при сравнительной оценке определять их нет необходимости);
 T_s — температура продувочного воздуха в ресивере, К;
 p_s — давление продувочного воздуха в ресивере, МПа;
 $a = 2-3$ — величина, зависящая от характеристик системы наддува;
 n — частота вращения дизеля, об/мин;
 $q_{ц}$ — цикловая подача топлива, г/цикл;
 T_K — крутящий момент на валу, Мнм;
 p_i — среднее индикаторное давление, МПа;
 $S_{тр.}$ — индекс топливной рейки.

Относительный показатель, характеризующий тепловую напряженность на заданном режиме работы дизеля, имеет вид

$$K_t = \frac{q_{cp.i}}{q_{cp.0}},$$

где $q_{cp.0}$ — тепловой поток на номинальном рабочем режиме дизеля; подсчитывается по данным испытаний на заводском стенде.

Все параметры, входящие в выражение для K_t , контролируются в процессе эксплуатации.

Во всех выражениях для определения величины в качестве общих членов входят параметры продувочного воздуха p_s и T_s , частота вращения дизеля n . Кроме того, в зависимости от технических возможностей, могут быть использованы такие параметры, как $q_{ц}$, T_K , p_i , $S_{тр.}$

В условиях эксплуатации возможно определять величины цикловой подачи топлива $q_{ц}$ на основе периодических замеров расхода

топлива с помощью мерного бака; однако, при создании системы непрерывного контроля параметр g_d использован быть не может.

Оптимальным параметром следует признать значение крутящего момента на валу T_K , увеличивается информативность, позволяя кроме уровня тепловой напряженности контролировать эффективную мощность дизеля. Особый интерес представляет указанный вариант для установок, в которых не предусмотрен контроль среднего индикаторного давления p_i . Реализация указанного варианта связана с необходимостью замера деформации или угла поворота вала.

Что касается использования индекса топливной рейки (указателя нагрузки) $S_{тр}$, следует иметь в виду, что этот показатель может меняться при регулировке топливной аппаратуры. При замере давления продувочного воздуха p_s необходимо учитывать, что на ряде судов (например, типа «Астрахань») показания манометра в ЦПУ не учитывают потери давления в воздушном тракте. Более точные показания можно получить, используя манометр, установленный непосредственно у воздушного ресивера.

В качестве примеров на рис.1 приведены зависимости относительного изменения максимальных температур и температурных напряжений от $q_{ср}$ в деталях ЦПГ при работе по винтовой характеристике для ряда судовых дизелей, полученные в результате обработки данных измерений.

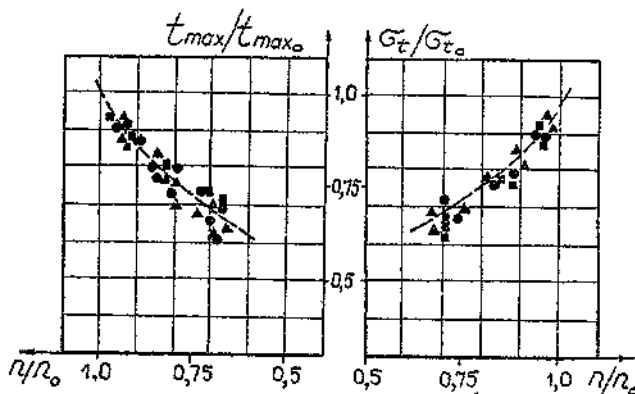


Рис. 1

Относительное изменение максимальных температур t_{max}/t_{max0} и температурных напряжений σ/σ_0 в сечениях поршней (■), цилиндрических крышек (●) и втулок (▲) при работе по винтовой характеристике;
 --- относительное изменение среднего удельного теплового потока $q_{ср}/q_{ср0}$

На рис.2 даны соотношения между изменением максимальных температур в деталях ЦПГ ряда дизелей ДКРН и относительным изменением значения K_t .

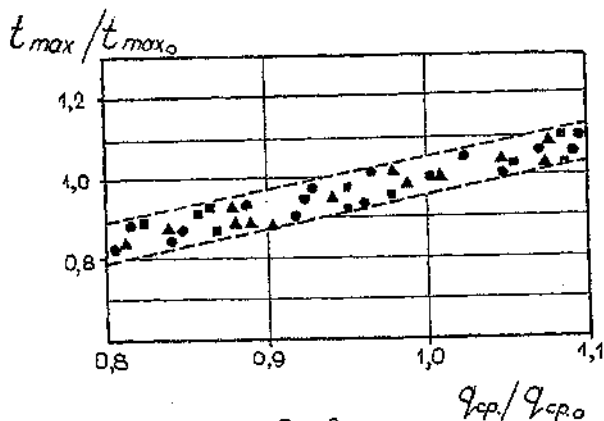


Рис. 2

Соотношение между относительным изменением среднего теплового потока q_{cp}/q_{cp_0} и максимальных температур t_{max}/t_{max_0} в сечениях поршней ($\blacksquare$), цилиндрических крышек ($\bullet$) и втулок ($\blacktriangle$) при работе дизелей типа ДКРН на заводском стенде

На рис.3 представлены результаты относительного изменения параметров, характеризующих тепловую напряженность двигателя Зульцер 6RD-56 на режимах работы при $n = const$ во время циркуляции судна.

Таким образом, изменение коэффициента K_t объективно отражает характер изменения параметров тепловой напряженности деталей ЦПГ на эксплуатационных режимах.

Реализация контроля уровня тепловой напряженности осуществляется на судах с помощью удобных для практического использования номограмм.

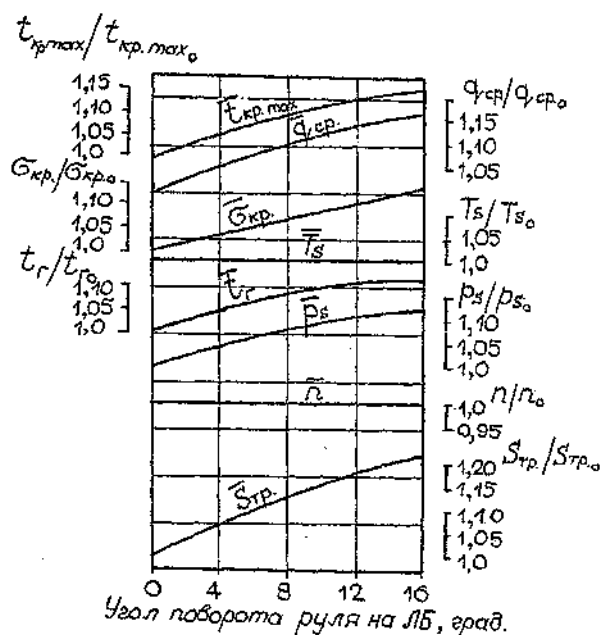


Рис. 3

Относительное изменение параметров теплонапряженности двигателя Зульцер 6 RD-56 при перекладке руля на левый борт ($n \approx const$).

Целесообразной представляется разработка аппаратуры для непрерывного контроля относительного уровня тепловой напряженности с сигнальным устройством в случае перегрузки.

УДК 614.841.34 : 629.1221.14

Н.А.Озеров, Л.Т.Танклевский

АЛЬТЕРНАТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОФФЕРДАМА КАК ПЕРЕБОРКИ ТИПА А-60 НА СУДАХ СМЕШАННОГО (РЕКА-МОРЕ) ПЛАВАНИЯ

В настоящее время из-за трудностей, возникающих при перевозке опасных грузов из внутренних районов России за рубеж наземным транспортом (железнодорожным или автомобильным), и в связи с пересечением многочисленных границ между пунктами отправки и назначения, большое внимание стало уделяться водному транспорту, а именно — судам смешанного (река-море) плавания.

На международных перевозках такие суда должны отвечать требованиям Международной конвенции по охране человеческой жизни на море СОЛАС-74. В соответствии с ними (правило 54.2.8) для судов, перевозящих опасные грузы, необходимо, чтобы переборки, образующие границы между грузовыми помещениями и машинными помещениями категории А, были изолированы по Стандарту «А-60», кроме случаев, когда опасные грузы укладываются на расстоянии не менее 3 м по горизонтали от таких переборок.

Суда смешанного плавания строились, в основном, для использования в границах бывшего Советского Союза и стран социалистического лагеря. Отделения машинных помещений от грузовых огнестойкими переборками типа А-60 в них не предусматривалось. На некоторых из них между такими помещениями размещались коффердамы, которые имели следующие типовые размеры:

ширина — $13,0 \div 15,0$ м;

высота — $6,0 \div 8,0$ м;

длина — $0,5 \div 1,5$ м.

Проведенные исследования прогреваемости коффердамов при горении керосина в моделях смежного помещения показали, что независимо от ширины коффердама, нормируемая для огнестойких конструкций температура на необогреваемой стороне коффердама, достигается через 10 — 12 минут, при средней температуре в помещении 500 — 600° С.

Увеличение температуры среды с увеличением площади горения приводит и к увеличению температуры на переборке и, как следствие, к повышению температуры на внешней стороне коффердама и достижению нормируемых температур за более короткие промежутки времени.

В то же время требование правила 54.2.8 Конвенции об укладке опасного груза на расстоянии 3 м от неизолированной переборки и эквивалентности этого мероприятия защитным свойствам переборки А-60 не обосновано, поскольку образующая воздушная полость между переборкой машинного отделения и грузом представляет собой тот же коффердам. В случае пожара в машинном отделении, при превышении температуры — 300°С на переборке — воздушная полость не препятствует передаче тепла излучением и опасная для перевозимого груза температура будет достигнута на его поверхности за более короткий промежуток времени, чем это могло бы быть при изолированной переборке.

Это обстоятельство может привести к катастрофическим последствиям. Например, при перевозке аммиачной селитры нагрев ее выше 270°С приведет к взрыву [1].

В связи с вышеизложенным необходима изоляция коффердама со стороны вероятного огневого воздействия.

Классификация судовых противопожарных конструкций осуществляется по результатам испытаний на огнестойкость в соответствии с требованиями Резолюции ИМО А.517(13) и новой А.754(18). Температурный режим испытаний по этим Резолюциям аналогичен Стандарту ИСО-834, который применяется при испытаниях строительных конструкций. Такие же требования изложены в принятом в России Стандарте СЭВ 1000-78. Этот температурный режим, в отдельные моменты испытаний, соответствует следующим значениям превышения средней температуры над начальной:

5 мин — 556°С

10 мин — 659°С

15 мин — 718°С

30 мин — 821°C,

60 мин — 925°C.

К настоящему времени в нашей стране испытано большое количество судовых и строительных конструкций на огнестойкость. Допущенные к применению на судах противопожарные конструкции судов с металлическим корпусом представлены в «Альбоме типовых конструкций. 300-10.048 (ЦКБ Балтсудпроект)», а строительные — в «Пособии по определению пределов огнестойкости конструкций ...» [2].

Как следует из п.2.6 «Пособия...», пределы огнестойкости ограждающих конструкций с воздушной прослойкой в среднем на 10 % выше пределов огнестойкости тех же конструкций, но без воздушной прослойки: эффективность воздушной прослойки тем выше, чем больше она удалена от нагреваемой плоскости; при замкнутых воздушных прослойках их толщина не влияет на предел огнестойкости.

По «Альбому типовых конструкций» можно выбрать конструкции типа А-60 с односторонней минерало-ватной изоляцией или из базальтового волокна толщиной 80 — 100 мм, без изоляции набора. (Допуск Регистра №№752.6.1.1-С и 694-6.1.1-С).

По «Инструкции по расчету пределов огнестойкости судовых конструкций» [3] были проведены расчеты пределов огнестойкости стальных конструкций с различной негорючей изоляцией при нагреве со стороны стальной основы толщиной 5 м. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчетов пределов огнестойкости переборки типа А-60

Прогрев до нормируемого превышения температуры 139°C	Расчетная толщина изоляции, мм		
	минераловатные плиты	керамзитобетон	базальтовое волокно
	48	54	40

Таблица 2

Рекомендуемые толщины изоляции на переборке между машинным отделением и коффердамом

№№ п/п	Наименование материала изоляции	Минимальная толщина изоляции на переборке, мм	
		Расчет	Испытание
1.	Керамзитобетон	54	48
2.	Минераловатные плиты	48	80
3.	Базальтовое волокно (маты БЗМ, АТМ)	40	100

Как видно из таблицы, результаты расчетов совпадают с результатами испытаний только в случае применения в качестве изоляции керамзитобетона. Это объясняется тем, что в отличие от минераловатных плит и матов БЗМ и АТМ керамзитобетон не меняет своей первоначальной толщины при монтаже изоляции. В таблице 2 приведена минимальная рекомендуемая толщина изоляции на переборке между машинным отделением и коффердамом, обеспечивающая конструкцию типа А-60.

Выводы

1. Коффердам без изоляции ограждающих переборок не эквивалентен противопожарным конструкциям типа А-60.

2. Требование правила 54.2.8 Конвенции СОЛАС-74 о минимальном расстоянии от переборки до опасного груза в 3 м должно быть пересмотрено с учетом опасности груза.

3. Для создания противопожарной конструкции типа А-60 следует применять изоляционные материалы с рекомендуемыми толщинами по таблице 2.

4. Увеличение толщины воздушной прослойки в коффердаме, с изоляцией на переборке, примыкающей к машинному отделению, увеличивает предел огнестойкости коффердама.

5. Предпочтительнее устанавливать изоляцию на переборку коффердама, примыкающую к машинному отделению, но может быть осуществлен монтаж изоляции и на переборку, граничащую с трюмом.

Список литературы

1. Химическая энциклопедия. В 5 т. А - Дарзана /Редколлегия: Кнунянц И.Л. (гл.ред.) и др. /т. 1. М.: Сов.энцикл., 1988.

2. Пособие по определению пределов огнестойкости конструкций, пределов распространения огня по конструкции и групп возгораемости материалов. М.: Стройиздат, 1985.

3. Инструкция по расчету пределов огнестойкости конструкций. М.: ВНИИПО МВД РФ, 1967.

УДК 347.799.13 : 66.098

Л.Д. Барнинова, Л.С. Кейзер, Г.А. Лемеш

ВЛИЯНИЕ СУДОХОДСТВА НА ИЗМЕНЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ

За последние 20 лет интенсивность жизни в Мировом океане уменьшилась на 30—50%. Факты загрязнения с судов общеизвестны. Наряду с этим морские суда еще являются и потенциальными переносчиками различных видов микроорганизмов, гидробионтов, патогенных микробов, имеющих в одних широтах и чуждых для других. Попадая в новые условия, благоприятные для их развития и размножения (температура, соленость воды, солнечная инсоляция), они начинают очень активно прогрессировать, изменяют сложившийся видовой состав, наносят вред высшим видам морских обитателей и передаются по пищевым цепям на более высокие уровни вплоть до человека, вызывая вспышки различного рода заболеваний и эпидемий.

Напомним, что качество морской воды определяется гидро-биологическими показателями: наличием в ней зообентоса, перифитона, зоопланктона и фитопланктона. Под зообентосом следует понимать совокупность животных, обитающих на дне водоемов (губки, кишечнорастворимые, многощетинковые черви, моллюски, ракообразные и др.). Перифитон — это поселение организмов на подводных частях судов. К ним относятся усногие ракообразные, двустворчатые моллюски, губки, трубчатые, водоросли и др. Зоопланктон — это совокупность населяющих водную толщу животных, пассивно переносимых течением. К ним относятся многочисленные простейшие, кишечнорастворимые, крылоногие моллюски, яйца и личинки различных беспозвоночных и

др. Фитопланктон — это совокупность растительных организмов (диатомовые, водоросли, перидинии и др.).

Очевидно, что суда могут переносить эти составляющие морской среды с непредсказуемыми последствиями для экосистем различных районов плавания. На изменение видового разнообразия влияют и различного рода отходы, сбрасываемые с судов при их нормальной эксплуатации и тем более — при авариях.

Особая роль в загрязнении морских вод принадлежит нефте-содержащим отходам. Пленка разлитой нефти на поверхности воды препятствует кислородному обмену, уничтожая тем самым все живое. Скоагулированные частицы нефти осаждаются на поверхности донной флоры, препятствуя ее росту. При этом наблюдается усиленный рост придонных бактерий, питающихся углеводородами. Сложившиеся экосистемы уничтожаются или меняются. Этому способствует применение для защиты днищ судов антикоррозионных покрытий, содержащих токсичные элементы, действующие смертоносно на организмы-обрастатели, одновременно отравляющие других обитателей моря в широком коридоре плавания судна.

Следовательно, морские суда действуют разнопланово на морскую биоту в различных направлениях: уничтожая ее, загрязняя и делая неполноценной, перевоза ее составляющие из одной части света в другую, способствуя переносу различных инфекций и заболеваний.

В настоящее время, в связи с ростом танкерного флота, встают вопросы, связанные не только с предотвращением загрязнений водных объектов нефтью с судов, но и со сбросом неочищенных балластных вод. В этих водах может содержаться большое число патогенной микрофлоры и других низших и высших организмов и растений. Поэтому необходимо решать вопросы, связанные с контролем качества сбрасываемых балластных вод и с недопустимостью их сброса в воды, тем более — в прибрежной зоне.

Последствия от загрязнений и переносов могут быть как краткосрочными, так и долговременными. Загрязнения, связанные частично и со сбросом балластных вод в прибрежных зонах, могут относиться к тому и другому варианту. К тому же, здесь возможно и проявление эффекта синергизма, связанного с усилением совместного воздействия двух или более составляющих. Например, с повышением температуры воздействие многих негативных факторов усиливается. Некоторые загрязните-

ли, напротив, имеют тенденцию к взаимной нейтрализации. Появление других загрязнителей может привести к тому, что сильные патогенные вещества будут выпадать в осадок или концентрироваться на взвешенных частицах, что и наблюдается повсеместно.

Все это говорит о том, что уровень загрязнений морской среды неуклонно возрастает. Можно перечислить основные виды антропогенных воздействий на морскую среду, в том числе и от водного транспорта: накопление химических веществ в биоте, микробиологическое загрязнение прибрежных районов, снижение биологической продуктивности, прогрессирующая эвтрофикация, возникновение мутагенеза и канцерогенеза, нарушение устойчивости экосистем.

Последствия перевозки различных животных и растений водным транспортом сказываются на изменении биоценозов целых стран и континентов. Например, бедствием для природы Австралии оказалась перевозка морским транспортом кроликов. Попав в благоприятные природные условия, они размножились и начали уничтожать сельскохозяйственные культуры. Только массовый их отстрел помог спасти сельское хозяйство континента от полного уничтожения.

Кроме специально перевозимых живых грузов, водным транспортом случайно перемещаются различные биологические виды. Так, австралийская щитовка, насекомое, перевезенное в Северную Америку и Средиземноморье, стало причиной опустошения фруктовых плантаций этих районов.

В последние годы беспокойство вызывает резкий рост массы гребневика, завезенного в бассейн Черного моря, по всей видимости, с балластными водами из Северной Америки. Этот «родственник» медузы в огромных масштабах уничтожает планктон, что ведет к сокращению запасов ценных видов рыб. В Лужской губе сильно размножился завезенный туда на днищах судов моллюск-дрейссена, который наносит вред различным подводным сооружениям и, питаясь планктоном, резко снижает его количество, чем нарушает биологическое равновесие водной экосистемы.

В настоящее время, наряду с резким снижением продуктивности морей, все чаще возникают вспышки заболеваний, связанных с плохим качеством воды и накоплением вредных веществ в гидробионтах. Это болезнь Миномата, различные сальмонеллезы и шистосоматозы, тиф, холера и другие заболевания.

Из краткого изложения экологических проблем, связанных с водным транспортом, следует сделать вывод о том, что в настоящее время необходимо подходить к решению этих проблем комплексно с переходом от наблюдательной и контролирующей функции к профилактике возможных последствий на основе введения в отрасли вневедомственной комплексной поэтапной экологической экспертизы, разработанной институтом Проблем транспорта Российской Академии наук, актов нормативного и правового регулирования, внесением дополнений к существующим Международным конвенциям и Правилам Российского Морского Регистра Судоходства и, в частности, по сбросу неочищенных балластных вод в прибрежных зонах.

Список литературы

1. Израэль Ю.А., Цыбань А.В. Антропогенная экология океана. Вестник АН СССР, 1988, №9.
2. Патин С.А. Влияние загрязнения на биологические ресурсы и продуктивность Мирового океана. М.: Мысль, 1989.
3. Хефлинг Г. Тревога в 2000-м году. М.: Мысль, 1990.
4. Уильямс Д. Основы контроля морских загрязнений. Л.: Судостроение, 1984.
5. Александров В. Осторожно, гребневик. Водный транспорт, 7.06.1990.
6. Кейзер Л.С., Барина Л.Д. Экологические проблемы морского транспорта // Морской флот, 1990, №10.
7. Барина Л.Д., Кейзер Л.С. Методологические подходы по решению экологических проблем транспорта. Транспорт: наука, техника, управление. АН СССР, 1990. №10.

Л.Н.Парфенов, С.В.Камкин, А.С.Пунда

К ПРОБЛЕМЕ ОГРАНИЧЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ЭМИССИИ ВРЕДНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВЫПУСКНЫХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Введение

В связи с возрастающими темпами судоходства и загрязнения моря и атмосферы выбросами с судов защита окружающей среды приобретает важное значение.

В дополнение к действующей Конвенции МАРПОЛ 73/78 Международная морская организация (ИМО) в 1995 г. разработала Приложение № 6, в котором предусматривается ограничение эмиссии вредных компонентов NO_x , SO_x в выпускных газах главных и вспомогательных судовых дизелей. В настоящее время в стадии согласования с государствами-членами ИМО находятся и вопросы организации контроля за выпускными газами дизелей, поставляемых на суда и находящихся в эксплуатации.

Ужесточение требований к чистоте выхлопа энергетических установок в определенной степени касается и классификационных обществ, осуществляющих наблюдение за постройкой и эксплуатацией судов.

В этом отношении показательна инициатива DNV, разработавшего в 1990 г. систему безопасности и защиты окружающей среды (Safety, Environmental Protection). Судоводные компании, работающие под наблюдением DNV, получают сертификат, удостоверяющий обеспечение безопасности и защиты окружающей среды в соответствии с системой SEP.

Состав отработавших газов судовых дизелей

При сжигании углеводородных топлив в судовых дизелях наряду с безвредными для окружающей среды компонентами отработавших газов (ОГ) — кислородом, азотом и водяным паром,

в атмосферу выбрасываются также экологически вредные компоненты. Типичный состав ОГ судового малооборотного дизеля, работающего на режиме 100%-ной нагрузки, приведен на рис.1. Слева показано: какие химические вещества вводятся в цилиндр с топливом, воздухом и смазочным маслом, а справа — какие выбрасываются в атмосферу в результате осуществления рабочих процессов в цилиндрах. Безвредные или нейтральные (CO_2) вещества в сумме составляют 99,75% объема ОГ. Остальные 0,25% (или 2500 частей на миллион — ppm) включают в себя окислы азота NO_x , серы SO_x , окись углерода CO, углеводороды C_xH_x и твердые частицы (сажа, зола). Содержание частиц принято измерять в миллиграммах на кубический метр газа в нормальных условиях (мг/м^3).

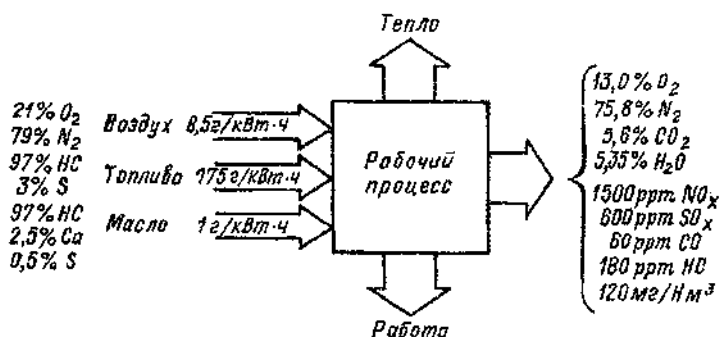


Рис. 1
Типичный состав ОГ судового малооборотного дизеля

Окись углерода, сажа и углеводороды являются результатом полного сгорания топлива. В связи с большим избытком воздуха в судовых дизелях их количество невелико по сравнению с высокооборотными автотракторными дизелями и особенно — бензиновыми карбюраторными двигателями. Однако некоторые углеводороды, например, бензапирен, обладают сильными канцерогенными свойствами. Поэтому, несмотря на малую концентрацию, проблема снижения выброса этих компонентов также актуальна.

Такие химические вещества, как NO_x , CO, SO_x и др., попадая в атмосферу, нарушают ее естественный экологический баланс за счет образования слабых кислот.

В таблице приведены диапазоны значений выброса вредных компонентов с ОГ дизелей различного класса, указаны их предельно допустимые концентрации (ПДК) и характер воздействия на человека (данные ИМО).

Таблица

Токсичные примеси в выпускных газах дизелей

Группа	Примеси	ПДК	Концентрация примеси	Концентрация, % и воздействие на человека
1	Азот N_2 , кислород O_2 , водяной пар H_2O , углекислый газ CO_2	—	—	—
2	Оксид углерода CO	0,0008	0,005 — 0,5	0,01 — хронич. отравление при длительном воздействии; 0,05 — слабое отравление, через 1 час; 1,0 — потеря сознания после нескольких вдохов
3	Оксиды азота: NO, NO_2	0,00009 в пересчете на N_2O_5	0,004 — 0,2	0,0013 — раздражение слизист. оболочек носа и глаз 0,004 — 0,008 — отек легких
4	Углеводородные соединения C_xH_y	—	0,013 — 0,047	раздражение слизист. оболочек, образование опухолей
5	Альдегиды: акролеин CH_2CHCHO (жидкость), формальдегид (газ), HCOH	0,00001	0,001 — 0,004	0,0005 — труднопереносимо 0,007 — раздражение дыхательных путей и глаз
6	Сажа C	0,000038	0,01 — 0,5 мг/л	Загрязнение воздуха и воды, ухудшение видимости
7	Сернистый ангидрид	0,000012	0,003 — 0,05	0,0017 — раздражение глаз 0,004 — отравление через 3 минуты

Доля NO_x и SO_x в ОГ составляет более 80% от объема всех вредных выбросов, поэтому задача снижения эмиссии этих компонентов составляет стержень проблемы создания «экологически чистых» судовых дизелей. Содержание окислов серы в ОГ обусловлено наличием серы в топливе. При окислении серы в камере сгорания дизеля образуются SO_2 и SO_3 , причем преимущественно SO_2 (соотношение 15:1). Образование окислов азота

в камере сгорания дизеля обусловлено наличием больших количеств азота, кислорода и высокими температурами в отдельных зонах расщепленного заряда. Окисление азота начинается при температурах выше 1500 К, а при 2300 К и более реакция протекает достаточно быстро (время реакции порядка $10^{-2} + 10^{-6}$ с).

Образование окиси азота происходит в зонах топливного факела, где смесь приближается по составу к стехиометрической, а локальная температура может достигать 2500 К. И хотя максимальная среднемассовая температура в дизелях не превышает 2000 К, указанное обстоятельство обуславливает высокие значения эмиссии NO_x . Окислы азота образуются также из-за наличия азота в топливе. Как показали исследования, азот, содержащийся в топливе, значительно более активен в химических реакциях окисления по сравнению с атмосферным азотом.

Характеристики вредных выбросов

В соответствии с Международным стандартом ИСО 2710 используются следующие характеристики для измерения эмиссии вредных выбросов:

состав газообразных выбросов C_i , %;

скорость выделения выбросов E_i , кг/ч;

удельный выброс e_i , кг/кВт·ч;

выброс на 1 кг топлива ε_i , кг/кг топлива.

Характеристики вредных выбросов, связанных между собой следующими соотношениями:

$$E_i = \varepsilon_i G_T,$$

где G_T — расход топлива на двигатель, кг/ч;

$$e_i = E_i / N_e \text{ или } e_i = \varepsilon_i g_e,$$

где N_e — эффективная мощность двигателя, кВт;

g_e — удельный эффективный расход топлива, кг/кВт·ч;

$$C_i = k \frac{E_i}{G_r} 100, \%$$

где G_r — массовый расход газов, кг/ч;

k — коэффициент, равный отношению молекулярной массы газов и молекулярной массе вредного компонента, т.е. $k = \mu_i / \mu_r$

Например, для окислов азота:

$\mu_r = 29,3$, $\mu_{NO_x} = 44,4$, тогда $k \approx 0,66$.

Расход газов через двигатель можно представить следующим образом: через расход топлива G_r , кг/ч

$$G_r = (\varphi_a \alpha L_0 + 1) G_T$$

где α — коэффициент избытка воздуха при сгорании;

φ_a — коэффициент продувки;

L_0 — теоретическая масса воздуха, необходимая для сгорания 1 кг топлива.

После подстановки последней формулы в уравнение для C_i и несложных преобразований получим:

$$C_i = k \frac{\varepsilon_i}{\varphi_a \alpha L_0 + 1} \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что объемная концентрация вредных компонентов в ОГ зависит от степени их разбавления воздухом, поэтому для сравнения уровня их эмиссии для различных дизелей C_i приводят (пересчитывают) к концентрации избыточного кислорода сухих ОГ (после конденсации паров H_2O), равной 15%.

Вследствие изменения условий смесеобразования и сгорания топлива в цилиндре дизеля, при его работе на различных скоростных и нагрузочных режимах меняются количества выделяемых с ОГ вредных компонентов. На рис.2 показана типичная картина эмиссии окислов азота судовым четырехтактным дизелем VASA 32 (фирма «Вяртсиля») при работе по винтовой (1) и нагрузочной (2) характеристикам.

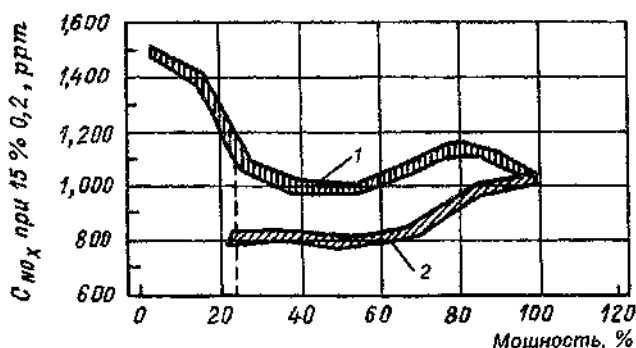


Рис. 2

Эмиссия окислов азота с ОГ судового среднеоборотного дизеля при работе на режимах нагрузочной и винтовой характеристик

По данным фирмы «МАН-Б и В» величина эмиссии вредных компонентов в зависимости от серии, числа цилиндров, уровня форсировки, может существенно отличаться. Так, например, дизелей серии MCE величина C_{NO_x} составляет в среднем 1000 ppm (0,1%), тогда как дизели более ранних выпусков (серия GFCA) имеют эмиссию NO_x порядка 1600 ppm.

Борьба с вредными выбросами судовых дизелей

В настоящее время действующие законодательства по выбросам морского транспорта имеют местный характер. Приведем ряд примеров:

запрещена работа вспомогательных двигателей паромов в порту Гетеборг (требуется подключение к береговой сети);

ограничено использование тяжелого топлива с высоким содержанием серы на паромов в портах Стокгольма и Хельсинки;

заданы пределы для выбросов окислов азота и серы дизелями речных судов в определенных районах Калифорнии, США.

В России с 1983 г. введен государственный стандарт (ГОСТ 24585-81), ограничивающий величину выбросов NO_x и CO судовых, тепловозных и промышленных дизелей следующими величинами:

$e_{NO_x} = 14 - 29$ (для эксплуатационной характеристики $e_{NO_x g_e}$ $e_{CO} = 10$ г/кВт·ч). Для сравнения: при работе судового малооборотного дизеля А/О «Брянский машиностроительный завод» 8ДКРН 60/195 (8L60MC) по винтовой характеристике на режимах от 25% N_e до 110% N_e (стендовые испытания) соответствующие характеристики вредных выбросов составили

$$e_{NO_x} = 10,5 - 8,7 \text{ г/кВт·ч};$$

$$e_{CO} = 0,87 - 0,36 \text{ г/кВт·ч}$$

В 1997 году планируется ввести новые ГОСТы, регламентирующие нормы выброса вредных веществ с отработавшими газами дизелей, где предполагается ужесточить требования по выбросу NO_x (e_{NO_x} порядка 18 г/кВт·ч).

В Приложении VI к Международной конвенции МАРПОЛ 73/78 (Предотвращение загрязнения воздуха с судов) предлагается ввести следующие ограничения на эмиссию NO_x (в пересчете на NO_2):

$$e_{NO_x} = 17 \text{ г/(кВт·ч при } n < 130 \text{ мин}^{-1};$$

$$e_{NO_x} = 45 \cdot n^{-0,2} \text{ г/(кВт·ч) при } 130 < n < 2000 \text{ мин}^{-1};$$

$$e_{NO_x} = 9,84 \text{ г/(кВт·ч) при } n \geq 2000 \text{ мин}^{-1}.$$

Графически эти условия иллюстрируются рисунком 3.

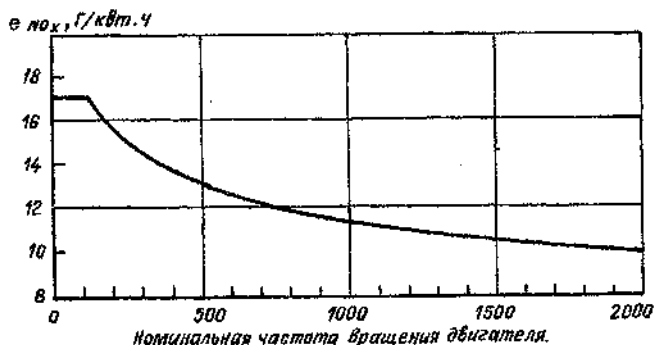


Рис. 3

Зависимость допустимой величины эмиссии NO_x от частоты вращения двигателя (измерения e_{NO_x} должны проводиться в соответствии со стандартами ИМО 8178

Зависимость между частотой вращения двигателя и допустимой величиной e_{NO_x} объясняется, в основном, сокращением продолжительности (при возрастании n) высокотемпературной стадии горения топлива, иными словами — времени, отводимого на образование NO_x . Это обстоятельство подтверждается экспериментальными данными на рис.2: при одной и той же нагрузке при работе на винт эмиссия NO_x в среднем больше на 20%. Пренебрегая некоторыми отличиями в динамике и скорости смесесобразования, примем постоянство продолжительности высокотемпературной стадии горения по углу поворота коленчатого вала φ_{zo} . Тогда время горения $\tau_{zo} = \varphi_{zo}/6n$. Так, например, при $n = 50\%$ и нагрузке 22,5% выбросы NO_x для винтовой характеристики в 2 раза больше, чем для нагрузочной.

Как уже отмечалось ранее, выбросы SO_x обусловлены содержанием серы в топливе. Снизить выброс SO_x можно двумя путями:

1. Снизить содержание серы в топливе путем его очистки.
2. Уменьшить выброс SO_x в атмосферу путем очистки ОГ.

Несмотря на то, что очистка топлива от серы на перерабатывающих заводах ведет к его удорожанию, этот вариант, по-видимому, будет использоваться как основной. Это обусловлено

тем обстоятельством, что удаление SO_x из ОГ путем пропуска через устройства мокрой очистки (скрубберы) потребует также очень больших капитальных вложений. Возникают также проблемы в связи с необходимостью хранения и сдачи на берег серной кислоты слабой концентрации (большие объемы жидкости потребуют достаточных емкостей), а следовательно — приведут к повышению эксплуатационных расходов.

Упомянутое выше Приложение VI к Конвенции МАРПОЛ 73/78 запрещает использование на судах топлива с содержанием серы более 5%, а в особых зонах — более 1,5%.

Борьбу с выбросом NO_x можно вести первичными методами, воздействуя на рабочие процессы дизелей таким образом, чтобы уменьшить количество образующихся NO_x в цилиндрах.

В свою очередь, первичные методы можно разделить на две группы:

а) требующие изменения конструкции дизеля или отдельных его элементов, реализуемых при разработке новых дизелей:

совершенствование системы впрыска и смесеобразования дизеля;

совершенствование системы турбонаддува;

выбор оптимального газораспределения;

выбор оптимальной частоты вращения коленчатого вала;

организация вихревого движения заряда в камере сгорания и др.

б) не требующие существенного изменения конструкции, реализация которых возможна при незначительной модернизации двигателя:

перевод дизеля на работу на водотопливной эмульсии (ВТЭ);

изменение фаз топливоподачи;

рециркуляция части отработавших газов и др.

В настоящее время реальную апробацию прошли первые два способа, реализованные фирмой «МАН-Б и В». Физический смысл влияния этих факторов на эмиссию NO_x состоит в том, что в обоих случаях уменьшается температура газов при сгорании топлива, определяющая скорость образования NO_x в цилиндре.

На рис.4 приведены результаты испытания судового малооборотного дизеля фирмы «МАН-Б и В» 7L90GSCS при работе на водотопливной эмульсии в сочетании с уменьшенным углом опережения подачи топлива. В верхней части рисунка приведены кривые изменения объемной концентрации NO_x в ОГ (в пересчете на 15% O_2) в зависимости от содержания воды в ВТЭ для двух

режимов: 100%-ной мощности (MCR) и 81%-ной мощности. Штриховой горизонтальной линией показан предельный уровень $C_{NO_x} = 600$ ppm, установленный агентством по предотвращению загрязнения окружающей среды США (EPA).

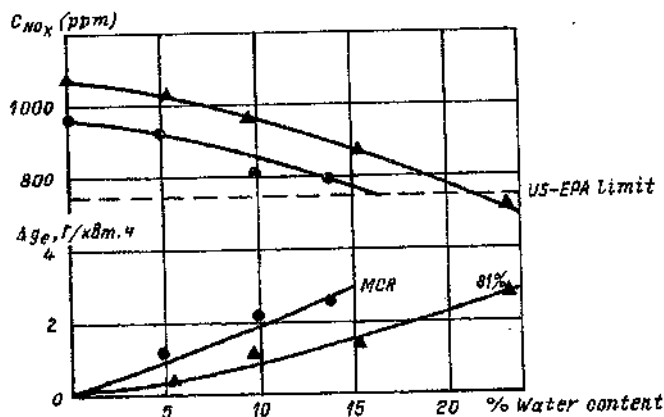


Рис. 4

Изменение концентрации NO_x в отработавших газах судового дизеля 7L90GSCA и его топливной экономичности при работе на ВТЭ

В нижней части рисунка показано, как при этом увеличивается удельный эффективный расход топлива.

Результаты испытаний позволили определить оптимальные значения факторов для достижения требуемого уровня эмиссии:

доли присадочной воды 22%;

угол опережения подачи уменьшен на 2° п.к.в.

Удельный эффективный расход топлива увеличивается при этом на 2 г/кВт·ч, что обусловлено увеличением продолжительности впрыска топлива и снижением максимального давления сгорания.

Специалисты полагают, что более существенный эффект может быть достигнут при рециркуляции части отработавших газов из выпускной системы на всасывание центробежного компрессора. При этом уменьшается концентрация кислорода в смеси газов в цилиндре, возрастают теплоемкость и газовая постоянная рабочего тела и, как следствие — уменьшается температура газов в цилиндре при сгорании топлива. Оба фактора обуславливают уменьшение количества NO_x , образующихся в цилиндре. Однако, перепуск газов ведет к снижению коэффициента избытка воздуха

при сгорании, поэтому этот способ применим, когда имеется достаточный «запас» по воздуху (например, на малых нагрузках). В судовых дизелях, работающих на высокосернистых топливах, этот способ неприемлем, так как в ОГ, перепускаемых на всасывание, содержится значительное количество SO_x . При наличии паров воды в наддувочном воздухе будет происходить интенсивное образование серной кислоты в воздушном тракте и цилиндрах при продувке. Аналогичные проблемы возникают (в меньшей степени) и при работе дизелей на ВТЭ: опыт работ в Северном морском пароходстве показал интенсивное коррозионное разрушение газоразводящего тракта.

К первичным методам снижения эмиссии можно отнести также выбор оптимального режима работы дизеля. Например, если главный двигатель нагружен винтом регулируемого шага, то для снижения эмиссии NO_x малый и средний ход целесообразно осуществлять в режиме $n = \text{const}$ (см. рис. 2), т.е. изменять скорость судна только за счет изменения шага винта. Это позволяет снизить выброс: NO_x на 10 — 25% по сравнению с режимами комбинаторной кривой.

В целом, по мнению специалистов, за счет первичных методов реально можно достигнуть снижения эмиссии NO_x на 30 — 50%. Если международными законодательствами будут введены более жесткие требования по ограничению выбросов, первичных методов будет недостаточно. В этом случае необходимо использовать вторичные методы или их комбинацию с первичными.

В настоящее время предлагается лишь одна технология для сокращения выбросов NO_x — селективная каталитическая очистка ОГ (SCR — Selective Catalytic Reduction). Суть ее заключается в том, что ОГ пропускаются через реактор, содержащий катализатор. В реактор подается газообразный аммиак (NH_3). При температуре ОГ в пределах 350 — 450°C в реакторе протекают химические реакции между NO_x и NH_3 , результатом которых являются безвредные продукты — азот и водяной пар.

Проблематичны в этом методе высокая стоимость и большие габариты системы. SCR реактора равны примерно половине габаритов дизеля (рис.5). Расходы на установку и эксплуатацию SCR — реакторов в существенной степени зависят от заданной степени очистки ОГ от NO_x . По данным фирмы «Вяртсила» при увеличении степени очистки с 50% до 90% удержание расходов на эксплуатацию составляет 250% (с 1 доллара США на 1000 кВт·ч до 2,5 долларов на 1000 кВт·ч в ценах 1992 года).

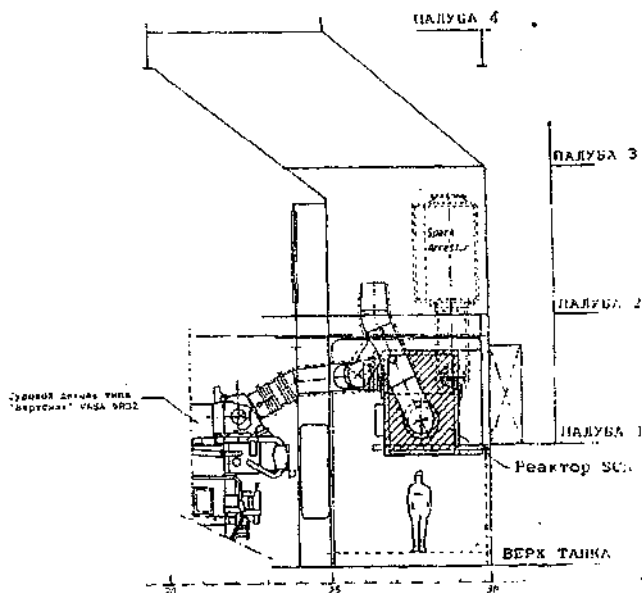


Рис. 5

В настоящее время в опытной эксплуатации находятся несколько судов с малооборотными дизелями фирмы «МАН-Б и В», а с 1992 года введен в эксплуатацию паром с дизелем фирмы «Вяртсила» типа VASA-GR32E (схема установки изображена на рис.5), снабженных SCR-установками.

В связи с тем, что температура ОГ среднеоборотного двигателя достаточно высока, SCR реактор размещают после турбины. В малооборотных дизелях приходится устанавливать их до газотурбо-нагнетателей, что вызывает ряд проблем эксплуатации: из-за большого объема реактора ухудшаются характеристики системы наддува, понижается надежность турбины из-за утечек непрореагировавшего аммиака и катализаторной пыли, не решена проблема загрязнения катализатора сажей и золой. На основании обобщения имеющегося опыта специалисты считают, что на ближайшие годы для судовых установок предпочтительным является сокращение выбросов NO_x с помощью первичных методов.

К числу других факторов, способствующих уменьшению общей массы выпускных газов, можно отнести назначение экономически

целесообразных скоростей хода. Для водоизмещающих судов известная зависимость мощности от куба скорости практически с точностью до постоянных удельных расходов топлива и газов адекватно отражается на потреблении топлива и массе выпускных газов, т.е. $G_r \sim V^3$.

С воздействием экономического фактора на снижение скорости хода мы уже встречались в годы «экономического кризиса», когда десятикратное увеличение стоимости топлива в какой-то мере компенсировалось 30%-ным снижением эксплуатационной скорости судов. Удорожание топлива явилось мощным стимулом для повышения экономичности судовых дизелей и отразилось в снижении их удельного расхода топлива на 30 — 35%.

Очевидно то, что вводимые ИМО ограничения на эмиссию вредных веществ также будут способствовать дальнейшему совершенству рабочих процессов в направлении снижения их содержания в выпускных газах. Что касается скоростного фактора, то для основной массы «тихоходных» транспортных судов его влияние на снижение эмиссии NO_x практически реализуется 10%-ным снижением контрактных значений скорости V_k .

Исключение составляют контейнеровозы, для которых отмечается вторая волна повышения контрактной скорости до 30 уз., но на базе не газотурбинных, а высокoeкономичных судовых дизелей. Расчеты, однако, показывают, что и в этом случае, несмотря на принятие мер по снижению сопротивления движению, составляющая эксплуатационных затрат на топливо возрастает до 70 — 75 %, когда наилучший финансовый результат работы судна (увеличение суточной прибыли на 18-20%) достигается при скорости $V = (0,8 - 0,85) V_k (20 - 25 \text{ уз.})$, а эмиссия газов снижается на 40 %.

Таким образом, планирование скоростей хода судов по условиям максимальной доходности одновременно является и важным фактором снижения загрязнения атмосферы выпускными газами дизелей.

УДК 621.316.542.064.26

Д.В.Вилесов, Л.Н.Токарев, Л.А.Трутнев, Ф.Х.Халилов

О КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯХ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В процессе нормального функционирования судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) происходят частые коммутации (включения и отключения) в электрических цепях, связывающих источники питания и потребителей электроэнергии. К их числу относятся коммутации в режимах: включения и отключения отдельных потребителей с емкостными и индуктивными накопителями электромагнитной энергии, пусков, переключений питания, регулирования частоты вращения, отключения двигателей электроприводов переменного и постоянного тока, синхронизации и отключения генераторных агрегатов, включения и отключения электромашинных преобразователей, работа вентильных преобразователей и др. Процедуры «включения-отключения» осуществляются штатной коммутационной аппаратурой. Кроме того, имеются несанкционированные, в том числе аварийные, замыкания и размыкания электрических цепей, включая замыкания на корпус судна, происходящие вне коммутационных аппаратов.

Очевидная возможность значительного влияния этих процессов на режим работы технических средств, получающих питание от судовой сети, определила необходимость количественного нормирования так называемых показателей качества электроэнергии, к которым относятся: величины напряжения в момент изменения режима, время переходного процесса, симметрия напряжений по фазам, искажение формы кривой напряжения при нелинейной нагрузке, падение напряжения в распределительной сети, статические и динамические отклонения частоты.

Перечисленные параметры дают описание качества электроэнергии во времени в «макромасштабе», на интервалах от миллисекунд до долей или единиц секунды и в диапазоне частот до десятков килогерц. Эта детализация во времени обеспечивала потребности координации характеристик (совместимости) судового электрооборудования на протяжении всего послевоенного периода, начиная с 40-х годов, когда решались основные задачи совершенствования СЭЭС и создания их новых видов. Именно эти показатели в течение длительного времени были объектом внимания судовых электриков и, естественно, Регистра, международной электротехнической комиссии.

Необходимо отметить, какие проблемы такого же характера ставились и решались в процессе развития отечественной судовой электротехники: обеспечение перевода судовых СЭЭС с напряжения 220В на 380В (40 — 60 гг.), определение рациональных параметров электроэнергии по частоте и напряжению, разработка регуляторов напряжения синхронных генераторов, разработка методов и методик расчета режимов СЭЭС (60-70 гг.), автоматизация электротехнических установок, в том числе судовых электростанций (50-70 гг.), решение задачи повышения надежности и живучести (55-70 гг.), создание корабельных ядерных энергетических установок (55-75 гг.), разработка новых электронных устройств и систем защиты СЭЭС, повышение предельной коммутационной способности автоматов, методов ограничения токов короткого замыкания (60-70 гг.), использование явления сверхпроводимости (80-90 гг.), повышение пожаробезопасности электрооборудования, применение статических преобразователей (75-90 гг.), повышение ресурса электрооборудования (с 80-х г.), внедрение в автоматику микроэлектроники, микропроцессорной техники, ПЭВМ и волоконно-оптических кабелей. В 80-х годах четко обозначилась проблема электромагнитной совместимости (ЭМС).

В рамках статьи существенно отметить, что в перечисленных направлениях работ практически не рассматривались эффекты импульсных коммутационных перенапряжений (ИКП). Исследования, проводимые в ЦНИИ СЭТ, СПбГМТУ (б.ЛКИ), ГМА (б.ВМИУ им.Макарова) и Регистре, не дали еще достаточно определенных и полных данных об условиях протекания и характеристиках этих повседневно повторяющихся, агрессивных и поэтому — особо значимых процессов. Главными причинами являются, по-видимому, случайность и быстротечность таких процессов, что объективно не давало возможности специалистам установить причинные связи явлений «перенапряжения» в цепи питания — сбой и даже деградация элемента (устройства).

Вместе с тем, примерно, с середины 60-х годов начали обнаруживаться помехи в электронных системах, которые невозможно было объяснить известными из опыта настройки причинами. Все чаще специалисты стали обращать внимание на сеть электропитания. Возникли такие ситуации, когда сложная электронная система, отлаженная при питании с берега, переставала работать при переводе питания на бортовые источники. На плавучем кране «Богатырь», например, из-за неработоспособности системы связи пришлось существенно изменить сеть питания. На одном из судов в 60-х годах спроектировали одновременно 2 сети питания радиоэлектронных устройств, централизованную и автономную. Одна из них, именно централизованная, оказалась неработоспособной из-за несовместимости по цепям питания.

На судах серии «Новгород», построенных в конце 60-х годов для Балтийского морского пароходства, для питания электронной системы централизованного контроля «Датацент» были предусмотрены электромашинные преобразователи, обеспечивающие полную развязку от судовой сети именно из-за возможных нежелательных флуктуаций напряжения судовой сети.

В связи с подобными фактами в судостроительной промышленности были организованы соответствующие исследования, для которых, в частности, была организована специальная лаборатория, выделены необходимые средства. В январе 80-го года было проведено крупное совещание специалистов десяти НПО электронного профиля, с участием руководителей соответствующих подразделений в ранге заместителей директоров. Совещание выработало главные направления деятельности в области электромагнитной совместимости, определило обязанности предприятий. Были приняты организационные решения о разработке серий специальных вторичных источников питания, выделены заводы для их производства и поставки на суда. Однако, в результате — быстрых решений проблемы ЭМС на судах не получилось. Проблема оказалась слишком сложной и объемной.

Трудности решения задачи обеспечения ЭМС технических средств на судах нарастают в связи с тем, что происходит, с одной стороны — снижение порогов полезных сигналов в информационной технике (в электронных устройствах и системах) и, следовательно, повышение чувствительности к электромагнитным помехам (снижение помехоустойчивости), а с другой — повышение параметров нормальных процессов в силовых цепях (напряжений, токов, скоростей их изменения) и, следовательно, повышение уровней создаваемых помех.

Оказывается, что в числе возможных и регистрируемых электромагнитных кондуктивных помех, т.е. тех, которые распространяются по электрическим цепям, особо выделяются перенапряжения, возникающие при коммутации цепей.

Отдельные эксперименты, проведенные в лабораторных условиях для выборочной оценки эффектов перенапряжений при включениях и выключениях электрических машин и трансформаторов морских типов серийными коммутационными аппаратами, подтверждают известные по опубликованным материалам данные о возможности существенных «выбросов» напряжения. Представление о характере наблюдавшихся процессов и значениях экстремумов перенапряжений дают осциллограммы, приведенные на рис.1, 2 и 3. Обращает на себя внимание сугубо случайный характер этих процессов в отношении величин импульсов, длительности и состава пачек импульсов до завершения процессов коммутации. Приведенная выборка осциллограмм взята из большого состава им подобных, полученных в опытах инженерами Галушиным С.Я., Крохмалем Э.Р., Солдатенковым В.В. Их обработка показала возможность перенапряжений на порядок больших, чем номинальные величины, с длительностью до десятых долей микросекунд при общей продолжительности процесса коммутации около одной миллисекунды.

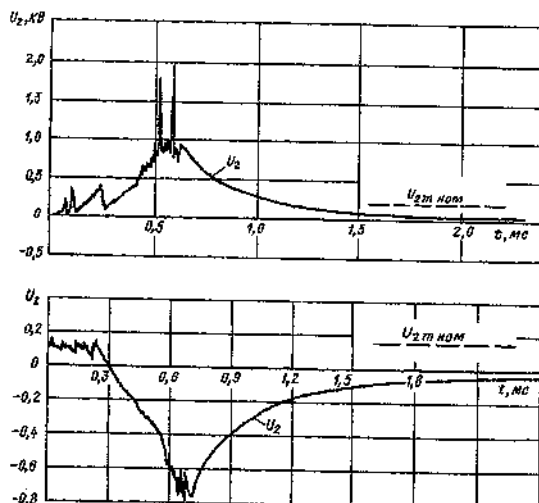


Рис. 1

Мгновенные значения напряжения на вторичной обмотке однофазного трансформатора, отключаемого автоматическим выключателем в режиме холостого хода (номинальное напряжение 127 В).

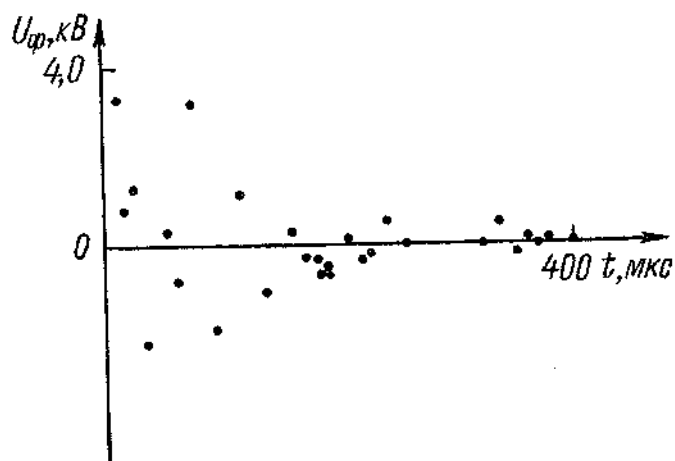
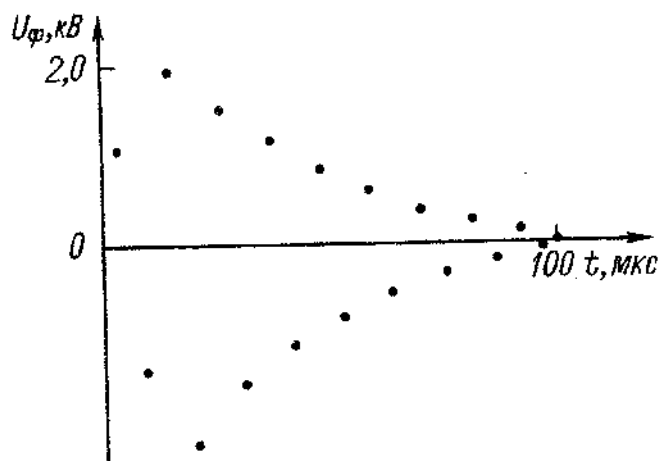


Рис. 2
Мгновенные значения напряжения на «еще свободной» фазе асинхронного двигателя, включаемого автоматическим выключателем (номинальное напряжение 380 В).

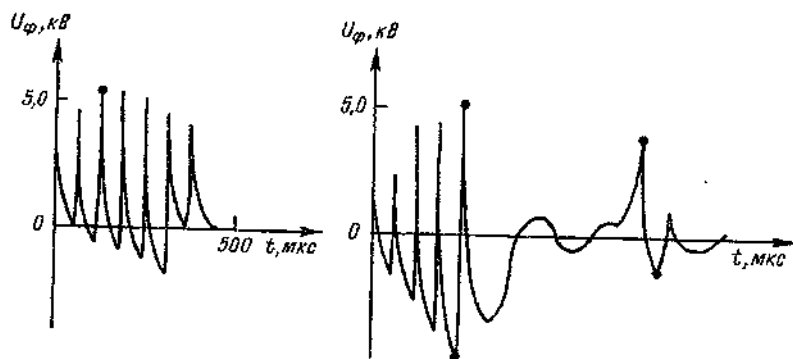


Рис. 3

Мгновенные значения линейного напряжения между «подключенной и свободной» фазами асинхронного двигателя, включаемого автоматическим выключателем (номинальное линейное напряжение 380 В).

Такие быстропотекающие, «микромасштабные» процессы, не описываемые принятыми параметрами оценки качества напряжения в СЭС, очевидно агрессивные не только для электроники. Данные промышленности вынуждают говорить о значительно более широкой номенклатуре электрооборудования, уязвимого для импульсных перенапряжений (ИПН). Тем самым определяется необходимость знания действительно имеющих место в СЭС быстропотекающих электромагнитных явлений для принятия адекватных инженерных решений.

Случайное протекание этих процессов, обусловленное значительным разбросом характеристик механизмов контактных аппаратов, дуговых промежутков, стволы дуг, составом и нелинейностью параметров работающих элементов коммутируемых цепей, чрезвычайно усложняет их расчетное прогнозирование. Применение методов классической электродинамики может лишь способствовать изучению общих закономерностей этих процессов, о чем свидетельствуют работы таких известных специалистов, как Брон О.Б., Буткевич Г.В., Веверка А., Геллер Б., Костенко М.В. и др.

Нарушения качества напряжения в СЭС, вызванные коммутациями цепей, по нашему мнению, недостаточно исследованы, не имеют установленных методик прогнозирования и метрологического обеспечения регистрации процессов и не являлись, по существу, объектом необходимого внимания специалистов при проектировании, монтаже и эксплуатации судового электрооборудования и связанных с ним технических средств.

Следует заметить, что в Руководстве по техническому надзору за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий (часть 3, 1992 г.) впервые были установлены требования по испытаниям на ЭМС для электронных средств судовой автоматики, в том числе на импульсные перенапряжения до 1 кВ согласно Публикациям МЭК 801-4 и 801-5. Уровни этих предельных испытательных напряжений являются дискуссионными в свете данных о возможных перенапряжениях.

В задачах, связанных с перенапряжениями в СЭЭС, важно также иметь в виду возможность существенных выбросов напряжений, вызванных электромагнитными явлениями в атмосфере.

Бесомым аргументом в пользу необходимого внимания к задаче ЭМС в отношении перенапряжений в СЭЭС, помимо изложенного выше, может и должен послужить опыт электроэнергетических систем других типов, прежде всего — «береговых».

В береговых электроэнергетических системах, в том числе за рубежом, ведутся уже более 20 лет интенсивные работы по изучению и разработке способов защиты от перенапряжений. Состояние этих работ кратко можно характеризовать следующих образом. Импульсы перенапряжений, возникающие в высоковольтных сетях (напряжение свыше 1000 В), передаются через трансформаторы в низковольтные цепи. Наибольшие перенапряжения возникают при коммутациях сетей низкого напряжения. Отключение и включение кабеля или воздушных линий, емкостных компенсирующих устройств сопровождаются перенапряжениями с кратностью более трех. Коммутация цепей трансформаторов при малой длине питающего кабеля может привести к ИКП с амплитудой до 10 кВ, опасной для изоляции любого силовоточного и слаботочного электрооборудования. Отключение и включение асинхронных двигателей, в том числе бытовых, приводят к перенапряжениям с кратностью до 10. Непосредственные измерения в сетях «Автоваза» в г.Запорожье, выполненные специалистами СПбГТУ, показали, что ИКП могут быть более 3 кВ.

Несимметричные режимы сетей высокого напряжения, особенно при коротких замыканиях, создают в контурах заземления распределительных устройств повышенные падения напряжений. Последние выносятся в цепи низкого напряжения и вызывают обратные перекрытия или пробои изоляции.

Следует обратить внимание на то, что для разрушения изоляции или изоляционной конструкции, помимо амплитуды перенапряжений, важное значение имеет энергия, которая содержится в импульсе.

С этой точки зрения небезынтересны уровни запасаемой в объектах энергии: силовые элементы, в том числе электродвигатели, 10^{-3} Вт.с и более; реле и электронные трубки — 10^{-3} Вт.с; фильтровые катушки — 10^{-2} Вт.с; конденсаторы электрических схем — 10^{-4} Вт.с; диоды — 10^{-6} Вт.с; транзисторы, интегральные схемы, ЭВМ — 10^{-7} Вт.с.

В зависимости от величины этой энергии должны создаваться и использоваться соответствующие средства защиты от перенапряжений (от искровых промежутков до нелинейных ограничителей перенапряжений). В мировой литературе отмечается, что в зависимости от требуемого уровня ограничения необходимо использовать «грубую» защиту (до трехкратных фазных напряжений) в виде унитарных защитных аппаратов (искровые промежутки, газоразрядники, вентильные разрядники, нелинейные ограничители) и «тонкую» защиту (до уровня 1,5 фазного напряжения) в виде комплекса, содержащего нелинейные ограничители (R-C цепочки, диоды Зенера, L-C фильтры и т.п.).

При выборе характеристик ограничителей важное значение имеют величины ожидаемых (с достаточно малой вероятностью) максимальных напряжений и коммутационных, и импульсных токов защищаемого аппарата. Исследования СПбГТУ показали, что, в среднем, в сетях 220 В максимальные напряжения меньше или равны 260 В, в сетях 380 — 460 В. Импульсные и коммутационные токи, соответственно, 1250 А, 200 А, одинаковые для сетей 220 и 380 В.

Для защиты от перенапряжений в береговых низковольтных сетях используются нелинейные ограничители, в частности, типов ОПН-О,22 и ОПН-О,38, шунтирующие защищаемые элементы. При напряжениях менее пороговых через ограничители протекают токи порядка 0,1–0,2 МА. Их сопротивления составляют, соответственно, несколько МОм. При возникновении перенапряжения уже через несколько наносекунд сопротивление ограничителя падает на несколько порядков. Естественно, при этом ток через ограничитель быстро возрастает, снижая тем самым импульс перенапряжения. В береговой сети этот ток отводится в землю, что резко и значительно ограничивает амплитуду перенапряжений, защищая изоляцию и изоляционные конструкции.

Ограничители и в России начали применяться уже довольно широко. Например, Ревдинскому медеплавильному заводу изготовлены 2100 шт, Сясьскому целлюлозно-бумажному комбинату — 8400, ВАЗу — 9300, «Свердловскэнерго» — 100, Запорожскому

автозаводу — 1200, Союзлесмонтажу — 9000. Анализ опыта эксплуатации ограничителей в течение 2 — 3-х лет на указанных предприятиях показал снижение аварийности электрооборудования (сильноточного и слаботочного) в 2 — 6 раз. В Петербурге одним из крупных производителей ОПН является Корниловский завод.

За рубежом ограничители, в том числе на базе оксидно-цинковых варисторов в виде дисков различного диаметра, выпускают крупнейшие электротехнические фирмы: Хитачи, Тошиба, Мицубиси, АВВ, Вестингауз и др. Объем выпуска ограничителей за рубежом на несколько порядков превосходит отечественный.

Экономический ущерб от перенапряжений весьма значителен. Например, в Германии годовой ущерб из-за перенапряжений, выводящих из строя интегральные схемы (чипы), составил, примерно, 100 млн. марок. По данным австрийского страхового общества только в 1984 г., по самым осторожным оценкам, в стране зарегистрировано более 20000 случаев повреждений электрооборудования по причине импульсных перенапряжений, что привело к материальному ущербу в размере более 5 млн. немецких марок, более того, в верхней Австрии были подвергнуты статистической оценке более 50000 случаев повреждения электрооборудования. Оказалось, что чаще всего повреждается изоляция двигателей (88%). Отмечается значительное число выходов из строя холодильников, стиральных машин, пылесосов.

В действующих правилах устройства электроустановок ни на судах, ни на берегу пока не предусматривается использование ограничителей для глубокого ограничения перенапряжений. В новой редакции ПУЭ, подготовленной для печати, а также в материалах МЭК отмечается важность применения ограничителей. Приходится констатировать недостаточность объема и содержания исследований процессов, происходящих при коммутации электрических цепей.

Важной и трудной стороной этой проблемы, в особенности для судовых условий, являются методы и средства измерения и регистрации ИКП, отличающихся высокими скоростями протекания процессов, значительными уровнями напряжений и случайным характером возникновения и протекания.

Все сказанное, в достаточной мере, подтверждает необходимость серьезного внимания специалистов по судовому электрооборудованию к явлениям импульсных коммутационных пере-

напряжений в самом широком плане: от изучения их закономерностей, характерных для специфических судовых условий и оборудования, до подготовки научно обоснованных рекомендаций и правил по способам и средствам их обезвреживания.

Задача гармонизации в СЭЭС уровней коммутационных перенапряжений и защищенности от них кондуктивно связанных технических средств является и научной, и проектно-конструкторской, и нормативно-правовой, определяемой, в конечном итоге, интересами безопасности эксплуатации СЭЭС, а следовательно, безопасности мореплавания.

Заключение

1. Процессы включения и отключения элементов электрических цепей, содержащих накопители электромагнитной энергии, могут сопровождаться значительными по амплитудам кратковременными /импульсными/ перенапряжениями. Изменение напряжения при коммутации является сугубо случайной функцией времени.

2. В нормальных режимах СЭЭС происходят частые коммутации в электрических цепях, связывающих источники питания и потребителей электроэнергии. Аварийные режимы обычно бывают обусловлены несанкционированными коммутациями цепей.

3. В стендовых условиях при коммутации автоматическими выключателями отдельных образцов низковольтных /до 0,4 кВ/ трансформаторов и асинхронных двигателей, применяемых на судах, установлена возможность возникновения импульсов напряжения, превышающих в экстремумах номинальные напряжения на один-два порядка и имеющих длительность до десятых долей микросекунд при общей продолжительности процесса коммутации порядка миллисекунды.

4. В «береговых» электроэнергетических системах низкого напряжения отмечаются многочисленные случаи перенапряжений в коммутационных режимах, частые повреждения изоляции обмоток электрических машин и выходы из строя элементов электронных устройств и вычислительной техники. Перенапряжения приводят к значительным экономическим потерям.

5. Отечественный и зарубежный опыт применения устройства защиты от перенапряжений в «береговых» низковольтных сетях показывает их эффективность. Ежегодный выпуск защитных

устройств /ограничителей и разрядников/ в развитых странах достигает многих миллионов экземпляров.

6. В обеспечении электромагнитной совместимости судовых технических средств должны обязательно предусматриваться меры по защите от перенапряжений. Для этого требуется более полное изучение закономерностей и характеристик процессов формирования перенапряжений в СЭС и обоснованная разработка методик прогнозирования величин перенапряжений и выбора мест установки и типов защитных устройств. Разработка методик должна быть ориентирована на их использование в нормативных документах Регистра.

Список литературы

1. Справочник судового электротехника. Т.3. Технология электромонтажных работ/Под ред.Г.И.Китаенко. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Судостроение. 1980. С.
2. Справочник судового электромонтажника. Авт.: Ю.С.Путятю, Н.В.Еремеев, Б.Д.Гандин, Н.А.Лазаревский. Л.: Судостроение, 1976.
1. Пазутник В.В., Ларионов В.П., Пиньталь Ю.С. ТВН: изоляция и перенапряжения в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Половой И.Ф., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х. Внутренние перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
1. Кузнецов А.Н. Биофизика электромагнитных воздействий. М.: Энергоатом-издат, 1994.
2. Электромагнитное загрязнение окружающей среды. Тезисы докладов конференции по электромагнитному загрязнению окружающей среды Ленинградского союза специалистов по безопасности деятельности человека. Изд.НИИ гигиены труда и профзаболеваний. Санкт-Петербург, 1993.

ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ГИГИЕНЫ НА СУДАХ

1

К настоящему времени многочисленными клинико-гигиеническими и экспериментальными исследованиями установлено, что электромагнитные поля (ЭМП) определенных параметров отрицательно воздействуют на здоровье человека. Это может проявляться в следующем:

усилении функциональных расстройств центральной нервной системы (астено-вегетативный синдром, вегетативная дисфункция),

заболеваниях сердечно-сосудистой системы (нейроциркуляторная дистония по кардиальному типу, гипертоническая болезнь, атеросклеротический кардиосклероз, ...),

заболеваниях желудочно-кишечного тракта (гастрит, язвенная болезнь, ...),

снижении компенсаторных возможностей организма, повышении риска онкологических заболеваний, стимулировании гипо- и импотенции у мужчин, замедлении и срыве адаптации организма к другим агрессивным физическим факторам,

ускорении процессов старения организма.

Последствия влияния ЭМП на организм человека существенно зависят от экспозиций воздействия и от частотных характеристик и амплитуд его компонент, от характеристик импульсных процессов.

Современные суда насыщены техническими устройствами и системами, функционирование которых связано с эмиссией электромагнитных полей с широким спектром частот и широким диапазоном напряженностей электрической и магнитной компонент, подчас — высоких значений.

К числу таких излучателей ЭМП относятся практически все устройства, в которых используются электромагнитные явления (электрические машины, коммутационная аппаратура, кабели, радиотехнические устройства, приборы сигнализации, компьютерная техника и т.д.).

Обсуждая вопросы гигиенического обеспечения безопасности человека в судовых условиях в электромагнитном аспекте, удобно в первом приближении разделить сферу жизнедеятельности плавсостава и пассажиров на две зоны: внешние пространства (палубы, надстройки) и внутренние (подпалубные помещения энергетических и технологических установок и устройств, обитания и др.).

Для первой зоны характерными являются ЭМП радиочастотного диапазона, а для второй — главным образом, ЭМП инфранизких, низких и средних частот, а также постоянные и импульсные поля. Это обстоятельство, естественно, влияет на гигиенические оценки электромагнитной обстановки в первой и во второй зонах. Ниже, именно в этом порядке, и будут рассмотрены вопросы обеспечения на судах электромагнитной гигиены.

2

В 80-е годы гигиеническими исследованиями было установлено, что на судах уровни электромагнитных полей на рабочих местах радиооператоров существенно ниже предельно допустимых значений. Это обусловлено эффективным экранированием ВЧ-блоков у передатчиков нового поколения, канализацией ВЧ-энергии коаксиальным (экранированным) кабелем, использованием радиочастотных шахт для передачи энергии в диапазоне средних волн. Кроме того, на современных судах передатчики размещаются в специальных помещениях — агрегатных, и управление их работой осуществляется дистанционно. Исследования показали также хорошую эффективность экранирования блоков генераторов навигационных РЛС и при должном контроле за плотностью сочленений волноводного тракта уровни плотности потока энергии (ППЭ) сверхвысоких частот (СВЧ) вблизи генераторов, как правило, ниже чувствительности измерительных приборов. Таким образом, установлено, что в сравнении с 70-ми годами, в 80-е был достигнут существенный прогресс в оптимизации условий труда членов экипажа, профессионально связанных с обслуживанием РПДУ и МРЛС. Однако, по-прежнему не утратили актуальности вопросы защиты плавсостава от воздействия электромагнитных полей, создаваемых антенными системами на открытых палубах (непрофессиональное облучение). На подтверждение данного тезиса и направлены основные положения настоящей статьи.

Гигиенические исследования, выполненные нами в последние годы на судах различных проектов и назначения показали, что в настоящее время продолжают использоваться в качестве главного средства судовой радиосвязи средневолновой передатчик «Муссон-2», диапазон частот 400 — 535 кГц, мощность 250 Вт. Передатчик работает на главную проволочную антенну или антенну-мачту — АМС-17. В качестве эксплуатационных средств радиосвязи применяются РПДУ «Бриг-2», и «Корвет-2» (диапазон частот 1,6 — 25,6 МГц). Передатчики работают на проволочные антенны, антенну АМС-17 и штыревые антенны типа ШПА-11, ШПА-11-2. Применяются и другие штыревые антенны.

Измерения показали, что при работе РПДУ «Муссон-2» уровни напряженности ЭМП в районах пеленгаторных палуб, палуб ходового мостика достигают сотен В/м, на некоторых судах более 1000 В/м. Высокие уровни электромагнитных полей (сотни В/м) на отдельных судах регистрировались также в районах шлюпочных и главных палуб. Кроме электрической составляющей ЭМП у антенных вводов и снижений проволочных антенн регистрировалась магнитная составляющая, значения которой достигали 2,5 А/м. Интенсивность электромагнитных полей, создаваемых РПДУ «Бриг-2» и «Корвет-2» была существенно ниже. В первом случае максимальные значения напряженности ЭМП достигали 500 В/м, во втором — 300 В/м. Регистрировались они на пеленгаторных палубах и палубах мостика. Надо подчеркнуть, что параметры электромагнитных полей, измеряемых в открытых районах судов, существенно зависят от архитектуры судна, конструктивных особенностей антенны, качества согласования антенны и передатчика, рабочей частоты. Так, по нашим данным, при смене несущей частоты с 4 МГц до 22 МГц напряженность ЭМП возрастает более чем в 3 раза. Существенным является вторичное отражение энергии от металлических конструкций и оборудования (репиторов гирокомпасов, леерных ограждений, тросов, лебедок, крышек трюмов и т.д.). Резюмируя полученные данные, следует еще раз подчеркнуть, что главными источниками интенсивных электромагнитных полей, создаваемых средствами морской радиосвязи, являются антенные вводы РПДУ и снижения антенн, которые размещаются, как правило, над палубами ходового мостика, что создает в районе крыла мостика крайне неблагоприятную электромагнитную обстановку.

Переходя к характеристике уровней ППЭ СВЧ, создаваемых антеннами навигационных РЛС, нужно подчеркнуть зависимость

интенсивности излучения от многих факторов: мощности РЛС, высоты установки и диаграммы направленности антенны, шкалы дальности, срока службы РЛС, архитектурных особенностей судов, наличия источников вторичного излучения. Максимальные значения ЭМИ были зарегистрированы преимущественно на пеленгаторной палубе, палубах бака или юта.

Исследования показали, что при эксплуатации различных модификаций РЛС «Океан», установленных на крупнотоннажных судах, не создаются высокие уровни электромагнитных излучений. Так, на обследованных судах плотность потока энергии (ППЭ) СВЧ составляет от единиц до десятков мкВт/см². Такие же значения ППЭ были зарегистрированы при работе РЛС «Наяда». Более высокие уровни электромагнитных излучений имели место на судах при эксплуатации РЛС «Кивач» и «Миус» ввиду низкого расположения антенн. Среди судов различного назначения наиболее интенсивные ЭМИ имеют место на средние- и малотоннажных судах рыбопромыслового флота, речных судах и судах типа река-море, оснащенных мощными РЛС с низкорасположенными антеннами. На судах указанных типов, ППЭ СВЧ на палубах и надстройках может достигать сотен мкВт/см².

90-е годы характеризуются очередным этапом переоснащения флота новыми РПДУ и НРЛС. Это новые станции спутниковой связи, ПВ-КВ радиостанции «Ангара-РА», «Ангара-РБ», РЛС «Лиман», «Грот», новые модификации отечественных радиолокационных станций.

В последние годы суда оснащаются преимущественно аппаратурой зарубежных фирм. Эта аппаратура имеет технические характеристики, отличающиеся от соответствующих параметров отечественной аппаратуры. Поэтому режим и характер облучения плавсостава на судах, оснащенных импортным оборудованием, будет иным. Из вышеизложенного очевидно, что вопросы защиты экипажей судов от воздействия модулированных ЭМП радиочастотного диапазона не утрачивают своей актуальности. Сложность задачи заключается в том, что техническими мероприятиями нельзя полностью исключить облучение экипажа ЭМП на открытых палубах. Поэтому специально для судовых условий Ленинградским (теперь Санкт-Петербургским) НИИ гигиены труда и профзаболеваний были разработаны два нормативных документа, регламентирующие ЭМП для плавсостава, выполняющего работы на открытых палубах (непрофессиональное облучение). Это утвержденные в 1984 г. Минздравом СССР дифференцированные по времени

предельно допустимые уровни воздействия электрических полей средних и высоких частот для плавсостава судов №3099-84. Согласно этому документу для СЧ-диапазона (0,3 МГц — 3 МГц)

$$E_{\text{пду}} = \frac{250 \text{ В/м} \cdot \text{ч}}{T},$$

где $E_{\text{пду}}$ — предельно допустимая напряженность электрического поля В/м;
 T — продолжительность воздействия в часах.

Максимально допустимая напряженность электрического поля не должна превышать 500 В/м.

Для диапазона ВЧ (3 МГц — 30 МГц)

$$E_{\text{пду}} = \frac{100 \text{ В/м} \cdot \text{ч}}{T}$$

Максимально допустимая напряженность электрического поля не должна превышать 200 В/м.

В 1990 г. секцией неионизирующих излучений Всесоюзной проблемной Комиссии «Научные основы гигиены труда и профпатологии» были утверждены ПДУ импульсно-прерывистых ЭМИ СВЧ-диапазона, создаваемых навигационными РЛС (3 и 10 см)

$$\text{ППЭ}_{\text{пду}} = \frac{250 \text{ мкВт} \cdot \text{час/см}^2}{T},$$

где $\text{ППЭ}_{\text{пду}}$ — предельно допустимый уровень плотности потока энергии, мкВт/см²;
 T — продолжительность воздействия в часах.

Максимально допустимая плотность потока энергии не должна превышать 500 мкВт/см².

Однако ПДУ, ввиду известных причин, не были утверждены тогда еще Минздравом СССР и документ не получил юридического завершения.

Допустимые уровни ЭМП на рабочих местах специалистов, осуществляющих работы с источниками ЭМП, устанавливает ГОСТ 12.1.006-84 «Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля». Подробно методы и средства защиты экипажа от воздействия ЭМП, создаваемых аппаратурой радиосвязи и радиолокации изложены в РД 5 Р8713-93. «Аппаратура радиосвязи и радиолокации. Методы оценки электромагнитных полей и средства защиты личного состава от облучения». Вместе с тем, следует подчеркнуть, что переоснащение флота средствами морской радиосвязи и навигационными РЛС нового поколения ставит задачу корректировки ранее разработанных ПДУ. Так, например, при научном обосновании ПДУ СЧ и ВЧ-диапазонов №3099-84 в экспе-

риментальных исследованиях моделировалась телеграфия ключом типа А1 (частный случай — 100%-ной импульсной модуляции). РПДУ нового поколения работают в режиме частотной модуляции. Иные параметры модуляции и у импортных навигационных РЛС. Известно, что модуляция информационного сигнала является биотропным параметром, существенно влияющим на конечный биологический эффект.

К нерешенным задачам следует отнести вопрос измерения уровней СВЧ-излучений, создаваемых импортными РЛС. Это обусловлено тем, что работа «на излучение» указанных станций возможна только при вращении антенны. Существующая отечественная и зарубежная измерительная аппаратура позволяет производить измерения только при остановленной (фиксированной) антенне. Требуют рассмотрения и вопросы измерения ЭМП СВЧ-диапазона, создаваемых станциями спутниковой связи (ССС). Работа на измерение СССР типа «Инмарсат-а» и «Инмарсат-в» происходит только во время сеанса связи с определенным спутником. Поэтому антенна станции имеет фиксированное положение и направлять ее в тот или иной район судна для выполнения измерений невозможно.

Из сказанного следует, что в зоне надпалубных пространств судов усилиями радиотехников и гигиенистов осуществлялись мероприятия, которые согласно принятым на протяжении последних 15-20 лет нормативным документам в общем обеспечивали безопасность в отношении ЭМП радиочастотного диапазона. Появления новых радиочастотных систем и уточнения медико-биологических данных о воздействии ЭМП высоких частот на человеческий организм, естественно, не позволяют считать эту задачу ЭМС исчерпанной, в том числе и в нормативном плане.

3

Во второй зоне — подпалубных пространствах — задача обеспечения электромагнитной безопасности для экипажа и пассажиров, по существу, в полном своем объеме не ставилась и не решалась. Отдельные, не координированные, измерения параметров электромагнитной обстановки во внутренних помещениях производились, но их результаты не вылились в необходимые обобщения и проектно-организационные решения.

Тем не менее, даже некоторые разрозненные данные таких обследований ЭМП представляют интерес по существу темы статьи.

На рис.1 представлены результаты отдельных измерений низкочастотных магнитных полей, выполненных разными специалистами, на морских судах РФ (СССР) разных флотов, начиная, примерно, с 80-х годов. Измерения производились на расстоянии, в среднем, 0,5 метра от элементов электрооборудования, дающих в данном помещении наибольшие значения напряженностей. На рис. 2, 3 и 4 приведены спектральные характеристики наибольших составляющих поля вблизи (0,5 м) различных типов электрооборудования.

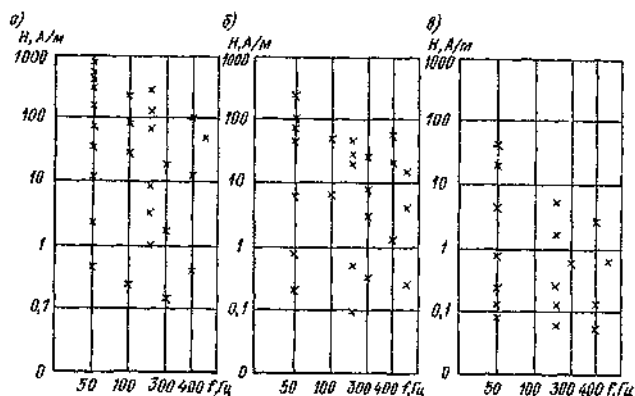


Рис. 1

Регуляторы измерений экстремумов (амплитуд) переменного магнитного поля в судовых пространствах:

- а) — «районы» электротехнического оборудования;
- б) — помещения механизмов;
- в) — бытовые помещения.

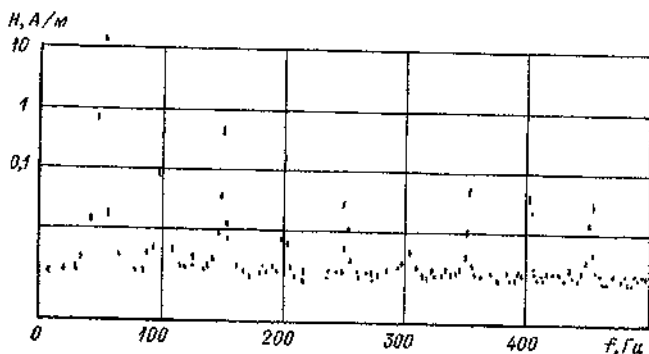


Рис. 2

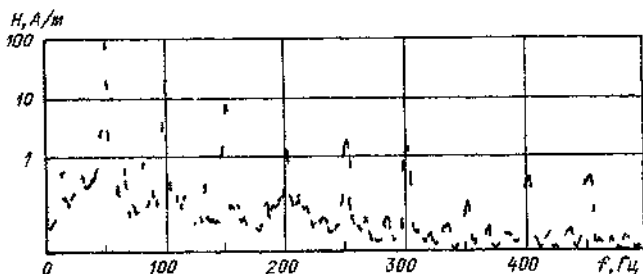


Рис. 3

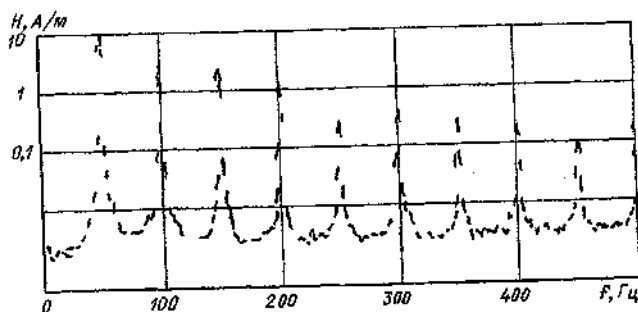


Рис. 4

Данные спектрального анализа магнитных полей электроприводов на расстоянии, примерно, 0,5 м

О закономерности убывания поля по мере удаления от его источника можно судить по кривым снижения амплитуд составляющих вектора индукции поля в сферических координатах (радиальная B_r , касательная B_θ , осевая B_z), измеренных вблизи асинхронного двигателя в режиме номинальной механической нагрузки (рис.5).

Составляющие поля в точках окружающего пространства машины переменного тока изменяются с частотой его вращения (пульсации).

Амплитудные величины индукции МП существенно изменяются в пределах полюсного деления и по длине машины. Наибольшие значения индукций отмечаются у синхронных машин в зоне лобовых частей обмоток, у асинхронных — в плоскости среднего сечения, а у машин постоянного тока — в плоскостях главных

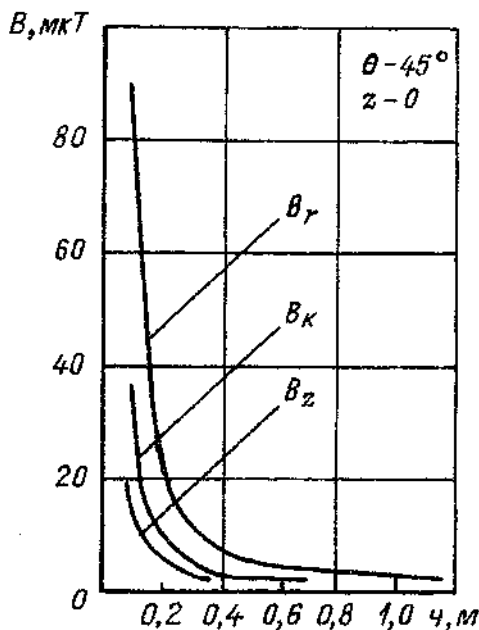


Рис. 5

Диаграмма ослабления внешнего магнитного поля электрической машины переменного поля

полюсов. Предельные значения индукции на отстоянии 0,1 м от поверхности корпуса оказываются порядка 100 мкТ. При удалении точки измерения в радиальном направлении эти величины снижаются, по грубой оценке, обратно пропорционально квадрату удаления от поверхности статора.

Радиальная и тангенциальная составляющие поля в большей части точек контролировавшегося внешнего пространства заметно превышали продольную составляющую.

В связи с полученными данными об особой активности биологического воздействия импульсных магнитных полей, определялись характеристики поля электрических машин в переходных режимах с большими всплесками токов. На рис. 6 и 7 приведены осциллограммы наибольшей составляющей вектора индукции магнитного поля асинхронного двигателя в режиме начала пуска на расстоянии 0,1 м от его корпуса и для сравнения — эта же величина в установившемся режиме с номинальной нагрузкой.

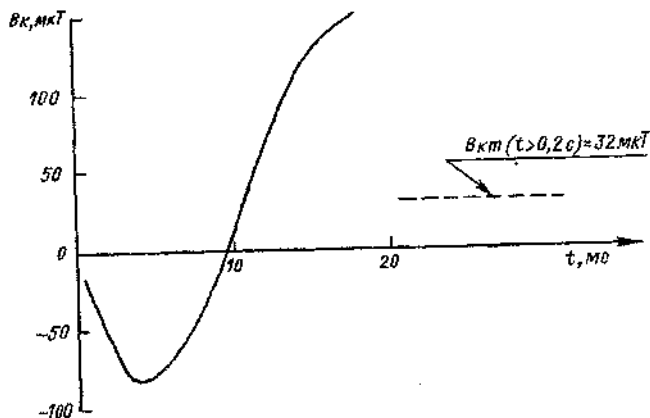


Рис. 6

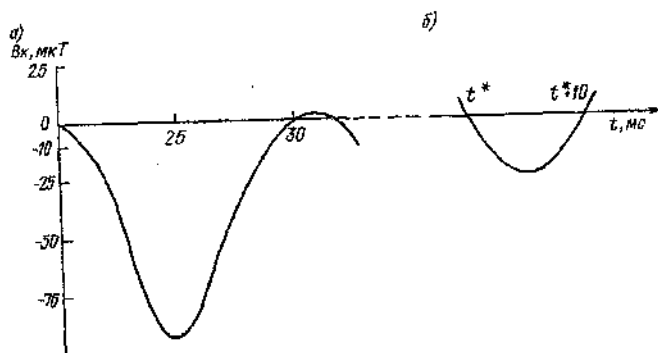


Рис. 7

Осциллограммы импульсов магнитного поля асинхронного электродвигателя при пуске (расстояние, примерно, 0,1 м)

При пуске асинхронного двигателя нарастание его внешнего МП до установившегося периодического режима является случайным процессом, определяемым фазой напряжения источника питания в момент включения. В таких переходных режимах составляющие вектора магнитной индукции являются непрерывными знакопеременными функциями времени с экстремумами, которые могут превышать амплитудные значения установившихся режимов.

Длительность процесса нарастания МП до установления гармонического (в первом приближении) закона его изменения составляет 2-3 периода.

В удалении от корпуса двигателя на 0,1 м наибольшие значения индукции МП оказываются как в установившихся режимах, в плоскости среднего сечения машины. При этом составляющая индукции, параллельная оси двигателя, оказывается в несколько раз меньше тангенциальной и радиальной составляющих. Величины амплитуд последних близки и не превышают двухкратных значений по сравнению с установившимися (порядка 50 мкТ).

Наибольшие скорости изменений составляющих вектора магнитной индукции МП согласно полученным осциллограммам были, примерно, 0,2 мТ/с, что также превышает эти величины в установившихся режимах.

К сожалению, данными, характеризующими электрическое поле во внутренних помещениях судов, авторы не располагают. Лабораторные измерения электрического поля низких частот, возникающего у образцов судового электрооборудования, дали предельные значения амплитуд до 3-5 кВ/м. Обнаружены предельные значения электростатического поля до 80 кВ/м (вблизи элементов компьютеров).

По мнению авторов, даже эти несистематические, выборочные оценки ближних магнитных и электрических полей судовых технических средств являются веским аргументом в пользу того, чтобы достаточно полно изучить электромагнитные характеристики внутренних судовых пространств и рациональным образом обеспечить безопасное пребывание в них экипажа и пассажиров, для которых эти уровни оказываются небезопасными.

4

В начале 1996 г. введено Положение о взаимодействии Государственного комитета санитарно-эпидемиологического надзора РФ и Департамента судостроительной промышленности ГКОП РФ, в котором в качестве основного направления указано «обеспечение приоритета сохранения жизни и здоровья населения, пассажиров и работающих при использовании продукции судостроения, эксплуатации объектов водного транспорта, судостроения и морской техники». Эта цитата из Положения приводится здесь для подчеркивания признания на высших уровнях руководства РФ, значимости вопросов электромагнитной гигиены, которые, конечно, относятся к сфере обеспечения жизни и здоровья той достаточно многочисленной части

населения, которая оказывается связанной с морскими плавающими объектами в качестве пассажиров и плавсостава.

Данные разделов 1, 2 и 3, по мнению авторов, содержат аргументы в пользу усиления внимания к соблюдению электромагнитной гигиены на судах и выработке программы ее обеспечения техническими и организационными мерами.

Базой таких координированных мер должны послужить нормативные документы Регистра, охватывающие все судовые пространства, в которых протекает жизнедеятельность. Существующие в настоящее время правила и нормы обеспечения электромагнитной гигиены на судах нельзя признать достаточными. Направление и содержание разработки этих важных документов, определяющих конечный результат — «электромагнитную безопасность мореплавания», должны стать задачей совместных усилий специалистов в области электромагнитной совместимости в техно- и биосфере.

Трудность этой задачи определяется не только сложностью закономерностей электромагнитных и биологических (физиологических) процессов, но и спецификой судовых условий, к которым относится совокупное воздействие на организм ряда неблагоприятных физических факторов (механика, тепло, климат, радиация, ...). Однако, задача обеспечения электромагнитной гигиены на судах, конечно, оправдывает усилия и затраты, которые необходимы для ее решения.

Выводы

1. Результаты многочисленных исследований электромагнитных воздействий на биообъекты и, в особенности на человека, указывают на острую необходимость разработки и принятия мер по предупреждению их вредных последствий.

2. Предупреждение вредных последствий нарушений электромагнитной гигиены должно быть распространено на суда с жесткими электромагнитными условиями в широком диапазоне частот.

3. В нормативных документах, регламентирующих условия соблюдения на судах электромагнитной гигиены, в настоящее время существуют положения, которые относятся к воздействиям на человека только полей высоких частот в пределах верхних палуб.

4. Вопросы электромагнитной гигиены во внутрисудовых пространствах, в том числе в энергонасыщенных помещениях, в этих документах практически отсутствуют.

5. Правовой базой работ по обеспечению электромагнитной совместимости биобъектов на судах должно быть создание научно обоснованных нормативных документов по электромагнитной гигиене, органически связанных с общими правилами и нормами обеспечения безопасности мореплавания, включая стадию проектирования судов и их оборудования.

6. Нормативные документы по обеспечению электромагнитной гигиены должны охватывать:

- классификацию и характеристики судовых пространств с агрессивными электромагнитными условиями;

- методы и средства прогнозирования и измерения параметров электромагнитной обстановки, учитывая и современные метрологические возможности;

- средства и методы защиты от полевых электромагнитных воздействий, а также

- порядок и способы контроля соблюдения электромагнитной гигиены в судовых условиях.

7. Задачи обеспечения электромагнитной гигиены необходимо рассматривать с учетом совокупного (аддитивного) одновременно нарушения условий обитания и под воздействием других (не электромагнитной природы) физических и химических факторов.

Н.И.Айзенштадт, М.С.Вилесова, Ю.Н.Киреев, А.А.Никитенко, Р.Б.Побат

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТАЯ ОГНЕ-, ВОДО- И ГАЗОСТОЙКАЯ МАССА ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ СУДОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ КОРОБОК

Свойства компаундов на основе эпоксидной смолы, применяемых в настоящее время в отечественном судостроении для заливки коробок кабельных трасс, определяют сложность, трудоемкость и вредность технологий их использования в электро-монтажном производстве. Эти составы не соответствуют международным требованиям по огнестойкости.

Практика зарубежного судостроения показывает возможность использования заливочных масс с более совершенными технологическими характеристиками и свойствами. Вместе с тем, существенным является их высокая стоимость и зависимость отечественного судостроения от иностранного рынка. Это обусловило разработки новых рецептур заливочных масс, упрощающих технологию герметизации кабельных коробок и отличающихся экологической чистотой и отсутствием токсичности.

Решение именно этой задачи авторами статьи — коллективом химиков-технологов и судовых электромонтажников, привело к созданию описываемой ниже массы «НИКИ».

Уплотнительная огне- и водогазостойкая масса «НИКИ» предназначена для уплотнения кабелей и места их проходов через корабельные переборки и предохранения от распространения огня по трассе кабелей вследствие горючести оболочек и изоляционных покрытий последних. Композиция для герметизации кабельных проходов должна обладать литевыми свойствами и способностью отверждаться при температуре окружающей среды. Другим непременным условием является жаростойкость (негорючесть) герметика. Оба эти требования сужают круг потенциальных исходных материалов и предопределяют его выбор из числа неорганических (минеральных) веществ, близких по природе к цементам, поэтому в качестве уплотнительной массы был выбран цементоподобный материал из класса огнеупоров на магнезитовой основе.

Выбранный материал отвечает также ряду других требований, предъявляемых к уплотнительной массе, а именно:

обеспечивает плотное прилегание к стенкам кабельной коробки и к самим кабелям за счет специальной присадки, приводящей к объемному расширению массы в процессе отверждения;

является практически безвредным в процессе переработки и после отверждения;

допускает упрощенную технологию смещения и заливки и не требует прецизионной дозировки компонентов;

допускает длительное хранение компонентов при соблюдении заданных условий.

Уплотнительная масса поставляется в виде двух компонентов — порошкообразного и жидкого (водного раствора отвердителя). Компоненты смешиваются непосредственно перед заливкой на месте потребления, допускается перемешивание вручную.

Рекомендуемое соотношение компонентов:

$$\frac{\text{порошок}}{\text{раствор отвердителя}} \approx \frac{60 \pm 2}{40 \pm 2} \quad (\text{т.е. } 1,4 - 1,5\%) \text{ по весу}$$

или

$$\frac{\text{порошок}}{\text{раствор отвердителя}} \approx \frac{2}{1} \text{ по объему}$$

При температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ литевые свойства сохраняются 1 — 1,5 часа.

Схватывание и отверждение массы происходит в течение 24 — 36 часов при той же температуре. Процесс расширения требует около 5 сут., а окончательное созревание, т.е. достижение постоянства физико-механических характеристик, происходит через 24 — 25 сут. (для обычных цементов — 28 сут.).

Однако, уже через 5 сут. завершается процесс расширения и за счет этого достигается герметичность.

Таким образом, период времени — 24 сут., не является лимитирующим в процессе производства.

Физико-химические и физико-механические характеристики отвержденного состава были подтверждены при проведении МВИ (межведомственных испытаний) образцов из отвержденной массы.

Согласно ГОСТу 320.4-81 определялись прочностные характеристики образцов балочек из вышеуказанной массы после воздействия смазочного масла и дизельного топлива, после

выдержки в парах воды, а также после выдержки при температурах -40°C , $+50^{\circ}\text{C}$ и термоциклирования в этих же пределах.

Определялась также устойчивость образцов к воздействию смазочного масла, дизельного топлива и паров воды по степени набухания в указанных средах.

Для оценки стойкости массы «НИКИ» к воздействию нефтепродуктов и паров воды был принят коэффициент стойкости K_c , равный отношению значений прочности при изгибе после воздействия среды и до воздействия среды.

Согласно ГОСТу 25246-82 на бетоны, химически стойкие к воздействию различных сред (в том числе органических жидкостей), материал характеризуется как высокостойкий при $K_c \geq 0,8$, стойкий при $0,5 \leq K_c \leq 0,8$ и относительно стойкий при $0,3 \leq K_c \leq 0,5$.

Средние значения результатов испытаний ряда образцов-балочек из испытываемой массы приведены в табл.1 и 2.

Таблица 1

Прочностные характеристики образцов из уплотнительной массы после воздействия нефтепродуктов в течение 10 сут. при $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$.

Нефтепродукт	Изгиб			Сжатие
	прочность		Стрела прогиба, мм	σ , кг/см ²
	R , кг/см ²	K_c		
Без воздействия	$R_0 = 17,2$	—	4,7	312
Дизельное топливо	$R_r = 14,4$	0,84	4,6	327
Смазочное масло дизельное	$R_r = 12,3$	0,82	4,2	342

Таблица 2

Изменения массы образцов уплотнительной массы «НИКИ» в процессе выдержки в среде нефтепродуктов в течение 10 сут. при $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Среда (нефтепродукт)	Длительность выдержки (сутки)	Изменения массы (%)		
		1	2	10
Дизельное топливо		1,08	1,25	1,51
Смазочное масло дизельное		0,52	0,55	0,65

Из данных таблиц 1 и 2 можно заключить следующее.

Прочностные испытания на изгиб показали, что масса по значениям коэффициента стойкости является высокостойкой по отношению к дизельному топливу и стойкой по отношению к смазочному маслу.

Прочностные испытания на сжатие не обнаружили разрушающего влияния нефтепродуктов на прочность массы.

Изменение массы (степень набухания) при выдержке в нефтепродуктах очень мало и свидетельствует о проникновении указанных нефтепродуктов только в поверхностный слой отвержденных образцов-балочек.

Таблица 3

Прочностные характеристики образцов балочек из уплотнительной массы «НИКИ» при воздействии влаги и последующей сушке

Вид воздействия	Изгиб		Стрела прогиба, мм	Сжатие σ , кг/см ²
	прочность			
	R , кг/см ²	Относит. K_c		
До воздействия	$R_0 = 17,2$		4,7	312
Выдержка при относительной влажности $95 \pm 3\%$ и температуре 40°C в течение 4 сут.	$R_t = 5,8$	0,34	3,2	289
Сушка после увлажнения при 40°C — 3 час.	$R_t = 11,6$	0,67	4,3	287
при 20°C — 3 сут.	$R_t = 11,8$		4,2	

Изменения массы образцов уплотнительной массы «НИКИ» при увлажнении (относительная влажность — $95 \pm 3\%$, температура 40°C) в течение суток и далее еще 3-х сут. составляет соответственно 3% и 6 %. Последующая сушка в течение 3 часов при температуре 40°C и далее еще 3-х сут. при температуре $20 \pm 3^\circ\text{C}$ восстанавливает исходное значение массы.

На основании этих данных и данных табл. 3 можно утверждать, что по значению коэффициента стойкости K_c масса относится к категории относительно стойких материалов по отношению к длительному воздействию водяных паров при повышенной температуре вследствие набухания в парах с поверхности.

После сушки прочностные характеристики материала отчасти восстанавливаются и он переходит в категорию стойких (по K_c).

Открытая поверхность уплотнений из массы «НИКИ», доступная для воздействия паров воды, должна быть защищена водонепроницаемым покрытием.

Холодоустойчивость, теплоустойчивость и влияние циклического знакопеременного изменения температуры среды определялись на сериях образцов балочек, подвергнутых воздействию в следующих условиях:

при минус $(40 \pm 3)^\circ\text{C}$ в течение 4 час;
 при плюс $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$ в течение 4 час;
 при термоциклировании в режиме трех циклов, причем каждый цикл включал воздействие:
 при минус 40°C — 10 мин;
 при плюс 50°C — 10 мин

Образцы после воздействия различных температурных режимов помещались в эксикатор, где выдерживались при температуре $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ вплоть до проведения прочностных испытаний. Результаты последних представлены в табл. 4.

Таблица 4

Прочностные характеристики образцов уплотнительной массы «НИКИ» после охлаждения, нагрева и термоциклирования

охлаждения, нагрева и термоциклирования				
Вид воздействия	Изгиб		Стрела прогиба, мм	Сжатие
	прочность			σ , кг/см ²
	R , кг/см ²	Относит. K_c		
До воздействия	$R_0 = 17,2$	—	4,7	312
Охлаждение 4 часа при -40°C	$R_1 = 18,0$	1,04	5,0	352
Нагрев 4 часа при $+50^\circ\text{C}$	$R_2 = 16,0$	0,93	4,6	323
3 цикла:				
— охлаждение 10 минут при -40°C	$R_3 = 17,0$	0,99	4,8	308
— нагрев 10 минут при $+50^\circ\text{C}$				

Данные табл.4 позволяют сделать вывод об отсутствии изменений прочностных характеристик испытуемой массы при температурных воздействиях в принятых пределах.

Объемное расширение уплотнительной массы в процессе отверждения регистрировалось по косвенной характеристике: методом выталкивания стержня отвержденной массы из канала толстостенного стального цилиндра с внутренним диаметром 1 см по усилию выталкивания. Жидкая масса заливалась в отполированный канал цилиндра, прикрепленного к съемному днищу. Процесс заполнения сопровождался вибрацией образца во избежание образования пустот (воздушных пузырей).

В результате испытаний нескольких вариантов рецептур массы были получены значения давлений выталкивания массы в пределах 250–500 кг/см².

Масса «НИКИ» выдержала испытания на вибростойкость и ударпрочность (ГОСТ В 20.30.304-76) и на газо- и влагонепроницаемость (ОСТ 5.6103-76).

Разработанная масса «НИКИ» изучалась в Научно-исследовательском институте гигиены и профпатологии для определения ее токсикологических характеристик. В итоге было получено официальное заключение, данные которого послужили основанием для выдачи сертификата (N 003114 от 25.12.95).

Согласно указанным документам:

неотвержденный состав (порошкообразный компонент) относится к 3-му классу опасности по ГОСТ 12.1.007-76, т.е. является умеренно опасным веществом и имеет ПДК_{р.з.} (по диоксиду кремния) = 4 мг/м³;

отвержденный состав относится к 4-му классу опасности по ГОСТу 12.1.007-76, т.е. является малоопасным веществом. (Для сравнения укажем, что портландцементы тампонажные по ГОСТу 1581-91, имеющие ПДК_{р.з.} = 6 мг/м³, относятся также к 3-му классу опасности по ГОСТу 12.1.007-76).

В филиале ВНИИПО МВД РФ в Петербурге (Независимый Испытательный Центр Пожарной безопасности) были проведены испытания массы «НИКИ» на негорючесть в соответствии с требованиями Регистра. На основании эксперимента установлено, что масса относится к группе негорючих материалов, что подтверждается официальным заключением (Протокол № 176-95 испытаний материалов на негорючесть. Резолюция ИМО А.472(XII)).

Была изготовлена специальная установочная партия продукта, которому присвоили марку «НИКИ», для проведения испытаний изделий на воздействие гидростатического давления, газо- и водонепроницаемость.

Объекты испытаний — кабельная уплотнительная коробка 1-й величины (длина 150 мм) по ОСТу 5.6183-82 и стаканы типа БЭЛТ.363173.007. В кабельной коробке уплотнены 6 кабелей типа КНРЭ, КНР, КМПВ, причем коробка заполнена кабелем на 65%.

При испытаниях на водонепроницаемость кабельной коробки, уплотненной массой холодной заливки «НИКИ», выдержано избыточное давление 0,2 МПа (2,0 кг/см²) в течение 24 часов. Затем избыточное давление было повышено до 0,3 МПа (3 кг/см²) и удерживалось в течение 15 мин. Протечек и снижения давления не наблюдалось.

При испытаниях на газонепроницаемость, выполненных воздействием воздуха под давлением 0,02 МПа (0,2 кг/см²) в течение 5 мин, выхода пузырьков воздуха не наблюдалось.

Таким образом, образец уплотнения групповых проходов кабелей, уплотненный массой «НИКИ», выдержал испытания на воздейст-

вие статического гидравлического давления, а также на водо- и газонепроницаемость в соответствии с Правилами Регистра.

Выводы

Разработана рецептура и технология производства и применения универсальной огне-, водо- и газостойкой уплотнительной массы «НИКИ» для уплотнения кабельных коробок на судах.

Масса отличается высокой огнестойкостью и хорошими герметизирующими свойствами. Она нетоксична, экологически безопасна. Технология ее применения проста. Рецептура основана исключительно на отечественных исходных компонентах, выпускаемых в России в промышленном масштабе.

Интегральные свойства «НИКИ» позволяют применять ее для герметизации кабельных коробок по ОСТу 5.6183, т.е. имеющих длину 150 мм (по сравнению с зарубежными 250 мм, где «НИКИ», естественно, обеспечивает отличный результат).

Стоимость «НИКИ», возможность использования на кабельных коробках, наряду с техническими и экологическими достоинствами, делает ее применение экономически выгодным.

Регистр выдал сертификат о типовом одобрении на применение массы «НИКИ».

Масса «НИКИ» выпускается АОЗТ «ЭЛЕКТРОБАЛТ НВ» по ТУ 3493-001-33136588-95.

СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Большой интерес, проявляемый в последние годы к разработке гребных электрических установок (ГЭУ) с полупроводниковыми преобразователями (ПП) различных типов, обусловлен перспективностью их применения на судах различного назначения. ГЭУ этого типа наиболее полно отвечают самым современным требованиям, связанным с ростом энерговооруженности судов, улучшением их технико-экономических показателей и повышением эффективности использования. Благодаря этому такие установки, кроме традиционного применения на ледоколах и судах ледового плавания, широко используются на судах самого различного назначения. Широкое применение находят ГЭУ и ПП на пассажирских судах, танкерах, на специальных судах (траулеры, буровые платформы, спасательные, научно-исследовательские суда и др.), у которых ходовые режимы с максимальной мощностью не совпадают по времени с периодами работы главных производственных механизмов.

Однако применение ПП для управления гребными электродвигателями связано с рядом особенностей, оказывающих существенное влияние на характеристики основного оборудования ГЭУ, выбор параметров и принципы построения электроэнергетической системы и ее защит, что в значительной мере определяет надежность работы энергетической установки в целом и безопасность мореплавания.

При выборе средств защиты ПП необходимо иметь в виду, что полупроводниковые приборы (тиристоры, диоды) имеют малую тепловую инерцию и весьма чувствительны к перегрузкам. Поэтому применение традиционных автоматических выключателей с временем срабатывания 60-80 мс и обычных предохранителей, время — токовые характеристики которых значительно превышают аналогичные характеристики полупро-

водниковых приборов, не обеспечивают требуемую защиту преобразователя.

Самым рациональным решением вопроса защиты ГЭУ с ПП могло стать применение быстродействующих автоматических выключателей и быстродействующих предохранителей со временем срабатывания менее 10 мс, что позволило бы ограничить ударный ток короткого замыкания.

Отсутствие отечественных быстродействующих автоматических выключателей в морском исполнении на требуемые напряжения вынуждает применять для защиты ГЭУ обычные автоматические выключатели со временем срабатывания до 80 мс.

Для защиты полупроводниковых приборов от пробоя в современных ГЭУ широко используются быстродействующие предохранители, которые включаются последовательно с полупроводниковым прибором.

Быстродействующие плавкие предохранители (БПП) отличаются от обычных плавких предохранителей общепромышленного назначения более жесткими требованиями. При выборе БПП необходимо проводить согласование характеристик предохранителя с характеристиками вентиля. БПП отличаются высокой отключающей способностью, минимальными потерями при номинальном токе, постоянством характеристик во времени при длительном протекании номинального тока. При использовании БПП энергия, выделяющаяся в вентиле за время протекания аварийного тока, минимальна. Напряжение дуги, возникающее при срабатывании предохранителя, и которое не должно приводить к пробоя неповрежденных приборов, минимально. БПП устанавливают для защиты от внешних коротких замыканий в фазных проводах на входе выпрямителя, либо на выходе, а также для защиты от внутренних повреждений в цепях тиристоров.

Основным параметром плавкого предохранителя является количество энергии, необходимое для его расплавления. Этот параметр, называемый интегралом плавления, определяется выражением:

$$W_{\text{пл}} = \int_0^{t_{\text{сп}}} i^2 dt,$$

где $t_{\text{сп}}$ — время расплавления плавкого элемента (до 0,01 с);
 i — мгновенное значение тока.

После расплавления плавкого элемента образуется электрическая дуга, которая вызовет напряжение на предохранителе и ограничение аварийного тока в цепи. В период горения дуги (время t_g) выделяется теплота, которую принято называть интегралом дуги.

БПП выбирают по полному интегралу отключения

$$W = W_{пл} + W_g$$

Для правильного выбора БПП необходимо знать: $I_{эф}$ — в предохранителе при номинальном режиме работы; $U_{эф}$ или U_m — между выводами БПП после его перегорания; $I_{доп.ав.}$ — допустимое значение аварийного тока вентиля; $U_{доп.}$ — допустимое значение аварийного тока вентиля; $U_{доп.}$ — допустимое значение напряжения для вентиля, возникающее при перегорании предохранителя; $I_{ав.}$ — аварийный ток вентиля, который должен быть отключен предохранителем.

Для вентилялей вводится показатель W_b — допустимый защитный показатель вентиля.

Если $W_{пр} > W_b$, при условии соответствия номинальных токов вентиля и предохранителя, БПП не обеспечивает надежной защиты вентиля. Для повышения надежности защиты используют БПП на меньшие токи, либо увеличивают число параллельно включенных вентилялей.

Для обеспечения надежной защиты вентилялей необходимо выдержать условие:

$$W_{пр} = W_b / K,$$

где K — коэффициент запаса, обычно $K = 1,2 \div 1,5$.

Расчеты, выполненные для ряда полупроводниковых преобразователей без быстродействующей токовой защиты, показали, что даже для судов ледового плавания (частые реверсы, удары винта о лед, фрезерование льда, заклинивание винта) в режимах короткого замыкания за преобразователем температура полупроводниковой структуры вентиля выше, чем в режимах эксплуатационных нагрузок. Поэтому аварийно-допустимый ток вентиля должен выбираться по значению ударного тока короткого замыкания, то есть

$$n = I_{уд.} / I_{доп.ав.} K_1 K_2,$$

где $I_{уд.}$ — ударный ток короткого замыкания;

n — количество параллельных вентилялей в плече;

$K_1 = 0,8 \div 0,9$ — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения тока между параллельно включенными вентилями;

$K_2 = 0,8 \div 0,9$ — коэффициент запаса, учитывающий разброс параметров;

Наряду с защитой от сверхтоков для обеспечения безаварийной работы преобразователя должна предусматриваться защита от возможных перенапряжений, которые могут возникать из-за перенапряжений в сети, вызванных действием сетевой коммутационной аппаратуры (сетевые перенапряжения), а также вследствие коммутационных изменений в самой схеме ППЧ (схемные перенапряжения).

Сетевые перенапряжения в сетях 380 В достигают 4 — 5-кратных значений. В сетях более высокого напряжения — до 3-х-кратного значения номинального рабочего напряжения. Эти перенапряжения эпизодичны.

Схемные перенапряжения связаны с действием коммутационной аппаратуры схемы преобразователя. Амплитуда, крутизна фронта и длительность перенапряжения зависят от параметров элементов схемы преобразователя, тока и напряжения на элементах схемы в момент коммутации.

Схемные перенапряжения возникают при:

подключении преобразователя к питающей сети;

отключении тока нагрузки или срабатывании защитных устройств (автоматических выключателей, предохранителей).

Перенапряжения возникают из-за электромагнитной энергии, накопленной в полях рассеяния генераторов, реакторов, питающей сети. Перечисленные виды схемных перенапряжений являются эпизодическими. Вместе с тем, существуют схемные повторяющиеся перенапряжения. Они связаны с включением и выключением вентилей схемы и называются коммутационными схемными перенапряжениями.

При включении вентиля напряжение его между анодом и катодом резко снижается. Эти изменения (сотни и тысячи вольт) прикладываются к другим вентилям схемы. Создаются всплески с большой крутизной фронта. Особенно это опасно при последовательном соединении вентилей и неидентичности сигналов отпирания.

Процесс выключения связан со спаданием обратного тока (амплитуда его может достигать 30% максимального значения прямого тока). При спадании обратного тока на индуктивностях возникают напряжения $L \frac{di}{dt}$, которые в сумме с рабочими напряжениями прикладываются к вентилям. Коммутационные перенапряжения могут достигать 10-кратного значения.

Существуют также схемные резонансные перенапряжения. Они связаны с тем, что ПП потребляет из сети несинусоидальный

ток. Если собственная частота контура цепи совпадает с частотой одной из гармоник тока сети, возникает резонанс, сопровождаемый перенапряжением. Такие перенапряжения могут возникать в схемах управления, при этом ток колебательного процесса может вызвать преждевременное принудительное включение тиристора.

Особо опасны перенапряжения для клапанов — для них недопустимы даже кратковременные превышения допустимого значения напряжения.

При разработке дополнений к Правилам Регистра необходимо учитывать общие тенденции к снижению всех видов перенапряжений для обеспечения надежной защиты ПП. Такими тенденциями являются:

- выбор полупроводникового прибора с достаточным запасом по напряжению;

- обеспечение номинального теплового режима, так как при лучшем охлаждении полупроводниковые приборы более устойчивы к перенапряжениям;

- выбор достаточного запаса по обратному напряжению;

- применение демпфирующих R — C цепочек, подключаемых параллельно полупроводниковому прибору или преобразователю.

Список литературы

1. В. А. Панов, В. В. Романовский, С. А. Корди. Эксплуатация гребных электроустановок. М.; Транспорт. 1988 г. С.174.
2. Единые электроэнергетические системы и отбор мощности на судах с электродвижением. // А.С.Болотский, Л.М.Либин, Э.В.Макашов, В.В.Романовский // Научно-технический сборник Регистра СССР, Вып.15. Л.: Транспорт. 1986. С.72-79.
3. Малышев В.А., Романовский В.В. Особенности эксплуатации гребной установки атомного ледокола // Судостроение. 1995 г. N 11-12. С.16-17.

УДК 629.12.018.76: 656.61.052.14: 621.396.932

К.А. Семенов, Б.И. Кузьмин, А.А. Лукинов

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМ СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ НА МОРСКОМ ФЛОТЕ

Рождение концепции интеграции систем можно отнести к началу 60-х годов. Возросшие возможности современной однофункциональной аппаратуры систем связи и навигации, освоение новых диапазонов частот и алгоритмов обработки сигналов, с одной стороны, позволяют поднять на новый качественный уровень традиционные системы радиосвязи и радионавигации, а также добиться лучшего выполнения ими своих функциональных задач. С другой стороны, они вызвали, наряду с новыми осваиваемыми проблемами, перекрытие и дублирование в решениях традиционных функций. В возможностях отказа от некоторых стандартно выполняемых задач однофункциональной аппаратурой виделось решение проблемы. Вместе с этим становится все более затруднительным размещение однофункциональной аппаратуры, ее использование и ремонт, в связи с чем возникает проблема рассмотрения структур известных устройств под новым углом зрения.

Основная цель интеграции — разработка многофункциональной аппаратуры с характеристиками, превосходящими соответствующие характеристики набора однофункциональных устройств. При разработке интегрированных систем требуется обеспечить возможность функционирования совмещенной аппаратуры без значительного изменения сигналов систем, т.к. существующая аппаратура не снимается с производства; получить значительные технико-экономические преимущества по стоимости, объему, массе, а также обеспечить новые функциональные возможности, достигаемые за счет интеграции.

Первоначальное стремление было связано с объединением средств в рамках одной системы. Так были разработаны первые антенно-аппаратурные комплексы связи с фазирруемыми антенными решетками и встраиваемыми локальными вычислительными сетями кольцевой или радиальной структуры. Основной целью на данном этапе была минимизация средств радиосвязи с максимальным возможным перекрытием функций различных информационных каналов. Следующим шагом стала централизация и автоматизация управления всеми судовыми средствами связи, в которых основная роль все-таки отводилась оператору. Была создана система связи типа «Диск С». В настоящее время интеграция перешла на качественно новый уровень — объединение разнородных (выполняющих различные функциональные задачи) систем в один интеллектуальный комплекс.

Для создания интегрированной системы с действительно интеллектуальными характеристиками требуется выполнить следующее:

- произвести универсализацию модулей аппаратуры различного назначения;

- предусмотреть использование однотипных сигналов, позволяющих работать различными техническими средствами в различных диапазонах, когда обработка должна вестись по унифицированным алгоритмам с минимальными изменениями и дополнениями для различных средств ;

- разработать алгоритмы, позволяющие рационально и равноправно пользоваться ресурсами интегрированной системы различными пользователями;

- создать совместимые и корректируемые в процессе эксплуатации программные комплексы.

Основным фактором, позволяющим осуществить высокую степень интеграции средств связи и навигации, является общность форм выполнения ими своих задач. Ранее навигационные и связные средства только пересекались в своем использовании, причем зачастую это пересечение было конфликтным. Сейчас сделана попытка совместного их функционирования на основе разумного объединения и распределения функций.

Рассмотрим некоторые проблемы интегрирования средств связи и навигации. К ним относятся:

- поддержание бесперебойной, достоверной связи и обеспечение постоянного и точного определения местоположения судна;

работа в широком диапазоне частот как средств навигации, так и средств связи;

планирование использования средств связи и средств навигации в зависимости от района и характеристик плавания судов различного назначения.

Объединяющими условиями являются:

использование радиотехнических средств;

высокие требования к качеству функционирования;

диапазоны используемых волн;

автоматизация функции выбора оптимальных средств в конкретных условиях.

Разъединяющими сторонами являются:

высокая вероятность появления внутрисистемных помех при одновременной работе различных средств;

отсутствие функциональных взаимосвязей.

В результате исследований по различным программам выявлены преимущества интеграции по отношению к обычной аппаратуре. Так, необходимые функциональная надежность и отказоустойчивость достигаются за счет оперативного подключения вместо вышедших из строя исправных модулей. Перестройка интегрированной структуры может вестись по двум направлениям:

выполнение потерянных функций за счет других аналогичных модулей сопряженных систем;

продолжение выполнения задачи за счет другой сопряженной системы.

Интегрированная аппаратура, благодаря модульному построению и модульному программному обеспечению, может модернизироваться за счет замены старых модулей и использования новых элементов программного обеспечения, вводимых в память, для улучшения характеристик без изменения основных структур. Компоненты такой аппаратуры могут программироваться для взаимодействия с сервисными и родственными системами, что открывает дополнительные возможности для кооперации. К не менее важным преимуществам интегрированной аппаратуры относятся возможности повышения помехоустойчивости и точности при навигационных определениях. Лучшая помехозащищенность, особенно систем связи, обеспечивается за счет более гибкого использования свободных частот, а также — за счет экспертных оценок, динамику которых оператор за короткий промежуток времени не имеет возможность оценить. В сложной помеховой обстановке более точное местоопре-

деление может быть выполнено за счет интегрального использования данных различных навигационных систем, а также данных, поступающих по каналам связи от соседних судов. При значительных отклонениях данных, поступающих от различных источников, существует возможность определения места ошибки и исключения последней из алгоритма обработки. Обобщенная схема интегрированной системы может быть представлена совокупностью отдельных узлов, связанных между собой общей шиной (магистралью) управления. Состав интегрированной системы принципиально мало отличается от состава однофункциональной аппаратуры, за исключением наличия связей там, где раньше они не предусматривались. Наличие разветвленной совокупности связей позволяет вести высокодинамичное управление системой в целом. Ряд устройств, без которых многие автономные средства не могут работать, выполняют не только родственные функции (блоки питания, синтезаторы частот, устройства отображения и др.), но и являются одинаковыми по своему конструктивному выполнению. При создании интегрированной системы невозможно рассмотрение устройств как простого набора средств. Поэтому, уже на этапе планирования, необходимо рассматривать систему как единый комплекс, что должно избавить от дублирования устройств. Однако, на данном этапе нельзя переходить грань разумного снижения их количества. Требуется, например, предусмотреть систему дублирования и поддержания работы в аварийных условиях.

Достижения в области системного проектирования позволяют поднять функциональную надежность на новый уровень. Повышение общей надежности ведется не только за счет улучшения надежности отдельных элементов. Создание новых типов микросхем, таких как биомолекулярные микросхемы, запоминающие устройства на цифровых магнитных дисках (ЦМД) и магнитных неоднородностях, использование интегральных оптических схем позволяет вести непрерывно текущий и функциональный контроль. Практически мгновенная реакция на изменения параметров позволяет вводить не только резервные модули, но и перераспределять ресурсы пользователям, т.е. производить изменение общей структуры системы.

Исследования в области многостанционного доступа привели к тому, что стало возможным использовать один комплект аппаратуры для одновременного решения различных задач. Так, в настоящее время широко используется временное разделение

при равномерно высокой нагрузке. Если использование одних средств более часто по сравнению с другими, то переходят на другие алгоритмы, например, доступ с назначениями и уступками.

Обработка сигналов, как и ранее, состоит из фильтрации, усиления и демодуляции. Наиболее сложным и дорогостоящим процессом является фильтрация, поэтому необходимо максимизировать интегрирование именно на этом участке. Последнее возможно на основе введенного профессором Д.В.Агеевым понятия «обобщенного резонанса» и его реализации в активных RC-цепях.

Решение этой проблемы может быть значительно облегчено с началом применения широкополосных сигналов, которые допускают одновременную передачу нескольких сообщений на базе их кодового разделения, обладают хорошими характеристиками помехоустойчивости к естественным помехам и помехам от радиотехнических средств, а также имеют схожие алгоритмы обработки. В настоящее время в системах связи широко используются сигналы с программированной перестройкой радиочастот (ППРЧ), псевдослучайной перестройкой частот (ПСПЧ), линейной и нелинейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и некоторые др. Использованию подобных сигналов предшествовала кропотливая работа по созданию систем, позволяющих вести обработку помехозащищенных сигналов, что потребовало применения быстродействующих вычислительных элементов. Наиболее исследованными и перспективными на данном этапе являются универсальные корреляторы, позволяющие одновременно обрабатывать несколько различных сигналов. Основными элементами таких корреляторов являются согласованный многоканальный фильтр, программируемый сигнальный процессор и сигнальная шина. Согласованные фильтры содержат элементы на ПАВ и приборы с зарядовой связью. Применение трансверсальных фильтров с использованием биомолекулярной технологии позволит поднять быстродействие до десятков млрд. операций в секунду, что позволит сканировать по диапазону в сотни МГц в течение наносекунд. На базе новых технологий разрабатываются аналого-цифровые преобразователи (АЦП), позволяющие вести дискретизацию почти сразу же после выделения сигналов антенной, что в свою очередь позволит избежать подавления полезных сигналов за счет нелинейностей усилителей и смесителей. В совокупности с цифровой фильтрацией это должно значительно повысить помехоустойчивость.

Применение новых антенных систем, таких как фазированные антенные решетки (ФАР), позволяет повысить качество селекции сигналов, что в обстановке одновременной многофункциональной работы особенно важно.

Повышение качества работы систем связи и навигации в конкретных условиях достигается не только за счет выбора оптимальных структур, но и за счет адаптации радиосредств связи и навигации к новым условиям. Средствами достижения наилучшего результата в этом случае служат:

- разработка новых алгоритмов анализа обстановки;

- увеличение энергетических характеристик передатчиков;

- улучшение алгоритмов обработки при различных помеховых воздействиях, введение универсальных аппаратных средств борьбы с помехами;

- назначение приоритетов при обработке.

Особое место в интегрированных системах принадлежит специальному математическому (СМО) и программному (ПО) обеспечению, которое имеет несколько уровней. К высшему уровню относятся программы управления аппаратурой. Они являются резидентными для процессора данных и обеспечивают взаимодействие операторов с аппаратными средствами. Второй уровень составляют операционные системы, осуществляющие автономное управление процессором данных и перепрограммируемыми контроллерами. К третьему уровню относятся прикладные программы соответствующих средств.

Благодаря соглашениям о связях между прикладными программами и операционными системами обеспечивается возможность модернизации и расширения функциональных характеристик, СМО и ПО должны удовлетворять ряду общих требований. Основные из них — достоверность и оперативность получения результатов. Для удовлетворения этим требованиям необходим системный подход к их построению. В этом случае проще обеспечить единство информационной базы данных, унификацию критериев обработки. Построение математического обеспечения обычно производится по модульному принципу, т.е. все программы образуют отдельные пакеты-модули, решающие однотипные задачи и размещаемые в долговременных запоминающих устройствах (ДЗУ). Высокие быстродействие и производительность достигаются благодаря применению принципов мультипрограммирования, режимов параллельной обработки дан-

ных и разделения времени. Средства встроенного контроля отказов, автоматизированного поиска и исправления ошибок обеспечивают высокую надежность цифровой обработки. Для более оперативной замены программных модулей и облегчения работы оператора программирование ведется на языках высокого уровня, использующих структурное программирование «снизу-вверх», т.к. по мере роста производительности ЭВМ и объема их памяти преимущества таких языков в оперативности компенсируют менее эффективное программирование на языках более низкого уровня, например, на ассемблере.

Существующий и прогнозируемый уровень радиоэлектронной техники и компьютерной технологии позволяет перейти к качественно новому этапу — интеграции, что обеспечит значительное повышение качества функциональной работы аппаратуры при снижении общих затрат.

Список литературы

1. Семенов К. А. О прогнозировании и системном решении вопросов радиосвязи на морском флоте // Материалы VIII НТК, секции радиосвязи и радионавигации. М.-Л.: НТОБТ. 1977. С.3-7.
2. Морская радиосвязь и радионавигация // Под ред. Ю.С.Ацерова и К.А. Семенова. М.: Транспорт. 1987. С.288.
3. Сапрыкин В. А., Рокотов С. П. Теория гидроакустики и цифровая обработка сигналов. Часть 2. Петродворец: ВВМУРЭ им. Попова. 1991. С.314.
4. Лукин В. Ю., Мищенко И. Н., Молочко С. В. Основные направления создания интегрированной бортовой радиоэлектронной аппаратуры систем связи навигации и опознавания в США // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. №8. С.3-23.

Е.В. Комраков

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МОРСКОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КАРТОГРАФИИ

Электронная картография становится все более актуальной на всех видах транспорта, включая морской. Она используется также при выполнении других работ.

Вопросы стандартизации применения электронных карт на море решаются на международном уровне. В ноябре 1995 года ИМО (Международная морская организация) приняла резолюцию A817(19) по ECDIS (Electronic Chart Display and Information System), т.е. системам, позволяющим отказаться от использования бумажных карт. Таким образом ECDIS стал легальным. Однако стандарт требований к ECDIS, который разрабатывается рабочей группой WG 7 в рамках технического комитета TC 80 МЭК (Международной Электротехнической Комиссии), еще не готов. Существуют две основные проблемы — это, во-первых, работа над цветами и символами, и во-вторых работа над корректурой карт в ECDIS. К концу этого года ожидается окончательный вариант стандарта. Это даст возможность классификационным обществам начать сертификацию ECDIS. Многие официальные структуры, в том числе Регистр, уже разрабатывают национальные стандарты, основанные, как правило, на предварительных международных документах. Можно предположить, что к началу 1997 года несколько классификационных обществ будут готовы к сертификации ECDIS. Это, хотя и очень важная, но только одна сторона проблемы.

ECDIS не может существовать без карт, выпущенных официальными гидрографическими службами (ГС) согласно стандарту S-57 в формате DX-90. Стандарт S-57 был принят МГО (Международной гидрографической организацией) в 1992 году, хотя еще в 1987 году уже были попытки создать формат DX-87. Формат DX-90 основан на международном стандарте ISO 8211 и является полновесным векторным форматом, передающим информацию об объектах реального мира. Уже есть некоторое количество тестовых карт от ГС, сделанных согласно стандарту S-57, но во второй его версии. В марте этого года вышла редакция, описы-

вающая третью версию формата. По аналогии с вводом (два года назад) второй версии, можно предположить, что переход на новый формат займет достаточно длительное время, поскольку первые тестовые файлы во второй версии появились почти через год после его введения. Кроме того, поскольку рабочая группа по символам и цветам еще не закончила свою работу, третья версия S-57 будет еще изменяться до конца этого года, и только после этого она будет «заморожена» на четыре года. Даже сейчас практически все тестовые файлы во второй версии имеют некоторые отклонения от S-57, хотя прошло уже более 2-х лет с момента его принятия. Подобная ситуация возникнет и с третьей версией, борьба за чистоту которой будет длиться, по-видимому, тоже не менее 2-х лет. Таким образом, с точки зрения соответствия S-57, карты могут появиться не раньше, чем через год-два. Однако, это еще не все.

Еще ни одна ГС не имеет системы поддержки корректуры. Без такой системы создавать карты бессмысленно. В 1994 году компания «Транзас Марин» подала запрос о возможности предоставления карт, которые были сделаны к известному проекту «Северное море» в 1989 году, на что было сообщено, что эти карты уже не существуют, поскольку не поддерживались в течение 5 лет, т.е. работа попросту была сделана зря.

Другая проблема, связанная с созданием баз данных ГС, заключается в том, что во многих случаях требуется не просто перевести существующую бумажную карту в электронный вид, независимо в растровый или векторный формат, но также сделать заново исследования многих регионов, что более трудоемко. Это связано не только с тем, что многие данные сильно устарели, но и с тем, что многие карты, изданные для относительной навигации, могут не подходить для абсолютной спутниковой навигации. Например, координаты судна, полученные при прокладке на бумажной карте пеленга и дистанции от мыса, не обязательно совпадут с координатами, полученными от спутниковой системы местоопределения. Именно поэтому на многих бумажных картах имеются рекомендации переходить с карты на карту не по координатам, а по пеленгу и дистанции от объекта или предупреждение о соблюдении осторожности при подходе к мелководным районам и берегам. Норвежская ГС однозначно заявила, что их северные карты в электронном виде можно будет сделать только после исследований, которые, при условии финансирования, займут более 10 лет. Если же сейчас сделать эти карты в

электронном виде, то судно используя GPS (глобальную систему местоопределения), будет по данным электронной карты плыть по берегу или между не теми островами. Допустим, что существующие карты, например Британского Адмиралтейства (БА), будут переведены в растровый вид, и будет разрешено использовать их вместо бумажных карт. На них невозможна динамическая относительная навигация (прокладка пеленгов и т.д.). Далеко ли уйдет судно, пользуясь растровыми картами БА на северные норвежские воды при позиционировании от GPS и не имея бумажных карт на борту?

На очень многие малообследованные регионы, например, практически на все побережье Китая, районы Океании, Карибского бассейна и т.д., карты БА имеют предупреждение «Поправки к WGS-84 определить невозможно, но это не значит, что они пренебрежительно малы». Даже карты издания 1995 года, например карта 253, имеют такое предупреждение. Компанией «Транзас Марин» были выпущены электронные карты на Малые Антильские острова масштаба 1:100 тыс., с использованием оригиналов карт Главного управления навигации и океанографии Министерства обороны (ГУНиО МО). После этого были созданы планы некоторых портов по оригиналам карт Британского Адмиралтейства. Они все «отошли» от российских карт на 6 кабельтовых. Правильность привязки карт была тщательно проверена. Кто прав? Опасность заключается в том, что и те, и другие бумажные карты являются официальными, однако при прокладке места по GPS на этих картах разница в местоположении составит 6 Кбт, что, с точки зрения безопасности мореплавания, совершенно недопустимо. Прокладка же относительного места по бумажной карте, при помощи, например, радиолокационной станции не приведет к такой разнице. Вероятно поэтому в проекте федеральной программы цифрового картографирования мирового океана, изданной Российским ВМФ летом 1995 года, из полумиллиарда долларов, запрашиваемых на осуществление этой программы, около 70% планируется истратить на промеры и исследования.

Все вышеуказанное говорит о том, что производство официальных электронных карт, по которым можно будет безопасно плавать без бумажных карт, наталкивается на ряд очень серьезных проблем и может занять многие годы, если не десятки лет. Но несмотря на трудности и отсутствие финансирования, ГУНиО МО прилагает все усилия и пытается приблизить издание первых официальных российских карт.

Другие ГС также пытаются что-то сделать. Например, Британское Адмиралтейство объявило конкурс на создание для него баз данных первых 200 карт. Однако оно требует создать их в формате IFF, что лишено смысла, поскольку этот формат очень далек от DX-90 и перевод карт в DX-90 очень трудоемок. Формат IFF (Internal Feature Format) является внутренним форматом английской компании Lazer Scan. Он основан на передаче графических примитивов и не передает информацию об объектах реального мира. Южно-Африканская гидрография уже 2 года назад создала 85 карт в формате IFF и до сих пор не может перевести их в формат DX-90.

Понимая сложность ситуации и длительные сроки внедрения официальных электронных карт, Британская и Американская ГС начали производство карт, не соответствующих стандарту S-57. Это растровые карты, а по сути, фотография бумажной карты, привязанная к координатной сетке, причем не всегда правильно, и ничего общего с каким-либо векторным форматом не имеет. Несмотря на то, что вышеуказанные ГС заявляют, что это — официальные электронные карты ГС, очевидно, что они не соответствуют стандартам S-57 и ECDIS. Это означает, что с юридической точки зрения использование бумажной карты, как основной, обязательно, и капитан будет отвечать за аварию, исходя из прокладки на бумажной карте. Кроме того, очевиден и другой существенный недостаток растровых карт: они — всего лишь картинка. Невозможно изменить ее масштаб, разгрузить, убрав некоторые слои, посмотреть информацию об объектах, обеспечить сигнализацию о пересечении или приближении к различным зонам и районам, включая зоны опасностей, опасных глубин, районов, закрытых для плавания, и т.д. Это означает, что теряется смысл всей идеи динамической электронной картографии, когда в автоматическом режиме осуществляется предупреждение об опасностях. Надо отдать должное, что некоторые ГС сделали образцы в векторном виде. Это Канада — около 250 карт, Ю.Африка — 85, Финляндия — 20, однако они тоже сделаны не по стандарту S-57.

Таким образом, с юридической точки зрения все эти карты находятся в равном положении, с аналогами, производимыми частными компаниями и могут быть использованы только в системах совместно с бумажными, которые являются основными. Такие системы называются ECS (Electronic Chart Systems), по

которым существуют международные и национальные стандарты, в частности стандарт, выпущенный Департаментом Морского Транспорта России.

В мире есть только 2 частные компании, которые производят векторные карты, пригодные для использования в ECS — «С-Мар» и «Транзас Марин». Лидер — компания «Транзас Марин», которая обладает коллекцией из более 3000 карт высокого качества. Компания «С-Мар» тоже динамично стала производить такие карты.

Таким образом, количество векторных карт для ECS, производимых коммерческими структурами, удовлетворительно и динамично растет. Например, «Транзас Марин» производит ежемесячно 60-70 новых. Однако возникает вопрос качества. Несомненно, ошибки на картах будут, даже если эти карты будут производиться официальными ГС. Примером тому является наличие ошибок на бумажных картах разных гидрографий, с которыми приходится постоянно сталкиваться при работе. Весь вопрос в том, насколько ответственно подходит коммерческая компания к контролю качества. Могу сказать, что «Транзас Марин» делает все возможное в этом плане. В отделе картографии компании работают 15 высокопрофессиональных гидрографов, которые занимаются только контролем качества. Это составляет не менее 40% от всего времени, затрачиваемого на производство карты. Большое внимание также уделяется математическому обеспечению пересчета различных проекций, компенсации деформации и дефектов печати бумажных карт. Компания «Транзас Марин» готова предоставить возможность всем клиентам использовать карты высокого качества в течение переходного периода до появления официальных от гидрографических служб, понимая, что независимо от качества, использование бумажной карты, как основной обязательно.

В мировой практике пока не определено, какую технологию принять для производства электронных карт. Можно использовать чисто дигитайзерную технологию. Она опробована и, например, в компании «Транзас Марин» работает уже 6-й год. Сейчас некоторые ГС и компании очень надеются на сканерную технологию, которая после получения растровой карты позволяет полуавтоматически ее векторизовать. Однако, по мнению многих экспертов, такая технология не станет эффективной для производства морских карт. Опыт «Транзас Марин» показывает, что дигитизирование линейных объектов (берега, изобаты и т.д.) в морских картах по трудоемкости занимает, как правило, не более 35-40%. Именно

эту часть работы можно облегчить. Что касается точечных объектов, то в обеих технологиях объем работы одинаков. Например, если на карте 12 тыс. скал (такие карты в коллекции «Транзас Марин» есть), то очевидно, что если повезет и сканерная технология опознает эти скалы, то надо подтвердить или дополнить атрибуты каждой скалы вручную. Вероятно, что надежды на получение в ближайшем будущем полной коллекции карт, благодаря использованию сканерной технологии, не оправданы.

Развитие электронной картографии — очевидно. В будущем без картографических систем будет также трудно обойтись, как, например, сейчас без радара.

СОДЕРЖАНИЕ

Решетов Н. А. Роль науки в деятельности Российского Морского Регистра Судоходства	3
--	---

Вопросы безопасности судов

Луковников А. А. Участие Российского Морского Регистра Судоходства в нормировании безопасности судов на международном уровне	6
Трунин В. К. Повышение безопасности и эффективности судов смешанного (река-море) плавания в эксплуатации.	14

Прочность корпусов судов и плавучих сооружений

Бойцов Г. В. О требованиях к прочности судов ограниченного и смешанного (река-море) плавания.	34
Апполонов Е. М., <u>Евдосеев А. Н.</u> , Нестеров А. Б., Тимофеев О. Я. О проекте новой редакции требований Правил Российского Морского Регистра Судоходства к ледовым усилениям судов и ледоколов.	49
Литонов О. Е. Проблемы прочности и надежности конструкций ледостойких платформ.	68

Мореходные качества судов

Луговский В. В. История создания и пути совершенствования норм остойчивости Российского Морского Регистра Судоходства.	83
Липис В. Б., Богданов А. И. О совершенст- вовании нормативных требований Российского Морского Регистра Судоходства и Международной Морской Организации к остойчивости морских судов в неповрежденном состоянии	94
Сутуло С. В. О нормировании маневренных качеств морских судов.	109

Рахманин Н.Н., Виленский Г.В. Попутное волнение и валкость судна	122
--	-----

Судовые спасательные средства

Ковчegov Л.П. Сертификация спасательных шлюпок свободного падения	141
---	-----

Судовые механические установки, валопроводы и двигатели

Костылев И.И., Смольник А.Ю. Использование высокотемпературных органических теплоносителей на судах	148
Кацман Ф.М., Коннов А.В. Анализ норм прочности лопастей гребных винтов	157
Кацман Ф.М., Андрияшин А.В., Беляшов В.А. Требования к прочности гребных винтов ледоколов и судов активного ледового плавания	169
Давыдов Г.А., Емельянов П.С., Орехов Ю.А. Пути улучшения контроля уровня тепловой напряженности судовых дизелей	191

Противопожарная защита судов

Озеров Н.А., Танклевский Л.Т. Альтернатива использования коффердама как переборки типа А-60 на судах смешанного (река-море) плавания	196
--	-----

Защита окружающей среды

Баринава Л.Д., Кейзер Л.С., Лемеш Г.А. Влияние судоходства на изменение биологического разнообразия	200
Парфенов Л.Н., Камкин С.В., Пунда А.С. К проблеме ограничения и контроля эмиссии вредных компонентов выпускных газов судовых дизелей	204

Судовое электрооборудование

Вилесов Д.В., Токарев Л.Н., Трутнев Л.А., Халилов Ф.Х. О коммутационных перенапряжениях в судовых электроэнергетических системах	216
Никитина В.Н., Вилесов Д.В., Свядощ Е.А., Степанов-Хазов С.Б. Об обеспечении электро- магнитной гигиены на судах	227
Айзенштадт Н.И., Вилесова М.С., Киреев Ю.Н., Никитенко А.А., Побат Р.Б. Экологически чистая огне-, водо- и газостойкая масса для уплотнения судовых кабельных коробок	240
Либин Л.М., Романовский В.В., Захаров А.А. Средства защиты полупроводниковых преобразователей гребных электрических установок	247

Судовое радионавигационное оборудование

Семенов К.А., Кузьмин Б.И., Лукинов А.А. Проблемы и решения интеграции систем связи и навигации на морском флоте	252
Комраков Е.В. Анализ современного состояния морской электронной картографии	259

Решетов Н.А. Роль науки в деятельности Российского Морского Регистра Судоходства // Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып. 19. С. 3 — 5.

Показана необходимость научного обоснования основных видов деятельности классификационного общества. Отражена роль Научно-технического совета Регистра как координирующего и экспертного органа. Приведены наиболее существенные и перспективные направления научных разработок, финансируемых Регистром. Подчеркивается значение научных исследований для повышения престижа Российского Регистра и отечественного судостроения.

Луковников А.А. Участие Российского Морского Регистра Судоходства в нормировании безопасности судов на международном уровне // Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып. 19. С. 6 — 13.

Приводятся обоснования необходимости регулирования безопасности судоходства на международном уровне и раскрывается роль и задачи Регистра в этом процессе на примерах участия его в работе двух авторитетных международных организаций — ИМО и МАКО.

Содержится краткий обзор новых инициатив по повышению безопасности судоходства, предпринятых в последнее время в рамках ИМО и МАКО, показаны способы взаимодействия Регистра с отечественными научно-исследовательскими и проектными организациями по совершенствованию нормативной базы Регистра.

Трунин В. К. Повышение безопасности и эффективности судов смешанного (река-море) плавания в эксплуатации//Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып. 19. С. 14 — 33.

Рассматриваются гидродинамические аспекты повышения безопасности и эффективности эксплуатации судов смешанного плавания, являющихся наиболее перспективным типом российских транспортных судов. Приведены основные результаты работ, выполненных в последние годы АО ИЦС — головной организацией Федеральной службы «Росречфлот» по судам смешанного плавания. При этом особое внимание уделено вопросам прогнозирования волнения по маршруту плавания и соответствующих мореходных показателей судна, а также выбора эффективных режимов морского перехода. Полученные результаты могут быть рекомендованы к использованию при нормировании мореходности судов ограниченного плавания.

УДК 629.12.001:539.4:629.122.1.14

Бойцов Г.В. О требованиях к прочности судов ограниченного и смешанного (река-море) плавания//Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып. 19. С. 34 — 48.

Разработана общая теория учета влияния ограничений эксплуатации судов в условиях волнения на снижение (редукцию) уровня действующих на них переменных нагрузок.

На основании разработанного теоретического аппарата, а также обобщения сведений о статистических закономерностях режимов волнения на маршрутах эксплуатации судов и погрешностей их метеопрогнозов обоснованы значения редукционных коэффициентов для общих и местных нагрузок судов рассматриваемого типа.

Апполонов Е.М., Евдосеев А.Н., Нестеров А.Б., Тимофеев О.Я. О проекте новой редакции требований Правил Российского Морского Регистра Судоходства к ледовым усилениям судов и ледоколов//Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып.19. С. 49 — 67.

Изложена методическая основа проекта новой редакции требований Правил Регистра к ледовой прочности судов и ледоколов. Показана целесообразность перехода к критериям и методам оценки прочности ледовых усиления, учитывающим резервы пластического деформирования материала и действительные формы ледовых повреждений. Обоснована принятая в проекте новая концепция ледовой классификации по базовым режимам движения судов во льдах.

Приведены количественные условия для обоснованного выбора требуемой ледовой категории в рамках новой классификации.

Литонов О.Е. Проблемы прочности и надежности конструкций ледостойких платформ//Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып. 19. С. 68 — 82.

Рассмотрены принципиальные особенности ледостойких платформ, связанные как с архитектурно-конструктивным обликом, так и с ветром, волнением, течением, льдом, сейсмической обстановкой, грунтом, температурой. Обсуждены основные проблемы, возникающие при проектировании ледостойких платформ. Даются предложения по направлениям решения вопросов прочности и надежности конструкций экологически и экономически ответственных сооружений, к каковым относятся ледостойкие платформы.

Луговский В.В. История создания и пути совершенствования норм остойчивости Российского Морского Регистра Судоходства // Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып. 19. С. 83 — 93.

Описывается история создания отечественных норм остойчивости морских судов, начиная с работы С.Н.Благовещенского (1932 г.) и кончая Правилами классификации и постройки морских судов Регистра, изданными в 1995 г. Анализируются физические основы и статистические критерии остойчивости судов на различных этапах разработки норм. Устанавливается связь между достижениями отечественной школы нормирования остойчивости и созданием международных требований к остойчивости судов в рамках ИМО. Указываются возможные пути дальнейшего совершенствования норм остойчивости морских судов, в частности, учет параметрического резонанса бортовой качки на попутных курсовых углах к волнению, для расчетной оценки «порога возбуждения» которого приводится достаточно простая формула, полученная недавно автором.

Липис В.Б., Богданов А.И. О совершенствовании нормативных требований Российского Морского Регистра Судоходства и Международной Морской Организации к остойчивости морских судов в неповрежденном состоянии // Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып. 19. С. 94 — 108.

Приводится обзор работ по совершенствованию нормативных требований Регистра и ИМО к остойчивости в неповрежденном состоянии водоизмещающих и быстроходных судов, выполненных в ЦНИИМФ за последние 15-20 лет для Регистра. Описываются особенности требований к остойчивости Правил Регистра и ИМО для этих судов. Определяются направления дальнейших работ.

УДК 629.12.075

Сутуло С.В. О нормировании маневренных качеств морских судов//Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып. 19. С. 109—121.

На основе анализа существующих национальных норм управляемости и норм ИМО, введенных резолюцией А.751(18), формулируются предложения по разработке новых российских норм управляемости.

УДК 629.123:629.12.073.243

Рахманин Н. Н., Виленский Г.В. Попутное волнение и валкость судна//Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып. 19. С. 122 — 140.

Приводится анализ существующих подходов к нормированию остойчивости на попутном волнении, дается толкование валкости судна с позиций современной теории качки, устанавливается ее численная мера, в качестве которой принимается амплитуда установившихся параметрических бортовых колебаний, и предлагается новая идея проверки остойчивости судна в условиях попутного волнения на основе критерия, ограничивающего амплитуду этих колебаний.

УДК 629.125.63:658.516.2

Ковчegov Л.П. Сертификация спасательных шлюпок свободного падения//Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып. 19. С. 141 — 147.

Рассмотрена возможность замены некоторых видов испытаний на сброс спасательной шлюпки свободного падения модельными испытаниями. Приведена методика подбора масштабной модели и оценка ее сопоставимости по перегрузкам, возникающим при входе

шлюпки в воду, как основной оценочной характеристики натурным испытаниям. Приведены рекомендации, которые могут быть использованы при одобрении Регистром программы испытаний.

УДК 662.7:621.181

Костылев И.И., Смольник А.Ю. Использование высокотемпературных органических теплоносителей на судах//Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып. 19. С. 148 — 156.

Рассмотрены основные характеристики высокотемпературных органических теплоносителей, являющиеся основной причиной их применения в составе судовых энергетических установок. Приведены основные схемы теплоснабжения судов с применением таких теплоносителей.

УДК 629.12.037.001.1

Кацман Ф.М., Коннов А.В. Анализ норм прочности лопастей гребных винтов//Науч.-техн.сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып.19. С. 157 — 169.

Для определения уровня требований Российского Морского Регистра Судоходства к прочности лопастей гребных винтов необходимо располагать количественными данными, характеризующими подобные требования других классификационных обществ. С этой целью произведен расчетный анализ прочности применительно к гребным винтам 97-ми судов, находящихся в эксплуатации. Сопоставимые расчеты выполнены в полном соответствии с требованиями 7-ми ведущих классификационных обществ.

В целях объективности сравнения все расчеты выполнялись для единого гипотетического случая — судна без ледовых подкреплений. Помимо этого произведены расчеты прочности гребных винтов для судов различных ледовых классов по требованиям всех классификационных обществ, приведенных к единым сопоставимым условиям.

Кацман Ф.М., Андришин А.В., Беляшов В.А. Требования к прочности гребных винтов ледоколов и судов активного ледового плавания // Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып.19. С. 169 — 190.

Существующие требования Российского Морского Регистра Судоходства к прочным размерам гребных винтов ледоколов и судов активного ледового плавания разработаны на основе теории статической прочности и воздействия на лопасть изгибающего момента от гидродинамического упора и не учитывают интенсивность ледовых нагрузок при взаимодействии со льдом. Для ледоколов и судов активных ледовых классов в основу разработки норм прочности гребных винтов должны быть положены ледовые нагрузки. При этом требования должны быть разработаны на основе обоснованной гипотезы статической или усталостной прочности. Поэтому в статье представлен анализ существующих гипотез взаимодействия гребных винтов со льдом.

В результате анализа показано, что для определения ледовых сил, необходимых для расчета прочных размеров гребных винтов, целесообразно принять в качестве основного расчетного режима процесс фрезерования льда. Прочные размеры лопастей гребных винтов ледоколов и судов активного ледового плавания должны определяться из условия усталостной и статической прочности. В статье выполнен анализ расчетных схем зарубежных классификационных правил для определения прочных размеров лопастей ледокольных гребных винтов. На базе выполненных исследований предложены рекомендации для разработки норм прочности гребных винтов ледоколов и судов активного ледового плавания.

Давыдов Г.А., Емельянов П.С., Орехов Ю.А. Пути улучшения контроля уровня тепловой напряженности судовых дизелей // Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып.19. С. 191 — 195.

В статье рассмотрен косвенный способ контроля за уровнем тепловой напряженности высокофорсированных главных судовых дизелей.

Уровень тепловой нагрузки дизеля предложено выполнять по относительной величине среднего теплового потока в стенки деталей цилиндропоршневой группы с использованием специальной номограммы и показаний основных штатных контрольно-измерительных приборов.

УДК 614.841.34: 629.1221.14

Озеров Н.А., Танклевский Л.Т. Альтернатива использования коффердама как переборки типа А-60 на судах смешанного (река-море) плавания // Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып.19. С. 196 — 199.

Оценена возможность использования коффердама как переборки типа А-60. Показано, что размещение опасного груза в трюме на расстоянии 3 м от неизолированной переборки опасно при пожаре в машинном отделении. Даны рекомендации по материалам и толщине изоляции ограждающих конструкций коффердама, обеспечивающих ему защитные свойства, эквивалентные переборке типа А-60.

УДК 347.799.13 : 66.098

Барина Л.Д., Кейзер Л.С., Лемеш Г.А. Влияние судоходства на изменение биологического разнообразия // Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып.19. С. 200 — 203.

В статье рассматриваются вопросы, связанные с деятельностью водного транспорта в аспекте его негативного влияния на морскую биоту и прибрежные экосистемы. Показаны отрицательные стороны этой проблемы и рекомендованы необходимые профилактические меры.

Парфенов Л.Н., Камкин С.В., Пунда А.С. К проблеме ограничения и контроля эмиссии вредных компонентов выпускных газов судовых дизелей //Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып. 19. С. 204 — 215.

Приведены анализ состава отработавших газов дизелей, характеристики вредных выбросов, методы борьбы с вредными выбросами как с помощью технических средств, так и законодательных актов.

Вилесов Д.В., Токарев Л.Н., Трутнев Л.А., Халилов Ф.Х. О коммутационных перенапряжениях в судовых электроэнергетических системах//Науч.-техн.сб.Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып.19. С. 216 — 226.

Коммутация (включения-отключения) элементов электроэнергетических систем, их отдельных участков, содержащих накопители электромагнитной энергии, могут сопровождаться значительными по амплитудам быстропротекающими, импульсными перенапряжениями. Перенапряжения в сетях опасны для электрооборудования и в особенности — для устройств энергетической и информационной электроники. До настоящего времени коммутационные перенапряжения не являлись в судовой электроэнергетике предметом обстоятельного изучения и разработки методов и средств предупреждения их вредных последствий. Опыт «береговых» систем указывает на необходимость и большую экономическую эффективность мер защиты от перенапряжений. В проблеме обеспечения электромагнитной совместимости судовых технических средств задача защиты от перенапряжения должна рассматриваться как обязательная.

УДК 577. 3

Никитина В.Н., Вилесов Д.В., Свядош Е.А., Степанов-Хазов С.Б. Об обеспечении электромагнитной гигиены на судах // Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып. 19. С. 227 — 239.

В статье исследованы электромагнитные воздействия на биобъекты, и прежде всего, на человека. Определены задачи обеспечения электромагнитной гигиены в судовых условиях.

УДК 629.12.066.002.72(03)

Айзенштадт Н.И., Вилесова М.С., Киреев Ю.Н., Никитенко А.А., Побат Р.Б. Экологически чистая огне-, водо- и газостойкая масса для уплотнения судовых кабельных коробок // Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства, 1996. Вып.19. С. 240 — 246.

Разработана новая отечественная масса («НИКИ») вместо используемого компаунда на эпоксидной смоле для уплотнения судовых кабельных коробок. Масса обладает рядом существенных достоинств: экологически чистая, нетоксичная, огнестойкая, удобна по технологии приготовления и использования, обеспечивает экономию на исходных материалах и на металле коробок.

УДК 629.12.037.4-83

Либин Л.М., Романовский В.В., Захаров А.А. Средства защиты полупроводниковых преобразователей гребных электрических установок // Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып.19. С. 247 — 251.

Подчеркивается широкое применение гребных электрических установок (ГЭУ) для различных типов морских судов. Учитываются особенности использования силовых полупроводниковых устройств в ГЭУ.

Показана необходимость применения быстродействующих автоматических выключателей и предохранителей в целях

защиты силовых полупроводниковых устройств. Приведена методика и параметры выбора плавких предохранителей в цепях защиты силовых полупроводниковых устройств. Обращается внимание на опасность резонансных перенапряжений. Приведены рекомендации по снижению всех видов перенапряжений в ГЭУ. Рекомендации могут быть использованы при разработке дополнений к 17.7.7 Правил классификации и постройки морских судов Российского Морского Регистра Судоходства (Часть XI «Электрическое оборудование»).

УДК 629.12.018.76 : 656.61.052.14 : 621.396.932

Семенов К.А., Кузьмин Б.И., Лукинов А.А. Проблемы и решения интеграции систем связи и навигации на морском флоте// Науч.-техн.сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып.19. С. 252 — 258.

Анализируются основные проблемы интеграции систем связи и навигации на морском флоте и предлагаются возможные решения рассматриваемой проблемы.

Основное внимание уделяется многофункциональной аппаратуре с процессорным управлением и характеристиками, превосходящими соответствующие характеристики однофункциональных устройств.

УДК 629.12.018.76 : 656.61.052.14 : 621.396.932

Комраков Е.В. Анализ современного состояния морской электронной картографии//Науч.-техн.сб. Российского Морского Регистра Судоходства. 1996. Вып.19. С. 259 — 264.

Анализируются основные проблемы, связанные с созданием морских электронных картографических систем и программного обеспечения к ним.

Рассматриваются перспективы использования электронных картографических систем на морском флоте.

Особое внимание уделено анализу направлений в развитии электронной картографии в мире.