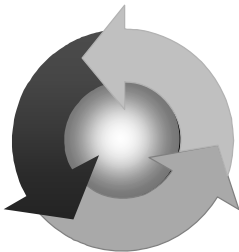


ISSN 1815-6770

Министерство образования и науки Украины
ОДЕССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ

Судовые энергетические установки



Научно-технический сборник

Выпуск 25

Одесса
2010

ББК 39.46
С 89
УДК 629.123.066

Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып. 25. – Одесса: ОНМА, 2010. – 133 с.

Сборник посвящен проблемам судовой энергетики, проектирования, модернизации и эксплуатации судовых энергетических установок, методам повышения эффективности и надёжности использования судовых технических средств. Сборник входит в перечень изданий, одобренных ВАК Украины по разделу технические науки.

Для научных работников и специалистов.

Редакционная коллегия: д.т.н., проф. А.М. Берестовой, АМИ; д.т.н., проф. Л.В. Вишневский, ОНМА; д.т.н., проф. В.А. Голиков, к.т.н., проф. А.А. Голиков, ОНМА; д.т.н., проф. С.И. Горб, ОНМА; д.т.н., проф. Н.Ф. Гречко, ОНМА; д.т.н., проф. В.Н. Захарченко, ОНМА; д.т.н., проф. В.Г. Ивановский, ОНМУ; д.т.н., проф. В.В. Капустин, СНТУ; к.т.н., проф. ОНМА М.А. Колегаев, (редактор); д.т.н., проф. А.И. Коханский, ОНМА; д.т.н., проф. М.В. Миусов, ОНМА; д.т.н., проф. Н.С. Молодцов, ОНМА; к.т.н., проф. А.Н. Пипченко, ОНМА; д.т.н., проф. Г.Ф. Романовский, НУК; д.т.н., проф. С.С. Рыжков, НУК; д.т.н., проф. П.С. Суворов, Дунайская комиссия по развитию судоходства; д.т.н., проф. В.В. Тарапата, ОНМА; д.т.н., проф. С.А. Ханмамедов, ОНМА; С.Н. Шакур.

Адрес редакционной коллегии: 65029, Одесса, ул. Дидрихсона, 8, Одесская национальная морская академия (ОНМА), кафедра СЭУ.

Контактные телефоны редакции (048) 733-49-24, 733-23-52.

e-mail: seu@ma.odessa.ua

Компьютерная вёрстка Шакур С.Н.

Утверждено учёным советом ОНМА, протокол № 2 от 30.09.2010

Содержание

<i>Гончаров И.В., Колегаев М.А., Ханмамедов С.А.</i> Переход горения в детонацию в судовых малооборотных длинноходовых дизелях.....	4
<i>Половинка Э.М., Кабацюра В.В., Албул Д.А.</i> Вязкость топливовоздушных смесей	10
<i>Суворов П.С., Тарасенко Т.В.</i> Обоснование выбора шага винта в условиях доштормового волнения на коротких морских линиях	18
<i>Хлопенко Н.Я., Гаврилов С.А.</i> Экспериментальные исследования эффективности работы выравнивающего устройства с разгружающими сильфонами	33
<i>Воробьев В.Л.</i> Математическое моделирование динамической контактной задачи для судовых деталей с покрытием.....	39
<i>Голиков В.А., Капустин В.И.</i> Способы повышения надежности операторов судовых энергетических систем.....	49
<i>Сандлер А.К., Дрозд Е.В.</i> Модернизация системы управления грузовым краном	56
<i>Ханмамедов С.А., Бурлаченко О.В.</i> Механизм образования углеродных отложений в проточной части судовых дизелей.....	60
<i>Кирюхин А.Л.</i> Совершенствование методов анализа динамики валопроводов судовых турбинных установок.....	72
<i>Дейнего Ю.Г.</i> Организационное обеспечение командным составом судна подготовки и проведения инспекции судна властями государства порта	79
<i>Сандлер А.К., Логинцев И.В., Сандлер А.А.</i> Структурная модель инвариантного волоконного акселерометра.....	87
<i>Артеменко О.С., Кардашев Д.Л.</i> Електромеханічні аналогії в електричних машинах з декількома степенями вільності.....	93
<i>Кардаш В.П.</i> Система удержания и стабилизации положения гребных валов судов	98
<i>Анфиногентов В.В.</i> Исследование поверхностного натяжения мазутов ...	104
<i>Мацкевич Д.В., Сагин С.В., Ханмамедов С.А.</i> Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя.....	109
<i>Рященко Б.П., Лавриненко М.И.</i> Состояние и перспективы развития технологии предотвращения заиливания судовых балластных танков.....	119
Рефераты.....	126
Правила оформления и представления рукописей для сборника «Судовые энергетические установки».....	132

УДК 621.431.74

Гончаров И.В., Колегаев М.А., Ханмамедов С.А.
ОНМА

ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В СУДОВЫХ МАЛООБОРОТНЫХ ДЛИННОХОДОВЫХ ДИЗЕЛЯХ

Горение и взрыв газов (и аэрозолей) — это с точки зрения химии одинаковые процессы превращения смеси горючих газов и окислителя в продукты сгорания, а с точки зрения физики — принципиально различные процессы, и имеющие существенно различные внешние проявления.

Под взрывом в физике понимают широкий круг явлений, связанных с выделением большого количества энергии в ограниченном объеме за очень короткий промежуток времени. Кроме взрывов обычных конденсированных химических и ядерных взрывчатых веществ, к взрывным явлениям относятся также мощные электрические разряды, когда в разрядном промежутке выделяется большое количество тепла, под воздействием которого среда превращается в ионизированный газ с высоким давлением; взрыв металлических проволочек при протекании через них мощного электрического тока, достаточного для быстрого превращения проводника в пар; внезапное разрушение оболочки, удерживающей газ под высоким давлением; столкновение двух твердых космических тел, движущихся навстречу одно другому со скоростью, измеряемой десятками километров в секунду, когда в результате столкновения тела полностью превращаются в пар с давлением в несколько миллионов атмосфер, и т. д. Общим признаком для всех этих разнообразных по своей физической природе явлений взрыва служит образование в локальной области зоны повышенного давления с последующим распространением по окружающей эту область среде со сверхзвуковой скоростью взрывной волны, представляющей собой прямой скачок давления, плотности, температуры и скорости среды.

При воспламенении горючих газообразных смесей и аэрозолей по ним распространяется пламя, представляющее собой волну химической реакции в виде слоя толщиной менее 1 мм, называемого фронтом пламени. Однако, как правило (если не считать детонационных режимов сгорания), эти процессы происходят недостаточно быстро для образования взрывной волны. Поэтому процесс сгорания большинства газовых горючих смесей и аэрозолей нельзя называть

взрывом, а широкое распространение такого названия в технической литературе, по-видимому, связано с тем, что, если такие смеси воспламеняются внутри оборудования или помещений, то в результате значительного повышения давления происходит разрушение последних, которое по своей природе и по всем своим внешним проявлениям носит характер взрыва. Поэтому, если не разделять процессы горения и собственно разрушения оболочек, а рассматривать всё явление в целом, то такое название аварийной ситуации в известной мере можно считать оправданным. Поэтому, называя горючие газовые смеси и аэрозоли «взрывоопасными» и определяя некоторые показатели «взрывоопасности» веществ и материалов, следует помнить об известной условности этих терминов.

Итак, если в некотором сосуде воспламенилась горючая газовая смесь, но сосуд выдержал образовавшееся вследствие этого давление, то — это не взрыв, а простое сгорание газов. С другой стороны, если сосуд разорвался, то — это взрыв, и при этом не имеет значения быстро или очень медленно происходило в нём сгорание газа; более того, — это взрыв, если в сосуде и вовсе не было горючей смеси, а он разорвался, например, вследствие превышения давления воздуха или даже без превышения расчетного давления, а вследствие потери прочности сосуда в результате коррозии его стенок.

Для того чтобы любое физическое явление можно было назвать взрывом, необходимо и достаточно, чтобы по окружающей среде распространялась ударная волна. А ударная волна может распространяться только со сверхзвуковой скоростью, иначе это не ударная, а акустическая волна, которая распространяется со скоростью звука. И никаких промежуточных явлений в сплошной среде в этом смысле не существует.

Другое дело — детонация. Несмотря на общую химическую природу с дефлаграцией (реакция горения), она сама распространяется вследствие распространения ударной волны по горючей газообразной смеси и представляет собой комплекс ударной волны и волны химической реакции в ней.

В литературе часто встречается термин «взрывное горение», под которым понимают дефлаграцию со скоростью распространения турбулентного пламени порядка 100 м/с. Однако такое название лишено всякого физического смысла и ничем не оправданно. Горение газообразных смесей бывает дефлаграционным и детонационным, и никакого «взрывного горения» не бывает. Введение в практику этого

понятия, очевидно, было вызвано желанием авторов особо выделить высокотурбулентное дефлаграционное горение, одним из важных поражающих факторов которого является скоростной напор газа, который сам по себе (без образования ударной волны) может и разрушить элементы проточной части двигателя [1]

Известно, что при некоторых условиях дефлаграция может переходить в детонацию. Условия, способствующие такому переходу, — это обычно наличие длинных вытянутых полостей, например, труб, галерей, горных выработок и проч., особенно если они содержат препятствия, служащие турбулизаторами газового потока. Если горение начинается как дефлаграция, а заканчивается как детонация, то кажется логичным предположить наличие некоторого промежуточного по своей физической природе переходного режима, который некоторые авторы и называют взрывным горением. Однако и это не так. Переход дефлаграционного горения в длинноходовом двигателе в детонацию можно представить следующим образом. Вследствие турбулизации и соответствующего увеличения поверхности пламени скорость его распространения увеличивается, и оно толкает впереди себя горючий газ с большей скоростью, что в свою очередь ещё больше увеличивает турбулентность горючей смеси впереди фронта пламени. Процесс распространения пламени становится самоускоряющимся с усиливающимся поджатием горючей смеси. Поджатие горючей смеси в виде волны давления и повышенной температуры (температура в акустической волне повышается по закону адиабаты Пуассона, а не по адиабате Гюгонио, как это происходит при ударном сжатии) распространяется вперед со скоростью звука. А всякое новое дополнительное возмущение со стороны ускоряющегося фронта турбулентного пламени распространяется по уже нагретому поджатием газу с большей скоростью (скорость звука в газе пропорциональна $T^{1/2}$, где T — абсолютная температура газа), и поэтому оно вскоре догоняет фронт предыдущего возмущения и суммируется с ним. А обогнать фронт предыдущего возмущения оно не может, так как местная скорость звука в холодном горючем газе, расположенном в невозмущенном газе, значительно ниже. Таким образом, на переднем фронте первого акустического возмущения происходит сложение всех последующих возмущений, амплитуда давления на фронте акустической волны увеличивается, а сам фронт из первоначально пологого становится все более крутым и в конечном итоге из акустического превращается в ударный. При дальнейшем росте ам-

плитуды ударного фронта температура в нём по адиабате Гюгонио достигает температуры самовоспламенения горючей смеси, что и означает возникновение детонации. Детонация — это ударная волна, в которой происходит самовоспламенение горючей смеси.

Рассматривая описанный механизм возникновения детонации, важно отметить, что его нельзя понимать как непрерывный переход от дефлаграции в результате постоянного ускорения фронта пламени: детонация возникает скачкообразно впереди дефлаграционного пламени, даже на существенном расстоянии от него, когда там создаются соответствующие критические условия. В дальнейшем детонационная волна, представляющая собой единый комплекс ударной волны и волны химической реакции, распространяется стационарно с постоянной скоростью по невозмущённому горючему газу, независимо от породившего её дефлаграционного пламени, которое при подходе к продуктам детонации вскоре вообще перестаёт существовать.

Таким образом, ударная волна, волна химической реакции и волна разрежения в продуктах сгорания в цилиндре двигателя движутся с одинаковой скоростью и вместе представляют собой единый комплекс, обуславливающий распределение давления в зоне детонации в виде острого короткого пика. Строго говоря, зона химической реакции отстоит на некотором расстоянии от фронта ударной волны, так как процесс самовоспламенения возникает не сразу же после ударного сжатия горючей смеси, а по истечении определённого периода индукции и имеет некоторую протяжённость, поскольку химическая реакция происходит хотя и быстро, но не мгновенно. Однако ни начало химической реакции, ни её конец на экспериментальной кривой пика давления никаких характерных изломов не определяют. При экспериментах датчики давления которые мы устанавливаем в камере сгорания двигателя фиксируют детонацию в виде очень резких всплесков давления, причем инерционность датчиков, которые используются в судовой энергетике и их линейные размеры (минимальный с диаметром ~ 2 мм) не позволяют проводить достоверных измерений не только профиля волны, но даже и её амплитуды. Для грубых оценок амплитуды давления в детонационной волне можно считать, что оно в 2-3 раза превышает максимальное давление взрыва данной горючей смеси в камере сгорания. Если детонационная волна подходит к поршню, то происходит её отражение, в результате которого давление ещё увеличивается. Этим и объ-

ясняется большая сила детонации. Воздействие детонационной волны на поршень очень специфично: оно носит характер жесткого удара.

По аналогии с конденсированными взрывчатыми веществами, которые принято делить на метательные и бризантные, можно отметить, что детонация в этом смысле оказывает, условно говоря, бризантное действие на препятствие, а дефлаграция — метательное.

Возвращаясь к вопросу о возможности и условиях перехода дефлаграции в детонацию в проточной части дизелей, следует отметить, что для этого необходима турбулизация газового потока, которая осуществляется организацией встречного движения струи топлива и воздушного потока, но существуют также и концентрационные пределы возможности детонации, которые существенно зависят от коэффициента избытка воздуха.

В двигателе внутреннего сгорания с большим объемом камеры сгорания возможен переход дефлаграции в самовоспламенение горючей смеси.

При определённых условиях это возможно при неправильной регулировке угла опережения подачи топлива, когда по мере распространения фронта пламени от точки зажигания давление в замкнутом объёме растёт, и по закону адиабаты Пуассона повышается температура горючей смеси, и в какой-то момент происходит самовоспламенение оставшейся части горючей смеси, сопровождающееся скачком давления в локальном объёме. Более подробные теоретические описания этого процесса содержатся в литературе [2, 3].

При экспериментах описанное явление самовоспламенения может восприниматься как переход дефлаграции в детонацию, хотя между ним и детонацией есть принципиальные физические различия: при детонации смесь воспламеняется от ударного сжатия по адиабате Гюгонио (необратимый термодинамический процесс), а в описанном случае — от изоэнтропийного сжатия по адиабате Пуассона (обратимый термодинамический процесс); детонация распространяется в виде волны с некоторой конечной скоростью, а описанный процесс самовоспламенения происходит одновременно во всём оставшемся объёме горючей смеси, что условно можно интерпретировать как распространения пламени с бесконечно большой скоростью.

В настоящее время в двигателях серии ME при трехразовой подаче топлива в цилиндр двигателя внутреннего сгорания нет усло-

вий для перехода дефлаграции в детонацию, зато есть условия для самовоспламенения последних порций горючей смеси. Механикам эксплуатирующим такие двигатели необходимо понимать что на основе правильного понимания физики этих процессов возможен поиск эффективных путей борьбы с детонацией или с тем, что ошибочно понимается как детонация.

Кстати, в двигателях внутреннего сгорания вполне вероятно и подлинная детонация, но как результат того, что в смеси она изначально инициируется электростатическим разрядом.

Таким образом, в двигателях серии МЕ процесс сгорания первой и третьей порции топлива существенно отличаются по своей природе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Водяник В. И. Оценка опасности взрывов больших газовых облаков в неограниченном пространстве // Безопасность труда в промышленности. – 1990. – № 11.
2. Водяник В. И., Тараканов С. В. Возникновение волн давления при самовоспламенении газа перед фронтом пламени в замкнутом сосуде // Физика горения и взрыва. – 1985. – № 1.
3. Водяник В. И. Взрывозащита технологического оборудования. М.: Химия, 1991. – 256 с.
4. Зельдович Я. Б., Баренблат Г. И., Либровч В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. – М.: Наука, 1980. – 478 с.
5. Зельдович Я. Б. Теория ударных волн и введение в газодинамику. – М.: Изд. АН СССР, 1946. – 187 с.
6. Зельдович Я. Б., Компанеев А. С. Теория детонации. – М.: Гостеоретиздат, 1955. – 268 с.
7. Солоухин Р. И. Ударные волны и детонация в газах. – М.: Физматгиз, 1963. – 238 с.

УДК 621.431.74-571-581

Половинка Э.М., Кабацюра В.В., Албул Д.А.
ОНМА

ВЯЗКОСТЬ ТОПЛИВОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

При работе систем впрыскивания топлива дизелей возможно формирование в полости низкого и высокого давления смеси топлива с газовыми включениями [1]. В этом случае образуется как мелкодисперсная пузырьковая структура, так и отдельные газовые включения. Газовые объёмы состоят из паров топлива и воздуха. Топливовоздушная смесь (ТВС) может быть создана в штатном режиме при работе эмульсионных насос-форсунок [2]. Топливная аппаратура такого типа используется фирмой Камминс. Кроме того, применение газотопливных смесей может рассматриваться как одно из направлений реализации газодизельного процесса при использовании горючих газов в качестве топлива для дизелей.

При анализе условий топливоподачи во всех указанных случаях необходимы знания характеристик рабочего тела системы впрыскивания. Такие данные получены в [2]. Однако в указанной работе и других исследованиях отсутствует информация о вязкости смеси топлива с воздухом. В данной статье содержатся результаты экспериментального исследования этого параметра, выполненные на кафедре СЭУ ОНМА.

Для экспериментального определения вязкости ТВС в дизельной лаборатории ОНМА создана установка, включённая в состав комбинированной системы топливоподготовки стендового двигателя 1ЧН25/34. Система и её элементы предназначены как для питания двигателя, так и для проведения автономных экспериментов. Схема системы представлена на рис. 1.

Основные функции элементов системы следующие.

Подача топлива на двигатель может осуществляться из расходных цистерн 2 или от топливных баков стенда 10 и 11. Получение ТВС осуществляется только с использованием топливных баков 10 и 11. Топливо берется из любого бака насосом 12 и направляется через подогреватель 13 и фильтр 14 в смеситель гидродинамического типа 15. В смесителе происходит смешивание воздуха с топливом. Давление топлива до смесителя определяется манометром. В компрессорном модуле предусмотрен контрольный манометр. С его помощью осуществляется проверка наличия избыточного по отношению

к топливу давления (не менее 0,1 бар), позволяющего избежать падения топлива в компрессор. На выходе из смесителя также установлен манометр 20, по которому определяют давление топливовоздушной смеси поступившей в систему. Далее возможен вариант возврата топлива в топливные баки (т.е. возможность перекачивать топливо из одного бак в другой) или подача топлива на ТНВД двигателя, а затем на форсунку.

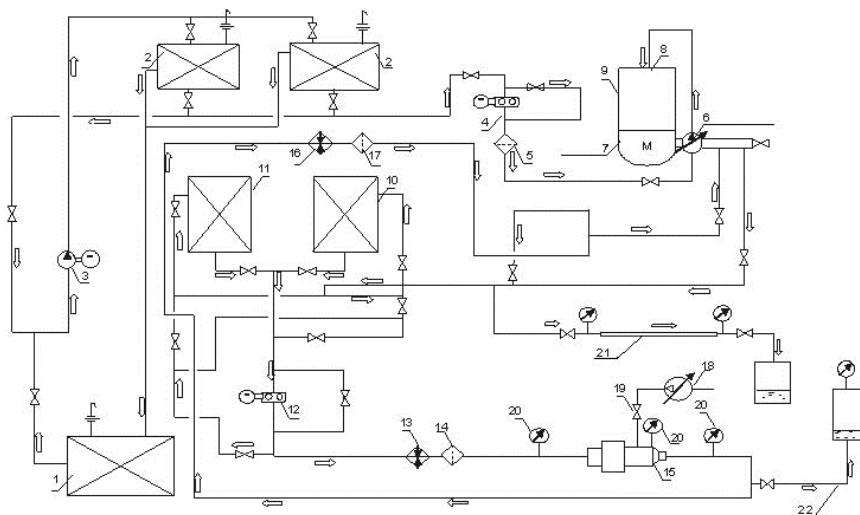


Рис. 1. Лабораторная система топливоподготовки: 1 — цистерна запаса топлива; 2 — расходная цистерна; 3 — топливо перекачивающий насос; 4 — топливоподкачивающий насос; 5 — фильтр топлива; 6 — ТНВД дизеля; 7 — дизель 1ЧН25/34; 8 — форсунка; 9 — цилиндр дизеля; 10, 11 — топливные баки стенда ТВС; 12 — топливоподкачивающий насос; 13, 16 — электроподогреватели топлива путевые; 14, 17 — фильтры; 15 — смеситель гидродинамический; 18 — воздушный компрессор; 19 — воздушный клапан; 20 — манометр, 21 — вискозиметр, 22 — измеритель состава смеси

Давление топливовоздушной смеси, поступающей в ТНВД двигателя, устанавливается путем рециркуляции топливовоздушной смеси на всасывание насоса 12.

Получение необходимого состава ТВС, обеспечивается изменением давления подачи насоса 12 путем рециркуляции топлива в топливный бак 10 или 11, а также изменением давления воздуха в системе. Воздух в смеситель подается в режиме рециркуляции топлива. Состав и вязкость определяются после заполнения напорного участка ТВС.

Для измерения состава ТВС использован отдельный блок, схема которого приведена на рис. 2.

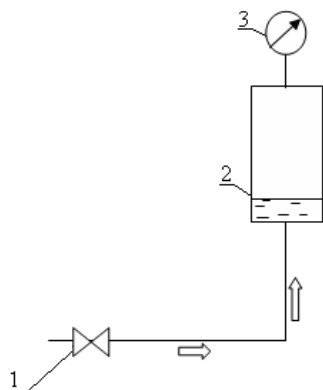


Рис. 2. Установка для определения состава ТВС: 1 — стопорный клапан; 2 — ёмкость для ТВС; 3 — манометр

Принцип измерения основан на определении давления в ёмкости 2 при поступлении в неё определённого количества топлива. При этом сравнивается давление в случае подачи "чистого" топлива и такого же количества топлива в составе ТВС.

Результаты экспериментального исследования представлены в графической форме на рис. 3 - 6.

В частности, на рис. 3 показана зависимость вязкости ТВС от давления в системе. Величины давления смеси указаны в условных обозначениях кривых. Масса воздуха в контрольных пробах, использованных для определения состава ТВС, соответствует опытным точкам рис. 4. Кривые обозначены так же,

как и на предыдущем рисунке.

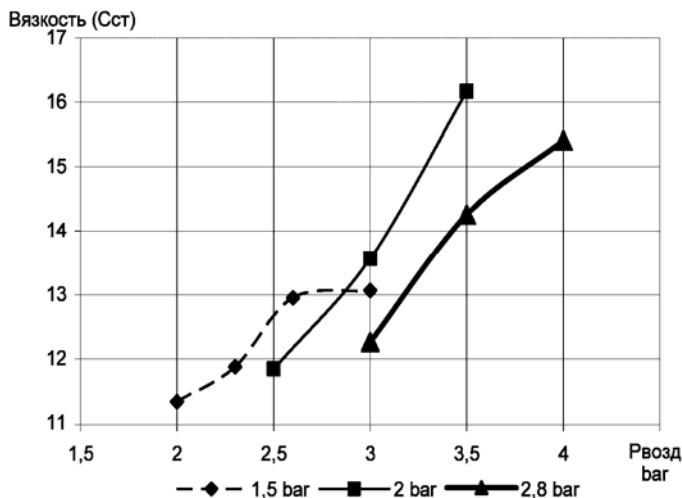


Рис. 3. Зависимость вязкости ТВС от давления воздуха в системе

Рис. 5 содержит данные об объёмном составе ТВС. И, наконец, вязкость ТВС в функции от количества воздуха в контрольных пробах представлена на рис.6.

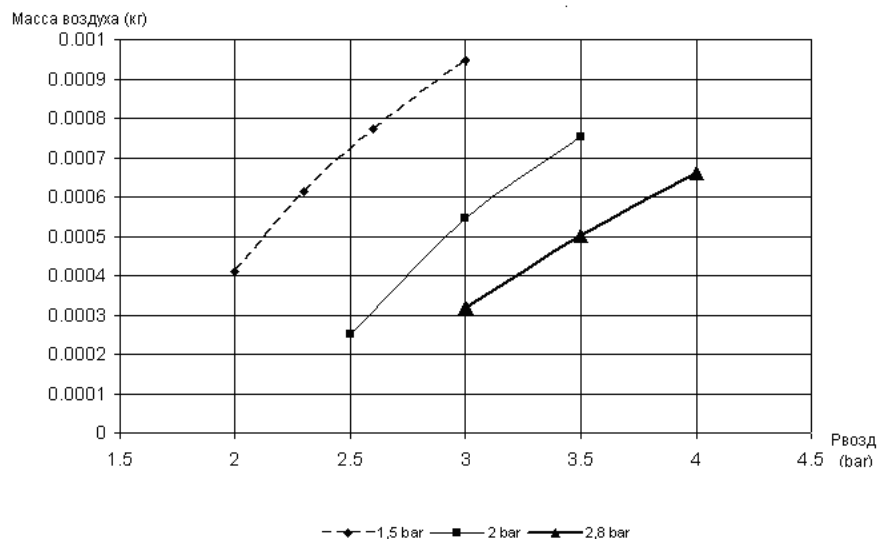


Рис. 4. Зависимость массы воздуха в ТВС от его давления в системе

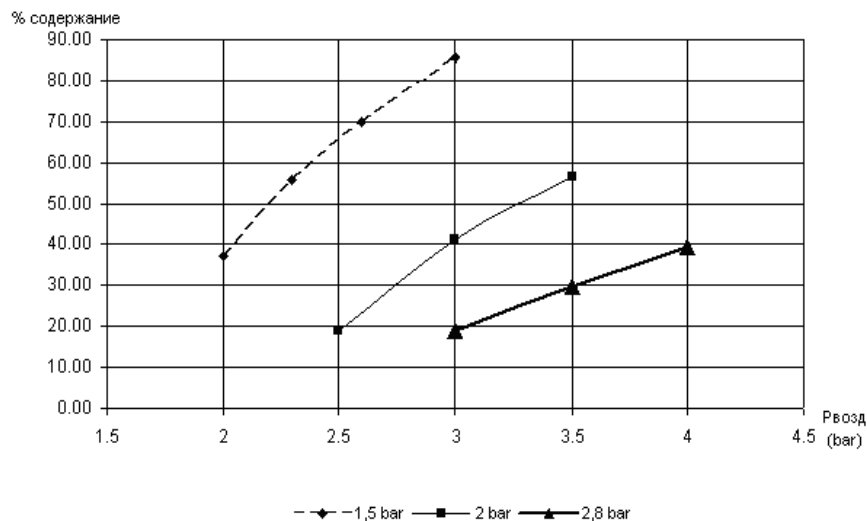


Рис. 5. Зависимость процентного содержания воздуха в ТВС от его давления в системе

Вязкость (сСт)

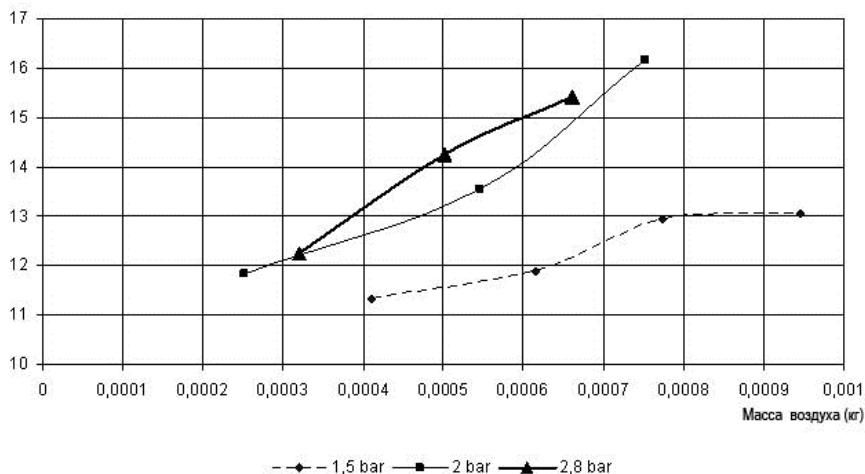


Рис. 6. Зависимость вязкости ТВС от количества воздуха

Во всех случаях полученные зависимости соответствуют следующей качественной закономерности: с повышением давления топлива в системе количество воздуха в ТВС уменьшается. Другой вывод состоит в том, что с ростом содержания воздуха в смеси вязкость её увеличивается.

Наиболее информативными являются данные, устанавливающие связь вязкости смеси с относительным содержанием воздуха и давлением топлива (смеси). Эти величины приведены в табл. 1. Приняты следующие обозначения: PFLSI-давление топлива (МПа), DAE4 – относительное массовое содержание воздуха (масштабировано, $\times 10^4$), UN — вязкость смеси (сСт-мм²/с).

Таблица 1. Характеристики ТВС

PFLSI	DAE4	UN
0,147	16,23	11,3
0,147	24,35	11,9
0,147	30,65	13,
0,147	37,42	13,1
0,196	9,93	11,8
0,196	21,66	13,6
0,274	12,63	12,3
0,274	19,83	14,3

Полученные экспериментальные данные целесообразно представить в форме регрессионных зависимостей.

Параметры уравнений регрессии получены с помощью пакета статистических программ (ПСП) Statgraph [3].

Оценка уравнения множественной линейной регрессии представляется в виде

$$y = b_0 + b_1 x_1, \dots, b_p x_p.$$

В качестве основного варианта в табл. 2 приведены оценки коэффициентов уравнения, связывающего независимую переменную — вязкость смеси v (идентификатор ПСП — UN) — с двумя независимыми: давлением топлива p_t (PFLSI) и относительным массовым содержанием воздуха в смеси x_w (DAE4).

То есть, получена оценка уравнения регрессии

$$v = f(p_t, x_w)$$

или в символах ППС

$$UN = f(PFLSI, DAE4).$$

Параметрами b_0 , b_1 , b_2 являются величины, содержащиеся в столбце ‘коэффициенты’. Далее для каждого коэффициента следуют: стандартная ошибка, t – статистика и уровень значимости (P – статистика).

Общими для уравнения являются (сохранена терминология ПСП): R-SQ(ADJ.) — квадрат множественного коэффициента корреляции, стандартная ошибка — standard error (SE), средняя абсолютная ошибка — mean absolute error (MAE).

Таблица 2. Параметры уравнения регрессии для UN

Независимая переменная	Коэффициент	Стандартное отклонение	t	Уровень значимости
CONSTANT	7,434288	1,459641	5,0932	0,0038
PFLSI	16,37525	5,081718	3,2224	0,0234
DAE4	0,097304	0,03077	3,1628	0,0250

R-SQ. (ADJ.) = 0,6160; SE=0,627491; MAE = 0,416018

Таким образом, зависимость вязкости ТВС (сСт·мм²/с) от давления и содержания воздуха имеет вид в символах Statgraph

$$UN = 7,43 + 16,37 PFLSI + 0,0973 DAE4.$$

В математических символах с соответствующими обозначениями и размерностью

$$v_{20} = 7,43 + 16,37p_t + 0,0973 \cdot 10^4 \cdot x_w.$$

Кроме приведенных в табл. 2 параметров модели, ПСП в разделе множественной регрессии позволяет представлять в табличной и графической форме следующую информацию: дисперсионные характеристики модели, дисперсионный анализ коэффициентов и другие данные.

Дополнительные параметры модели приведены в табл. 3, содержащей её дисперсионные характеристики.

Таблица 3. Дисперсионный анализ уравнения регрессии для UN

Источник	Сумма квадратов	Степени свободы	Средний квадрат	F-соотношение	P-значение
Модель	5,20955	2	2,60477	6,61378	0,0394
Ошибка	1,96920	5	0,393841		
Сумма	7,17875	7			

Оценка адекватности выполнена по статистике F_0 . В данном случае $F_{0,95}(2,5)=5,79$ и $F_0 = 6,61 > F_{0,95}(2,5)$, т.е. нулевая гипотеза отвергается. Следовательно, с вероятностью 0,95 модель адекватна. При этом уровень значимости составляет 0,0394, а коэффициент корреляции и соответствующее значение коэффициента детерминации: $R=0,848$; $D=R^2 = 0,6160$.

Из числа других зависимостей, полученных в результате эксперимента, приведём характеристики регрессионного уравнения для вязкости в функции от давления топлива и давления воздуха. В ПСП использованы следующие обозначения: PFL — давление топлива (МПа), PAIR — давление воздуха (МПа), UN — вязкость смеси (сСт·мм²/с).

Таблица 4. Параметры уравнения регрессии для UNN3.UN

Независимая переменная	Коэффициент	Стандартное отклонение	t	Уровень значимости
CONSTANT	6,456489	0,997078	6,4754	0,0003
UNN3.PFL	-1,245369	0,521794	-2,3867	0,0484
UNN3.PAIR	3,188457	0,484807	6,5768	0,0003

R-SQ. (ADJ.) = 0,8559; SE=0,610034; MAE = 0,354140

В данном случае получены характеристики, совпадающие (в принятом диапазоне величин) с приведенными выше. Действительно: $F_{0,95}(2,5) = 5,79$ и $F_0 = 6,61 > F_{0,95}(2,5)$, т.е. модель адекватна. При

этом уровень значимости составляет 0,0394, а коэффициент корреляции и соответствующее значение коэффициента детерминации: $R=0,9251$; $D=R^2=0,8559$.

Таблица 5. Дисперсионный анализ уравнения регрессии
для UNN3.UN

Источник	Сумма квадратов	Степени свободы	Средний квадрат	F-соотношение	P-значение
Модель	5,21002	2	2,60501	6,61598	0,0394
Ошибка	1,96873	5	0,393745		
Сумма	7,17875	7			

Таким образом, зависимость вязкости TBC от давления топлива p_t и давления воздуха p_v имеет вид в символах Statgraph:

$$UN = 6,45 - 1,24 PFL + 3,19 PAIR.$$

В математических символах:

$$v_{20} = 6,45 - 1,24p_t + 3,19p_v.$$

Выводы.

В результате проведенных экспериментальных исследований, получены существенные характеристики TBC — её вязкости при различном составе смеси и давлениях.

Опытные данные представлены в графической и аналитической форме. Для аналитического представления использован аппарат множественной регрессии с определением параметров моделей и их дисперсионных характеристик. Показана адекватность математических моделей экспериментальным данным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Топливные системы и экономичность дизелей / И.В. Астахов, Л.Н. Голубков, В.И. Трусов и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
2. Вихерт М.М. Топливная аппаратура автомобильных дизелей: конструкция и параметры. / М.М. Вихерт, М.В. Мазинг – М.: Машиностроение, 1978. – 176 с.
3. Афифи А. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ. / Пер. с англ. / А. Афифи, С. Эйзен. – М.: Мир, 1982. – 488 с.

УДК 629.123.1.001

Суворов П.С., Тарасенко Т.В.
Дунайская Комиссия – ОАО "УДП"

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ШАГА ВИНТА В УСЛОВИЯХ ДОШТОРМОВОГО ВОЛНЕНИЯ НА КОРОТКИХ МОРСКИХ ЛИНИЯХ

Полученные В.И. Небесновым и его учениками аналитические (точнее – полуаналитические) формы оптимизирующих управлений ВРШ в условиях волнения [1, 2], показывают возможность поиска таких управлений, при которых могут быть сформированы режимы движения судового пропульсивного комплекса с путевой экономией топлива в 4 – 7 % по сравнению с режимами «среднего капитана». Однако практическая реализация полученных форм управления крайне трудна в силу значительного числа принимаемых условных допущений и аппроксимаций.

Здесь следует отличить волнение, при котором этот поиск экономичного режима еще допустим, и штормовое волнение, при котором поведение судна определяется специальным режимом штормования [5].

Например, накопленные в мировой практике данные свидетельствуют о том, что при уже «сильном волнении» (степень волнения – 5...6 баллов) преимущественно выбирается движение судна вразрез волне, т.е. для избежания сильной бортовой качки и заливаемости оператор на мостике стремится поставить судно в положение, близкое к перпендикулярному по отношению к основному направлению волн. Такой же принцип наблюдается и при попутном волнении. Кроме того, в условиях волнения кроме естественного падения скорости имеет место и преднамеренное ее снижение оператором в целях уменьшения качки и слеминга.

Соответственно, корректно задача поиска управления судном по экономическим критериям, возможна только в условиях доштормового волнения. Задача поиска управления по критерию топливной экономичности при волнении в практике судоходства постоянно является актуальной, и поиск оптимизирующих алгоритмов управления продолжается, тем более, что режимы движения в условиях волнения являются преобладающими в годовом цикле судна.

Цель статьи – получение более упрощенных расчетных форм алгоритмов рационального управления ВРШ для частных случаев доштормового волнения.

Изложение основных результатов.

Исходя из схемы (рис. 1) энергетического взаимодействия элементов судового пропульсивного комплекса с винтом регулируемого шага (ВРШ), уравнение его ходкости на волнении запишется в виде:

$$P(H, n, v, w, E_w) - R(v, t_s, E_w) = m_c \frac{dv}{dt};$$

$$M_e(F, n_d, E_w) - M_{в.п.}(n) - M_p(H, n, v, w, E_w) = 2\pi I_\Sigma \frac{dn}{dt} + 2\pi \frac{dI_\Sigma}{dt} \cdot \frac{dH}{dt}, \quad (1)$$

где P, R — упор винта и сила сопротивления движению судна; $M_e, M_{в.п.}, M_p$ — эффективный момент двигателя, момент сопротивления валопровода (механические потери), момент сопротивления винта; H — шаг ВРШ,

$$H = \frac{H_p}{D_p}$$

H_p — геометрический шаг; D_p — диаметр винта; n_d — частота вращения двигателя $n_d = in$, (i — коэффициент передачи редуктора); v — скорость судна; F — координата топливоподачи в двигатель; t_s — коэффициент засасывания; w — коэффициент попутного потока; m_c — масса судна с учетом присоединенных масс воды; I_Σ — приведенный момент инерции вращающихся масс двигателя, гребного винта и присоединенных к нему вращающихся масс воды.

Влияние внешней среды E в рассматриваемом случае определено функцией волнового воздействия E_w , вызывающего килевую, вертикальную и бортовую качки, а также их моменты. Для условий регулярного волнения уравнение ходкости (1) для каждого отдельно взятого i -го участка волнения при $n = \text{const}$, обеспечиваемое регулятором частоты вращения (работа с валогенератором), и управлении мощностью дизеля разворотом лопасти ВРШ через регулятор нагрузки (РН) запишется в виде:

$$\left. \begin{aligned} T_c \frac{d\Delta\bar{v}}{dt} &= (1 - t_s)^{-1} \Delta\bar{P} - \Delta\bar{R} \\ T_d \frac{d\Delta H}{dt} &= \Delta\bar{M}_e - \Delta\bar{M}_p \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где T_c, T_d — постоянные времени судна и двигателя (рис. 2, а, в);

$$T_c = \frac{v_n m_c}{R^0}; \quad T_d = \frac{2\pi I_\Sigma n_n}{M_e^0};$$

знак « $\bar{}$ » над переменной означает относительное ее значение по отношению к режиму, принимаемому за исходный на тихой воде до встречи с участком волнения; индекс «0» – номинальный режим, за который принимаем режим движения на тихой воде до встречи с участком волнения.

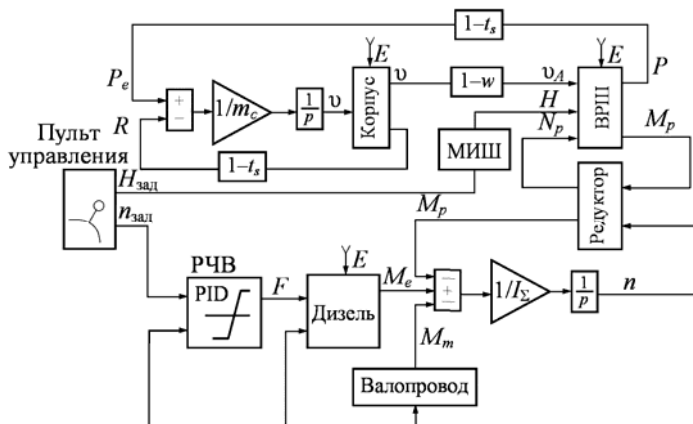


Рис. 1. Схема энергетического взаимодействия в судовом дизельном пропульсивном комплексе с ВРП

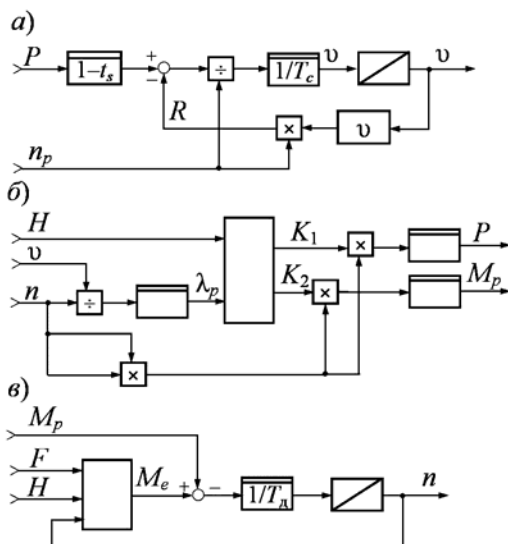


Рис. 2. Схемы энергетических преобразований в элементах пропульсивного комплекса: а – корпус; б – гребной винт; в – главный двигатель; K_1 , K_2 – коэффициенты упора и момента

Упор и момент для условий тихой воды рассчитываются по зависимостям:

$$P^0 = K_1^0 \rho D_p^4 n^2; \quad M_p^0 = K_2^0 \rho D_p^5 n^2,$$

где K_1 , K_2 – коэффициенты нагрузки по упору и моменту (рис. 2, б), соответственно зависящие от изменения относительной поступи винта λ_p и шага ВРШ (рис. 3).

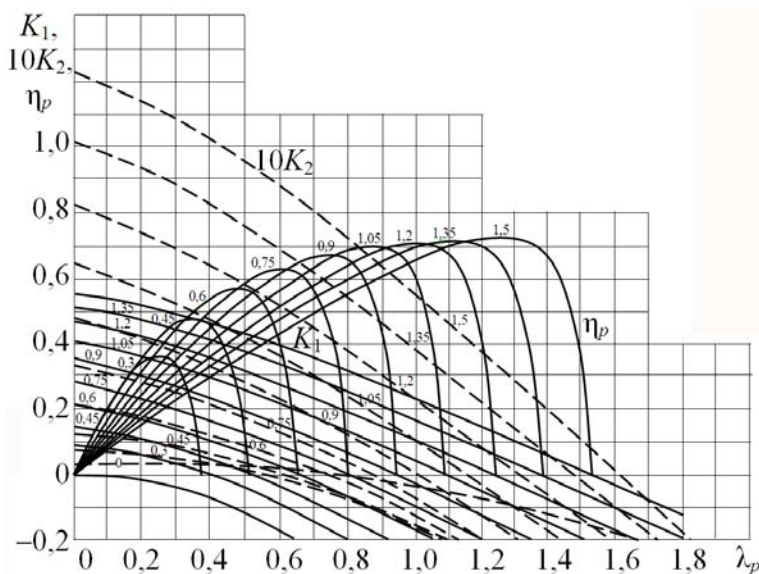


Рис. 3. Характеристики ВРШ для различных шаговых отношений $H = H_p/D_p$

Для условий умеренного волнения и изменения шага ВРШ посредством РН

$$K_{1w} = K_{1w}(\lambda_{pw}, \tilde{H}); \quad K_{2w} = K_{2w}(\lambda_{pw}, \tilde{H}),$$

где шаг винта определится действием РН [3]; знак « $\tilde{}$ » означает среднее значение за период воздействия волнения (период качки).

В условиях волнения способ управления судном оценивается исходя из основных принципов:

- обеспечение безопасности (выбор скорости и курсового угла к волне);
- уточнение скорости для прибытия в заданную точку по времени;
- максимальная топливная экономичность перехода.

Для режимов доштормового плавания, т.е. до режимов «значительного волнения» имеет место [5]: степень волнения до 3-х баллов, при котором высота волн с обеспеченностью 3 % $h_{3\%} \approx 1,25$ –2,0 м, высота значительных волн $h_{1/3} \approx 0,9h$ – 1,5 м, средний период волн 3,7 – 4,5 с и скорость ветра 8 – 11 м/с.

Предположим, что судно работает на линии типа “Short Sea Shipping” [7], например, следует рекомендованным курсом из портов Азовского моря на порты «морского участка» р. Дунай (рис. 4). При этом рекомендованный курс проходит через районы I, II, III, для которых известны [11] повторяемость, обеспеченность и периоды волн для годовичного цикла «зима – весна – лето – осень» (табл. 1, в которой p – повторяемость, %; f – обеспеченность, %) с использованием которых можно определить спектр [6, 8, 9, 12] регулярного волнения (рис. 5).

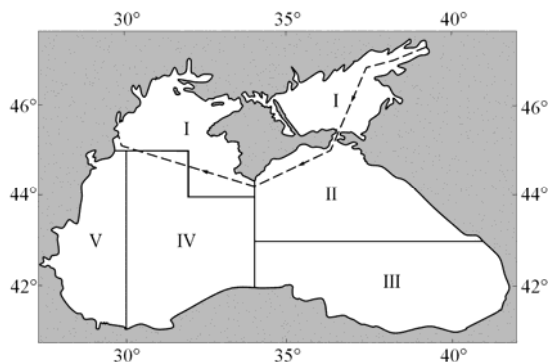


Рис. 4. Рекомендуемый курс судна для линии Short Sea Shipping из портов Азовского моря в порты Дуная

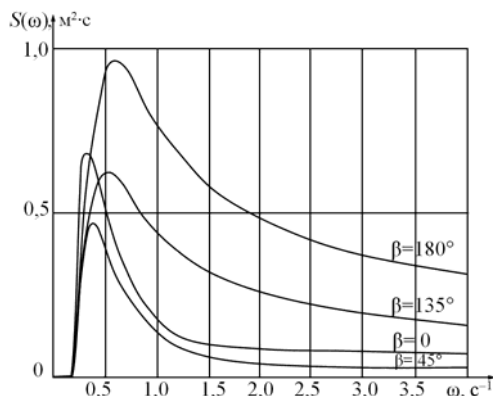


Рис. 5. Спектр волнения для района I по Пирсону-Московицу для условий: скорость ветра $u_b=10$ м/с; скорость судна $u_c=9$ узлов

Таблица 1. Параметры волнения района I Черного и Азовского морей

Высота волны h_w , м	Зима		Весна		Лето		Осень	
	p	f	p	f	p	f	p	f
<1	27	100	40	100	55	100	40	100
1-2	43	73	43	60	32	45	43	60
2-3	20	30	12	17	10	13	12	17
3-4	6	10	3	5	2	3	3	5
4-5	2,7	4	1,3	2	0,65	1	1,3	2
5-6	0,6	1,3	0,4	0,7	0,15	0,35	0,4	0,7
6-7	0,3	0,7	0,15	0,3	0,13	0,2	0,15	0,3
7-8	0,25	0,4	0,09	0,15	0,04	0,07	0,09	0,15
8-9	0,07	0,15	0,03	0,06	0,03	0,03	0,03	0,06
9-10	0,03	0,08	0,03	0,03	–	–	0,03	0,03
10-11	0,02	0,05	–	–	–	–	–	–
>11	0,03	0,03	–	–	–	–	–	–
Период T_w , с	Зима		Весна		Лето		Осень	
	p	f	p	f	p	f	p	f
<3	25	100	39	100	50	100	48	100
3-5	48	75	43	61	40	50	41	52
5-7	19	27	13	18	8	10	9	11
7-9	6	8	4	5	1,6	2	1,6	2
9-11	1,5	2	0,7	1	0,33	0,4	0,34	0,4
11-13	0,3	0,5	0,21	0,3	0,5	0,07	0,04	0,06
13-15	0,17	0,2	0,07	0,09	0,02	0,02	0,02	0,02
15-17	0,02	0,03	0,02	0,02	–	–	–	–
>17	0,01	0,01	–	–	–	–	–	–

Спектр морского волнения по В. Пирсону – Л. Московицу

$$S(\omega) = \frac{2\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-\beta \left(\frac{g}{\omega v} \right)^4 \right],$$

где $\alpha = 8,1 \cdot 10^{-3}$; $\beta = 0,74$; v – скорость ветра на высоте 19,2 м над уровнем моря.

Примем следующие основные допущения:

- для линий SSS на переходе в пределах одного района от одной фиксированной точки (например, порт выхода P_0) до E (порт назначения, подход к проливу, к границе района) имеется один центр волнения (рис. 6);

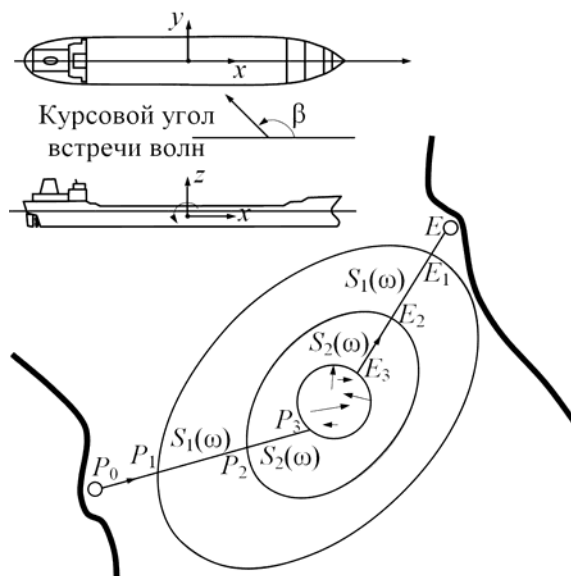


Рис. 6. Схема перехода участка с одним центром волнения и двумя спектрами волнения

- от центра волнения имеется (для SSS) максимум четыре участка стабильного (стационарного) спектра волнения с длиной волны λ_{w1} , λ_{w2} и высотами h_{w1} , h_{w2} ($P_1 - P_0$ и $P_2 - P_3$ до условного центра волнения, затем $E_3 - E_2$ и $E_2 - E_1$);
- в пределах действия стационарного спектра (волнение может быть стационарным в пределах 1-6 час [6]) динамическое воздействие на пропульсивный комплекс вдоль оси x изменяется по синусоидальному (косинусоидальному) закону регулярной волны или по трахоиде пакетной волны с одной центральной волной;
- судну задано значение скорости v_i , при этом непреднамеренное ее снижение Δv_w за счет встречных спектров $S_1(\omega_1)$ и $S_2(\omega_2)$ можно заранее оценить, исходя из амплитуд спектров (ω_1 , ω_2 — частоты волнения);
- при преднамеренном снижении скорости судна по сравнению со скоростью на тихой воде увеличение средних значений упора $\tilde{P}$ и момента $\tilde{M}_p$ пропорционально высоте волны h_w , в то время как амплитуда колебаний этих величин пропорциональна квадрату высоты волны $(h_w/2)^2$ [6];

- курсовой угол волны β учтен в спектрах волнения (рис. 5).

Сопротивление судну на волнении

$$R = R^{\circ} + \Delta R_w + R_p,$$

где R° – сопротивления на тихой воде; R_p – дополнительное сопротивление диска винта при качке (в дальнейших рассуждениях величину R_p не учитываем).

Дополнительное сопротивление воды движению судна ΔR_w вследствие продольной качки вдоль оси z (рис. 6, влиянием бортовой качки и рыскания судна пренебрегаем) и воздействия набегающих волн не связано с сопротивлением на тихой воде [6] и пропорционально квадрату амплитуды набегающих волн:

$$\Delta R_w = K_w \rho g^2 \left(\frac{h_w}{2} \right)^2 B^2 L^{-1},$$

где K_w – коэффициент дополнительного сопротивления, $K_w = K_w(\omega)$; B, L – соответственно ширина судна по миделю и длина $L = L_{\perp\perp}$ – длина между перпендикулярами; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения.

При этом амплитуда волн определяется из спектра регулярного волнения, рассчитанного для данного участка для частоты значимой волны (рис. 5):

$$\frac{1}{2} h_{w_i}(\omega) = \sqrt{S_i(\omega) \Delta \omega}.$$

Для режима нерегулярного волнения следует принять высоту центральной волны пакета волн трахоидального вида.

Согласно [8, 9], величина энергии, приходящаяся на длину волны и на единицу ширины гребня линейной волны малой амплитуды

$$f_w = \frac{1}{8} \rho g \left(\frac{h_w}{2} \right)^2.$$

Общая величина энергетического воздействия волны на некоторую линейную координату корпуса судна L

$$F_w(\omega) = \frac{1}{2} \rho g \left(\frac{h_w}{2} \right)^2 L \alpha^2(\omega),$$

где $\alpha^2(\omega)$ — коэффициент средней силы регулярной волны.

Соответственно, располагаемая энергия при спектре волнения $S(\omega)$

$$F_w(\omega) = \rho g L \int_0^{\infty} S(\omega) \alpha^2(\omega) d\omega.$$

Если сопоставить выражения ΔR_w и $F_w(\omega)$, то в силу их соответствия безразмерный коэффициент K_w можно приближенно интерпретировать как степень энергетической реакции (чувствительности) судна на соответствующий спектр волнения, создающий сопротивление ΔR_w :

$$K_w = \frac{\Delta R_w}{\rho g \left(\frac{h_w}{2} \right)^2 B^2 L^{-1}}.$$

Располагая значениями ΔR_w , определяемыми по модели [10] или эмпирическим формулам [12], и вычислив значения K_w для соотношений λ_w/L при постоянных числах Фруда (в рассмотренных случаях для судов типа «Измаил» число Фруда $Fr = 0,15$ и $0,20$), получим, что энергетическая реакция судна на амплитуды волн (в данном случае при скорости $v = 8,0$ узлов и $h_w/2 = 1,1$ м) из наличных спектров имеет в определенных реальных случаях четкие максимумы. Справедливо принять, что при выборе скорости судна при заданном спектре волнения и имеющейся длине волны следует избегать максимума K_w за счет намеренного изменения скорости судна, тем самым при известных ΔR_w и h_w (из спектра) можно определить диапазон наиболее чувствительной реакции судна на волнении и, соответственно, диапазон максимальных потерь мощности главного двигателя. Соответственно, из рис. 7 можно прогнозировать поиск наивыгоднейшего в данных условиях режима, имея в виду, что определяющей величиной станет число Fr .

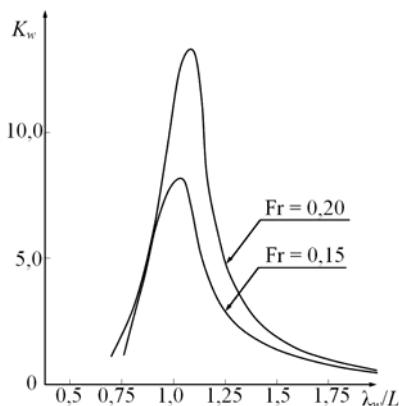


Рис. 7. Безразмерный коэффициент дополнительного сопротивления от волнения K_w

Примем в качестве критерия поиска наивыгоднейшего режима условие — пропульсивный КПД комплекса в условиях волнения

$$\eta_{Dw} = \frac{1}{2\pi} \frac{v(R^0 - \Delta\tilde{R}_w)}{n\tilde{M}_p}$$

должен минимально отличаться от соответствующего ему значения (т.е. при равных значениях n , v , Fr) КПД, определенного для условий тихой воды

$$\eta_D^0 = \frac{1-t_s^0}{1-w^0} \eta_p \eta_e,$$

где η_p — КПД винта; η_e — эффективный КПД двигателя.

Из рис. 8 видно, что максимальное падение значения η_{Dw} по отношению к η_D^0 соответствует определенной зоне отношения λ_w/L , причем зона такого падения смещается при увеличении числа Фруда (для данного типа судна) в сторону больших величин λ_w/L .

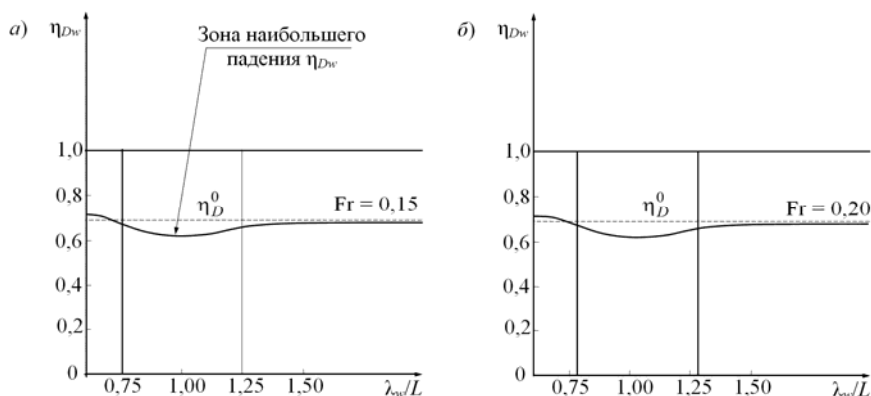


Рис. 8. Зона предпочтительных режимов при волнении по критерию КПД комплекса при $n_p = \text{const}$: а — при $Fr = 0,15$; б — при $Fr = 0,20$; — — — режим волнения ($h_w = 1,1$ м); — — — режим тихой воды

Важным является то, что максимум падения η_{Dw} соответствует для отношений λ_w/L пику величины K_w (см. рис. 7).

Эффективный КПД главного двигателя при условиях $n = \text{const}$ для тихой воды и умеренном волнении со всережимным регулятором частоты вращения и РН изменится незначительно (от т. A_2 к т. A_1 , рис. 9).

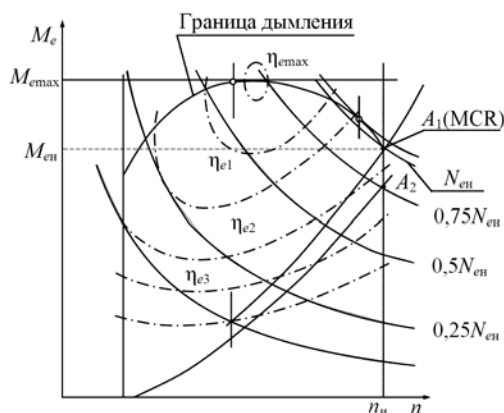


Рис. 9. Относительный эффективный КПД дизеля в режимах работы двигателя с валогенератором ($n = \text{const}$): A_1 — номинальный режим с валогенератором; A_2 — условный номинальный режим момента (мощности) на гребном винте

обусловлено особенностью структуры потока винта: в условиях волнения струя винта уже мало похожа на обычную вихревую пелену или цилиндрический поток и представляет собой бурун, интенсивность которого растет с увеличением числа Fr и несколько падает на больших значениях относительной поступи винта λ_p .

Средние по времени значения $\tilde{K}_{lw}^{np}$ и $\tilde{K}_{2w}$ увеличиваются на тем большую величину, чем выше частота и амплитуда колебаний волнения и соответственно качки судна. Наибольшее влияние на их величину при этом будет иметь изменение шагового отношения H_p/D_p при работе РН, а не вертикальная координата оси гребного винта. Соответственно для работы судна с ВРШ и при $n = \text{const}$ изменение числа Фруда Fr возможно регулированием мощности за счет разворота лопастей и установления режима скорости, при котором η_{Dw} гребного винта приближается к η_D^0 , причем в особых случаях (суда типа «Измаил» и суда «река-море») при фиксированном для данного участка отношении λ_w/L и h_w следует для достижения условия $\eta_{Dw} \approx \eta_D^0$, не уменьшать скорость судна, а наоборот – увеличивать (рис. 10, а). Для коротких волн (случай только для тепло-

Основное отличие η_{Dw} от η_D^0 будет определяться только реакцией корпуса (отношение $\frac{1-t_s}{1-w}$) и гребного винта при волнении η_{pw} (рис. 10).

Для условий волнения:

$$\tilde{\eta}_{pw} = \frac{\tilde{K}_{2w}}{\tilde{K}_{lw}} \cdot \frac{\tilde{\lambda}_p}{2\pi},$$

где $\tilde{\lambda}_p$ – средние значения относительной поступи.

В условиях килевой качки решающее влияние на показатели эффективности действия винта оказывает число Фруда Fr . Это

хода типа «Измаил»), режим с $\lambda_w/L = 0,75$ (рис. 10, б) вполне рациональный и при нем можно допустить работу ВРШ с регулятором нагрузки.

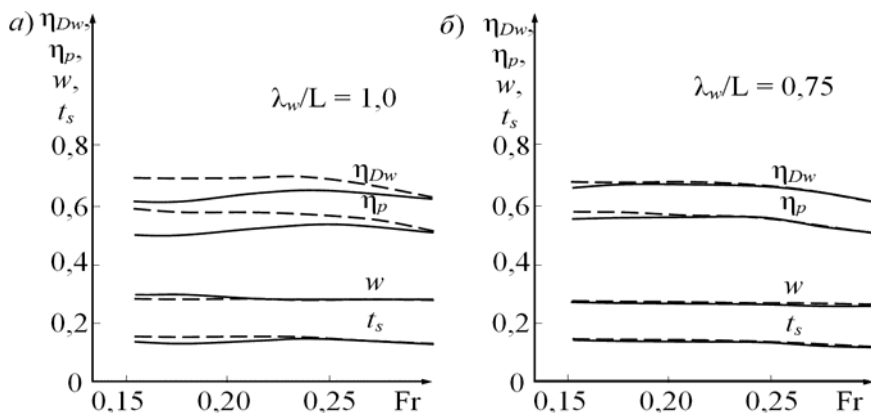


Рис. 10. Показатели КПД судового комплекса при $n = \text{const}$: а — $\lambda_w/L = 1,0$; б — $\lambda_w/L = 0,75$; — — — — режим волнения ($h_w = 1,1$ м); - - - - режим тихой воды

Таким образом, реальная регулируемая средняя скорость судна в условиях волнения

$$\tilde{v} = v^0 - \Delta v_w \pm \Delta v,$$

где v^0 — скорость на тихой воде до входа в зону регулярного волнения со спектрами $S_1(\omega_1)$ и $S_2(\omega_2)$ или до встречи с пакетом нерегулярных волн с центральной волной; Δv_w — непреднамеренная потеря скорости от дополнительного сопротивления ΔR_w , которая определяется по методике [4] для регулярного волнения при применении специального коэффициента влияния волнения $f_{шт}$; при нерегулярном волнении коэффициент $f_{шт}$ увеличивается на коэффициент динамичности действия центральной волны пакета; Δv — намеренное изменение скорости с использованием критерия $\Delta \eta_D = \min \eta_D^0 - \eta_{Dw}$.

Наиболее вероятный рациональный по критериям $\Delta \eta_D$ режим в условиях умеренного волнения — режим дополнительно сниженной скорости.

Если определяющей нагрузкой в период прохода участка волнения считать только значимую высоту (амплитуду) регулярного, а для

нерегулярного – высоту центральной волны пакета, то для определения мощности главного двигателя, обеспечивающей нерегулируемый режим ($\tilde{v}_w = v^0 - \Delta v_w$) движения судна, вместо уравнения динамики в относительных приращениях переменных достаточно использовать уравнение статики комплекса в виде

$$(1 - \tilde{t}_s) \rho n_0^2 D_p^4 \tilde{K}_{1w} (\tilde{\lambda}_p, \tilde{H}) = R_w (\tilde{v}_w);$$

$$\rho n_0^3 D_p^5 \tilde{K}_{2w} (\tilde{\lambda}_p, \tilde{H}) = a_1 \eta_{\text{п}} N_{e_w} (\tilde{H}),$$

где $a_1 = 16,2$; $\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи.

Полученная величина мощности $N_{e_w}(\tilde{H})$ при $n = n_0 = \text{const}$ не должна выходить за пределы ограничительной характеристики A_2-B_2 (рис. 11, а) для режима с полной нагрузкой валогенератора, если скорость судна в условиях умеренного волнения не выходит за ее пределы, а для остальных условий – за пределы характеристик A_2-B_2 начала доштормового волнения (рис. 10, б). В последнем случае в уравнении статики необходимо использовать предельные значения $N_e(\tilde{n}) = N_e^{\text{ог}}(\tilde{n})$, $\tilde{K}_{1w} = K_{1w}^{\text{ог}}$, т.е. значения, соответствующие ограничительным характеристикам при начале штормового волнения. Исходным для выбора мощности дизеля, обеспечивающего рациональный режим движения судна и соответственно шага по диаграммам (рис. 11), будет уравнение

$$N_{e_w} = \frac{\tilde{K}_{2w}}{K_2^0} \frac{\eta_D^0}{\eta_D^w} \frac{\tilde{v}}{v^0} N_e^0.$$

Уменьшение скорости Δv соответствует экстремуму падения η_{Dw} (рис. 8). Абсолютная величина снижения Δv может быть незначительной (по условию безопасности), но, имея в виду стандартную зависимость часового расхода топлива от скорости $B_{\text{ч}} \sim v^3$, справедливую для условий доштормового волнения, топливная экономичности на переходе участка может быть повышена на 3,5-4 %.

Выводы.

1. Для прогнозирования режима движения судна в условиях волнения рекомендованный курс следует разделить на участки с одним центром волнения, для которых имеются данные значений максимально двух спектров волнения.

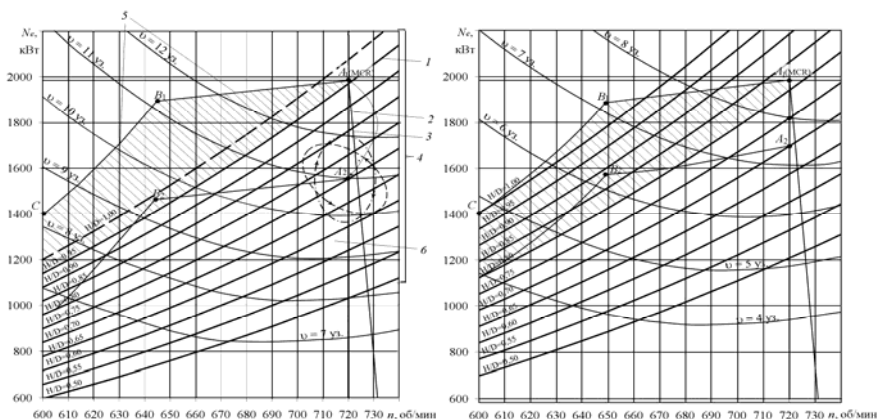


Рис. 11. Зона располагаемых режимов работы дизеля 6R32BC “Wärtsilä Vaasa” (суда типа «Измаил»): а — в условиях тихой воды; б — в штормовых условиях; 1 — номинальная винтовая характеристика при 100%-ной нагрузке валогенератора; 2 — характеристика $n = \text{const}$; 3 — регуляторная характеристика; 4 — характеристики $N_e = f(n)$ при $H_p/D_p = \text{var}$; 5 — ограничительная характеристика; A_1 — режим MCR; A_2 — режим отбора мощности валогенератора; B_1, B_2 — точки перелома ограничительных характеристик

2. Для определения максимальной величины влияния волнения можно принять коэффициент дополнительного сопротивления, при котором наблюдается экстремум падения КПД комплекса.
3. В качестве критерия выбора рационального режима движения судна рекомендовано использовать минимум разности значений КПД комплекса при волнении и на тихой воде.
4. Для определения мощности главного двигателя и шага ВРШ, соответствующего выбранной скорости перехода участка волнения достаточно использовать уравнение статики комплекса и статические характеристики дизеля для режимов тихой воды и начала штормового волнения.
5. Для режимов работы судна на коротких морских линиях при преднамеренном снижении скорости судна можно достичь экономии топлива 3,5 ... 4 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Небеснов В.И. Оптимальные режимы работы судовых комплексов. – М.: Транспорт, 1974. – 200 с.
2. Небеснов В.И. Оптимальное управление ВРШ на волнении. / В.И. Небеснов, В.А. Плотников, А.И. Кузюшин. – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 87 с.

3. Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Экономичные режимы главных двигателей с ВРШ в условиях волнения // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – 2009. – Вып. 15. – Одесса: ОНМА. – С. 83 - 98.
4. Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Домбровский В.А. Ходкость судов «река-море» на морском сегменте Большого европейского кольца // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – 2008. – Вып. 13. – Одесса: ОНМА. – С. 78 - 87.
5. Липис В.Б. Гидродинамика гребного винта при качке судна. – Л.: Судостроение, 1975. – 264 с.
6. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. – Л.: Судостроение, 1982. – 288 с.
7. Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Задача создания Short Sea Shipping – коротких морских сообщений для Дуная // International Black Sea Transport Forum. Транспортная стратегия Украины. 21–22 октября 2009 г. – Одесса: Mediascompass, 2009. – С. 40 - 41.
8. Ньюмен Дж. Морская гидродинамика. Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1985. – 368 с.
9. Ле Меоте Бернар. Введение в гидродинамику и теорию волн на воде. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 367 с.
10. Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Прогнозирование влияния нерегулярного волнения на ходкость одновинтового судна // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – 2005. – Вып. 10. – Одесса: ОНМА. – С. 76 - 92.
11. Ветер и волны в океанах и морях: справочные данные. Регистр СССР. – Л.: Транспорт, 1974. – 359 с.
12. Справочник по теории корабля: в 3 т. /Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. Т.1: Гидромеханика, сопротивление движению судов, судовые движители. - 764 с. Т.2: Статика судов, качка судов. - 440 с. Т.3: Управляемость водоизмещающих судов, гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. - 540 с.

УДК 621.822.2

Хлопенко Н.Я., Гаврилов С.А.
НУК

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВЫРАВНИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С РАЗГРУЖАЮЩИМИ СИЛЬФОНАМИ

Введение. В патентах [1-3] предложено гидравлическое выравнивающее устройство (ГВУ) с разгружающими сильфонами для упорных подшипников скольжения (УПС) судовых газотурбинных двигателей (ГТД). Как показывают расчеты, проведенные нами по формулам работ [4-6] для различных типоразмеров УПС судовых ГТД, оно характеризуется хорошей выравнивающей способностью при перекосах корпуса и обеспечивает защиту масляной пленки от вибрационного разрушения при торцовых биениях гребня.

Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования способностей гидравлического устройства [1-3] выравнивать нагрузки по подушкам при перекосах корпуса и подавлять вынужденные колебания толщины масляной пленки при торцовых биениях гребня.

Экспериментальные исследования проводились на стенде, описанном в работе [7]. Для измерения рабочих параметров подшипника использовался автоматизированный измерительный комплекс (АИК) [7, 8], аппаратная и программная части которого были существенно переработаны в связи с увеличением объема измерений и обработки полученной информации.

Показано, что созданная нами конструкция ГВУ обеспечивает полное выравнивание нагрузок по подушкам при перекосах корпуса и надежно защищает масляную пленку от вибрационного разрушения, вызванного торцовыми биениями гребня, во много раз превышающими нормативные значения.

Описание экспериментальной головки со встроенным УПС с ГВУ. Экспериментальная головка стенда представлена на рис. 1. Она состоит из гидроцилиндра 1 со встроенным упорным подшипником скольжения [7] с гидравлическим выравнивающим устройством 8.

УПС включает в себя корпус 2, шесть самоустанавливающихся подушек 3 и сепаратор 6, соединенный с корпусом крепежными винтами 7. Корпус подшипника жестко прикреплен к поршню гидроцилиндра.

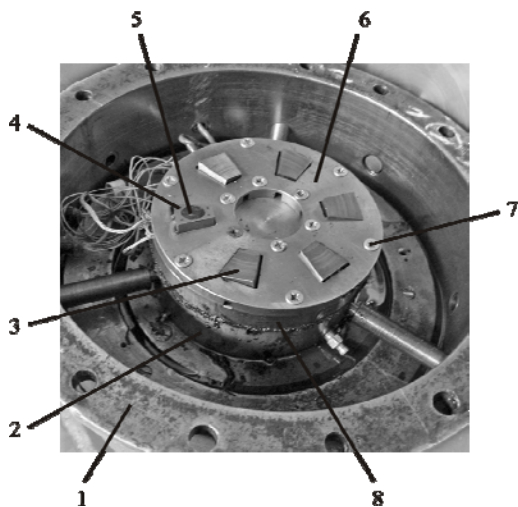


Рис. 1. Фотография экспериментальной головки: 1 — гидроцилиндр; 2 — корпус подшипника; 3 — подушка; 4 — термопара; 5 — вихретоковый преобразователь; 6 — сепаратор; 7 — крепежный винт; 8 — гидравлическое выравнивающее устройство

ГВУ (рис. 2) состоит из диска 1 с отверстиями и однослойных сильфонов с жесткими торцами 2, установленных в эти отверстия [см. 1-3]. Соединение сильфонов с жесткими торцами и диском выполнено пайкой с использованием припоя марки ПСр-45.

С тыльной стороны диска приварена крышка с кольцевой камерой (на рис. 2 не показана), образующей с рабочими объемами сильфонов замкнутую полость, заполненную при помощи штуцеров 3 и 4 маслом под небольшим давлением.

Усилие на подшипник создается за счет нагнетания масла под давлением в рабочую полость гидроцилиндра. Давление в рабочей полости измеряется манометром типа МО с ценой деления 2,5 кПа и пределом измерений 0...0,6 МПа.

Перекус корпуса подшипника измеряется по методике, изложенной в работе [7].

Для измерения температур смазки на входе и выходе из зазора между гребнем и подушкой используются хромель-копелевые термопары [две вблизи входной и две вблизи вы-

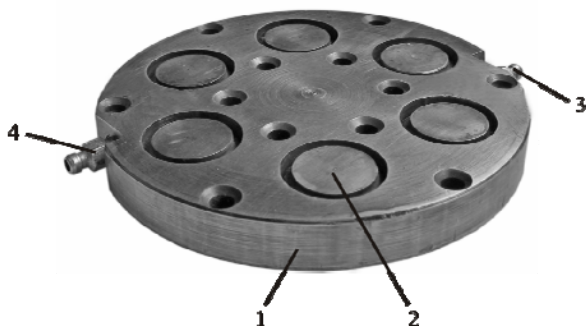


Рис. 2. Фотография экспериментального образца гидравлического выравнивающего устройства с разгружающими сильфонами: 1 — диск; 2 — сильфон; 3, 4 — штуцеры

ходной кромки подушки (см. рис. 1, поз. 4)]. Контрольная проверка показаний термопар, установленных в подушку, проводилась в масле потенциометром ПП-63 и ртутным термометром ГОСТ 215-73-ТЛ-2 с точностью до одного градуса по Цельсию.

Регистрация частоты вращения гребня осуществляется струнным индуктивным датчиком, а также контролируется тахометром ИО-30 с ценой деления 20 об/мин.

Толщина масляной пленки измеряется при помощи изготовленного вихретокового преобразователя (см. рис. 1, поз. 5), встроенного в тело подушки под точкой ее опоры, с точностью погрешности тапировки [7].

Описание автоматизированного измерительного комплекса. Функциональная схема автоматизированного измерительного комплекса представлена на рис. 3.

Основная аппаратная часть АИК реализована на базе персонального компьютера и устройства сбора данных NI USB-6009. Устройство сбора данных NI USB-6009 работает под управлением программного продукта LabVIEW и объединяет в себе все основные функции, необходимые для сбора и сохранения данных.

Программная часть АИК включает в себя математическую обработку результатов измерений, их сохранение, интерфейс пользователя, а также приложения, предназначенные для работы с сохраненными результатами экспериментов.

В отличие от работ [7, 8], сбор данных с нескольких каналов осуществляется одновременно (рис. 3) в реальном времени по схеме кольцевого буфера [9], в котором производится сбор и хранение данных платой NI USB-6009. Данные из буфера считываются по мере поступления и отображаются на графиках осциллограмм и числовых индикаторах лицевой панели.

Анализ экспериментальных результатов. Экспериментальные исследования эффективности работы ГВУ с разгружающими сильфонами проводились на установившихся режимах работы УПС при частоте вращения вала 2000 об/мин, амплитуде торцового биения гребня 60 мкм, линейном перекосе корпуса подшипника 60 мкм под точкой опоры подушки и удельных давлениях на подушку 1,2...2,5 МПа. В качестве смазки использовалось маловязкое масло М63/12Г. Коэффициент жесткости сильфонов определялся по результатам измерений осевых перемещений его торца под действием заданной нагрузки и оказался равным $52,6 \pm 2,5$ кН/м.

Распределение осевой нагрузки по подушкам рассчитывалось по методу, предложенному в работе [4], неоднократно подтвержденному экс-

периментальными исследованиями. Вычисления показали, что значения нагрузок по подушкам совпадают с точностью до трех знаков после запятой. Следовательно, созданное гидравлическое выравнивающее устройство с разгружающими сильфонами способно равномерно распределять осевую нагрузку по подушкам.

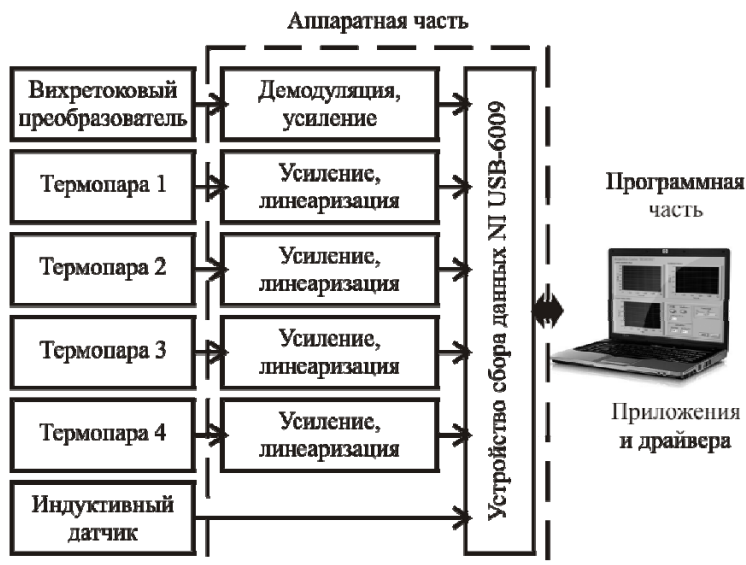


Рис. 3. Функциональная схема автоматизированного измерительного комплекса для экспериментальных исследований УПС с ГВУ с разгружающими сильфонами

На рис. 4 представлены осциллограммы электрических сигналов вихретокового преобразователя толщины масляной пленки. Первая осциллограмма (см. рис. 4, а) отображает поведение толщины масляной пленки при регулярных торцовых биениях гребня, а вторая (см. рис. 4, б) характеризует изменение с течением времени ее динамической составляющей. Они получены на установившемся режиме работы подшипника при удельном давлении на подушку около 1,2 МПа и температуре окружающей среды 23 °С. Измеренные значения температур смазки на этом режиме составили 130 °С на входе и 137 °С на выходе из несущего зазора между гребнем и подушкой. Расчетное значение температуры смазки на выходе из того же зазора, найденное по методу [6] в предположении, что все тепло уносится смазкой, оказалось несколько завышенным и равным около 138 °С. Как и следовало ожидать, эта величина температуры несущей

щественно отличается от экспериментального значения. Различие между ними составляет всего лишь 0,7%.

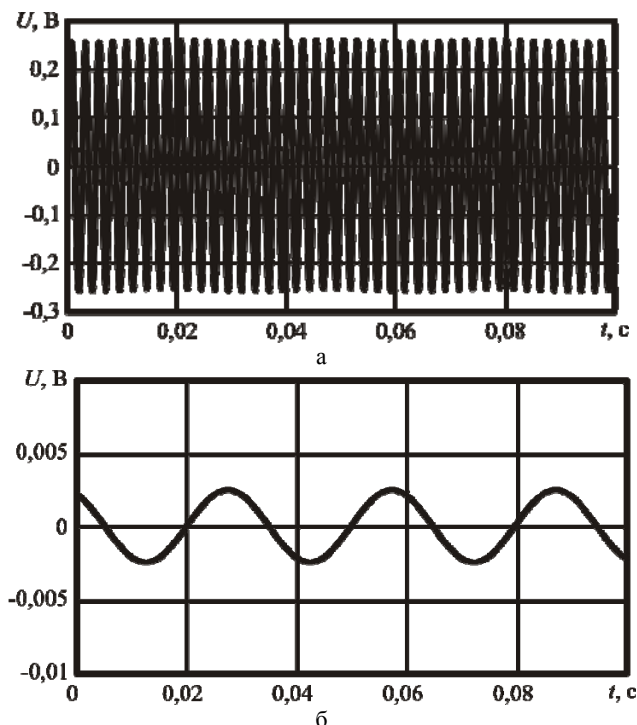


Рис. 4. Осциллограммы модулированного (а) и демодулированного (б) сигналов вихретокового преобразователя толщины масляной пленки: U — напряжение на выходе датчика; t — время

Сравнительный анализ осциллограмм, представленных на рис. 4, а, б показывает, что динамическая составляющая толщины масляной пленки под точкой опоры подушки составляет всего лишь 1% от ее статической составляющей. Этот результат подтверждается также расчетами, выполненными нами с привлечением работ [4, 6]. Поэтому можно утверждать, что гидравлическое выравнивающее устройство обеспечивает надежную работу смазочной пленки подшипника при торцовых биениях гребня и перекосах корпуса.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что при коэффициенте жесткости сильфона на порядок меньшем динамической жесткости масляной пленки

подушки гидравлическое выравнивающее устройство обеспечивает полное гашение вынужденных колебаний толщины масляной пленки при торцовых биениях гребня и выравнивание нагрузок по подушкам.

2. Теоретически и экспериментально доказана целесообразность применения УПС с ГВУ с разгружающими сильфонами в судовых ГТД и других технических устройствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на корисну модель №17857. Україна. Упорний підшипник ковзання / Романовський Г.Ф., Хлопенко М.Я., Гальчевський Ю.Л., Гаврилов С.О. – Опубл. 16.10.2006. – Бюл. №10.
2. Патент на корисну модель №42138. Україна. Упорний підшипник ковзання / Хлопенко М.Я., Гаврилов С.О., Крижановський Ю.І, Шарейко Д.Ю. – Опубл. 25.06.2009. – Бюл. №12.
3. Патент на корисну модель №46214. Україна. Упорний підшипник ковзання / Хлопенко М.Я., Гаврилов С.О., Романовський Г.Ф., Шарейко Д.Ю. – Опубл. 10.12.2009. – Бюл. №23.
4. Хлопенко Н.Я. Расчет предельных амплитуд торцовых биений гребня при перекосах корпуса упорного подшипника. – Николаев, 1994. – 20 с. – Рукопись представлена Николаевским корабл. ин-том. – Деп. В УкрГНТБ 20.04.94, №821-Ук94.
5. Хлопенко Н.Я. Динамика упорного подшипника скольжения при дисбалансах ротора, вращающегося в упругих опорах / Шарейко Д.Ю. // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2008. – №3. – С.67-72.
6. Хлопенко Н.Я. Влияние пузырьков газа на нелинейные динамические характеристики масляной пленки подпятника // Инженерно-физический журнал. – 1996. – Т.69. – №1. – С.90-97.
7. Романовский Г.Ф. Динамика упорных подшипников скольжения судовых турбомашин: Монография. / Хлопенко Н.Я. – Николаев: НУК, 2007. – 140 с.
8. Хлопенко Н.Я. Автоматизированный измерительный комплекс для мониторинга рабочих процессов в упорных подшипниках скольжения судовых турбомашин / Гаврилов С.А. // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2007. – №1. – С.18-22.
9. Трэвис Дж. LabVIEW для всех / Кринг Дж. – М.: ДМК Пресс, 2008 – 880 с.

УДК 621.791.92

Воробьев В.Л.
ОНМА

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ СУДОВЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ

Для повышения износостойкости деталей судовых машин и механизмов применяется метод нанесения на основную деталь износостойких покрытий малой толщины с высокими прочностными и износостойкими характеристиками. Поэтому необходимо исследовать напряженно-деформируемое состояние деталей с покрытием в зависимости от механических характеристик основной детали, моделируемой как упругий слой и покрытия, моделируемого как полубесконечная пластинка, нагруженная вертикальной и горизонтальными нагрузками, движущимися с постоянной скоростью вдоль торца покрытия. Задача сведена к системе трех интегральных уравнений на полубесконечном интервале с разностными ядрами и указан приближенный метод решения этих уравнений методом ортогональных многочленов.

Полубесконечное покрытие, занимающее область ($x \geq 0$, $|y| < \infty$), с жесткостью D и толщиной $2h$ полностью сцеплена с упругим слоем и нагружена вертикальной $q_3(x, y, t)$ и горизонтальными $q_k(x, y, t)$, ($k=1, 2$) нагрузками (рис. 1).

Обозначим через $p_m(x, y, t)$ искомые контактные напряжения, $U_m(x, y, t)$ — перемещения срединных точек покрытия, $V_m(x, y, t)$ — перемещения поверхности упругого слоя. Для покры-

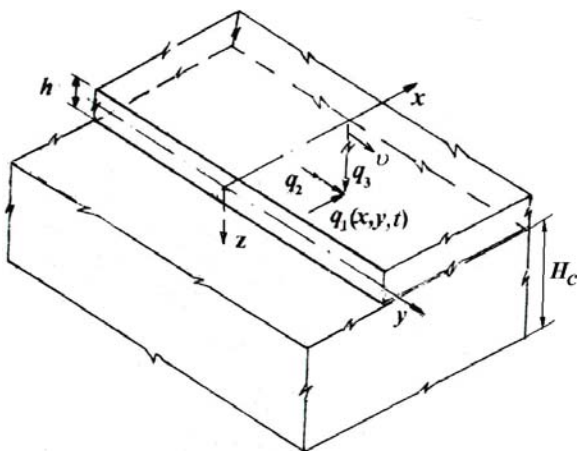


Рис. 1.

тия контактные напряжения и перемещения находятся из системы дифференциальных уравнений [1], записанной для преобразований Фурье в комплексной форме по переменной $\bar{y} = y - vt$ с параметром λ (штрих означает производную по x ; v — скорость движения нагрузок в направлении оси Oy ; ω — частота колебания нагрузок; $m = 1, 2, 3$):

$$\left\{ \begin{aligned} & U''_{1,\lambda}(x) - v_2 i \lambda U'_{2,\lambda}(x) - v_1 \lambda^2 U_{1,\lambda}(x) + \frac{1}{\theta} [q_{1,\lambda}(x) - p_{1,\lambda}(x)] = \\ & = \frac{2\rho h \omega_{v,\lambda}^2}{\theta} U_{1,\lambda}(x), \\ & -\lambda^2 U_{2,\lambda}(x) - v_2 i \lambda U'_{1,\lambda} + v_1 U''_{2,\lambda}(x) + \frac{1}{\theta} [q_{2,\lambda}(x) - p_{2,\lambda}(x)] = \\ & = \frac{2\rho h \omega_{v,\lambda}^2}{\theta} U_{2,\lambda}(x), \\ & D \left(\frac{d^2}{dx^2} - \lambda^2 \right)^2 U_{3,\lambda}(x) = q_{3,\lambda}(x) - p_{3,\lambda}(x) - h [q_{1,\lambda}(x) + p_{1,\lambda}(x)]' - \\ & - \frac{2\rho h \omega_{v,\lambda}^2}{\theta} U_{3,\lambda}(x) + i \lambda h [q_{2,\lambda}(x) + p_{2,\lambda}(x)], \quad \theta = \frac{1-v^2}{2Eh}, \quad D = \frac{h^2}{3\theta}, \\ & v_k = \frac{1+(-1)^k v}{2}, \quad \omega_{v,\lambda} = \omega + v\lambda. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$[q_m, p_m, U_m, V_m(x, \bar{y}, t)] = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [q_m^{\lambda,\omega}, p_m^{\lambda,\omega}, U_m^{\lambda,\omega}, V_m^{\lambda,\omega}(x)] e^{-i(\bar{y}\lambda + \omega t)} dx d\omega.$$

Преобразования Фурье перемещений $V_{m,\lambda}(x)$, ($m = 1, 2, 3$; $-\infty < x < \infty$) поверхностных точек упругого слоя связаны с преобразованиями Фурье контактных напряжений $p_{j,\lambda}(x)$, следующими интегральными соотношениями [2]:

$$V_{m,\lambda}(x) = \theta_0 \sum_{j=1}^3 \int_0^{\infty} K_{mj}^{\lambda}(x-s) p_{j,\lambda}(s) ds,$$

$$K_{mj}^{\lambda}(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_{mj}^{\lambda}(t) e^{-izt} dt, \quad m, j = 1, 2, 3$$

$$\begin{aligned}
H_{11}^\lambda(t) &= t^2 M(u) + \lambda^2 N(u), \quad H_{22}^\lambda(t) = t^2 N(u) + \lambda^2 M(u), \\
H_{12}^\lambda(t) &= H_{21}^\lambda(t) = t\lambda[M(u) - N(u)]; \quad H_{13}^\lambda(t) = -H_{31}^\lambda(t) = itP(u), \\
H_{32}^\lambda(t) &= -H_{23}^\lambda(t) = i\lambda P(u), \quad u = \sqrt{t^2 + \lambda^2}; \quad \sigma_n = \sqrt{u^2 - k_n^2}, \quad (n=1,2); \\
k_2^2 &= \rho_0(\omega + v\lambda)^2 H_c^2; \quad k_1^2 = k_2^2(1 - 2v_0)/(2 - 2v_0); \\
M(u) &= k_2^2 \left[\sigma_2 sh 2\sigma_2 \cdot ch 2\sigma_1 - \sigma_1^{-1} u^2 sh 2\sigma_1 ch 2\sigma_2 \right] / (2u^2 \Delta(u)); \\
N(u) &= 2sh 2\sigma_2 / (u^2 \sigma_2 sh 2\sigma_2); \\
P(u) &= (2u^2 - 0,5k_2^2)(1 - ch 2\sigma_1 ch 2\sigma_2) / \Delta(u) + \\
&+ \sigma_1^{-1} \sigma_2^{-1} \Delta^{-1}(u) \left[2u^4 - u^2(1,5k_2^2 + k_1^2) + k_2^2 k_1^2 \right] + sh 2\sigma_1 sh 2\sigma_2; \quad (2) \\
R(u) &= k_2^2 (2\Delta(u))^{-1} \left[\sigma_1^2 sh 2\sigma_1 ch 2\sigma_2 - \sigma_2^{-1} u^2 sh 2\omega_2 ch 2\sigma_1 \right]; \\
\Delta(u) &= u^2 (2u^2 - k_2^2) - (2u^4 - uk_2^2 + 0,25k_2^4) ch 2\sigma_1 ch 2\sigma_2 + \\
&+ \sigma_1^{-1} \sigma_2^{-1} u^2 \left[2u^4 - u^2(2k_2^2 + k_1^2) + k_1^2 k_2^2 + 0,25k_2^4 \right] sh 2\sigma_1 sh 2\sigma_2.
\end{aligned}$$

Если толщина слоя достаточно большая, то его можно моделировать как упругое полупространство, для которого в формуле (2) следует положить

$$\begin{aligned}
M(u) &= -0,5\theta_2^2 \sigma_2^0 / u^2 / \Delta_0(u); \quad N(u) = 2/u^2 / \sigma_2^0; \\
P(u) &= (u^2 - 0,5\theta_2^2 - \sigma_1^0 \sigma_2^0) / \Delta_0(u); \quad R(u) = -0,5\theta_2^2 \sigma_1^0 / \Delta_0(u); \\
\Delta_0(u) &= (u^2 - 0,5\theta_2^2)^2 - u^2 \sigma_1^0 \sigma_2^0; \quad \sigma_k^0 = \sqrt{u^2 - \theta_k^2}; \\
\theta_1^2 &= \rho_0(\omega + v_\lambda)^2 \alpha_0; \quad \theta_2^2 = \rho_0(\omega + v_\lambda)^2 \zeta_0 \\
\theta_0 &= 2(1 - v_0^2) / E_0, \quad \zeta_0 = v_0 / (1 - v_0), \quad \alpha_0 = (1 - 2v_0) / (2 - 2v_0).
\end{aligned} \quad (3)$$

В формулах (1)-(3) E, E_0 — модули упругости, v, v_0 — коэффициенты Пуассона, ρ, ρ_0 — удельные веса покрытия и упругого слоя.

Преобразования Фурье перемещений покрытия и упругого слоя должны удовлетворять условиям контакта

$$\begin{aligned}
U_{1,\lambda}(x) &= V_{1,\lambda}(x) + h U'_{3,\lambda}(x), \quad U_{2,\lambda}(x) = V_{2,\lambda}(x) + i\lambda h U_{3,\lambda}(x), \\
U_{3,\lambda}(x) &= V_{3,\lambda}(x), \quad x \geq 0.
\end{aligned} \quad (4)$$

Если $\lambda \neq 0$, то общие, исчезающие на бесконечности, решения дифференциальных уравнений из (1) имеют вид:

$$\begin{aligned}
 U_{1,\lambda}(x) &= c^{-1} \left(a_{1,\lambda} + a_{2,\lambda} |\omega_{v,\lambda}|x \right) e^{-|\omega_{v,\lambda}|x} + I_1^0 \left[q_{1,\lambda}(x) - p_{1,\lambda}(x) \right] + \\
 &\quad + \rho \left\{ \lambda^2 I_2^0 \left[q_{1,\lambda}(x) - p_{1,\lambda}(x) \right] - i\lambda I_2^1 \left[q_{2,\lambda}(x) - p_{2,\lambda}(x) \right] \right\}, \\
 U_{2,\lambda}(x) &= -ic^{-1} |\lambda|/\lambda \left[a_{1,\lambda} + a_{2,\lambda} \left((3-\nu)/(1+\nu) - |\omega_{v,\lambda}|x \right) \right] e^{-|\omega_{v,\lambda}|x} + \\
 &\quad + \frac{1}{v_1} I_1^0 \left[q_{2,\lambda}(x) - p_{2,\lambda}(x) \right] - \\
 &\quad - \rho \left\{ \lambda^2 I_2^0 \left[q_{2,\lambda}(x) - p_{2,\lambda}(x) \right] + i\lambda I_2^1 \left[q_{1,\lambda}(x) - p_{1,\lambda}(x) \right] \right\}, \\
 U_{3,\lambda}(x) &= (h)^2/3c \left(a_{3,\lambda} + a_{4,\lambda} |\omega_{v,\lambda}|x \right) e^{-|\omega_{v,\lambda}|x} + I_2^0 \left[q_{3,\lambda}(x) - p_{3,\lambda}(x) \right] - \\
 &\quad - h I_2^1 \left[q_{1,\lambda}(x) + p_{1,\lambda}(x) \right] + i\lambda h I_2^0 \left[q_{2,\lambda}(x) + p_{2,\lambda}(x) \right], \\
 \rho &= (1+\nu)/(1-\nu); \quad c = \theta_0/\theta; \quad x \geq 0, \\
 I_n^r[f(x)] &= \int_0^\infty G_{nr}^\lambda(|x-s|) f(s) ds; \\
 G_{nr}^\lambda(z) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \frac{(it)^r e^{izt}}{(t^2 + \lambda^2)^n - 2\rho h \omega_{v,\lambda}^2} dt, \quad (r \leq 2n).
 \end{aligned} \tag{5}$$

При вычислении производных от перемещений $U_{k,\lambda}(x)$ ($k=1, 2, 3$) в формулах (5), для операторов $I_m^{(j)}[f(x)]$ следует воспользоваться следующими равенствами:

$$\begin{aligned}
 \left(I_m^{(j)}[f(x)] \right)' &= I_m^{(j+1)}[f(x)], \quad (m=1, 2); \\
 I_2^2[f(x)] &= \lambda^2 I_2^0[f(x)] - I_1^0[f(x)], \\
 I_2^4[f(x)] &= f(x) - 2\lambda^2 I_1^0[f(x)] + \lambda^4 I_2^0[f(x)].
 \end{aligned} \tag{6}$$

При вычислении производных от перемещений $U_{k,\lambda}(x)$ ($k=1, 2, 3$) в формулах (5), для операторов $I_m^{(j)}[f(x)]$ следует воспользоваться следующими равенствами:

$$\begin{aligned}
 I_m^{(j)'}[f(x)] &= I_m^{(j+1)}[f(x)], \quad (m=1, 2); \quad I_2^2[f(x)] = \lambda^2 I_2^0[f(x)] - I_1^0[f(x)], \\
 I_2^4[f(x)] &= f(x) - 2\lambda^2 I_1^0[f(x)] + \lambda^4 I_2^0[f(x)].
 \end{aligned} \tag{7}$$

Постоянные $a_{j,\lambda}$ ($j = 1, 2, 3, 4$) определяются из условий на торце покрытия для преобразования Фурье напряжений, моментов, и обобщенных поперечных сил, определяемых по формулам

$$\begin{aligned}\sigma_{x,\lambda}(x) &= E \left[U'_{1,\lambda}(x) - \nu i \lambda U_{2,\lambda}(x) \right] / (1 - \nu^2); \\ \tau_{xy,\lambda}(x) &= E \left[U'_{2,\lambda}(x) - i \lambda U_{1,\lambda}(x) \right] / (2 + 2\nu); \\ M_{x,\lambda}(x) &= -D \left[U''_{3,\lambda}(x) - \nu \lambda^2 U_{3,\lambda}(x) \right]; \\ (D)^{-1} Q_{x,\lambda}(x) &= -U'''_{3,\lambda}(x) + (2 - \nu) \lambda^2 U'_{3,\lambda}(x) - h \left[q_{1,\lambda}(x) + p_{1,\lambda}(x) \right].\end{aligned}\quad (8)$$

Уравнения для определения постоянных $a_{j,\lambda}$ будут приведены ниже.

Для определения неизвестных контактных напряжений в результате подстановки (2) и (4) в условия контакта (3) получена система из шести интегральных уравнений. Эта система после введения обозначений $\lambda x = t$, $\lambda s = \tau$,

$$\lambda^{-1} \left[p_{k,\lambda}(t/\lambda), q_{k,\lambda}(t/\lambda) \right] = \left[p_k(t), q_k(t) \right],$$

примет вид

$$\begin{aligned}\sum_{k=1}^3 \int_0^\infty \ell_{rk,\lambda}(|t-\tau|) p_k(\tau) d\tau &= (A_{r,\lambda} + B_{r,\lambda} |\lambda| t) e^{-|\lambda|t} + c f_{r,\lambda}(t), \quad t \geq 0; \quad r=1, 2, 3; \\ \ell_{rk,\lambda}(z) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \left[H_{rk}^\lambda(t) + h_{rk,\lambda}(t) \right] e^{-izt} dt.\end{aligned}\quad (9)$$

Входящие сюда функции и постоянные определяются по формулам

$$\begin{aligned}h_{11,\lambda}(t) &= 2c (2\omega_\lambda - \alpha \lambda^2 \omega^2); \quad h_{12,\lambda}(t) = -h_{21,\lambda}(t) = 2c \alpha i t \omega^2; \quad \omega_\lambda = (t^2 + \lambda^2)^{-1}; \\ h_{22,\lambda}(t) &= 2c [(1 - \nu)^{-1} \omega_\lambda + \alpha \lambda^2 \omega_\lambda^2]; \quad h_{13,\lambda}(t) = -h_{31,\lambda}(t) = 2c i t \omega_\lambda^2 / h; \\ h_{33,\lambda}(t) &= 2c h^{-2} \omega_\lambda^2; \quad h_{23,\lambda}(t) = -h_{32,\lambda}(t) = 2c i \lambda \omega_\lambda^2 / h; \\ f_{1,\lambda}(x) &= -2I_1^0 [q_{1,\lambda}(x)] + \gamma \lambda^2 I_2^0 [q_{1,\lambda}(x)] - \gamma i \lambda I_2^1 [q_{2,\lambda}(x)] - \frac{3}{h} I_2^1 [q_{3,\lambda}(x)]; \\ f_{2,\lambda}(x) &= -\gamma I_2^1 [q_{1,\lambda}(x)] - \gamma \lambda^2 I_2^0 [q_{2,\lambda}(x)] - \frac{2}{1 - \nu} I_1^0 [q_{2,\lambda}(x)] - \frac{3}{h} i \lambda I_2^0 [q_{3,\lambda}(x)]; \\ f_{3,\lambda}(x) &= -\frac{3}{h^2} \{ h I_2^1 [q_{1,\lambda}(x)] - h i \lambda I_2^0 [q_{2,\lambda}(x)] + I_2^0 [q_{3,\lambda}(x)] \}, \\ \alpha &= (1 - 2\nu) / (1 - \nu); \quad \gamma = 2(2 - \nu) / (1 - \nu).\end{aligned}\quad (10)$$

$$A_{1,\lambda} = a_{4,\lambda} + h \lambda (a_{1,\lambda} - a_{2,\lambda}); \quad A_{2,\lambda} = \frac{|\lambda|}{i\lambda} \left[a_{3,\lambda} - \frac{3-\nu}{1+\nu} a_{4,\lambda} \right] + h \lambda a_{1,\lambda};$$

$$A_{3,\lambda} = a_{1,\lambda}; \quad B_{1,\lambda} = a_{4,\lambda} + h \lambda a_{2,\lambda}; \quad B_{2,\lambda} = \frac{|\lambda|}{i\lambda} a_{4,\lambda} + h \lambda a_{2,\lambda}; \quad B_{3,\lambda} = a_{2,\lambda}.$$

Приближенное решение системы (9) строится методом ортогональных многочленов [3] и разыскивается в виде следующего ряда ($x, \lambda > 0$):

$$p_k(\tau) = 2(2\lambda\tau)^{-1/2} e^{-\lambda\tau} \sum_{n=0}^{\infty} \mu_n \phi_{n,k} L_n^{-1/2}(2\lambda\tau), \quad \mu_n = \frac{2\sqrt{2}n!}{\Gamma(n+1/2)}, \quad x, \lambda > 0, \quad (11)$$

где $L_n^\alpha(z)$ — многочлены Чебышева-Лагеррера; $\Gamma(z)$ — гамма-функция Эйлера [4].

В результате применения этого метода относительно коэффициентов разложения получим блочную систему уравнений для определения коэффициентов $\phi_{n,j}$ ряда (11)

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{n=0}^{\infty} I_{m-n,r,k} \phi_{n,k} = f_{m,r}, \quad r=1,2,3; \quad m=0,1,2,\dots$$

$$I_{m-n,r,k} = 4\mu_m \mu_n \iint_0^\infty \ell_{rk,\lambda}(|t-\tau|) e^{-(t+\tau)} (4t\tau)^\alpha L_m^\alpha(2\tau) L_n^\alpha(2t) dt d\tau, \quad (12)$$

$$f_{m,r} = 2\mu_m \int_0^\infty \left[c \lambda (A_r + B_r t) e^{-t} + f_r(t) \right] e^{-t} (2t)^\alpha L_m^\alpha(2t) dt, \quad (\alpha = -1/2).$$

Используя работы [1, 3, 6], коэффициенты системы (12) представим в виде

$$I_{n,1,1} = k_n^{1,1} + \frac{2c}{\lambda} (2q_n^{1,0} - \alpha q_n^{2,0}); \quad I_{n,1,2} = -k_n^{1,2} - \frac{2c}{\lambda} \alpha q_n^{2,1}; \quad I_{n,1,3} = k_n^{1,3} - \delta q_n^{2,1};$$

$$I_{n,2,1} = k_n^{2,1} + \frac{2c}{\lambda} q_n^{2,1}; \quad I_{n,2,2} = k_n^{2,2} + \frac{2c}{\lambda} \left[\frac{q_n^{1,0}}{1-\nu} + \alpha q_n^{2,0} \right]; \quad I_{n,2,3} = k_n^{2,3} + \delta q_n^{2,0};$$

$$I_{n,3,1} = k_n^{3,1} + \delta q_n^{2,1}; \quad I_{n,3,2} = -k_n^{3,2} + \delta q_n^{2,0}; \quad I_{n,3,3} = k_n^{3,3} - \delta q_n^{2,0} / h;$$

$$k_n^{1,1} = \delta_{0n} + \frac{\zeta_0}{2} \left[\delta_{0n} - \frac{1}{2} \delta_{|n|} \right]; \quad k_n^{1,2} = k_n^{2,1} = \frac{\zeta_0}{4} \delta_{|n|};$$

$$k_n^{1,3} = -k_n^{3,1} = \frac{\alpha_0}{\pi} (1 - 4n^2)^{-1}; \quad k_n^{2,2} = \frac{\delta_{0n}}{1-\nu_0} - \frac{\zeta_0}{2} \left[\delta_{0n} - \frac{1}{2} \delta_{|n|} \right];$$

$$k_n^{2,3} = -k_n^{3,2} = \frac{\alpha_0}{\pi} \frac{1}{1-4n^2}; \quad k_n^{3,3} = \delta_{0,n}; \quad \left(\delta = 3c / \lambda / h^{\pm} \right);$$

$$q_n^{1,0} = \frac{2}{\pi(1-4n^2)}; \quad q_n^{2,p} = (12-4^p) \frac{(-1)^p}{\pi} \frac{1}{(9-4n^2)(1-4n^2)}, \quad (p=0,1). \quad (13')$$

Для вычисления коэффициентов правой части $f_{m,r}$ системы (12) используя представления для полиномов Чебышева-Лагерра

$$1 = L_0^{-1/2}(2t); \quad 2t = \frac{1}{2}L_0^{-1/2}(2t) - L_1^{-1/2}(2t)$$

и их ортогональность (7.414) [4], запишем формулу

$$f_{m,r} = \frac{c}{2} \left[A_r 2\delta_{1m} + B_r \left(\frac{1}{2}\delta_{0m} - \delta_{1m} \right) \right] + \frac{c}{\lambda} \bar{f}_{m,r};$$

$$\bar{f}_{m,r} = 2\mu_m \int_0^{\infty} f_r(t) e^{-t} \frac{L_m^{-1/2}(2t)}{\sqrt{2t}} dt, \quad (14)$$

где δ_{km} – символ Кронекера.

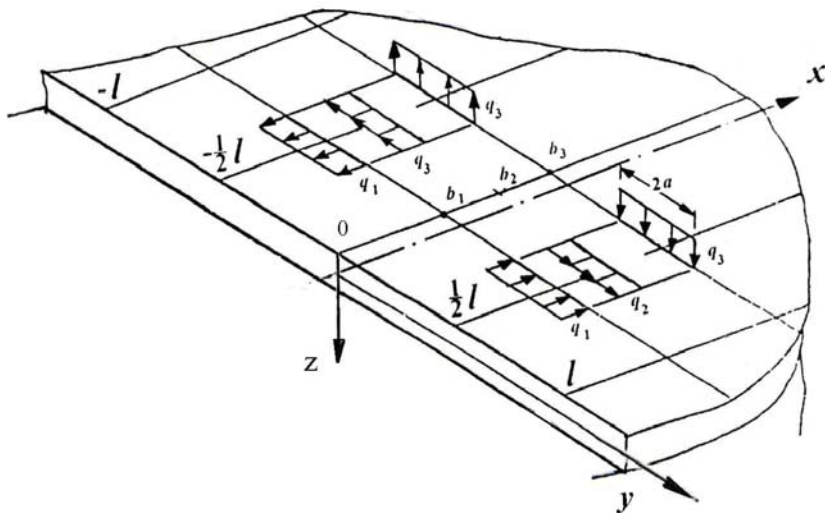


Рис. 2

Входящие сюда функции $f_{r,\lambda}(t)$ зависят от загрузки покрытия. Если нагрузки загружены по линиям $x = b_j$, $j = 1, 2, 3$ (рис. 2), эти коэффициенты представим в виде

$$\begin{aligned}\bar{f}_{m,1} &= -2R_m^{1,0}(\beta_1) + \gamma R_m^{2,0}(\beta_1) + \gamma R_m^{2,1}(\beta_2) - 3h^{-1}R_m^{2,1}(\beta_3); \quad \beta_j = cb_j; \\ \bar{f}_{m,2} &= \gamma R_m^{2,1}(\beta_1) + \frac{2}{1-\nu} R_m^{1,0}(\beta_1) - \gamma R_m^{2,0}(\beta_2) + 3h^{-1}R_m^{2,0}(\beta_3); \end{aligned} \quad (15)$$

$$\bar{f}_{m,3} = -3h^{-1} [R_m^{2,1}(\beta_1) + R_m^{2,0}(\beta_2) + h^{-1}R_m^{2,0}(\beta_3)]; \quad R_m^{2,1}(x) = (R_m^{2,0}(x))'.$$

Функции $R_n^{p,0}(z)$ будут определяться формулами

$$\begin{aligned}R_0^{1,0}(z) &= e^{-z} [0,5 \cdot \Gamma^*(z) + \sqrt{2z}] / \sqrt{\pi}, \quad \Gamma^*(z) = e^{2z} \Gamma(0,5; 2z), \\ R_0^{2,0}(z) &= e^{-z} [(2,5 - 2z) \cdot 1,5 \cdot \Gamma^*(z) + (3,75 + 2z)\sqrt{2z}] / 6 / \sqrt{\pi}, \\ R_1^{1,0}(z) &= -e^{-z} (2z)^{2+\alpha} [2\Gamma(3+\alpha)]^{-1}, \\ R_1^{2,0}(z) &= -e^{-z} \left\{ 3,75 \cdot [0,5 \cdot \Gamma^*(z) + \sqrt{2z}] + (2z)^{1,5} (2,5 + 2z) \right\} / 15 / \sqrt{\pi}, \\ R_m^{p,0}(z) &= \frac{(-1)^p 2^{1-2p}}{\Gamma(p+0,5+m)} (m-p)! e^{-z} (2z)^{2p-0,5} L_{m-p}^{2p-0,5}(2z), \\ p &= 1, 2; \quad m = 2, 3, \dots, \end{aligned} \quad (16)$$

где $\Gamma(\alpha, 2z)$ – неполная Гамма-функция [4].

Входящие в искомое решение (11) коэффициенты $\phi_{n,k}$ находятся из бесконечной системы (12). Так как правые части системы содержат неизвестные произвольные постоянные A_r, B_r ($r = 1, 2, 3$), которые выражаются согласно (10) через a_j ($j = 1, 2, 3, 4$), то пользуясь линейностью этой системы, коэффициенты $\phi_{n,k}$ будем разыскивать в виде

$$\phi_{n,k} = \sum_{p=1}^3 (A_{p,\lambda} \phi_{n,k,p} + B_{p,\lambda} \bar{\phi}_{n,k,p}) + \phi_{n,k,p}; \quad (n = 0, 1, 2, \dots; \quad k = 1, 2, 3), \quad (17)$$

где $\phi_{n,k,r}, \bar{\phi}_{n,k,r}, \phi_{n,k,4}$ находятся из бесконечной системы (12), в правых частях которых, соответственно записанных в (17) слагаемым, вместо $f_{m,r}$ находятся величины

$$\delta_{ip} \delta_{1m}, \quad \delta_{rp} (\delta_{0m} - 2\delta_{1m}) / 4, \quad \bar{f}_{m,r}. \quad (18)$$

Бесконечные системы (12) с учетом (17), (18) удобно решать приближенно методом редукции.

Постоянные $a_{j,\lambda}$ ($j = 1, 2, 3, 4$), входящие в (5) и (17), определяются из формул (8) при $x = \pm a$. Подставив формулы (5) в (17) с использованием (6) и положив $x = 0$, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}
& (1-\nu)\lambda c^{-1}\left[\left(1-\nu\right)a_2-a_1\right]-\sigma_1\phi_{0,1}+\sigma_2\phi_{0,2}+\sigma_3(\phi_{1,1}+\phi_{1,2})= \\
& =2h\sigma_{x,\lambda}(0)-\bar{\sigma}_{x,\lambda}(0,\beta_1); \\
& (1-\nu)\lambda c^{-1}\left[2\left(1+\nu\right)a_2-a_1\right]-\tau_1\phi_{0,1}+\tau_2\phi_{0,2}+\tau_3(\phi_{1,1}+\phi_{1,2})= \\
& =2h\tau_{xy,\lambda}(0)-\bar{\tau}_{xy,\lambda}(0,\beta_2); \\
& h\lambda(3c)^{-1}\left[2a_4-(1-\nu)a_3\right]+m_1\left(\phi_{0,2}+\phi_{0,3}/h\right)-m_3\phi_{0,1}- \\
& -m_3\left(\phi_{1,1}+\phi_{1,2}+\phi_{0,3}/h\right)=M_{x,\lambda}(0)/h-\bar{M}_{x,\lambda}(0,\beta_3); \\
& h^2\lambda(3c)^{-1}\left[(1+\nu)a_4-(1-\nu)a_3\right]+h\left[q_1\left(\phi_{0,2}+\phi_{0,3}/h\right)\right]+ \\
& +q_2\phi_{0,1}-m_3\left(\phi_{1,1}+\phi_{1,2}+\phi_{1,3}/h\right)=Q_{x,\lambda}(0)-\bar{Q}_{x,\lambda}(0,\beta_3); \\
& \sigma_1=(9+\nu)/16; \quad \sigma_2=(3-5\nu)/16; \quad \sigma_3=(1+\nu)/8; \\
& \tau_1=(5-3\nu)/16; \quad \tau_2=(7-\nu)/16; \\
& m_1=(3+5\nu)/16; \quad m_2=(7+\nu)/16; \quad m_3=(1-\nu)/8; \\
& q_1=(9-\nu)/16; \quad q_2=(5+3\nu)/16.
\end{aligned} \tag{19}$$

Здесь $\sigma_{x,\lambda}(0)$, $\tau_{xy,\lambda}(0)$, $M_{x,\lambda}(0)$, $Q_{x,\lambda}(0)$ – соответственно нормальные и касательные напряжения, изгибающий момент и поперечная сила в торцах покрытий; $\bar{\sigma}_{x,\lambda}(0,\beta_1)$, $\bar{\tau}_{xy,\lambda}(0,\beta_1)$, $\bar{M}_{x,\lambda}(0,\beta_3)$, $\bar{Q}_{x,\lambda}(0,\beta_3)$ — аналогичные усилия, действующие по линиям $\xi=\beta_i$ ($i=1, 2, 3$), (см. рис. 2).

Коэффициенты $\phi_{n,j}$ определяются формулой (17), в которую входят постоянные $a_{j,\lambda}$ ($j=1, 2, 3, 4$). Подставив формулу (17) в (19) и собрав слагаемые, содержащие одинаковые постоянные, получим линейную систему четырех алгебраических уравнений относительно постоянных $a_{j,\lambda}$. Определив эти постоянные, найдем напряжения и изгибные усилия в покрытиях.

В качестве примера были проведены вычисления приведенного изгибающего момента и контактных напряжений в покрытии нагруженного вертикальной сосредоточенной силой, приложенной в точке $\beta_3=c\beta_3$. Из вычислений следует, что при $\beta_3 H_c \geq 3,2$ слой можно заменить на упругое полупространство, для которого расчетные

формулы существенно упрощаются. Если же $\beta_3 H_c \leq 0,1$ упругий слой можно моделировать как винклеровское основание с коэффициентами податливости $k_j = \lambda_j H_c$ ($j=1,2,3$). В этом случае контактные напряжения вычисляются по формулам $p_{j,\lambda}(x) = k_j^{-1} U_{j,\lambda}(x)$. Из результатов вычисления для всех толщин слоя при нагрузках на покрытие, приложенных на расстояниях $\beta_j \geq 1,8$, расчетные усилия в покрытии практически совпадают с аналогичными усилиями в бесконечном покрытии, для которого получено точное решение уравнения (9) при $-\infty < \tau < \infty$ и $A_{r,\lambda} = B_{r,\lambda} = 0$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Г.Я. Контактные задачи для линейно-деформируемого основания / Г.Я. Попов. – К.: Вища школа, 1982. – 167 с.
2. Ворович И.И. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей / И.И. Ворович, В.А. Бабешко. – М.: Наука, 1979. – 320 с.
3. Попов Г.Я. Концентрация упругих напряжений возле штампов, разрезов, тяжких включений и подкреплений / Г.Я. Попов. – М.: Наука, 1982. – 324 с.
4. Градштейн Н.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / Н.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.: Физматгиз, 1971. – 1108 с.
5. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа / К. Ланцош. – М.: Фитматгиз, 1961. – 387 с.
6. Гожберг И.Ц. Уравнение в свертках и проекционные методы их решения / И.Ц. Гожберг, И.А. Фельдман. – М.: Наука, 1971. – 420 с.

УДК 629.12.06: 628.84:517.3

Голиков В.А., Капустин В.И.
ОНМА

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ОПЕРАТОРОВ СУДОВЫХ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами исходит из анализа аварийности морских и речных судов, в котором доминирующая роль принадлежит человеческому фактору. Более 85% аварий на транспорте происходит по вине операторов эргатических систем управления движением. Основными причинами проявления этого фактора являются управленческая несогласованность, недостаток оперативных знаний и неготовность оператора к экстремальному управлению [1, 2].

Рассматриваемая проблема является компонентой «Основных научных направлений и важнейших проблем фундаментальных исследований в области природных, технических и гуманитарных наук на 2009-2013 годы» (совместный приказ МОНУ, НАНУ, АПНУ, АМНУ, АПНУ, АНУ от 26.11.2009г., № 1066/609, п. 1.2.4.5 — проблемы оптимального управления, а также «Приоритетных направлений развития науки и техники на период до 2006г.» (Указ Президента Украины от 11.06.2001, № 2623-III, ст.7,п.1).

В монографии [1] отмечается, что адаптация операторов, машинистов, диспетчеров, шоферов, моряков и других представителей аналогичных профессий носит стадийный, динамически стереотипный характер. Если на первой стадии адаптации человека включаются вегетативные и двигательные механизмы организма, то на последующих этапах происходит психологическая настройка судового оператора (жалобы на скуку, снижение внимания и потеря интереса к работе).

Для первой стадии адаптации моряков был предложен алгоритм формирования комфортного динамического микроклимата (КДМ), который предусматривает колебания микроклиматических параметров воздушной среды помещения в допустимых пределах одновременно с физической нагрузкой на организм и без нее. К сожалению, в приведенной монографии нет сведений об экспериментальной проверке эффективности КДМ. Эффективность воздействия внешних факторов на психику оператора судна недостаточно изучена, что сдерживает проведение полной адаптации моряков в рейсах.

Следует обратить внимание и на активные мобилизационные адаптивные реакции в организме человека при воздействии инфразвука — упругих волн с частотами ниже области восприятия органами слуха человека, обычно, 16-25 Гц. Источниками инфразвука являются природные шумы ветра в атмосфере, лесах, горах и морях, гром, взрывы и орудийные выстрелы, а также техногенные факторы — работа транспортных средств, электро и радиооборудования, средств связи и др. [3].

Характерной особенностью инфразвука является его малое поглощение в таких средствах как воздух, вода и земная кора, вследствие чего он распространяется на большие расстояния. Например, при частоте 3,5 Гц длина волны равна 100 метрам.

Влияние инфразвука на организм человека неоднозначно. Являясь, по сути, низкочастотной гомеостатической системой, его элементы входят в резонанс с инфразвуком определенных частот, становясь колебательным контуром. Благоприятное воздействие оказывает задействие механического резонанса упругих колебаний с частотами 10-16 Гц. Самым опасным считается промежуток частот от 6 до 9 Гц. Например, при частоте 7 Гц наблюдаются психотропные эффекты созвучные альфа ритму природных колебаний мозга, приводящие к прекращению его умственной деятельности. Причем, при малой интенсивности инфразвука (120-130 дБ) на этой частоте вызывается тошнота, звон в ушах, ухудшение зрения и безотчетный страх. Звук средней интенсивности (130-150 дБ) при частоте 7 Гц расстраивает органы пищеварения и мозг, порождая паралич, общую слабость, а иногда, и слепоту. Упругий мощный инфразвук способен повредить и даже полностью остановить сердце. Приступы морской болезни и головокружения наступают также при (85-110 дБ) с частотой около 12 Гц, а инфрачастоты в 15-18 Гц той же интенсивности порождают чувство беспокойства, неуверенности и панического страха [4, 5].

Целью настоящего исследования является выбор способов обеспечения готовности судового оператора к экстремальному управлению судном и его техническими средствами управляемым воздействием внешней среды.

В первую задачу исследования входило количественное описание характеристик КДМ для обеспечения физиологической активности оператора, а во вторую - выбор метода средств и программ психофизиологической настройки оператора для работы в экстремальных условиях.

Изложение основного материала исследований начинается с установления взаимосвязи между теплоощущением оператора и температурой атмосферы помещения. Для этого был проведен лабораторный эксперимент по активизации механизмов и систем теплового гомеостаза путем создания дефицита тепла.

В таблице 1 представлены результаты теплового воздействия в в климатической камере на группу из 15-ти курсантов, занимающихся тренингом, в которой дефицит температуры воздуха снижается по синусоидальному закону

$$\Delta T(\tau) = \Delta T_{\max} \sin(3\tau)$$

При $\Delta T_{\max} \in [-14; 0^\circ \text{C}]$ и $\tau \in [0; 60 \text{ мин}]$.

Особенностью эксперимента является постепенное (за 30 минут) снижение температуры воздуха до минимально установленной с постепенным ее повышением до первоначальной в течение последующих 30 минут. Испытуемые ощущали максимальный дискомфорт на 30-й минуте с момента начала эксперимента. Алгоритм блока задания регулятора температуры воздуха в помещении оператора при работе системы судового микроклимата (ССМ) в режиме «Термотренировка» направлен на реализацию КДМ в течение 1 час, а процесса с последующим обнулением времени. В течение часа температура воздуха в кондиционируемом помещении изменяется по синусоидальному закону

$$T(\tau) = T_{\text{н}} - B \sin(3\tau),$$

где $T_{\text{н}}$ — температура акклиматизации, $^\circ\text{C}$; B — максимальный температурный градиент: $B = 8$ при $T_{\text{н}} \in [24; 32^\circ \text{C}]$, $B = 4$ при $T_{\text{н}} \in [22; 24^\circ \text{C}]$, $B = 2$ при $T_{\text{н}} \in [18; 22^\circ \text{C}]$, τ — время, $\tau \in [0; 60 \text{ мин}]$.

Приведенное выражение является не единственной закономерностью формирования КДМ в ССМ так как требует уточнения эффективности температурных воздействий не только на общее теплофизическое состояние организма, но на эффективность принятия оператором решений, что потребует более тщательных психофизиологических исследований в производственных условиях.

В дальнейшем эта же группа добровольцев - курсантов, средним возрастом 22 года, была подвергнута программируемому низкочастотному воздействию с помощью прибора электромагнитной терапии «DETA – RITM» изготовленного НПП «Эллис» (Россия) [7].

Таблица 1. Характеристики КДМ помещения судового оператора
при $\phi_b \in [50, 60\%]$; $V_b \leq 0,15$ м/с; $q_b = 0$ Вт/м²

Температура акклиматизации, °С	Температурный градиент, °С	Теплоощущения	
		Самочувствие	Баллы
32,0±0,2	-2,0±0,2	комфорт	0
	-4,0±0,2	комфорт	0
	-6,0±0,2	комфорт	0
	-8,0±0,2	прохладно	-1
	-10,0±0,2	прохладно	-1
	-12,0±0,2	холодно	-2
	-14,0±0,2	холодно	-2
30,0±0,2	-2,0±0,2	комфорт	0
	-4,0±0,2	комфорт	0
	-6,0±0,2	комфорт	0
	-8,0±0,2	прохладно	-1
	-10,0±0,2	прохладно	-1
	-12,0±0,2	холодно	-2
28,0±0,2	-2,0±0,2	комфорт	0
	-4,0±0,2	комфорт	0
	-6,0±0,2	комфорт	0
	-8,0±0,2	прохладно	-1
	-10,0±0,2	прохладно	-1
26,0±0,2	-2,0±0,2	комфорт	0
	-4,0±0,2	комфорт	0
	-6,0±0,2	комфорт	0
	-8,0±0,2	прохладно	-1
	-10,0±0,2	прохладно	-1
24,0±0,2	-2,0±0,2	комфорт	0
	-4,0±0,2	комфорт	0
	-6,0±0,2	комфорт	-1
	-8,0±0,2	прохладно	-1
22,0±0,2	-2,0±0,2	комфорт	0
	-4,0±0,2	прохладно	-1
	-6,0±0,2	холодно	-2
20,0±0,2	-2,0±0,2	прохладно	-1
	-4,0±0,2	холодно	-2

Прибор генерирует электромагнитное поле в диапазоне частотно-амплитудных (биоэффективных) окон, вызывая направленные изме-

нения в функционировании организма человека. В биологии, медицине и физике явление адаптационного или приспособительного биоэффекта относят к резонансным (табл. 2).

Таблица 2. Частоты собственных колебаний
головного мозга человека [6]

	Состояние организма		Резонансная частота, Гц
1	Сон	(Δ -ритм)	0,3 - 4,0
2	Покой	(Θ -ритм)	4,0 - 8,0
3	Умственная работа	(α -ритм)	9,0 - 13,0
4	Умеренная физическая работа	(β_1 -ритм)	13,0-25,0
5	Бодрствование	(β_2 -ритм)	25,0-35,0
6	Интенсивная физическая работа	(γ -ритм)	35,0- 100

Данный прибор предназначен для использования в электромагнитной терапии и функционирует в 10-ти программном режиме (табл. 3): «антистресс», «глубокая очистка», «активная защита», «женская мочеполовая система», «регуляция желудочно-кишечного тракта», «мужская мочеполовая система», «усталость спины», «регуляция сердца», «кровообращение», и «почки». Программы записаны по мере возрастания генерируемых частот от 1 Гц до 40 Гц. Прибор генерирует знакопеременные синусоидальные импульсы с максимальной амплитудой 1,5 В и различной длительностью (см. табл. 3).

Программы отличаются частотой, скважностью и длительностью генерируемых импульсов. Программный блок последовательно формирует ряд несущих частот распределенных по времени программы, которая колеблется от 30 до 40 минут. Из табл. 2 следует, что процессу расслабления (сна) соответствуют низкие резонансные частоты. Поэтому для этого процесса использовалась программа «активная защита» с программными частотами $1 \div 3$ Гц, а для бодрствования – программа «кровообращение» $1 \div 30$ Гц.

Программа «активная защита» реализуется в период отдыха перед сном, в то время как «кровообращение» стимулирует организм к бодрствованию и активному восприятию оператором поставленных задач.

В процессе экспериментов добровольцы находились в помещении с комфортными микроклиматическими условиями, соответствующими умственной работе (α -ритм).

Таблица 3. Характеристика программ прибора электромагнитной терапии «DETA-RITM»

	Программа, Время,	Подпрограммы					
		I	II	III	IV	V	VI
		Частота/Время, Гц/с					
1.	Антистресс (2400)	1,0/600	2,0/400	3,0/300	4,0/300	3,0/400	2,0/400
2.	Активная защита (2100)	1,0/300	2,0/300	3,0/400	4,0/300	3,0/300	2,0/500
3.	Женская МПС (2400)	1,0/600	2,0/600	3,0/600	2,0/600	-/-	-/-
4.	Глубокая очистка (2400)	1,0/600	2,0/600	3,0/400	2,0/800	-/-	-/-
5.	Регуляция ЖКТ (2100)	1,0/400	2,0/200	3,0/400	4,0/200	3,0/400	2,0/500
6.	Мужская МПС (2400)	1,0/400	3,0/400	6,0/400	10,0/400	6,0/400	3,0/400
7.	Усталость спины (2400)	1,0/200	3,0/400	5,0/300	10,0/200	5,0/300	3,0/400
8.	Регуляция сердца (1800)	1,0/400	3,0/200	5,0/600	15,0/400	5,0/300	3,0/500
9.	Кровообращение (1800)	1,0/300	10,0/300	20,0/300	30,0/200	20,0/300	10,0/400
10.	Почки (2100)	10,0/300	20,0/600	30,0/150	40,0/350	30,0/400	20,0/300

В течение программы «активная защита» (переход к Δ -ритму) частота пульса у добровольцев составляла 58 ± 2 удара в минуту, а систолическое и диастолическое давления крови снизились к 10-й минуте на $6,0 \pm 1$ % и оставались пониженным и до конца программы. При реализации программы «кровообращение» при частоте сердечных сокращений 59 ± 2 удара в минуту, систолическое давление крови в течение 15 минут снизилось на 18 ± 2 % с незначительным повышением до 14 ± 1 % в конце программы. Самочувствие испытуемых в начале сеансов оставалось комфортным. После сеансов, в первом случае, через 30 ± 10 минут испытуемые почувствовали сонливость, в то время как во втором случае, в течение более 2-х часов испытуемые бодрствовали.

Выводы:

Выполненные предварительные исследования по влиянию внешней воздушной среды на психоэмоциональное состояние судового

оператора, находящегося в состоянии оперативного покоя, следует отметить, что как динамическое охлаждающее воздействие воздуха помещений с градиентом $-8 \div -4^{\circ}\text{C}$ так и электромагнитное воздействие в инфразвуковой зоне ($1 \div 30$ Гц) вызывают однозначный бодрствующий эффект.

Факт бодрствования оператора может служить и характерным признаком адаптации организма к внешней среде, а синусоидальный характер внешнего воздействия не допускает вхождение в негативное психоэмоциональное состояние. Используемые методы КДМ и ЭМТ с применяемыми законами и алгоритмами изменения состояния внешней воздушной среды позволяют более широко использовать ССМ, расширяя спектр их режимов работы.

Дальнейшие исследования психологической адаптации судовых операторов планируется продолжить в производственных условиях для создания средств управления ССМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голиков В.А. Теоретические основы кондиционирования микроклимата на судах / В.А. Голиков. – Одесса: ОГМА, 1999. – 325 с.
2. Голиков В.В. Системный подход к проблеме безопасного управления судном / Судостроение: сб. науч. тр. / ОНМА – Вып. 17 – Одесса: «ИздатИнформ» 2009. – С.51-58.
3. Птицина Н.Г. Естественные и техногенные магнитные поля как факты потенциально опасные для здоровья (обзор) // Успехи физических наук. – 1998. – Т. 168, № 7. – С. 768-791.
4. Девяков Н.Д. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности / Н.Д. Девяков, Н.Б. Голант, О.В. Бецкий. – М.: Радио и связь, 1991. – 132 с.
5. Лебедев В.В. Биоэффекты слабых комбинированных, постоянных и переменных магнитных полей // Биофизика. – 1996. – Т. 41, Вып. 1. – С. 224-232.
6. Хабарова О.В. Биоэффективные частоты и их связь с собственными частотами живых организмов // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2002. – № 5. – С. 56-66.
7. “DETA-RITM”: Паспорт. – М.: НПП “Элисс”, 2010. – 15с.

УДК 681.518.55

Сандлер А.К., Дрозд Е.В.
ОНМА

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОВЫМ КРАНОМ

Опыт эксплуатации показывает, что грузовые операции, проводимые на судах с использованием мощных грузовых устройств, представляют собой потенциально опасный технологический процесс, который может инициировать аварийную ситуацию [1].

Анализ аварий и катастроф при подъеме крупногабаритных и тяжеловесных грузов показывает, что имеет место снижение остойчивости судна или ее полная потеря. При этом, остойчивость резко уменьшается, как в момент подвешивания груза судовым краном, так и в начальный момент перемещения груза на причал (рис. 1).

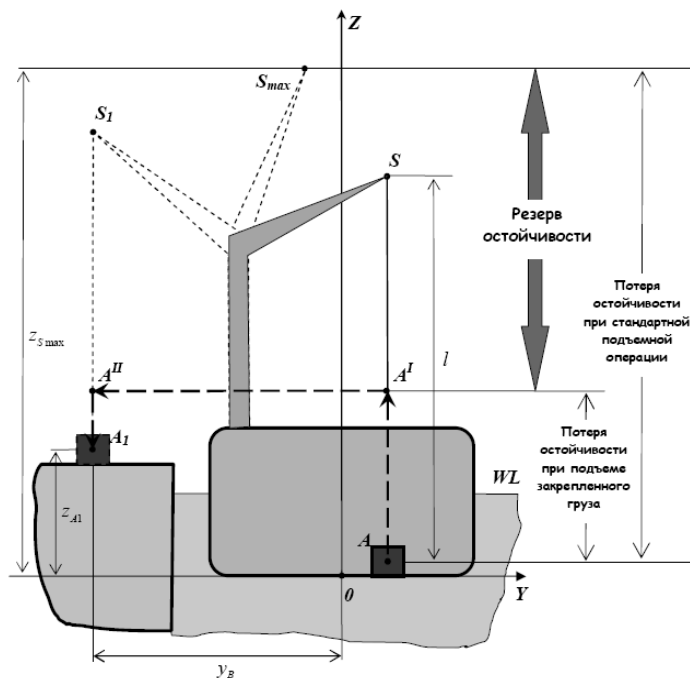


Рис. 1. Изменение остойчивости при грузовых операциях

Поэтому, перед проведением таких грузовых операций, как правило, проводятся предварительные расчеты по оценке посадки и остой-

чивости судна, в том числе оценивается потеря метацентрической высоты судна для самых неблагоприятных моментов грузовой операции. Однако расчеты не гарантируют полной безопасности проведения таких грузовых работ, потому что в них изначально может быть заложена ошибка, связанная с определением фактической величины метацентрической высоты судна к началу проведения работ.

Необходимость повышения безопасности грузовых работ вынуждает проводить работы по модернизации систем управления грузовыми средствами.

Наиболее перспективным, по мнению ведущих производителей кранового оборудования, может быть переход к дистанционному управлению кранами. Однако внедрение дистанционного управления требует серьезной доработки информационно-измерительной системы (ИИС) всех грузовых средств судна. Это обусловлено необходимостью предотвращения столкновений кранов между собой, а также кранов с неподвижными объектами. Кроме того, при одновременной работе всех кранов система управления должна поддерживать систему стабилизации крена судна.

Для эффективного решения указанных задач в состав ИИС должны быть имплементированы устройства для автоматического определения фактической позиции, скорости и ускорения вращения, предельного момента нагрузки каждого крана, а также регулирования высоты подъема груза [2].

Расширение функций ИИС в условиях комплексного влияния дестабилизирующих факторов (ДФ) напрямую связано с проблемой сохранения уровня достоверности информации как в первичных преобразователях, так и в коммуникативных линиях. Процессы старения в датчиках и линиях связи непрерывно происходят как во время работы, так и во время хранения и транспортировки изделий. Действие ДФ приводит к существенному изменению номинальных исходных характеристик преобразователей и к возникновению погрешностей измерений.

Преодолеть проблему достоверности информации, на наш взгляд, возможно путем широкого внедрения волоконно-оптических устройств. Устройства этого класса по целому ряду параметров превосходят свои электронные аналоги и становятся незаменимыми в промышленности и инженерии. Сегодня волоконно-оптические изделия эволюционируют по двум направлениям, – как структурные элементы систем связи и сенсорных комплексов.

Анализ применения волоконно-оптических измерительных устройств в системах точного позиционирования технологических объектов показал следующее. Среди всего многообразия существующих волоконных измерительных устройств в наибольшей степени задачам управления грузовыми устройствами отвечают волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) [3 – 5].

Был исследован вопрос интеграции ВОГ в существующие системы управления грузовыми кранами. В результате исследования установлено, что:

- для оптимизации скоростного режима поворота крана, необходимо использовать информацию не менее, чем с трех ВОГ (рис. 2). Датчик, расположенный на позиции 1, наиболее рационально монтировать на торце оси блока шкивов. Изменение геометрии оси

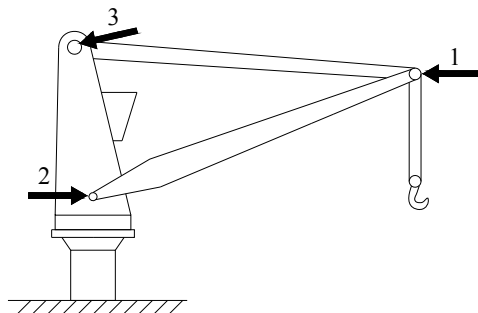


Рис. 2. Позиции установки ВОГ ИИС крана: 1 – датчик контроля груза на гаке; 2 – датчик вылета стрелы; 3 – датчик угловой скорости.

- при подъеме груза будет фиксироваться по отклонению торцевой поверхности оси от вертикальной плоскости. В позиции 2 монтировать датчик в центре крышки подшипника грузовой стрелы. В позиции 3 установить датчик внутри башни крана на вертикальной оси башни.
- трансформацию управляющего сигнала, вырабатываемого блоком обработки информации от ВОГ, в механическое воздействие наиболее целесообразно осуществлять с помощью пьезопривода. Один пьезопривод должен непосредственно быть связан с дроссельным клапаном, управляющим гидромотором поворота крана, а другой — с механизмом ограничения ходом рычага ручного управления.
- для использования в системе управления краном достаточным является применение ВОГ одноосной схемы (рис. 3) [5].

Комплексное применение датчиков контроля в работе судового крана при осуществлении поворота, изменения вылета стрелы и перемещения груза позволит контролировать угловые скорости пово-

рота грузовых кранов в большом динамическом диапазоне. При этом диапазон изменения от 1 °/с до 300 °/с можно контролировать одним прибором с достаточно высокой точностью.

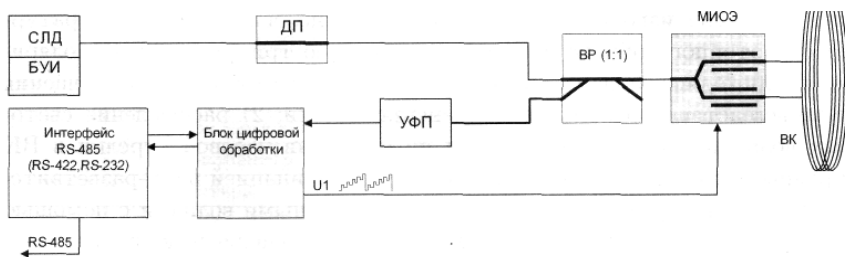


Рис. 3. Структурная схема одноосного ВОГ: СЛД — суперлюминесцентный диод; БУИ — блок управления излучателем; ВР — волоконный разветвитель; ВК — волоконный контур; МИОЭ — многофункциональный интегральный оптический элемент; УФП — устройство фотоприемное; ДП — деполяризатор; RS-485 — последовательный интерфейс

Внедрение в практику управления судовым краном вышеперечисленных подходов позволяет создать условия для перехода к оптимальному контролю и управлению грузовыми операциями и повышению их безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитин, Е.В. Обеспечение остойчивости и безопасности судна при проведении подъемных работ судовыми кранами. // Судовождение. – 2009. – Вып. 16. – С. 119-126.
2. Мельникова Л.В. Реализация оптимального управления механизмом передвижения с использованием системы ТПН-АД / Л.В. Мельникова, А.Г. Тепляков. // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2000. – Вып. 54. – С. 21-25.
3. Коркишко Ю.Н. Высокоточный волоконно-оптический гироскоп с линейным цифровым выходом / Ю.Н. Коркишко, В.А. Федоров, В.Е. Прилуцкий, В.Г. Пономарев и др. // Гироскопия и навигация. – 2004. – №1. – С. 62-72.
4. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. / Э. Удд. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
5. Коркишко Ю.Н. Волоконно-оптический гироскоп навигационного класса точности / Ю.Н. Коркишко, В.А. Федоров, В.Е. Прилуцкий, В.Г. Пономарев и др. // Гироскопия и навигация. – 2008. – №1. – С. 71-81.

УДК 621.431.74.72

Ханмамедов С.А., Бурлаченко О.В.
ОНМА

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Дисперсный твердый углерод, в виде отложений образующийся в проточной части дизелей является продуктом неполного сгорания углеводородного топлива.

Процесс образования отложений происходит при термическом разложении углеводородного топлива при температурах 1500° С с последующим быстрым охлаждением продуктов разложения.

Материал отложений состоит из отдельных замкнутых частиц, где первичными являются шаровые глобулы диаметром в десятки и сотни А°, которые способны химически связываться друг с другом и образовывать вторичную структуру, объединяясь в агрегаты типа линейных ветвящихся цепочек, спиралей, гроздей ит. д.

Фуллерены необходимо рассматривать в качестве одной из разновидностей углеродных частиц [2]. Как результат спонтанной конденсации производных термического разложения углеводородов, фуллерены присутствуют в любом пламени при сгорании.

Знание механизмов образования углеродных отложений и их структуры имеет большое значение для организации эксплуатации СДВС на протяжении всего его жизненного цикла. Природа образования отложений остается предметом интенсивных исследований в рамках физики и химии явлений, имеющих место в конденсированных средах с различным масштабом структурного упорядочения.

Несмотря на имеющийся к настоящему времени ряд гипотез и предположений, общепринятой концепции образования отложений и структуры углеродных отложений в проточной части дизелей пока не существует.

Цель настоящей работы — построение модели процессов зарождения отложений и роста углеродных доменов в проточной части дизелей.

1. Анализ существующих моделей строения углеродных отложений. Углеродные отложения, которые образуются в проточной части двигателя внутреннего сгорания, дают при их изучении в рентгеновском излучении типичное для аморфных и поликристаллических веществ непрерывное по углу рассеяние рентгеновских

лучей с немногочисленными диффузными максимумами, соответствующими положению дифракционных линий решетки графита, причем рефлексы типа (hkl) отсутствуют [2].

Углеродные отложения, как считается, состоят из графитоподобных микрокристаллитов с характерными размерами по толщине $L_c = 12-17 \text{ \AA}$ и протяженности $L_a = 15-30 \text{ \AA}$ [4]. Микрокристаллиты как области когерентного рассеяния рентгеновских лучей представляют собой домены параллельно уложенных гексагональных сеток, произвольно ориентированных относительно общей нормали. Межплоскостные расстояния ($3.4 \text{ \AA}$) соответствуют d_{002} решетки графита, т. е. микрокристаллиты образованы 3–5 параллельно ориентированными слоями. Углеродные отложения в проточной части дизелей не являются членом графитового ряда, т.е. не описывается турбостратной моделью, и его нельзя представить в качестве плохо закристаллизованного или ультрадисперсного графита.

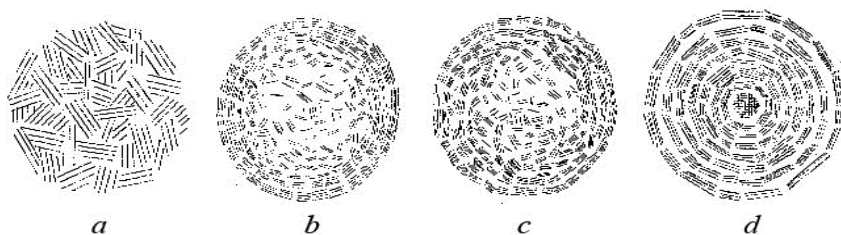


Рис. 1. Некоторые модели строения углеродных отложений [5]: *a* — отложение как набор хаотически расположенных микрокристаллитов; *b* — отложение с уплотненной оболочкой, состоящей из ориентированных по поверхности микрокристаллитов и менее плотной сердцевины; *c* — оболочечные микрокристаллиты закручены в спираль; *d* — микрокристаллиты образуют сферические слои, расположенные концентрически вокруг центрального ядра, зародыша

Различные модели строения углеродных отложений представлены на рис. 1 [5]. Одна из наиболее ранних моделей, рис. 1, *a*, представляет фрагмент отложения как набор микрокристаллитов, лишенный какого-либо упорядочения. Модель, соответствующая рис. 1, *b*, предполагает наличие у отложения углерода оболочки, более организованной, чем внутренние области. Отличие структуры, изображенной на рис. 1, *c*, от предыдущей состоит в том, что оболочечные микрокристаллиты закручены в спираль. Перечисленные модели не в состоянии объяснить, что заставляет отложения принимать сферическую форму в отличие от модели, представленной на рис. 1, *d*. Здесь микрокри-

сталлиты располагаются вокруг центрального сферического ядра, строение которого и механизм образования остается неясным.

В одной из последних моделей, предложенной в [6], предполагается, что частицы состоят из икосаэдрических слоев углерода, свернутых в спиралевидную фуллереновую оболочку. Некоторые исследователи поддержали такую точку зрения, считая, что образование фуллеренов и рост углеродных отложений находятся в прямой взаимосвязи [7]. Однако некоторые специалисты, занимающиеся этой проблемой, полагают, что эти процессы совершенно независимы друг от друга [8]. В частности, в [9] утверждается, что нет необходимости привлечения пятичленных колец углерода C_5 , ответственных за формирование квазисферических поверхностей, для описания рентгеновских дифракционных картин отложений углерода, и простая традиционная двумерная модель микрокристаллитов частиц в виде больших полиароматических молекул, уложенных в пачки, может объяснить структуру и химические свойства углеродных отложений [10]. Кроме того отметим, что весомым аргументом против любой спиральной структуры углеродных частиц служат экспериментальные факты невозможности интеркалирования последних [10] и их газонепроницаемость [11].

2. Механизм формирования углеродных отложений проточной части дизелей. Считается, что формирование углеродных отложений происходит в несколько этапов. Химические процессы превращения углеродных веществ в твердый углерод сопровождаются физическими процессами возникновения новой дисперсной фазы. Если иметь в виду углеводороды топлив, то на первом этапе происходит их термическое разложение в результате крекинга и дегидрогенизации. Для ароматических углеводородов продуктами разложения являются скелеты ароматики, потерявшие стабильность при отрыве водородных и других атомов. Эти радикалы трансформируются затем в полиядерные ароматические макромолекулы. При разложении более простых веществ (например, метана, графита) суммарная кинетика процесса лимитируется скоростью образования первого ароматического кольца [12] через циклизацию линейных цепочек атомов углерода [4].

На втором этапе происходит коалесценция полиароматических макромолекул в углеродные кластеры, которые являются зародышами (ядрами) отложений. Считается, что на этом этапе образуется не более 10% общей массы отложений [12].

Третий этап характеризуется ростом отложений при их столкновениях с реакционноспособными промежуточными продуктами разложения углеродных веществ. Если произошло объединение зародышей, то последующее нарастание углеродных слоев на поверхность образовавшихся агрегатов происходит как на единое целое, т.е. углеродные отложения и их агрегаты растут одновременно, что подтверждается фактом одинаковости времени формирования (порядка нескольких мс) тех и других [12]. Поскольку возникновение ядра является ключевым моментом, в целом процесс формирования углеродных отложений и их структура остаются неясными главным образом из-за отсутствия понимания того, что представляет собой углеродный зародыш и что заставляет отдельную частицу принимать сферическую форму.

Одной из наиболее распространенных точек зрения является предположение о том, что зародышами являются жидкие домены ароматических углеводородов, возникающие и растущие в результате процессов конденсации. Домены преобразуются в твердые частицы в результате дегидрогенизации [13]. Этим объясняется сферическая форма отложений углерода, а также образование агрегатов путем адгезионного взаимодействия доменов в моменты их затвердевания. Иными словами, формирование углеродных отложений происходит в результате фазовых переходов газ – жидкость – твердое тело.

Такая точка зрения, по нашему мнению, требует уточнения вследствие такого известного факта. Углеродистые отложения, получаемые в результате испарения при 2500°C спектрально чистого графита в условиях высокого вакуума или атмосферы инертного газа высокой чистоты (т. е. при практически полном отсутствии водорода), по своей структуре не отличается от отложений, получаемых из углеводородов [11]. Кроме того, жидкокапельная модель несовместима с газонепроницаемостью углеродных отложений. В противном случае обратной гидрогенизацией можно было бы превращать этот материал в ароматические углеводороды. Подобные превращения пока не наблюдались, а углеродные домены сохраняют свою морфологию вплоть до температур сублимации углерода [14].

3. Физическая модель процесса образования углеродных отложений. Теория процесса обычно сводится к описанию качественных кинетических моделей, ограниченных возможными взаимодействиями промежуточных продуктов и углерода [13]. Поскольку необходимость этапа зародышеобразования для перехода из газовой

фазы в твердую очевидна, нередко используют классическую теорию зародышеобразования, т. е. возникновения центров кристаллизации или конденсации. Если используется модель жидкого ядра, то используют механизм образования частиц аэрозоля при конденсации пересыщенного пара. Общей чертой существующих методов аналитического описания процесса образования углеродных отложений является их абстрактный характер, так как нет привязки к конкретной структуре зародыша и самой частицы.

Выберем в качестве примера один из таких методов. Процесс образования отложений может быть описан с привлечением концепции разветвленного цепного взрыва с квадратичными обрывами цепей, приводящими к быстрому его затуханию. Такому процессу отвечает известное уравнение Семенова Н.Н. [15]

$$\frac{dn}{dt} = n_0 + (f - g)n - g_0 n^2, \quad (1)$$

где n — концентрация макромолекул-радикалов, n_0 — скорость их самопроизвольного зарождения, f и g — коэффициенты линейного разветвления и обрыва цепей, g_0 — коэффициент квадратичного обрыва цепей.

Цепная природа процесса экспериментально подтверждается существованием периода индукции (1-2 мс от начала процесса, когда углеродных частиц еще нет) и концентрационных порогов [16]. Уравнение (1) применимо лишь формально, так как оно относится к активным частицам, т. е. к радикалам, а не к углеродным частицам как конечному продукту процесса. Поэтому в [16] уравнение Семёнова может быть скорректировано

$$\frac{dn}{dt} = n_0 + (f - g)n - g_0 nN \quad (2)$$

и дополнено аналогичным уравнением для скорости образования углеродных частиц

$$\frac{dN}{dt} = (a - bN)n. \quad (3)$$

Здесь g_0 является коэффициентом захвата радикалов углеродными частицами, имеющими концентрацию N , a и b — коэффициенты, причем $1/a$ имеет смысл периода индукции.

Зависимость $N = N(t)$ можно получить, решая совместно уравнения (2) и (3). Поскольку неизвестных коэффициентов слишком мно-

го, использовались фактические данные [37]. Кроме того, было принято, что минимальная углеродная частица, т. е. зародыш, имеет размеры ~ 10 А и содержит ~ 50 атомов углерода.

Экспериментальные исследования величины углеродных отложений во времени в проточной части двигателя хорошо описываются предложенными уравнениями.

О возможной конфигурации такой частицы предположения высказывались [16]. В результате были получены значения соответствующих коэффициентов, а экспериментальные точки удовлетворительно легли на рассчитанные кинетические кривые. Отметим, что автор [16] наблюдал окрашивание бензольных углеродных суспензий в красный цвет, так что он, вероятно, одним из первых располагал растворами фуллеренов C_{60} .

4. Формирование углеродных частиц из фуллереновых кластеров в проточной части двигателей. Если рассмотреть три этапа формирования углеродных частиц, то, по нашему мнению, на первом из продуктов разложения углеродных веществ образуются кластеры в виде радикальных сеток с оборванными связями, т. е. в конфигурации химически нестабильных изогнутых поверхностей, замыкание которых на втором этапе приводит к возникновению кластеров фуллеренов. Однослойные фуллерены являются минимально возможными углеродными частицами и одновременно зародышами более крупных доменных частиц. Сформировавшись, они приобретают свойства физической поверхности, на которую на третьем этапе идет наращивание слоев углерода. Рост частиц, объединение их в домены прекращается после охлаждения, как самих частиц, так и промежуточных продуктов.

Фуллерены с регулярной укладкой углеродных пентагонов C_5 и гексагонов C_6 в образовании отложений не участвуют, так как такие кластеры характеризуются повышенной термодинамической стабильностью, что позволяет получать их в макроколичествах. Наиболее стабильным, как известно [17], является C_{60} . Если в фуллереновых кластерах имеются дефекты, то они выступают в качестве затравок для образования фронта роста углеродных слоев. При этом, как показано в [18], рост последующего слоя происходит не обязательно после завершения предыдущего. Связь между первыми двумя слоями осуществляется, вероятно, за счет частичной реализации двойных $C=C$ связей фуллерена-зародыша. В качестве дефектов могут выступать незавершенность оболочек, примыкающие друг к дру-

гу пентагоны C_5 , семичленные кольца C_7 , гетероатомы (обычно Н, О, N, S и др.), а также дефекты, характерные для графитов: поворот участков слоев вокруг нормали, дефекты упаковки типа вакансий и т. д. Дефектными фуллеренами в силу их нестабильности можно считать кластеры с нечетным количеством атомов углерода.

На рис. 2 представлен фрагмент углеродного отложения в проточной части двигателя МС. Углеродные домены имеют центральную полость, размер и конфигурация которой соответствует размеру и конфигурации ядра, т. е. фуллерена-зародыша. Ядро окружено слоями сферических углеродных сеток. Области когерентного рассеяния рентгеновских лучей, с которыми обычно связывают углеродные микрокристаллиты, представляют собой наиболее плоские участки нескольких внешних слоев. Эти области тем меньше, чем меньше углеродные частицы, т.е. чем больше кривизна углеродных слоев.

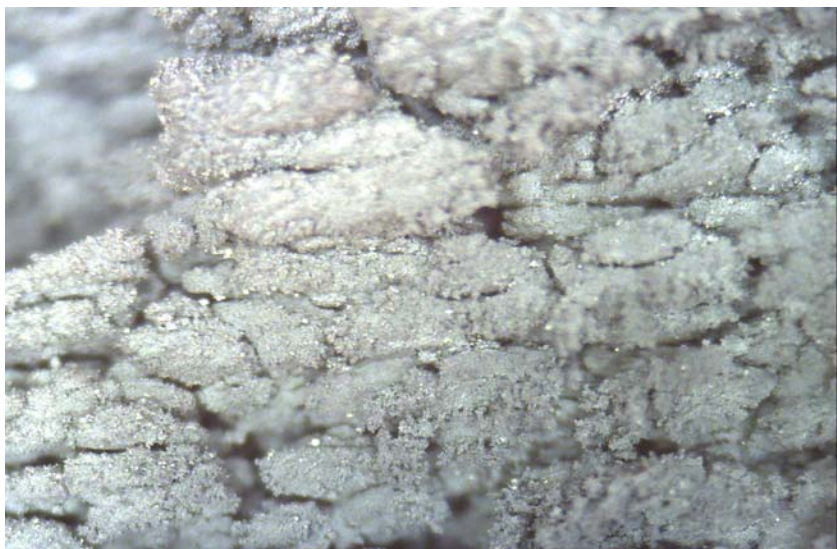


Рис. 2. Фрагмент отложений углерода проточной части дизеля МС

Электронно-микроскопические изображения, позволившие напрямую выявить структуру таких объектов, впервые получены в [20]. В частности, многослойные частицы диаметром $30\text{--}70\text{ \AA}$ имели центральные дефектные (незавершенные) сфероиды диаметром $8\text{--}10\text{ \AA}$, окруженные дефектными концентрическими оболочками [21].

Если фуллерен рассматривать как трехмерный аналог двумерных полиядерных ароматических соединений, то домен отложения можно представить как аналог кристаллического графита, слои которого замкнуты во вложенные друг в друга сфероиды с повышенной дефектностью. Последняя подтверждается высокой концентрацией ($4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [10]) некомпенсированных спинов в углеродном материале. Дефектность косвенно подтверждается также и тем фактом, что удельный вес отложений углерода $\rho = 1.8\text{—}2.0 \text{ г/см}^3$ [22], не достигая $\rho = 2,265 \text{ г/см}^3$ монокристалла графита [23], находится на уровне удельного веса промышленных кристаллических графитов, имеющих сопоставимые концентрации парамагнитных центров [24].

Замкнутые отложения углерода со структурой, как показано на рис 2, образуются также и при термообработке в бескислородной среде полностью аморфизованного дисперсного твердого углерода, состоящего из отдельных хаотически ориентированных микрокристаллитов в виде чешуек хлопьев) размером $10 \text{ \AA}^\circ$.

При общем нагреве образца [25] глобулы возникают во всем его объеме, причем, чем выше температура и время отжига, тем больше образуется глобулярных слоев и тем ближе форма частиц к шаровой. По мере углубления отжига наблюдается разрушение возникающих нанотрубок и трансформация их в сферические частицы. Если отжиг локален, то домены образуются только в областях нагрева, как наблюдалось в [26] при воздействии на образец интенсивным электронным пучком микроскопа высокого разрешения. В частности, частицы диаметром $470 \text{ \AA}^\circ$ имели 70 сферических слоев, расстояние между которыми соответствовало d_{002} планарного графита. Диаметры первой сферы частиц такого "сферического графита" находились в пределах $6\text{--}10 \text{ \AA}^\circ$.

Существование фуллереноподобных кластеров в виде замкнутых сфероидов, составленных из пяти- и шестичленных колец атомов или молекул, не является исключительной особенностью углерода. В [27,28] приведен материал (в общей сложности 2370 ссылок) о наиболее важных полученных до 1983 года результатах по изучению кластеров и малых частиц металлов, их окислов и сплавов, газов (при низких температурах), полупроводниковых элементов, химических соединений.

Наиболее интересные данные, на наш взгляд, получены начиная с 60-х годов, когда стал применяться аэрозольный способ быстрого охлаждения расширяющихся сверхзвуковых потоков вещества (от-

качка высокопроизводительным вакуумным насосом), смешанных с инертными газами (He, Ar, CO₂ и др.) и анализируемых по массе времяпролетной методикой. В упомянутых источниках, понятно, нет данных по углеродным кластерам, однако с открытием фуллеренов в середине 80-х годов этот пробел был восполнен, и с библиографией по углероду можно ознакомиться, например, в [29–32] и многих других обзорных работах.

Что касается неуглеродных веществ, то их масс-спектры выглядят аналогично спектрам углерода, т. е. имеет место картина резких пиков, соответствующих кластерам с количеством атомов (молекул) от нескольких единиц до многих сотен. Например, обычное испарение Pb демонстрируют только димеры Pb₂, но в потоке с He регистрируются кластеры до Pb₄₀₀. Собственный пар In — мономер, но в свободно расширяющейся струе с инертным газом-носителем наблюдаются In_{*n*} с *n* от 2 до 500 и т. д.

Существование стабильных замкнутых полиэдрических частиц, в том числе многослойных, подтверждено множеством экспериментов. Многослойные частицы размером до 500 Å имеют сферическую форму и характеризуются расстоянием между слоями полиэдрических сфероидов $d \approx 3.4 \text{ Å}$, как и в углеродных отложениях. Наблюдаются агрегаты в виде цепочек сферических частиц. Многослойные домены, которые представляют собой плотную упаковку вложенных друг в друга сфер на основе икосаэдров, характерны, в частности, для кластеров Ag и Xe.

В качестве примера химического соединения можно привести кластеры молекул воды. Наиболее интенсивные пики в ее масс-спектрах отвечают кластерам с $n = 21, 26, 28, 30$ с клатратной структурой (которой соответствуют эндоэдрические комплексы фуллеренов). Иными словами, замкнутому кластеру с $n = 21$ отвечает пентагональный додекаэдр, который составлен 20 молекулами воды с атомами кислорода в вершинах, водородные связи которых направлены вдоль ребер многогранника, и одной молекулой, захваченной в центр; $n = 28$ соответствует 26 молекулам на поверхности сфероида и двум молекулам внутри него и т. д. Все кластеры с $n = 21-30$ составлены одинаковым количеством пентагонов, равным 12, и различным числом гексагонов. Например, кластер с $n = 28$ имеет три кольца (H₂O)₆. Теоретическое рассмотрение предсказывает, что идеально упорядоченные структуры кластеров воды не могут беспредельно увеличивать свои размеры. Уже при $N > 80$ построить замкнутые сфероиды без большого нару-

шения углов и длин связей не удастся. Отметим, что данное обстоятельство соответствует ситуации и с углеродными кластерами: количество образующихся стабильных высших фуллеренов ($n > 70$) много меньше количества C_{60} и даже C_{70} . Синтез гигантских однослойных фуллеренов с $n > 100$, вероятно, энергетически не выгоден. Однако такие кластеры с дефектами структуры вполне могут играть роль зародышей углеродных отложений. Данное предположение подтверждается, в частности, относительно большими размерами ($30 \text{ \AA}$) центральных сфероидов, наблюдавшихся на доменах диаметром $200 \text{ \AA}$ в [33]. В связи с этим домены агрегата на рис. 1*b* изображены с ядрами различных размеров.

ВЫВОДЫ

Все многообразие дисперсного твердого углерода, наблюдаемого в отложениях дизелей, условно можно свести, на наш взгляд, к узкому кругу форм, включающему углеродные частицы в виде фуллеренов и фуллереноподобных наночастиц, многослойные домены и агрегаты, а также рыхлый аморфный углерод. Последний является термодинамически нестабильной системой, которая при отжигах преобразуется в замкнутые углеродные частицы.

Спонтанное образование замкнутых углеродных частиц из газовой фазы является результатом быстрого охлаждения углеродных кластеров. При таких условиях образования твердого углерода, а также при реализации условий образования отложений из твердой фазы, эти отложения являются наиболее стабильными, образуя его аллотропную форму. Существование кластеров и таких частиц, является общим фундаментальным свойством множества веществ, как элементарных, так и в виде соединений.

Принципиальной разницы между получением фуллеренов и более крупных частиц в виде доменов не существует. Как те, так и другие образуются в результате одного и того же процесса разложения веществ на основе углерода — тяжелых и легких углеводородов, графита, полимеров [34], высших оксидов углерода [35].

Нет сомнений, что такие же частицы можно получить и при распылении алмаза. Вопрос состоит лишь в том, насколько эффективен тот или иной метод для получения конкретных структур. При этом отчетливо прослеживается такая тенденция: чем меньше фрагменты разложения и чем быстрее и глубже они охлаждаются, тем меньше в среднем размеры углеродных частиц.

С другой стороны, в процессах неполного догорания на линии расширения углеводородных топлив в рабочих цилиндрах двигателей, для которых характерны относительно невысокие температуры и низкие скорости охлаждения продуктов термического разложения, вырастают в основном более крупные углеводородные отложения. Это подтверждается измерением размера частиц по ходу их в проточной части двигателя (от выходного клапана до концевых поверхностей утилизационного котла).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев В.П., Михайлов В.В. Производство сажи. – М.: Химия, 1970. – 318 с.
2. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. // УФН. – 1991. – 161, 7. – С. 173.
3. Curl R.F, Smalley R.E. // Scientific American. – 1991. – 10. – P. 54.
4. Фенелонов В.Б. Пористый углерод. – Новосибирск: Изд. Ин-та катализа СО РАН, 1995. – 518 с.
5. Donnet J.B. // Carbon. – 1982. – 20, 4. – P. 267.
6. Zhang Q.L., O'Brien S.C., Heath J.R., Liu Y., Curl R.F., Kroto H.W., Smalley R.E. // J. Phys. Chem. – 1986. – 90, 4. – P. 525.
7. Gerhardt Ph., Löffler S., Homann K.H.. // Chem. Phys. Lett. – 1987. – 137, 4. – P. 306.
8. Pope C.J, Marr J.A, Howard J.B. // J. Chem. Phys. – 1993. – 97, 42. – P. 11.
9. Frenclach M., Ebert L.B. // J. Phys. Chem. – 1988. – 92, 2, P. 561.
10. Ebert L.B. // Science. – 1990. – 247. – P. 1468.
11. Kappler P., Ehrburger P., Lahaye J., Donnet J.B. // J. Appl. Phys. – 1979. – 50, 1. – P. 308.
12. Lahaye // J. Carbon. – 1992. – 30, 3. – P. 309.
13. Радченко О.П., Масленников А.А. Исследование реологии судового топлива // Судовые энергетические установки: научн.-техн. сб. - 2008. - Вып. 21. - Одесса: ОНМА. - С. 4-8.
14. Фиалков А.С.. Углеродистые материалы. - М.: Энергия, 1979. - 320 с.
15. Семенов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. – М.: Изд. АН СССР, 1958. – 686 с.
16. Теснер П.А.. Образование углерода из углеводородов газовой фазы. - М.: Химия, 1972. - 136 с.
17. Curl R.F. // Carbon. – 1992. – 30, 8. – P. 1149.

18. Kaprinarov N., Marinov M., Pchelarov G., Konstantinova M., Stefanov R. // J. Phys. Chem. – 1995. – 99, 7. – P. 2042.
19. Walker P.L. // Carbon. – 1972. – 10, 4. – P. 369.
20. Iijima S. // J. Cryst. Growth. – 1980. – 50, 3. – P. 675.
21. Iijima S. // J. Phys. Chem. – 1987. – 91, 13. – P. 3466.
22. CRC Handbook of Chemistry and Physics / Ed. by R.C. Weast, M.J. Astle. CRC, Boca Raton, FL (1980). P. B-6.
23. Краткая химическая энциклопедия, т. 5. / Под ред. И.Л. Кнунянца. – М.: Сов. энциклопедия, 1967. – 1184 с.
24. Производство и свойства углеродных саж / Под ред. В.Ф. Суровикина. – Омск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1972. – 407 с.
25. Heer W.A., Ugarte D. // Chem. Phys. Lett. – 1993. – 207, 4, 6, 7, P. 480.
26. Ugarte D. // Nature. – 1992. – 359. – P. 707.
27. Петров Ю.И. Физика малых частиц. - М.: Наука, 1982. - 359 с.
28. Петров Ю.И. Кластеры и малые частицы. - М.: Наука, 1986.- 368 с.
29. Лозовик Ю.Е., Попов А.М. // УФН.- 1997.- 167, 7, 751с.
30. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. // УФН.- 1995.- 165, 9, 977с.
31. Елецкий А.В. УФН 167, 9 945 (1997).
32. Безмельницын В.Н., Елецкий А.В., Окунь М.В. //УФН.- 1998. - 168, 11, 1195 с.
33. Dravid V.P., Lin X., Wang Y., Wang X.K., Yee A., Ketter J.B. - son, R.P.H. Chang.// Science. - 1993. - 259. – P.1601.
34. Brinkmalm G., Barofsky D., Demirev P., Fenyó D., Hakans P. - son, Johnson R.E., Reinmann C.T., Sundquist Bo U.R.// Chem Phys. Lett. - 1992. - 191, 3, 4. – P.345.
35. McElvang S.W., Ross M.M., Goroff N.S., Diederich F. // Science. – 1993. - 259. – P. 1594.
36. Chibante L.P.F., Thess A., Alford J.M., Diener M.D., Smalley R.E. //J. Phys. Chem. – 1993. - 97, 34, 8. – P. 696.
37. Камкин С.В. Эксплуатация судовых дизелей. / С.В. Камкин, И.В. Возницкий. - М.: Транспорт, 1990. – 360 с.

УДК 621.438:62-233

Кирюхин А.Л.

Академия ВМС им. П.С. Нахимова

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ВАЛОПРОВОДОВ СУДОВЫХ ТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Основными тенденциями развития судовой энергетики является повышение производительности основного энергетического оборудования при одновременном увеличении ресурса и снижении расходов на производство и эксплуатацию. Применительно к судовым турбинным установкам (СТУ) это предусматривает повышение удельных мощностей и частот вращения турбоагрегатов, сопровождающееся увеличением масс и габаритов валопроводов и, соответственно, повышением действующих в ротативных деталях сил и их моментов, развитием колебаний и ростом механических потерь при генерации, трансформации и передаче энергии в пропульсивном комплексе. Следствием становится ужесточение требований к точности удержания осей валов СТУ и стабилизации их пространственного движения.

Надежность теоретического анализа колебательного движения судовых валопроводов определяется уровнем физического соответствия математических моделей их реальным условиям функционирования в составе пропульсивного комплекса. Традиционной практикой динамического анализа устойчивости подвижного равновесия валов является моделирование на основе уравнений Лагранжа, основных теорем динамики и канонических уравнений Гамильтона [1 – 4], однако их применение в нелинейном программировании требует значительных усилий при построении моделей подвижных систем с потоками энергии различных видов. Приемлемой альтернативой, подходящей для получения уравнений движения несимметричных многоэлементных роторов, является применение методов расчёта динамических систем с сосредоточенными параметрами [3, 4] и, в частности, моделей на основе представлений о «корабельных» углах [5]. Результаты реализации такого подхода авторами работы [6] при нелинейном динамическом анализе осевых колебаний судовых валопроводов свидетельствуют о перспективности использования математических моделей несимметричных роторов с сосредоточенными параметрами для исследования поперечных колебаний валопроводов СТУ в опорах скольжения.

Целью исследования является совершенствование методов анализа динамики валопроводов судовых турбинных установок.

Основными факторами, влияющими на характер и интенсивность колебаний валопроводов пропульсивного комплекса, являются статические, динамические и циклические внешние нагрузки, потоки тепла и вещества, физико-химические процессы в подшипниках. Воздействия этих факторов вызывают рост силовых и тепловых напряжений, деформацию элементов роторной системы, структурные и фазовые превращения в смазочной жидкости подшипников и другие процессы. Поэтому исследование динамики валопроводов СТУ следует осуществлять как в механико-математическом аспекте анализа общих закономерностей подвижного равновесия роторной системы, так и в аспекте термодинамического анализа процессов энергопреобразования в опорах.

Наиболее информативным является изучение динамики роторов на основе анализа траекторий движения центров цапф, по форме и размерам которых можно судить о динамических процессах с учётом нелинейности реакций опор. На рис. 1 представлена расчётная схема для анализа динамической системы с сосредоточенными параметрами, учитывающей пространственное смещение и движение вала относительно центра подвижного равновесия.

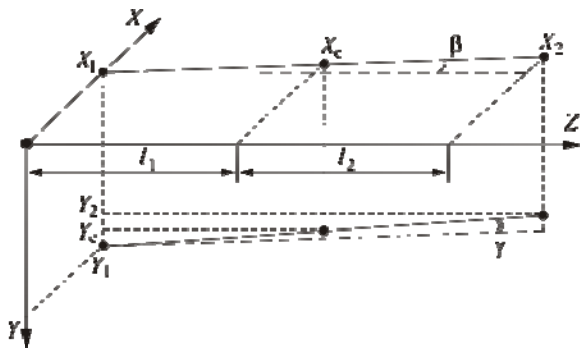


Рис. 1. Расчётная схема ротора на двух опорах

Рассмотрим малые колебания вала вокруг оси симметрии с постоянной угловой скоростью ω . Движением вала вдоль оси Z пренебрегаем.

Моменты инерции ротора относительно оси симметрии J_z и относительно оси, перпендикулярной оси вращения и проходящей через центр тяжести вала J , определяются по формулам:

$$J_z = \frac{m R^2}{2}; \quad J = \frac{m}{4} \left(R^2 + \frac{\ell^2}{3} \right),$$

где m, R — масса и радиус вала; $\ell = \ell_1 + \ell_2$ — длина вала между опорами.

Выразим координаты центра тяжести и углы между осью вала и её проекцией на плоскости XOZ и YOZ через координаты опор:

$$X_c = \frac{X_1 \ell_2 + X_2 \ell_1}{\ell}; \quad Y_c = \frac{Y_1 \ell_2 + Y_2 \ell_1}{\ell}; \quad (1)$$

$$\beta = \frac{X_2 - X_1}{\ell}; \quad \gamma = \frac{Y_2 - Y_1}{\ell}. \quad (2)$$

На основании теоремы о движении центра инерции [3] запишем дифференциальные уравнения

$$\begin{aligned} m (\ddot{X}_1 \ell_2 + \ddot{X}_2 \ell_1) &= -(W_1 - m e_p \omega^2 \cos \omega t + W_2) \ell; \\ m (\ddot{Y}_1 \ell_2 + \ddot{Y}_2 \ell_1) &= -(W_3 - m e_p \omega^2 \sin \omega t + W_4) \ell, \end{aligned} \quad (3)$$

где e_p — дисбаланс; $W_1 - W_4$ — обобщенные силы, в которые входят реакции опор, внешние силы и восстанавливающие моменты.

Составим уравнения колебаний вала вокруг осей, параллельных X и Y , проведенных через центр инерции ротора. Главные моменты количеств движения системы с точностью до малых величин первого порядка малости имеют вид [1]:

$$L_{CX} = J_z \omega \gamma + J \dot{\beta}; \quad L_{CY} = J_z \omega \beta - J \dot{\gamma}; \quad L_{CZ} = J_z \omega. \quad (4)$$

Главные моменты внешних сил относительно проведенных через центр инерции осей находим из рис. 1:

$$\sum M_{CX} = W_2 \ell_2 - W_1 \ell_1; \quad \sum M_{CY} = W_4 \ell_2 - W_3 \ell_1; \quad \sum M_{CZ} = 0. \quad (5)$$

На основании теоремы об изменении главного момента количеств движения в относительном движении по отношению к центру инерции [3], имеем:

$$\begin{aligned} J_z \omega \dot{\gamma} + J \ddot{\beta} &= W_2 \ell_2 - W_1 \ell_1; \\ J_z \omega \dot{\beta} - J \ddot{\gamma} &= W_4 \ell_2 - W_3 \ell_1. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляя в уравнения (6) значения β и γ из выражений (2), получим систему четырёх линейных однородных дифференциальных уравнений с неизвестными X_1, X_2, Y_1, Y_2 :

$$\begin{cases} m(\ddot{X}_1\ell_2 + \ddot{X}_2\ell_1) = -(W_1 - e_p\omega^2 \cos\omega t + W_2)\ell \\ m(\ddot{Y}_1\ell_2 + \ddot{Y}_2\ell_1) = -(W_3 - me_p\omega^2 \sin\omega t + W_4)\ell \\ J_z\omega(\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1) + J(\ddot{X}_2 - \ddot{X}_1) = W_2\ell\ell_2 - W_1\ell\ell_1 \\ J_z\omega(\dot{X}_2 - \dot{X}_1) - J(\ddot{Y}_2 - \ddot{Y}_1) = W_4\ell\ell_2 - W_3\ell\ell_1 \end{cases} \quad (7)$$

Приведем систему (7) к уравнениям вида

$$\begin{aligned} m\ddot{X}_1 &= m\frac{I_z}{I}\frac{\ell_1}{\ell}\omega(\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1) + me_p\omega^2 \cos\omega t + \\ &+ W_1\left(1 + m\frac{\ell_1^2}{I}\right) + W_2\left(1 - m\frac{\ell_1\ell_2}{I}\right); \\ m\ddot{X}_2 &= -m\frac{I_z}{I}\frac{\ell_2}{\ell}\omega(\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1) + me_p\omega^2 \cos\omega t + \\ &+ W_1\left(1 - m\frac{\ell_1\ell_2}{I}\right) + W_2\left(1 + m\frac{\ell_1^2}{I}\right); \\ m\ddot{Y}_1 &= m\frac{I_z}{I}\frac{\ell_1}{\ell}\omega(\dot{X}_2 - \dot{X}_1) + me_p\omega^2 \sin\omega t + \\ &+ W_3\left(1 + m\frac{\ell_1^2}{I}\right) + W_4\left(1 - m\frac{\ell_1\ell_2}{I}\right); \\ m\ddot{Y}_2 &= -m\frac{I_z}{I}\frac{\ell_2}{\ell}\omega(\dot{X}_2 - \dot{X}_1) + me_p\omega^2 \sin\omega t + \\ &+ W_3\left(1 - m\frac{\ell_1\ell_2}{I}\right) + W_4\left(1 + m\frac{\ell_1^2}{I}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

Численное интегрирование системы уравнений (8) выполняется методом Адамса-Башфорта [4], поэтому для расчёта первых трёх точек траектории движения оси вала используется метод Эйлера. Для расчёта составляющих реакций опор и восстанавливающих моментов решаются уравнения движения и теплопроводности для вала совместно с уравнениями сохранения количества движения, массы и энергии для смазочного материала подшипников по методу, изложенному в работах [7, 8].

При расчёте поперечных колебаний многопролетных судовых валопроводов используется метод матриц перехода с допущениями о

свободных колебаниях каждого участка и действии внешних сосредоточенных сил или взаимодействии между соседними пролетами только на их торцах. Граничными условиями для расчёта динамики судового валопровода являются крутящий момент на фланце отбора мощности турбоагрегата и гидродинамические силы и моменты на винте.

Реализация математических моделей в программном обеспечении многовариантных расчётов служит средством параметризации процессов удержания и стабилизации валопроводов пропульсивного комплекса. Для иллюстрации результатов расчёта на рис. 2 приведены графики зависимости эксцентриситета положения цапфы в опоре и относительных амплитуд её колебаний, приведенных к минимальной толщине смазочного слоя, и температуры смазочного материала подшипников от частоты вращения валопровода СТУ.

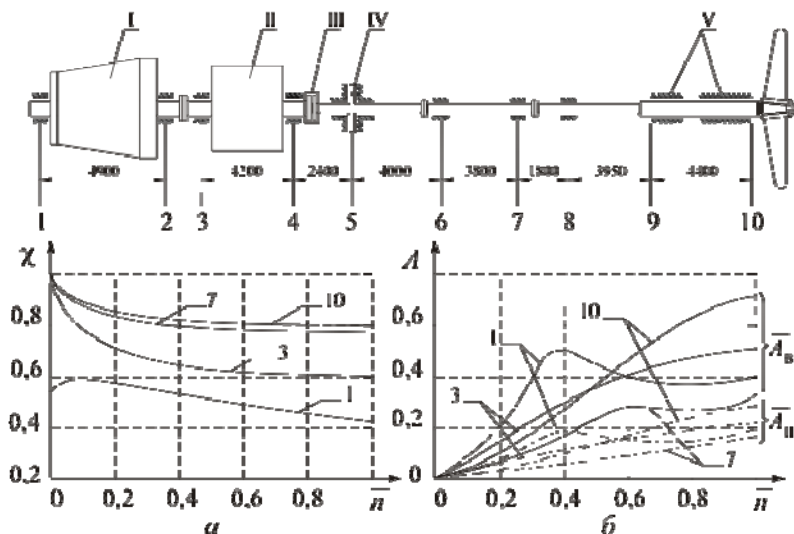


Рис. 2. Параметры процессов удержания и стабилизации валопровода СТУ ($N_e = 22300$ кВт; $n_T = 6000$ об/мин; $n_B = 290$ об/мин): относительный эксцентриситет (а) и амплитуда вертикальных и поперечных колебаний цапф валопровода в опорах (б); I — паровая турбина; II — редуктор; III — муфта; IV — главный упорный подшипник; V — дейдвудное устройство; 1 — гидростатодинамический подшипник на водяной смазке; 2 - 10 — гидродинамические подшипники на масляной смазке

Анализ соответствия результатов имитационных экспериментов заданным критериям качества достигаемых целей, произведенный с

использованием данных экспериментов на физических моделях [8, 9], показал, что суммарная погрешность от упрощений при постановке задачи, выбора исходных зависимостей и методов расчёта не превышает 6 – 9%.

Выводы. Сложность разработки достоверных методов нелинейного анализа динамики валопроводов пропульсивного комплекса, кроме стохастичности внешних факторов, определяется также и особенностями, связанными с конструктивным исполнением объекта, нагрузочно-скоростными характеристиками роторной системы и физическими свойствами смазочных материалов опор скольжения. Это затрудняет построение моделей подвижных систем с потоками энергии различных видов на основе уравнений Лагранжа и основных теорем динамики. Приемлемой альтернативой, подходящей для получения уравнений движения валопроводов СТУ, является применение методов расчёта динамических систем с сосредоточенными параметрами.

Полученная система уравнений динамики ротора, дополненная уравнениями теплопроводности для вала и законами сохранения количества движения, массы и энергии для характерных участков гидравлического тракта опор служит средством параметризации процессов удержания и стабилизации валопроводов СТУ, а результаты имитационных экспериментов на разработанной модели объекта исследования отвечают заданным критериям качества достигаемых целей.

Дальнейшее совершенствование научно-методического аппарата исследования процессов удержания и стабилизации валопроводов СТУ должно осуществляться по пути усложнения математической модели энергопреобразования и тепломассообмена в элементах роторной системы в целях максимального приближения её к реальным условиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Childs D. Turbomachinery rotordynamics: phenomena, modeling and analysis / D. Childs. – New York: Wiley-Interscience, 1993. – 496 p.
2. Гольдин А.С. Динамика роторных машин / А.С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.
3. Gasch R. Rotordynamik / R. Gasch, R. Nordmann, H. Pfutzner. – Berlin: Springer, 2005. – 699 s.

4. Савин Л.А. Моделирование роторных систем с подшипниками жидкостного трения / Л.А. Савин, О.В. Соломин. – М.: Машиностроение, 2006. – 444 с.
5. Хлопенко Н.Я. Работоспособность динамически нагруженных судовых упорных подшипников скольжения: автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук: спец. 05.08.05 „Судовые энергетические установки” / Н.Я. Хлопенко. – Николаев, 1996. – 43 с.
6. Романовский Г.Ф. Динамика упорных подшипников скольжения судовых турбомашин: [монография] / Г.Ф. Романовский, Н.Я. Хлопенко. – Николаев: Нац. ун-т кораблестроения, 2007. – 140 с.
7. Романовский Г.Ф. Расчёт динамических характеристик опорных подшипников скольжения судовых турбоагрегатов на водосодержащем смазочном материале / Г.Ф. Романовский, А.Л. Кирюхин // Сборник научных трудов СВМИ. – Севастополь: СВМИ, 2008. – Вып. 1(14). – С. 118-124.
8. Романовский Г.Ф. Термогидродинамический расчёт подшипников скольжения судовых пропульсивных комплексов в неспецификационных эксплуатационных условиях / Г.Ф. Романовский, А.Л. Кирюхин // Проблемы трибологии. – 2009. – №3 (53). – С. 62-71.
9. Кирюхин А.Л. Экспериментальный стенд для исследования устойчивости жидкостного режима трения в подшипниках / А.Л. Кирюхин, В.В. Сапига, М.В. Слободянюк // Сб. научн. тр. СВМИ. – Севастополь, 2007. – Вып. 1(11). – С. 198-204.

УДК 656.61

Дейнего Ю.Г.
Академия ВМС им. П.С. Нахимова**ОРГАНИЗАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМАНДНЫМ
СОСТАВОМ СУДНА ПОДГОТОВКИ И ПРОВЕДЕНИЯ
ИНСПЕКЦИИ СУДНА ВЛАСТЯМИ ГОСУДАРСТВА ПОРТА**

Глубокие качественные изменения в системе морского транспорта, характеризующиеся повышением интенсивности использования судов, снижением численности судовых экипажей и оптимизацией затрат на техническую эксплуатацию флота в условиях жестокой конкуренции в сфере международных морских перевозок требуют совершенствования нормативно-правовой базы обеспечения безопасности морехозяйственной деятельности, защиты морской среды и её ресурсов, охраны человеческой жизни на море. Консолидация усилий международных организаций (ИМО, МОТ) и национальных департаментов морского и речного транспорта направлена на создание гармоничной системы контроля за судами, находящимися в эксплуатации, укрепление сотрудничества между портами, государственными надзорными организациями и классификационными обществами, глобализацию их информационных систем и унификацию требований по безопасности жизнедеятельности на море.

Тенденциями современного этапа являются усиление надзора за судами со стороны государства флага и государственного портового контроля. Функции последнего регламентируются, в частности, Парижским, Токийским и Черноморским Меморандумами [1–3]. За основу руководства по деятельности Токийского и Черноморского Меморандумов о взаимопонимании взято руководство о деятельности Парижского Меморандума, старейшего из существующих. Парижский Меморандум подписан морскими властями следующих государств: Бельгия, Болгария, Канада, Хорватия, Кипр, Дания, Эстония, Финляндия, Франция, ФРГ, Греция, Исландия, Ирландия, Италия, Латвия, Литва, Мальта, Нидерланды, Норвегия, Польша, Португалия, Румыния, Российская Федерация, Словения, Испания, Швеция, Соединённое Королевство Великобритании и Северной Ирландии. Каждая из этих властей взяла на себя обязательства проводить ежегодно количество инспекций, равное 25% оценочного количества иностранных торговых судов, совершивших заходы в порты его государства в течение трёх последних календарных лет.

С 1.01.2009 г. введена схема глобального учёта судоходных компаний, с присвоением каждой уникального номера. Начался сбор информации о качестве выполнения судоходными компаниями своих обязанностей по безопасной эксплуатации судов в соответствие со следующими международными конвенциями: Международной Конвенцией о грузовой марке (МКГМ – 66) и Протоколом 1988 г. к ней; Международной Конвенцией по охране человеческой жизни на море (СОЛАС – 74), дополненной Протоколами 1978 г. и 1988 г.; Международной Конвенцией по предотвращению загрязнения с судов, изменённой Протоколами 1978 г. и 1997 г. (МАРПОЛ 73/78); Международной Конвенцией по подготовке и дипломированию моряков и несении вахты (ПДМНВ – 78); Конвенцией о Международных правилах по предотвращению столкновения судов в море (МППСС – 72); Международной Конвенцией по обмеру судов 1969 г.; Конвенцией о торговом мореплавании (Конвенция МОТ №147 1976 г.); Международной Конвенцией о гражданской ответственности за ущерб, вызванный разливом нефти.

Деятельность региональных организаций государственного портового контроля, обеспечивающих проверку судов под эгидой ИМО, постоянно расширяется и совершенствуется. Так, Парижский Меморандум анонсировал внедрение в 2011 году нового инспекционного режима, при котором 100% судов, заходящих в порты Европы, будут проверены в установленные периоды времени.

Основным аспектом надзорной деятельности государственного портового контроля является проверка соответствия судна, компетентности его экипажа и уровня подготовки командного состава требованиям Международных Конвенций и национальных нормативных актов. В частности, инспектор может проверить следующее:

- судовое расписание по тревогам (наличие и места расположения на судне, знание членами экипажа обязанностей по тревогам, записи в судовом журнале о деталях проведения аварийных учений и пр.);
- план SOPEP (наличие его на судне и обязанности членов экипажа согласно этому плану);
- проверка на мостике может включать в себя следующее: знание членами комсостава судна, ответственными за навигационную вахту, оборудования управления и навигационного оборудования, находящегося на мостике; умение переключать режимы работы рулевого управления с автоматического ре-

жима на ручной и наоборот; знание характеристик маневренности судна; знание процедур подготовки к выходу из порта и прибытию в порт, подача сигналов, связь, маневрирование, аварийные ситуации и ведение записей в судовом журнале;

- компетентность персонала, на который возложены конкретные обязанности в отношении груза и грузового оборудования: знание своих обязанностей, а также опасностей, связанных с грузом и мер, которые необходимо предпринимать в случае возникновения таких опасностей;
- знание ответственного судового персонала своих обязанностей в отношении основных и дублирующих механизмов и оборудования (аварийных и резервных источников электропитания, вспомогательного рулевого устройства, водоотливных, осушительных, пожарных насосов и другого оборудования, применяемого в аварийных ситуациях);
- навыки работы с АДГ и ВДГ, порядок действий при обесточивании судна, пуск и обслуживание двигателя спасательной шлюпки, обслуживание аккумуляторных батарей, навыки изменения режима управления и пр.;
- уровень восприятия членами экипажа требований руководств, наставлений и инструкций по обеспечению безопасности при эксплуатации судна и его оборудования;
- действия членов экипажа по техническому обслуживанию и периодическим испытаниям судовых технических средств, тренировкам и тревогам, порядок ведения судовой отчётно-учётной документации;
- наличие инструкций по борьбе с пожаром, по техническому обслуживанию спасательных средств, буклета об остойчивости судна;
- количество образовавшегося шлама, ёмкость танка для шлама и льяльных вод, производительность оборудования, фильтрующего нефтесодержащие воды, ведение журнала нефтяных операций;
- процедуры погрузки, разгрузки и очистки грузовых танков танкеров, перевозящих нефть и вредные жидкие вещества;
- выполнение требований Конвенции ПДМНВ–78 и МОТ №147.

Для оптимизации организационного обеспечения подготовки к инспектированию судна властями государства порта целесообразно основные недостатки, которые могут обусловить задержание судна,

систематизировать по группам в соответствии с требованиями Международных Конвенций и Кодексов.

I. Несоответствия требованиям СОЛАС–74:

- неспособность обеспечить надлежащую эксплуатацию механизмов, систем и устройств СЭУ;
- неспособность обеспечить надлежащую эксплуатацию АДГ, освещения, аккумуляторов, основного и вспомогательного рулевых приводов;
- отсутствие, недостаточное количество или значительный износ спасательных средств индивидуального пользования, спасательных шлюпок и плотов, средств их спуска на воду;
- отсутствие, несоответствие или значительный износ систем обнаружения пожара, пожарной сигнализации, противопожарного инвентаря, стационарных установок для борьбы с пожаром, пожарных захлопок, неспособность обеспечить нормальную работу противопожарной защиты грузовой палубы танкера, ходовых огней, сигнальных фигур или звуковых сигналов;
- отсутствие или неспособность обеспечить нормальную работу радиооборудования для подачи сигналов бедствия или поддержания связи в целях обеспечения безопасности, навигационного оборудования;
- отсутствие откорректированных навигационных карт или иных соответствующих морских публикаций, электронных карт;
- отсутствие или неисправность искробезопасной вытяжной вентиляции в грузовых насосных отделениях;
- серьёзные недостатки в области эксплуатационных требований, перечисленных в предыдущем разделе;
- несоответствие количества, состава или уровня подготовки экипажа требованиям по безопасному укомплектованию личным составом;
- невыполнение программы расширенных освидетельствований;
- отсутствие или неработоспособность САЗРИУС.

II. Несоответствия требованиям Кодекса ИВС (Международного Кодекса по конструкции и оборудованию судов, перевозящих наливом опасные жидкие грузы):

- перевозка вещества, не упомянутого в Свидетельстве о годности, или отсутствие информации о грузе;
- отсутствие или неисправность устройств безопасности по превышению давления;

- наличие потенциальных источников возгорания в опасных районах;
- превышение максимально допустимой загрузки отдельных танков;
- недостаточная тепловая защита термочувствительных продуктов.

III. Несоответствия требованиям Кодекса IGC (Международного Кодекса по конструкции и оборудованию судов, перевозящих наливом сжиженные газы):

- перевозка вещества, не упомянутого в Свидетельстве о годности, или отсутствие информации о грузе;
- перевозка веществ, которые должны быть нейтрализованы, без действительного свидетельства на нейтрализатор;
- отсутствие устройств закрытия в жилых или служебных помещениях, газопроницаемость переборок и дефекты воздушных затворов;
- отсутствие или дефекты быстрозакрывающихся клапанов или клапанов безопасности;
- неисправность вентиляторов в грузовой зоне;
- неисправность сигнализации давления в грузовых танках;
- дефекты устройств обнаружения газа.

IV. Несоответствия требованиям Конвенции о грузовой марке:

- значительные области повреждений или коррозии обшивки корпуса и набора палуб, влияющие на мореходное состояние судна;
- недостаточная остойчивость судна;
- отсутствие достаточной и надёжной информации, которая позволяет капитану организовать погрузку и балластировку судна таким образом, чтобы обеспечить запас остойчивости на всех этапах рейса;
- отсутствие, значительный износ или дефекты устройств закрытия люков и водонепроницаемых дверей;
- перегруз судна;
- отсутствие марок углубления или невозможность их считывания.

V. Несоответствия требованиям Конвенции МАРПОЛ 73/78:

- отсутствие, серьёзный износ или неисправность оборудования для фильтрации нефтесодержащих вод, системы САЗРИУС или устройства сигнализации о предельной концентрации нефти в сбросе;

- недостаточный для осуществления намеченного рейса свободный объём отстойных танков или танков для шлама;
- отсутствие журнала нефтяных операций;
- установка запрещенных обходных устройств для сброса;
- отсутствие или несоответствие требованиям Конвенции комплекта документов по освидетельствованиям.

VI. Несоответствия требованиям Приложения II к МАРПОЛ 73/78:

- отсутствие Руководства по методам и устройствам;
- грузу не присвоены категории;
- отсутствие журнала грузовых операций;
- установка запрещенных обходных устройств.

VII. Несоответствия требованиям Приложения V:

- отсутствие плана и журнала операций с мусором;
- неосведомлённость членов экипажа о требованиях плана операций по обработке и удалению мусора.

VIII. Несоответствия требованиям Конвенции ПДМНВ–78:

- отсутствие у личного состава соответствующих свидетельств;
- комплектация вахты лицами, необученными управлению оборудованием для обеспечения безопасности судоходства, поддержания радиосвязи, связанной с обеспечением безопасности, или оборудованием для предотвращения загрязнения морской среды;
- наличие у экипажа сертификатов о профессиональной пригодности к исполнению обязанностей моряков в части обеспечения безопасности судна и предотвращения загрязнения;
- комплектование сменных вахт лицами, недостаточно отдохнувшими и пригодными к выполнению своих обязанностей.

IX. Несоответствия требованиям Конвенции МОТ:

- недостаточность для перехода в следующий порт запасов продуктов питания и питьевой воды;
- исключительно антисанитарные условия на борту судна;
- отсутствие обогрева в жилых помещениях судна, работающего в зонах низких температур;
- излишняя захламленность, загромождение оборудованием или грузами проходов в жилых помещениях;
- явные признаки того, что назначенные в первую или в одну из последующих вахт персонал утомлён.

Для исключения инцидентов, влекущих за собой замечания о несоответствии, штрафные санкции и задержание судна, в период

подготовки и проведения инспекции региональными организациями государственного портового контроля на судне проверяется:

- наличие установленной нормативными актами и инструкциями судовладельца документации, правильность её заполнения;
- выполнение требований Конвенций к конструкции судна и помещениям для механизмов;
- соблюдение требований Международных Конвенций по грузовым маркам, по спасательным средствам, по пожаробезопасности, по предотвращению столкновения судов в море, по радиооборудованию и др.;
- выполнение на нефтяных танкерах требований Руководства по эксплуатации и оборудованию систем мойки сырой нефтью;
- наличие и правильность оформления расписания по тревогам, знание экипажем своих обязанностей по различным видам тревог;
- наличие и правильность оформления плана SOPEP, знание экипажем своих обязанностей по борьбе с разливом нефти;
- наличие плана борьбы с пожаром или соответствующих буклетов, знание экипажем своих обязанностей при борьбе с пожаром;
- знание лицами, привлекаемыми к несению ходовой вахты, оборудования управления и навигационного оборудования, находящегося на мостике, и умение его эксплуатировать;
- знание маневренных параметров судна и процедур, применяемых на мостике во время несения вахты;
- знание командным составом судна своих обязанностей в отношении груза и грузового оборудования;
- знание экипажем устройства, принципов функционирования, своих обязанностей при эксплуатации и техническом обслуживании основных и вспомогательных механизмов;
- знание технической информации по эксплуатации судовых технических средств и умение быстро и эффективно её использовать;
- выполнение требований по безопасному несению вахты в машинном отделении и на ходовом мостике;
- поддержание мер безопасности и чистоты во всех помещениях;
- наличие у экипажа сертификатов, дипломов в соответствии с требованиями ПДМНВ–78;

- выполнение требований Конвенции МОТ по охране труда, санитарным нормам, безопасности жизнедеятельности и т. д.

Выполнение процедур подготовки и корректное организационное обеспечение инспектирования судна со стороны командного состава и экипажа судна позволяет существенно сократить время вынужденного простоя и уменьшить издержки, связанные с устранением рекламаций региональных представительств государства порта, а также создает предпосылки к росту рейтинга судоходной компании в международных информационных системах учёта качества выполнения требований по безопасной эксплуатации судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парижский Меморандум о взаимопонимании о контроле судов государством порта. – СПб: ЦНИИМФ, 2006. – 216 с.
2. Меморандум о взаимопонимании по контролю судов государством порта в Азиатско-Тихоокеанском регионе (Токийский Меморандум). – СПб: ЦНИИМФ, 2006. – 48 с.
3. Меморандум о взаимопонимании о контроле судов государством порта в Черноморском регионе. (Текст включает 3-й комплект поправок.) – СПб: ЦНИИМФ, 2006. – 216 с.

УДК 681.7.068

Сандлер А.К.¹, Логишев И.В.¹, Сандлер А.А.²
ОНМА¹, ОНУ²

СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ИНВАРИАНТНОГО ВОЛОКОННОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Постоянно изменяющиеся в течение длительных периодов времени гидродинамические и климатические условия эксплуатации пропульсивного комплекса судна, в сочетании с влиянием агрессивной морской среды, вызывают резкое снижение ресурса смазочных материалов, используемых в газотурбинных двигателях и газотурбокомпрессорах дизелей. Нарушение режимов смазки неизбежно инициирует зарождение прогрессирующих с высокой скоростью дефектов в элементах подшипниковых узлов. Несвоевременное обнаружение деструктивных процессов в подшипниках роторов газотурбинных установках (ГТУ) приводит к аварийной ситуации, которая может негативно повлиять на безопасность мореплавания.

К сожалению, уровень достоверности долгосрочного прогноза состояния узлов роторного оборудования, обеспечиваемый стандартными системами технического диагностирования (СТД), очень мал. Для решения проблемы ведущие разработчики СТД предлагают проводить модернизацию систем в направлении расширения частотного диапазона в область высокочастотной вибрации, которая в наибольшей степени изменяет свои свойства при наличии дефектов в стадии зарождения, и увеличения числа точек контроля вибрации [1, 2, 3]. Для непосредственного измерения и передачи информации о вибрации наиболее рациональным представляется использование акселерометров и линий связи на элементной базе волоконно-оптических элементов.

Теоретические предпосылки к решению задачи создания волоконно-оптических акселерометров (ВОА) созданы трудами таких отечественных и зарубежных ученых. В работах Бусурина В.И., Бутусова М.М., Гречишникова В.М., Гуляева Ю.В., Красюка Б.А., Носова Ю.Р., Шереметьева А.Г., A.W. Snyder, T. Okosi и E. Udd неоднократно подчеркивались более высокие, по сравнению с традиционными датчиками, метрологические характеристики ВОА и высокая помехозащищенность волоконных линий передачи информации.

В то же время в научно-технической литературе недостаточно отражены особенности создания ВОА, эксплуатируемых в условиях

концентрированного воздействия дестабилизирующих факторов (ДФ), генерируемых компактно расположенным оборудованием энергетической установки. Соответственно не рассматриваются конструктивно-технологические особенности, и не дается оценка их метрологических и эксплуатационных характеристик в данных условиях. Проблема стабилизации характеристик ВОА в экстремальных условиях обусловлена отсутствием подробной информации о ДФ, которые являются случайными, проявляются нерегулярно, с трудно прогнозируемой частотой и интенсивностью [4]. Получение такой информации представляет значительные технические трудности, так требуется наличие разветвленной измерительной сети.

Таким образом, возникла необходимость проведения дополнительного исследования, цель которого повышение уровня достоверности диагностирования подшипников ГТУ в режиме непрерывного и длительного контроля путем улучшения и стабилизации метрологических характеристик ВОА.

На основании исследований возможных принципов преобразования измерительной информации в изменение параметров оптического сигнала определено следующее. Наиболее рациональной является разработка простых, надежных и универсальных с точки зрения конструктивных и схемных решений ВОА, принцип действия которых основан на амплитудной модуляции светового потока. За счет использования простых компенсационных и дифференциальных схем амплитудные волоконные датчики имеют значительные резервы повышения точности и достоверности измерений.

Для детальной оценки потенциальных возможностей использования волоконных датчиков вибрации в тяжелых условиях была исследована работа измерительной системы (рис. 1), построенной по классической схеме [5].

Реальные условия эксплуатации имитировались в термокамере лаборатории ОАО "Одесский кабельный завод" с переменной температурой, влажностью и присутствием оксиды серы и продуктов испарения минеральных горюче-смазочных материалов. После серии тестов наблюдалось ухудшение метрологических характеристик датчика.

Происходящие изменения объяснены воздействием на кварцевое стекло элементов акселерометра гидролитической, кислотной и щелочной коррозии, интенсивность которых экспоненциально увели-

чивается с температурой. В результате термофлуктуационного и гидролитического воздействия ДФ происходит:

- разрушения силоксановых мостиковых связей в поверхностном слое стекла толщиной 30 ... 120 мкм [6, 7, 8];
- нарушение геометрии расположения волноводных элементов датчика [9];
- образование "паразитного" слоя на элементах датчика [6, 7, 8].
- Кроме того, подтверждена связь размеров волоконных элементов и вероятности того, что на их поверхности или в объеме могут зарождаться опасные дефекты, резко снижающие оптические и механические свойства кварцевого стекла.

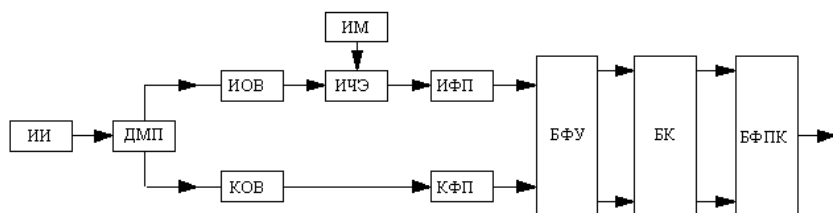


Рис. 1. Дифференциальная компенсационная схема ВОА: ИИ — источник излучения; ДМП — демультиплексор; ИОВ/КОВ — измерительное/контрольное оптическое волокно; ИЧЭ — измерительный чувствительный элемент; ИМ — инерционная масса; ИФП/КФП — измерительный/контрольный фотоприемник; БФУ — блок фотоусилителя; БФПК — блок формирования и преобразования кода.

В создавшейся ситуации представляется рациональным акцентировать внимание на компенсации деградации свойств чувствительного элемента акселерометра и прилегающих линий связи. Для этого предлагается следующая структурная модель ВОА (рис. 2).

Отличие предлагаемой модели от ее существующих аналогов заключается в наличии в составе контрольного канала элемента идентичного, за исключением инерционной массы, измерительному чувствительному элементу (ЧЭ).

Другим отличием является отказ от соединения модулирующей/отражающих деталей с опорным волокном с помощью сварки в плазме дуги высоковольтного разряда [10, 11, 12]. Как альтернатива сварке предлагается формирование необходимых элементов в виде микроструктуры на торцевой поверхности ЧЭ методом наращивания слоя сапфирового стекла. Таким образом, будет обеспечена эффек-

тивная оптическая связь между ЧЭ и световодом, а также высокая механическая прочность соединения в широком диапазоне температур.

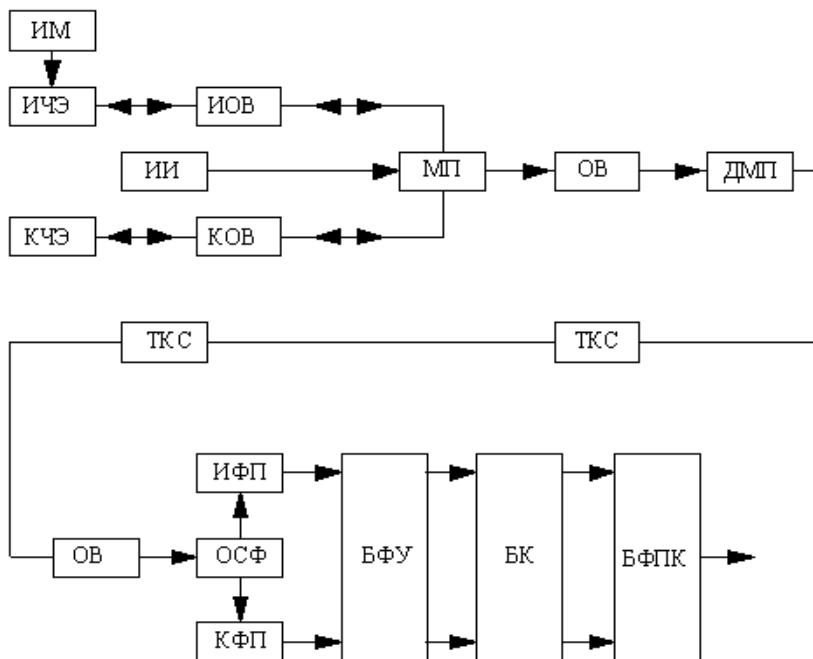


Рис. 2. Схема инвариантного ВОА: ИИ — источник излучения; МП — мультиплексор; ИОВ/КОВ — измерительное/контрольное оптическое волокно; ИЧЭ — измерительный чувствительный элемент; ИМ — инерционная масса; КЧЭ — контрольный чувствительный элемент; ДМП — демультиплексор; ТКС — термокомпенсированный соединитель; ИФП/КФП — измерительный/контрольный фотоприемник; ОСФ — оптический спектральный фильтр; БФУ — блок фотоусилителя; БФПК — блок формирования и преобразования кода.

Для снижения общей протяженности оптического тракта, эксплуатируемого в тяжелых условиях, предлагается использовать одно опорное волокно, в сочетании с мультиплексированием сигнала, для связи измерительной части и блока обработки информации.

Значительным отличием предлагаемой схемы является использование для монтажа фрагментов измерительного тракта, находящихся

в зоне высоких температур, специализированных термокомпенсированных волоконных соединителей, разработанных авторами [13].

Для проверки эффективности предлагаемых мер по стабилизации метрологических характеристик ВОА был создан и испытан на вибростенде и в термокамере макет ВОА. Результаты испытаний подтвердили целесообразность выбранного направления совершенствования волоконных датчиков для задач диагностики в экстремальных условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баркова Н.А. Оптимизация методов диагностики подшипников качения по высокочастотной вибрации. <http://www.vibrotek.com/russian/articles/opthi/index.htm>.
2. Якобсон П.П. Особенности вибрационной диагностики газотурбинных установок. <http://www.vibrotek.com/russian/articles/gtu/index.htm>.
3. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. <http://www.vibrotek.com/russian/articles/book/index.htm>.
4. Коновалов С.Ф. Теория виброустойчивости акселерометров. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
5. Бусурин, В.И., Носов, Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
6. Кумалагов И.А. Пороки, вызванные химическим взаимодействием стекла. <http://oknamodern.ru/100.php?c=29>.
7. Кай Чанг. Важность минимизации оптических потерь, вызванных водородным старением и щелочными примесями, на примере оптического волокна AllWave® с нулевым водяным пиком. www.ofsoptics.com.
8. Лунин Б.С., Торбин С.Н. Влияние напряжений в кварцевом стекле на внутреннее трение // Вестник Московского университета. Сер. 2. ХИМИЯ. – 2003. – Т. 44, № 2. – С. 108-114.
9. Лунин Б.С., Торбин С.Н. Образование дефектов поверхности кварцевого стекла при термообработке // Вестник Московского университета. Сер. 2. ХИМИЯ. – 2005. – Т. 46, № 6. – С. 378-381.
10. Лукьянов Д.А. Разработка алгоритма обработки выходного сигнала волоконно-оптического датчика (ВОД) измерений температуры // Электронный журнал Труды МГУЛ. – 2007. – Вып. 5.

11. Сандлер А.К. Волоконно-оптический віброакселерометр: Деклараційний патент України № 16068 МПК 7G01M11/00. – заявл. 20.02.2006. // Опубл. 15.07.2006, бюл. № 7.
12. Сандлер А.К. Волоконно-оптический акселерометр для контроля высокочастотной вибрации судовых газотурбинных установок // Автоматика-2008: Доповіді 15 міжнародної конференції з автоматичного управління – 23-26 вересня 2008 р. – Одеса: ОНМА. – С. 504-506.
13. Сандлер А.К., Волоконно-оптичний з'єднувач: Деклараційний патент України № 31701, МПК (2006) G02B 6/00. – заявл. 27.09.2007. // Опубл. 25.04.2008, бюл. № 8.

УДК 531.31

Артеменко О.С., Кардашев Д.Л.
ОНМА**ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ АНАЛОГІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ
З ДЕКІЛЬКОМА СТЕПЕНЯМИ ВІЛЬНОСТІ**

Подібна форма законів різних областей фізики дає змогу застосовувати загальний математичний апарат при дослідженні складних електромеханічних систем [1]. Найпростішими аналогами являються ідеалізовані коливальні системи з одним ступенем вільності: тягар підвішений на пружині та електричний контур, який складається з котушки індуктивності L , резистора r і конденсатора ємності C . Як відомо, коливальний процес під дією електрорушійної сили (ЕРС) $\varepsilon(t)$ в паралельному RCL-контурі описується диференціальним рівнянням згідно законів Кірхгофа (в послідовному RCL-контурі будемо мати інше, але за формою подібне, рівняння)

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{r}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = \varepsilon(t), \quad (1)$$

де q – заряд конденсатора.

Рівняння (1) подібне за формою з диференціальним рівнянням коливального руху тіла масою m , підвішеного на пружині жорсткістю k , з урахуванням опору середовища з коефіцієнтом β , яке знаходиться під дією вимушеної сили

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\beta}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = f(t) \quad (2)$$

Отже, кожному параметру механічної системи можна поставити у відповідність параметр електричної системи і навпаки. Таким чином, будь-який висновок, отриманий для однієї системи щодо стійкості, резонансу тощо, буде справедливим і для іншої системи-аналога.

Глибока аналогія між механічними рухами та процесами в електричних ланцюгах стала підґрунтям постулату Максвелла на якому, в свою чергу, ґрунтується загальна теорія електричних машин [2].

Розглянемо вимірювальний прилад електродинамічної системи як приклад електромеханічної системи. Даний прилад складається із двох котушок: рухомої 1 та нерухомої 2 (рис. 1). Рухома котуш-

ка знаходиться всередині нерухомої та закріплена на осі 3 разом із стрілкою приладу. Струм до рухомої котушки подається по спіральних пружинах які одночасно є пружними механічними елементами.

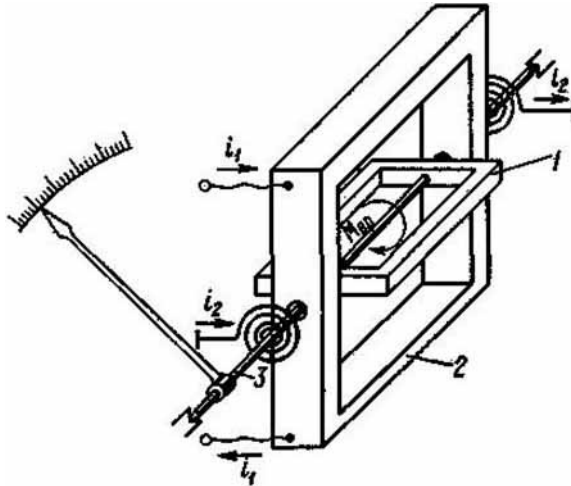


Рис. 1. Устрій приладу електродинамічної системи

Загальні рівняння Лагранжа – Максвела [2] для такої системи з урахуванням сил в'язкого тертя та омичного опору в провідниках мають вигляд

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \tilde{L}}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial \tilde{L}}{\partial q_i} = Q_i - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} \quad (i=1, \dots, n). \quad (3)$$

Тут функція Лагранжа $\tilde{L} = \tilde{L}_M + \tilde{L}_E$ згідно постулату Максвела є сумою функцій Лагранжа механічної та електричної частин складної електромеханічної системи відповідно; Q_i — узагальнені сили; R — дисипативна функція Релея; $q_i, \dot{q}_i$ — узагальнені координати та швидкості відповідно.

Позначимо через I момент інерції рухомої котушки разом із стрілкою; L_1, L_2 — коефіцієнти самоіндукції нерухомої та рухомої котушок; $M(\alpha)$ — коефіцієнт взаємоіндукції який залежить від кута між їхніми магнітними осями; k — сумарна жорсткість пружин; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — електрорушійні сили; r_1, r_2 — омичні опори провідників; β — коефіцієнт опору середовища. Узагальненими координатами зручно обрати кут α обертання рухомої частини та q_1, q_2 — заряди які проті-

кають по провідниках котушок. Отже ми маємо систему з трьома степенями вільності – однією механічною та двома електричними.

Функція Лагранжа, за означенням, є різницею між кінетичною та потенціальною енергіями системи. Таким чином, функція Лагранжа для механічної частини має вигляд

$$\tilde{L}_M = E_k - \Pi = \frac{I \cdot \dot{\alpha}^2}{2} - \frac{k \cdot \alpha^2}{2}. \quad (4)$$

Для електричної частини потенціальна енергія дорівнює нулю тому що в системі відсутні ємності і таким чином

$$\tilde{L}_E = E_{ke} = \frac{1}{2} (L_1 \dot{q}_1^2 + 2M(\alpha) \dot{q}_1^2 \dot{q}_2^2 + L_1 \dot{q}_2^2) \quad (5)$$

Функція Релея

$$R = \frac{1}{2} \beta \cdot \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} r_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} r_2 \dot{q}_2^2. \quad (6)$$

Підставив вирази (4), (5), (6) в (3) та враховуючи, що похідні за часом від зарядів дорівнюють відповідним струмам, отримаємо систему диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} + r_1 i_1 = \varepsilon_1 - M(\alpha) \frac{di_2}{dt} - 2 \frac{dM(\alpha)}{d\alpha} \dot{\alpha} i_2 \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + r_2 i_2 = \varepsilon_2 - M(\alpha) \frac{di_1}{dt} - 2 \frac{dM(\alpha)}{d\alpha} \dot{\alpha} i_1 \\ I \ddot{\alpha} + \beta \dot{\alpha} + k \alpha = \frac{dM(\alpha)}{d\alpha} i_1 i_2 \end{cases} \quad (7)$$

В системі рівнянь (7) перші два рівняння описують процеси які відбуваються в котушках приладу. Ми бачимо, що на протікання струму в електричних контурах, зокрема ЕРС джерела струму, ЕРС самоіндукції та ЕРС взаємоіндукції впливає додаткова ЕРС, обумовлена рухом провідника із струмом в магнітному полі. Одночасно, на обертання рухомої частини механічної системи діє додатковий момент пондермоторних сил, який залежить від добутку постійних або миттєвих (для ланцюгів змінного струму) струмів в контурах. Зазвичай залежність коефіцієнту взаємоіндукції $M(\alpha)$ від кута α обертання рухомої котушки дуже близька до синусоїдальної кривої, тому система рівнянь (7) є нелінійною.

Для визначення невідомих α_0 , i_{10} , i_{20} врахуємо, що в стані рівноваги всі похідні за часом дорівнюють нулю. Тоді перші два рівняння

є законами Ома для ланцюгів постійного струму, а з третього рівняння отримаємо

$$i_{10}i_{20} \frac{dM(\alpha)}{d\alpha} = k\alpha, \quad (8)$$

звідки основне рівняння приладу в ланцюзі постійного струму буде

$$\alpha = \frac{1}{k} \frac{dM(\alpha)}{d\alpha} i_{10}i_{20}. \quad (9)$$

Для ланцюга змінного струму добуток миттєвих значень треба замінити добутком діючих значень відповідних струмів та косинусу зсуву фаз.

Завдяки залежності (9) прилади цієї системи найчастіше використовують в якості ватметрів. При послідовному з'єднанні котушок 1 та 2 (див. рис. 1) електродинамічні прилади можна використовувати в якості амперметрів. В цьому випадку число ступенів вільності системи буде дорівнювати двом, тому що $i_{10} = i_{20} = i$.

Для невеликих кутів відхилення α залежність $M(\alpha)$ можна прийняти лінійною, тобто $M(\alpha) \approx b \cdot \alpha$ ($b = \text{const}$). В цьому випадку

основне рівняння приладу — $\alpha = \frac{b}{k} i^2$ і ми отримаємо добре відомий емпіричний факт, що шкали електромеханічних приладів є квадратичними.

При паралельному поєднанні контурів електродинамічні прилади можна застосовувати в якості вольтметрів.

При наявності змінної електрорушійної сили $\varepsilon(t)$ в електричному контурі виникають вимушені коливання, частота і амплітуда яких залежить від частоти ЕРС, та згасаючі власні гармонійні коливання, частота яких визначається параметрами механічної підсистеми. Зокрема рівняння (7) враховує виникнення в електричній частині перехідних процесів у випадку якщо ЕРС не є періодичною функцією.

Ми бачимо, що система рівнянь Лагранжа - Максвела з дисипативною функцією Релея дозволяє з єдиної точки зору досліджувати електромеханічні процеси в електричних машинах які мають якнайменше два степеня вільності, тому в них можна підібрати параметри так, щоб отримати ефект динамічного гасіння механічних коливань. І навпаки, можна створити такі параметри, коли вся енергія в системі піде на підтримання коливань електричної системи, а механічна буде коливатися з мінімальною амплітудою.

Метод електромеханічних аналогій або груповий метод, дозволяє моделювати процеси у фізичній системі за допомогою процесів еквівалентної фізичної природи. Так, сучасне моделювання вібраційних характеристик циліндрових втулок судових дизелів широко використовує метод електромеханічних аналогій. Заміна механічних елементів їх електричними аналогами дозволяє оцінити найважливіші характеристики довговічності втулок таких як частота, амплітуда коливань та прискорення коливального руху.

Динаміку відповідної електричної системи можна відтворити засобами комп'ютерного [3] або аналогового моделювання. Знайдені модельні параметри дозволяють зворотною аналогією підібрати відповідні матеріали із необхідними властивостями для побудови або удосконалення механічної системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Павловський М. А. Теоретична механіка: Підручник. – К.: Техніка, 2002. – 512 с.
2. Бутенин Н.В., Фуфасєв Н.А. Введение в аналитическую механику. – М.: Наука, 1991. – С. 118-119.
3. Валишин А.Г. Использование метода линейных механических цепей для моделирования вибрационных характеристик цилиндрических втулок судовых дизелей // IV Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna EXPLO-SHIP 2006, Poland. – С. 391-398.

УДК 629.5.035.8

Кардаш В.П.
ОНМА

СИСТЕМА УДЕРЖАНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ ГРЕБНЫХ ВАЛОВ СУДОВ

Специализация и эволюция архитектурно-конструктивных типов судов характеризуется с одной стороны развитием и усовершенствованием методов грузовых операций, а с другой стороны — характерным для последнего времени повышением удельной грузоемкости. Решением V Международной научно-технической конференции «Эффективность, надежность и безопасность энергетических установок» (Энергоустановки – 2010) от 7÷11 июня 2010 г. рекомендовано в иерархии функциональных подсистем энергетических установок в частности судовых, выделить систему удержания стабилизации осей валов двигателей энергетических установок, что соответствует современным научно-техническим представлениям по данному вопросу и будет способствовать совершенствованию понимания процессов, протекающих в винто-рулевых колонках (ВРК) судов река-море.

В последние годы на судах, особенно типа река-море, в качестве основного движительно-рулевого устройства применяют ВРК, обладающие рядом эксплуатационных преимуществ по сравнению с традиционным пропульсивным комплексом.

К преимуществам применения ВРК можно отнести следующее:

- уменьшается на 20÷30% длина машинного отделения, что позволяет увеличить объем грузовых помещений;
- упрощается процесс монтажа;
- возможность установки ВРК после спуска судна на воду;
- упрощение формы корпуса кормовой оконечности;
- возможность модульной замены ВРК без постановки судна в док;
- возможность увеличения диаметров гребных винтов, что приводит к повышению пропульсивного КПД, а, следовательно, сокращению расхода топлива;
- масса пропульсивного комплекса с использованием ВРК ниже традиционного на 20÷30%;
- отказ от буксиров при постановке к причалу или к другому судну.

Так как судам приходится часто работать в узкостях, проходить через многочисленные шлюзы, существенное значение приобретает высокая маневренность: судно способно развернуться на месте, а при развороте ВРК на 180° с полного хода вперед до остановки судно проходит всего $1,5 \div 2$ длины корпуса.

ВРК используется в качестве главного движительно-рулевого устройства с приводом от дизельного двигателя уже несколько десятков лет, но до сих пор не разработана научно-обоснованная методика расчета нагрузок, учитывающая особенности этих пропульсивных комплексов.

Из рассмотренных схем валопроводов с традиционным пропульсивным комплексом и с движительно-рулевым устройством, использующим в своем составе винто-рулевые колонки с Z-образными редукторами (рис. 1), видно, что схема (б) характеризуется наличием составного гребного вала, удержание и стабилизация положения которого осуществляется с помощью подшипников качения, и отсутствием традиционного дейдвудного устройства.

Эксплуатация судов с дейдвудным устройством в загрязненных водах и на мелководье приводит к значительным материальным затратам и к потере ходового времени.

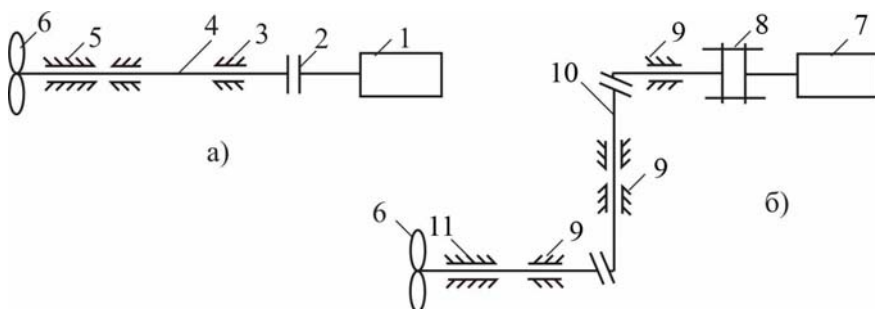


Рис. 1. Схема с линейным валопроводом (а) и составным валопроводом с Z-образным редуктором (б): 1 — главная энергетическая установка, 2 — упорный подшипник скольжения, 3 — опоры скольжения (опорный подшипник скольжения), 4 — гребной вал, 5 — дейдвудное устройство, 6 — гребной винт. 7 — дизельная установка, 8 — устройство соединения валов, 9 — опорные подшипники качения, 10 — промежуточные валы с коническими зубчатыми зацеплениями, 11 — уплотнительный узел, 6 — гребной винт

Эксплуатации ВРК производства немецкой фирмы «Schottel» показала, что слабым звеном в их конструкции является нижний редуктор из-за ненадежной системы подшипников качения вала винта.

В составе ВРК в качестве опор промежуточных валов Z-образных редукторов используются подшипники качения. Срок службы ВРК по расчетным данным должен составлять до 40 000 часов [1]. Однако уже через 7-14 тысяч часов судовладельцам приходится производить ремонтно-восстановительные мероприятия, в основном, из-за разрушения подшипниковых узлов качения.

Редуктора ВРК данного типа маслозаполненные, а для обеспечения смазочного действия уплотнительного устройства выходного вала в схеме предусмотрен подпор посредством создания гидростатического столба. При этом в схеме отсутствуют устройства, обеспечивающие контроль интенсивности изнашивания и качества масла, находящегося в редукторе.

Смазочный материал находится в очень жестких условиях, так как, например, максимальное герцевское давление может достигать 3-4 ГПа, скорость вовлечения смазки достигает 1 м/с. Время прохождения зоны контакта составляет около 10^{-4} с, а скорость сдвига — $10^7 \div 10^8$ с⁻¹. На дорожках качения реализуется граничный режим трения. Тепловыделение, обусловленное сдвигом, повышает температуру смазки на десятки и даже сотни градусов и увеличивает температуру сопрягаемых тел вблизи зоны контакта. Наряду с высоким давлением на единичных контактах фактической площади контакта и скоростью сдвига, термические эффекты приводят к неньютоновскому поведению смазки.

Смазка выполняет и другие функции, в частности, может предотвращать перегрев трущихся поверхностей, защищать их от коррозии. При этом смазка в процессе эксплуатации может насыщаться капельной влагой за счет конденсирования влаги из атмосферного воздуха или кислотами и становится опасной в этом смысле: происходит разрушение смазочной пленки, создаются условия для создания адгезионного изнашивания. Наряду с этим имеет место и абразивное изнашивание, вызванное загрязнением смазки продуктами износа [2].

Следует отметить, что на характер контакта двух тел и возникновения фрикционных связей оказывает влияние не только микрорельеф, но и тонкий (субмикро) рельеф, связанный с возникновением и развитием дислокаций. В соответствии с представлениями физики твердого тела поверхность реального кристаллического тела представляет собой сложную систему блоков и выходов отдельных групп дислокаций.

Разрушение подшипников качения можно рассматривать как процесс накопления дислокаций в результате повторного воздействия напряжений на микроструктуру поверхностного слоя. Слияние дислокаций приводит к рождению микротрещин в области максимального напряжения или неоднородности микроструктуры. Последующее нагружение способствует росту подповерхностных микротрещин, которые сливаются и образуют трещину критического размера.

Следует учитывать также и тот факт, что даже неподвижный подшипник качения подвержен динамической нагрузке, возникающей от вибрации корпуса судна, которая создается приводным двигателем, что может приводить к фреттинг-износу (рис. 2).



Рис. 2. Характерный вид разрушения подшипников качения

Расчетное определение закономерностей изнашивания при проектировании сложно и носит приближенный характер.

Задача данной работы — найти комплексный подход к увеличению надежности работы ВРК в эксплуатации, что позволит снизить финансовые затраты на их эксплуатацию, а также снизить потери ходового времени.

В настоящее время одним из эффективных способов снижения интенсивности изнашивания подшипниковых узлов трения является управление параметрами пристенных смазочных слоев посредством ориентанта, высаженного на их поверхностях. Его наличие на поверхностях трения способствует организации структурированного масляного слоя толщиной до 20 мкм, что существенно изменяет их триботехнические параметры [3].

Для снижения интенсивности изнашивания сопряженных поверхностей подшипников качения необходимо создать гомеотропную структуру смазочного слоя [4].

В качестве ориентанта использовалось высокомолекулярное фтористое соединение, позволяющее обеспечить структурирование смазки на поверхности деталей, повысить несущую способность смазочного слоя, удерживать смазочный материал в зоне трения за счет создания барьерного покрытия, что способствует снижению интенсивности изнашивания (рис. 3).

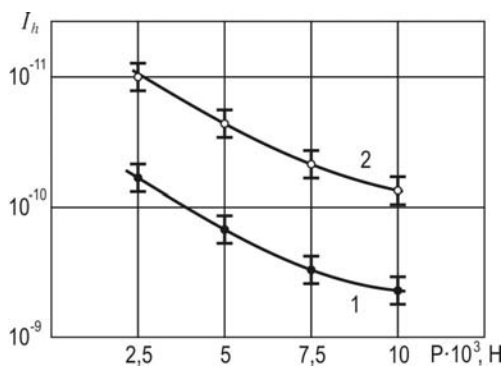


Рис. 3. Зависимость интенсивности изнашивания подшипника качения от нагрузки: 1 — без ориентанта; 2 — с ориентантом

Этот эффект достигается за счет управления структурой пристенного смазочного слоя, т.е. посредством ориентанта создается гомеотропная структура, позволяющая повысить его несущую способность, улучшить условия работы подшипниковых узлов на пусковых и переходных режимах их работы.

Применение ориентанта пристенного смазочного слоя позволяет повысить долговечность подшипниковых узлов качения до уровня, позволяющего эксплуатировать их без замены на протяжении всего жизненного цикла судна (рис. 4).

Таким образом, управление структурой пристенного смазочного материала, позволяет повысить долговечность подшипниковых узлов в 3 раза снизить расход на масло.

Экономическая эффективность исходит от снижения финансовых затрат на эксплуатацию ВРК, исключения потерь ходового времени.

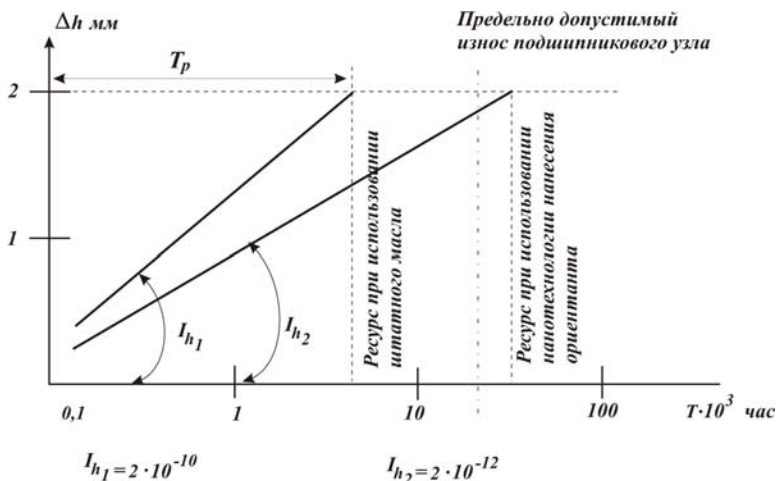


Рис. 4. Влияние ориентанта на ресурс подшипникового узла

В конструкции ВРК следует предусмотреть возможность установки охладителя масла, масляного циркуляционного насоса, фильтрующего и сепарирующего оборудования.

Комплексное решение проблемы позволит повысить надежность работы ВРК и продлить ресурс его эксплуатации без ремонтных работ на протяжении всего жизненного цикла судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maintenance Schedule for SRP 1010/1212FP. Technical Specification. Информационный материал фирмы SCHOTTEL GmbH@Co.KG, Германия, 2005.
2. Мышкин Н.К. Трение, смазка, износ / Н. Мышкин, М. Петровец. – М.: Физматлит, 2007. – 367 с.
3. Дерягин Б.В. Смачивающие пленки / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев. – М.: Наука, 1984. – 157 с.
4. Кардаш В.П. Повышение эффективности работы судовых устройств / В.П. Кардаш, С.А. Ханмамедов // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2007. – Вып. 20. – Одесса: ОНМА. – С. 4-15.

УДК 621.7.023

Анфиногентов В.В.
ОНМА**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ МАЗУТОВ**

Одной из вспомогательных задач исследования, цель которого — повышение эффективности процесса мойки грузовых отсеков танкеров за счет уменьшения трудо- и энергозатрат, сокращения продолжительности процесса мойки и потерь эксплуатационного времени, а также снижения количества нефти, сбрасываемой в море с моющей водой, является анализ адгезионного и когезионного взаимодействий процесса образования слоя нефтепродуктов на поверхностях грузового отсека после выгрузки танкера. Именно эти взаимодействия обеспечивают удержание оставшегося (после стекания излишков) слоя нефтепродуктов на поверхностях отсека и определяют количество нефтепродуктов, налипших на эти поверхности, а следовательно, и затраты энергии на гидромониторную очистку грузовых отсеков от нефтеостатков [1].

Одним из параметров, определяющих величины работ адгезии и когезии нефтепродуктов является их поверхностное натяжение на границе с воздухом.

Встречающиеся в литературных источниках данные по поверхностному натяжению нефтепродуктов и, в частности, мазутов весьма малочисленны, при этом они часто не согласуются между собой. К тому же, эти данные были получены в довольно узких интервалах температур и вязкостей (460,0 сСт и ниже) примерно 40-50 лет тому назад [2–6].

Кроме того, за последние 15-20 лет произошли серьезные качественные изменения в сырьевой базе нефтеперерабатывающей промышленности. Если раньше перерабатывались главным образом малосернистые кавказские нефти, то в настоящее время преимущественно высокосернистые нефти Башкирии, Татарии и Поволжья. Современные технологии характеризуются внедрением ряда новых процессов, приводящих к значительному углублению переработки нефти. В результате этих изменений топочные мазуты, получаемые на нефтезаводах путем смешения тяжелых нефтяных остатков с маловязкими компонентами или в качестве целевых продуктов с установок термического крекинга, обладают повышенной вязкостью и плотностью, высоким содержанием асфальто-смолистых веществ, большим содержанием серы.

Указанным определяется необходимость исследования поверхностного натяжения современных мазутов, изготовленных на основе существующей сырьевой базы.

Исследованию в интервале температур $5 \div 65^\circ \text{C}$ подвергались пробы мазутов, охватывающие весь вязкостной диапазон данных продуктов. Сведения об этих мазутах приведены в таблице 1.

Таблица 1. Физико-химические показатели исследуемых мазутов

Обозначение мазута	Плотность при 15°C $\rho_{15}, \text{кг/м}^3$	Кинематическая вязкость		Температура застывания, $^\circ \text{C}$
		при 50°C $\nu_{50}, \text{сСт}$	при 80°C $\nu_{80}, \text{сСт}$	
М 100	970,5	630	112,6	3
М 100 +	996,5	925,3	145,4	3
М 80	967,5	563,7	101,5	8
М 60	976,5	487,00	90,88	2
М 40	969,1	307,2	66,25	8
М 20	954,8	62,91	20	4
М 20П*	908,3	67,75	21,37	28

* Мазут М 20П отличается высоким содержанием парафинов

Определение поверхностного натяжения мазутов на границе с воздухом осуществлялось методом П.А. Ребиндера (метод максимального давления в газовом пузырьке) [7].

Указанный метод отличается простотой аппаратного оформления и достаточно высокой точностью, найденное поверхностное натяжение не зависит от краевого угла смачивания жидкостью материала капилляра и от плотности жидкости, измерения проводятся каждый раз на вновь образованной поверхности, а испарение с нее исключается. Все это делает данный метод одним из наиболее распространенных.

Поддержание заданной температуры измерительной ячейки производилось с помощью лабораторного термостата позволяющего поддерживать температуру с точность $\pm 0,2^\circ \text{C}$. Температуры, ниже комнатной, достигались с помощью загрузки в камеру термостата некоторого количества льда. Давление в газовом пузырьке, необходимое для расчетов поверхностного натяжения, определялось с помощью наклонного манометра ММН-240 ГОСТ 11161-71.

Полученные результаты представлены в табл. 2 и на рис 1.

Таблица 2. Значения поверхностного натяжения мазутов
в зависимости от температуры

Температура, °С	Обозначение мазута						
	M100	M100+	M80	M60	M40	M20	M20П
	Поверхностное натяжение, мН\м						
5	76,79	109,12	—	71,13	—	57,39	—
10	65,47	93,76	167,32	65,47	49,31	46,88	—
15	57,39	71,13	94,57	56,58	46,88	36,37	—
20	52,54	55,77	75,03	52,54	43,65	35,57	—
25	46,07	50,11	54,96	47,69	41,22	34,76	—
30	42,84	45,26	44,46	46,07	38,8	33,95	40,42
35	39,61	41,22	42,84	42,84	37,18	33,14	32,33
40	36,37	37,99	42,03	42,03	36,37	32,33	31,52
45	34,76	36,37	41,22	40,42	35,57	31,52	30,72
50	33,95	35,57	40,42	39,61	34,76	30,72	29,91
55	33,14	34,76	39,61	37,99	33,95	29,91	29,10
60	32,33	33,95	37,99	36,37	32,33	29,10	28,29
65	32,00	33,14	36,37	35,57	30,72	28,29	27,48

В интервале температур 40...65° С изменение поверхностного натяжения мазутов от температуры носит линейный характер. Графически эти зависимости представляют собой прямые, имеющие практически одинаковый угол наклона, что хорошо согласуется с данными [4, 5]. При этом в указанном температурном диапазоне $\min$ и $\max$ значения величин поверхностного натяжения для каждого из мазутов разнятся на 13 ... 18%.

В то же время, в температурном диапазоне от 40° С и ниже наблюдается резкий рост величины поверхностного натяжения для всех исследуемых мазутов. Так, в зависимости от вида мазута при снижении температуры от 40° С до 5° С поверхностное натяжение увеличивается в 1,7...4,0 раза, при этом зависимость поверхностного натяжения от температуры носит явно не линейный характер. Для группы тяжелых мазутов (M80, M100, M100+) рост поверхностного натяжения является наиболее интенсивным.

ВЫВОДЫ

1. Определены значения поверхностного натяжения на границе с воздухом для мазутов, производимых на основе современной сырьевой базы, в температурном интервале 5...65° С и в весьма широком

диапазоне изменения кинетической вязкости от 33,0 до десятков тысяч сСт.

2. Показано, что в интервале $40 \div 65^\circ \text{C}$ зависимость поверхностного натяжения от температуры исследуемых мазутов является линейной и может быть описана уравнением типа $y = a + bx$, при уменьшении температуры ниже 40°C поверхностное натяжение резко возрастает не по линейному закону.

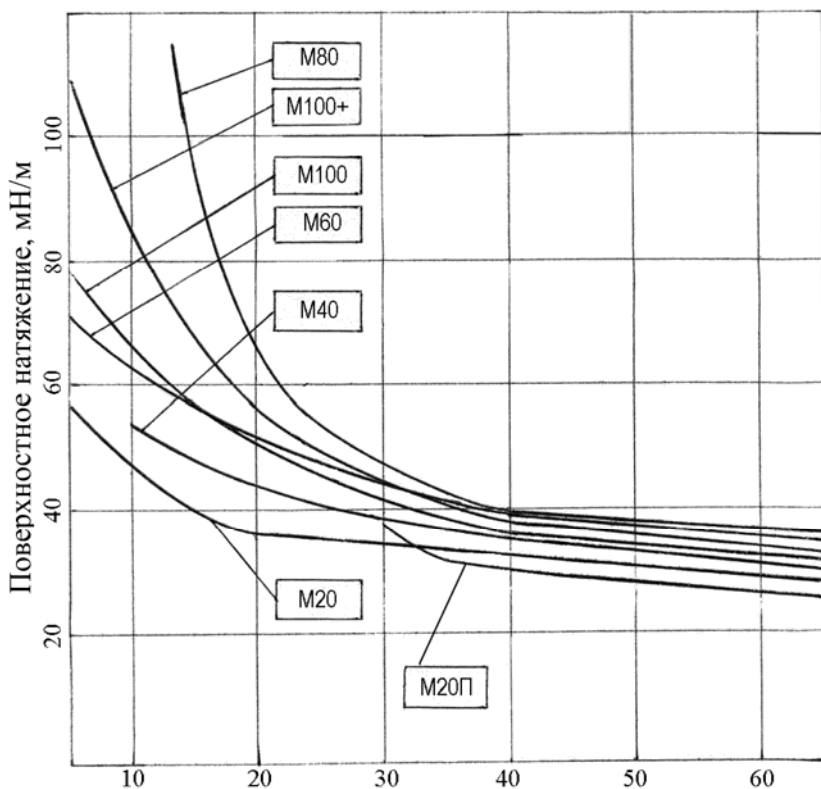


Рис. 1. Зависимость поверхностного натяжения мазутов от температуры

3. Сравнительный анализ данных таблиц 1, 2 и рис. 1 позволяет сделать заключение об отсутствии прямой связи между поверхностным натяжением и вязкостью либо плотностью мазута.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голиков В.А. Энергетический баланс процесса гидромониторной очистки емкостей от остатков нефтепродуктов / В.А. Голиков,

- В.В. Анфиногентов // Судовые энергетические установки и системы: Эксплуатация и ремонт: III междунар. науч.-техн. конф. – Одесса: ОНМА, 2009. – С. 120-126.
2. Лосиков Б.В. Основы применения нефтепродуктов / Б.В. Лосиков, Н.Г. Пучков, Б.А. Энглин. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – 567 с.
 3. Геллер З.И. Высоковязкие мазуты как котельное и печное топливо / З.И. Геллер. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – 216 с.
 4. Геллер З.И. Мазут как топливо / З.И. Геллер. – М.: Недра, 1965. – 495 с.
 5. Лосиков Б.В. Нефтепродукты. Свойства, качество, применение. Справочник / Б.В. Лосиков. – М.: Химия, 1966. – 776 с.
 6. Топлива для стационарных и судовых газовых турбин / [Лосиков Б.В., Фатьянов А.Д., Микулин Ю.В., Александрова Л.А.]. – М.: Химия, 1970. – 310 с.
 7. Фролов Ю.Г. Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии / Ю.Г. Фролов, А.С. Гродский. – М.: Химия, 1986. – 216 с.

УДК 621.436.004.1

Мацкевич Д.В., Сагин С.В., Ханмамедов С.А.
ОНМА**ИЗМЕНЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ
МАСЛЯНОЙ СИСТЕМЕ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ
СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

В судовых двигателях внутреннего сгорания для управления процессами, протекающими в трибосистемах двигателей, используются технические масла. Наибольшее распространение получили минеральные масла нефтяного происхождения. Эти масла должны, прежде всего, обеспечивать функционирование трибосистем и при этом обеспечивать минимальные потери на трение и обеспечивать минимальный износ деталей двигателя. Таким образом, основные показатели работы двигателя как расход топлива и ресурс деталей двигателя во многом зависят от управляемого протекания процессов его трибосистемах.

В настоящее время организация эксплуатации двигателей построена таким образом, что за процессами, протекающими в трибосистемах двигателей, судят по изменению параметров рабочих процессов двигателя и характеристик масел. Поэтому в процессе длительной эксплуатации двигателя возникает задача выбора параметров масла, которые бы наиболее информативно отображали процессы, протекающие в масле, и разработки методики мониторинга этих параметров, которые давали бы также косвенную информацию о состоянии отдельных элементов двигателя. Такие параметры масла как вязкость, щелочное число, наличие воды и механических примесей считаются наиболее информативными. Инструкциями заводов строителей двигателей эти параметры, как правило, регламентированы. Браковочные же показатели этих величин устанавливает судовладелец.

В процессе эксплуатации двигателя его техническое состояние изменяется. Изменяются условия его взаимодействия с маслом. Масло под действием процессов протекающих в двигателях и внутренних, протекающих в самом масле, изменяет свои характеристики. Экипаж судна при этом решает две задачи. Одну — мониторинга параметров масла и недопущения выхода их на браковочные показатели и вторую — задачу определения по анализам масла отклонений в работе двигателя.

Из всех процессов, протекающих в масле при работе двигателя, наиболее рационально осуществлять мониторинг следующих процессов:

- процесса загрязнения масла нерастворимыми примесями в масле, т.е. продуктами сгорания и изнашивания;
- изменения структуры масла и его реологических характеристик;
- химических процессов — окисления, нейтрализации кислых продуктов.

Проведенные работы [2] по окислению масла показали, что полученная кривая относительного приращения вязкости имеет определенное сходство с S-образной кривой процесса комбинированного окисления, при этом ход кривой зависит от типа смазочного материала и параметров рабочего процесса двигателя. За отражением химических и физических процессов, происходящих в работающем масле, авторы [1], например, судят по приращению вязкости, кислотности, содержанию нерастворимого осадка и степени окисления, измеряемой ИК-спектроскопией.

Оценка состояния масла по кислотному числу пригодна лишь с определенными ограничениями, и информативность кислотного числа в значительной мере определяется классом углеводов, лежащих в основе данной марки масел. Кислотное число действительно является показателем наличия органических кислот, однако на первых стадиях процессов окисления углеводов разных классов ни один из них не образует кислоты. Органические кислоты образуются на более глубоких стадиях в результате окисления первичных кислородсодержащих соединений. Поэтому широко применяемая оценка стабильности окисления различных масел по значению кислотного числа недостаточна, так как отсутствие кислотного числа или его малое изменение не свидетельствуют об отсутствии процесса окисления. В то же время, как показал анализ многочисленных экспериментальных данных, существует определенная корреляционная связь между содержанием в работающих моторных маслах нерастворимых продуктов и кислотным числом.

Значимым показателем накопления продуктов окисления служит содержание нерастворимого осадка, но это применимо лишь для масел судовых двухтактных двигателей, имеющих разделенный картер, процесс окисления которых осуществляется практически без поступления внешних загрязнений.

Оценка степени окисления по данным ИК-спектроскопии полезна и дает информацию о накоплении в маслах отдельных соединений, например, карбонильных или кислородсодержащих групп, но применение ИК-спектроскопии в современном ее исполнении в условиях эксплуатации практически исключено. В связи с этим, говоря о приросте вязкости работавших моторных масел, следует особо исследовать вопрос о значимости различных факторов, т.е. дать количественную оценку каждого из них, поскольку, как следует из результатов упомянутых исследований, вязкость является интегральным показателем, реагирующим практически на все важнейшие процессы, приводящие к изменениям физико-химической структуры работающего моторного масла.

Изучение зависимости между содержанием тех или иных компонентов в масле, продолжительностью работы двигателя и некоторыми параметрами масляной системы позволяет установить основные закономерности процесса изменения состояния отдельных элементов двигателя топливной аппаратуры деталей цилиндро-поршневой группы и т.д.

За процессами, происходящими в масле проведем наблюдения на реальном двигателе PIELSTIC 8PC2-5L, работающем в составе импульсивной установки транспортного судна и на его модели.

Ниже рассматривается физическая модель системы смазки этого среднеоборотного двигателя с сухим картером.

Двигатель условно представлен в виде двух последовательно включенных замкнутых емкостей правильной формы (рис. 1). В картерную полость двигателя попадают кислые жидкие продукты и твердые загрязнения в виде продуктов сгорания и изнашивания, прежде всего, деталей цилиндро-поршневой группы и подшипников кривошипно-шатунного механизма. Далее все эти продукты поступают в отстойную цистерну, в которой следует различать воздушное и жидкостное полупространства, имеющие между собой поверхность раздела. В процессе эксплуатации двигателя в нижнее полупространство, занятое маслом, поступают под действие сил тяжести продукты сгорания топлива и изнашивания деталей двигателя. Из обеих полостей масло, перешедшее в газообразное состояние, а также часть масла, испаряющаяся в цилиндре двигателя, удаляется в окружающую среду.

В данной физической модели двигателя приняты следующие обозначения:

- G_0, G_τ — количество масла в системе соответственно в начальный момент и к моменту τ , г/кВт;
- Q_y — скорость угара масла, г/(кВт·ч);
- Q_d — скорость долива масла, г/(кВт·ч);
- a — скорость поступления загрязнений, г/(кВт·ч);
- x_0, x — содержание загрязнений в масле соответственно в начальный момент и после промежутка времени τ , %;
- $x_{\text{ср}}$ — среднее содержание загрязнений в масле за время от 0 до τ , %;
- g — количество загрязнений в масле, г;
- g_ϕ — количество отфильтрованных загрязнений (нерастворимых примесей), г;
- τ — время, ч.

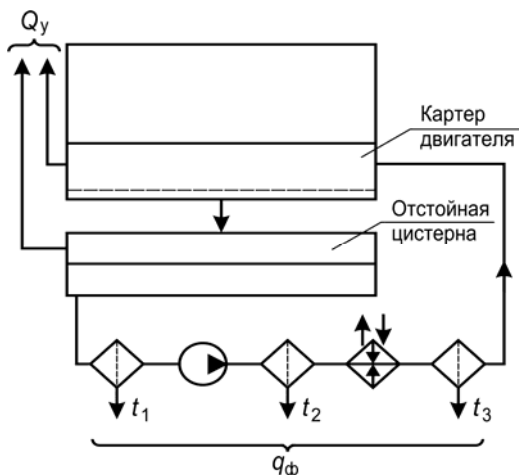


Рис. 1. Физическая модель циркуляционной системы смазки двигателя PIELSTIC 8PC2-5L

Под скоростью загрязнения будем понимать весовое количество загрязнений, попадающих в масло при работе двигателя в единицу времени. В настоящей работе под загрязнениями имеют в виду нерастворимые в бензине примеси, определяемые методом центрифугирования.

Скорость загрязнения масла зависит от режима работы двигателя, степени его изношенности, качества применяемого топлива и масла. Если приработанный двигатель работает на постоянном ре-

жиме и на определенном сорте топлива и масла, то скорость загрязнения масла нерастворимыми примесями может быть условно принята постоянной.

По данным [3] скорость загрязнения масла для двухтактных дизелей составляет $a = 0,06 \div 0,1$ г/(кВт·ч), а для четырехтактных — $a = 0,03 \div 0,12$ г/(кВт·ч).

Скорость загрязнения может быть рассчитана по экспериментальным данным испытаний двигателя. Для этого необходимо определить: расход и долив масла, содержание нерастворимых примесей x в масле через определенные промежутки времени τ , а также количество отложений на фильтре и содержание нерастворимых примесей в них.

В этом случае скорость загрязнения может быть рассчитана по следующему выражению, г/(кВт·ч)

$$a = \frac{g_{\phi} + x_{cp} Q_y \tau + xG - x_0 G_0}{100\tau}. \quad (1)$$

Определим основную закономерность изменения содержания нерастворимых примесей в циркуляционном масле двигателя PIELSTIC 8PC2-5L.

Пусть ко времени τ — продолжительности эксплуатации двигателя с момента залива свежего масла — количество загрязнений в картере двигателя будет x .

За время $d\tau$ в масло поступило еще $ad\tau$ загрязнений. За это же время вместе с угаром из масла уйдет $xQd\tau$ загрязнений, а с доливым маслом будет дополнительно внесено $x_0 Q_d d\tau$ загрязнений. Общее изменение содержания загрязнений составит

$$(a + x_0 Q_d - xQ_y) dx. \quad (2)$$

За это время количество масла в картере изменится на величину долива и угара, т. е. на величину $(Q_d - Q_y)$, следовательно,

$$G = G_0 - (Q_y - Q_d) \tau. \quad (3)$$

В зависимости от особенностей конструкции системы смазывания количество масла в системе во времени будет изменяться в зависимости от того, какой регулятор уровня масла установлен на отстойной цистерне двигателя рис. 2.

Как видно из рис. 2, количество масла в цистерне может убывать по изображенной закономерности в случае, если будет применен астатический регулятор уровня, выполненный, например, на поплав-

ковых чувствительных элементах; в случае, если применяется регулятор уровня, имеющий небольшую статическую ошибку — рис. 2,а.

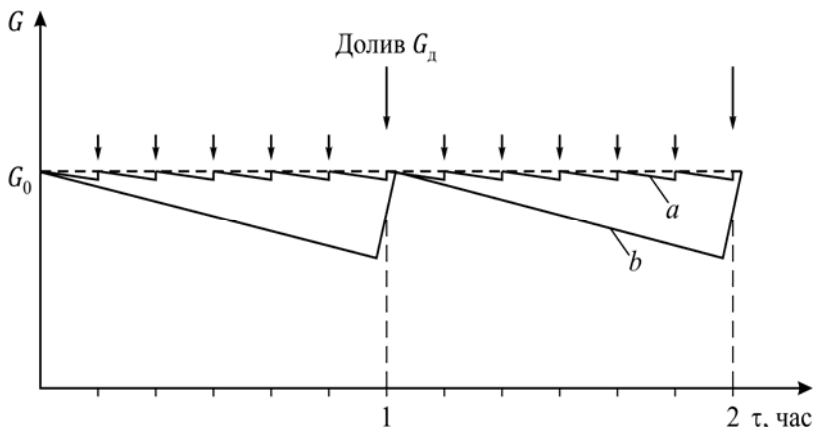


Рис. 2. Зависимость изменения количества масла в отстойной цистерне двигателя PIELSTIC 8PC2-5L от времени работы его a — для случая регулирования уровня астатическим регулятором и b — статическим

Таким образом, можно считать что, общее дифференциальное уравнение, определяющее изменение содержания загрязнений в масле за время $d\tau$, будет иметь вид

$$(G_0 - Q_y \tau) dx = (a - x Q_y) d\tau. \quad (4)$$

Рассмотрим решение уравнения (4) для случаев регулирования уровня различными регуляторами.

Двигатель PIELSTIC 8PC2-5L работает со статическим регулятором уровня в сточной масляной цистерне по закону b , приведенному на рис. 2. При таком законе регулирования можно считать, что в течение периода времени 0-1 и 1-2 (см. рис. 2) двигатель работает без долива масла, т. е. $Q_d = 0$. Тогда уравнение (4) принимает вид

$$(G_0 - Q_y \tau) dx = (a - x Q_y) d\tau \quad (5)$$

или

$$\frac{dx}{a - Q_y x} = \frac{d\tau}{G_0 - Q_y \tau}.$$

Интегрирование и преобразования этого уравнения дают следующее его решение относительно накопления нерастворимых примесей в масле:

$$x = -\frac{a}{Q_y} \ln \frac{G_0 - Q_y \tau}{G_0}.$$

Так как часть загрязнений удерживается агрегатами очистки, то реальная скорость поступления загрязнений в масло будет ниже величины a . В этом случае необходимо ввести дополнительную поправку на коэффициент отфильтровывания f , который будет представлять собой отношение загрязнений, удержанных фильтром $g_\phi = g_1 + g_2 + g_3$, ко всему количеству загрязнений $(a\tau - x_{\text{ср}}Q_y\tau)$, прошедших через фильтр, т.е. ко всему количеству поступивших за время τ загрязнений за вычетом тех, которые были унесены за это же время с угаром масла. Таким образом, коэффициент отфильтровывания f , выраженный в %, будет иметь вид

$$f = \frac{100g_\phi}{a\tau - x_{\text{ср}}Q_y\tau}.$$

Особо следует отметить, что коэффициент отфильтровывания близок к единице. Так, у двигателя PIELSTIC 8PC2-5L со штатными свежепромытыми фильтрами и при включенном масляном сепараторе коэффициент отфильтровывания составляет $f = 0,99$. По мере появления в масле частиц менее 1 мкм, которые практически не задерживаются фильтрами, коэффициент отфильтровывания медленно снижается примерно на 0,001 на каждые 100 часов работы двигателя. Тогда реальное содержание примесей в масле составит

$$x = \frac{100a(1-f)}{Q_0} \ln \frac{G_0 - Q_y\tau}{G_0} \quad (6)$$

Если регулятор уровня масла в отстойной цистерне будет астатическим, тогда долив масла в систему можно считать непрерывным. Двигатель в этом случае работает с регулярным доливом масла, равным угару, т. е. $Q_d = Q_y$. При этом содержание загрязнений в доливаемом масле, как правило, $x_0 = 0$.

Тогда уравнение, определяющее содержание загрязнений в масле, имеет вид

$$Gdx = (a - Q_yx)d\tau. \quad (7)$$

Интегрируем уравнение (7) и, решая относительно содержания примесей, полагая, что при $\tau = 0$ $x = 0$, получим выражение для содержания примесей в масле к моменту τ

$$x = \frac{a}{Q_y} \left(1 - e^{-\frac{Q_y \tau}{G}} \right). \quad (8)$$

Если содержание примесей выражается в %, то формула (8) будет иметь вид

$$x = \frac{100a}{Q_y} \left(1 - e^{-\frac{Q_y \tau}{G}} \right). \quad (9)$$

В случае, если в исходном масле имеется некоторое содержание примесей, т. е. $x_0 \neq 0$, то решение уравнения (4) будет иметь вид

$$x = \frac{100a}{Q_y} \left(1 - e^{-\frac{Q_y \tau}{G}} \right) + x_0 e^{-\frac{Q_y \tau}{G}}, \quad (10)$$

а с учетом коэффициента отфильтровывания формула (10) примет вид

$$x = \frac{100a(1-f)}{Q_y} \left(1 - e^{-\frac{Q_y \tau}{G}} \right) + x_0 e^{-\frac{Q_y \tau}{G}}. \quad (11)$$

Полученные формулы (6) и (11) являются основными для расчета содержания загрязнений x в масле для дизелей PIELSTIC 8PC2-5L, работающих с различными регуляторами уровня масла в отстойной цистерне масла.

На рис. 3 показаны зависимости изменения содержания примесей в масле для случаев работы различных регуляторов уровня a — случай работы с астатическим регулятором (зависимость получена по формуле (11)), а кривая b получена по экспериментальным данным.

Зависимость c получена по формуле (6) для случая применения регулятора уровня с поплавковыми чувствительными элементами.

Из рассмотрения полученных результатов исследований видно, что содержанием загрязнений в масле можно управлять путем:

- увеличения количества масла G в системе;
- повышения эффективности очистки масла.

Завод строитель двигателя рекомендует, чтобы содержание нерастворимых примесей в масле было не более 1%.

Изменение содержания примесей в масле, как известно [2], приводит и к изменению вязкости масла. Изменение вязкости масла также регламентировано заводом строителем двигателя. Так завод

строитель двигателя не рекомендует, чтобы вязкость изменялась более чем на $+20\% \div -10\%$.

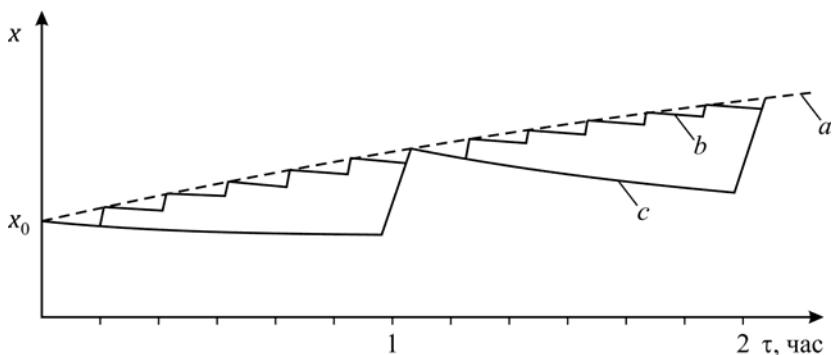


Рис. 3. Зависимости изменения содержания примесей в масле для случаев работы различных регуляторов уровня: *a* — работы с астатическим регулятором (пунктирная кривая *a* получена по формуле (11), кривая *b* — по экспериментальным данным).

Согласно рекомендациям завода строителя двигателя судовладельцу необходимо осуществлять мониторинг содержания нерастворимых примесей в масле и его вязкостью. На рис. 4 приведены результаты мониторинга показателей масла в виде функции $\Delta\mu = f(x)$.

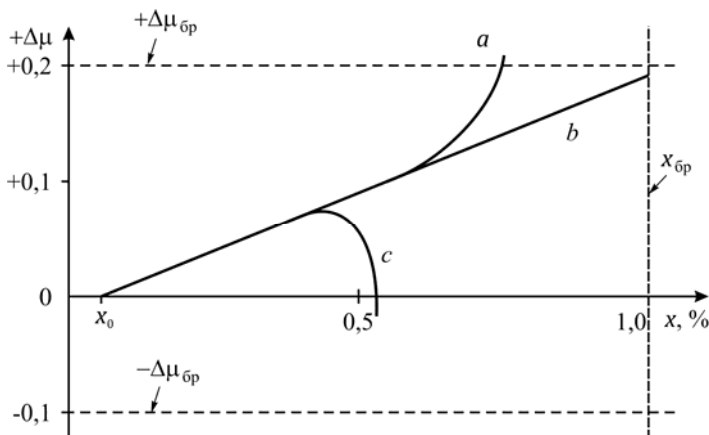


Рис. 4. Зависимость изменения содержания вязкости масла от содержания нерастворимых примесей в циркуляционном масле: *a* — для случая поломки кольца и прорывов газов в картер двигателя; *b* — для случая эксплуатации двигателя без отклонений в его техническом состоянии и штатном окислении и загрязнении масла; *c* — для случая попадания топлива в масло

Как видно из рис. 4, в процессе эксплуатации двигателя, управляя содержанием нерастворимых примесей в масле, можно осуществлять удержание реологических характеристик последнего в поле изменений, рекомендованном заводом строителем.

Вместе с тем, на рис. 4. также просматриваются закономерности, которые указывают на изменении технического состояния отдельных элементов двигателя.

В заключение следует отметить что контроль изменения реологических характеристик циркуляционного масла среднеоборотного двигателя позволяет определить время замены масла, а также получить информацию, которая позволяет идентифицировать техническое состояние отдельных элементов двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев М. А., Бунаков Б. М., Долецкий В. А. Качество моторного масла и надежность двигателей. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 231 с.
2. Фуке Г. И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов. – М.: Наука, 2003. – 327 с.
3. Ханмамедов С.А., Щербак Д.В. Интенсификация противоизносных свойств смазочных материалов для узлов трения судовых энергетических установок // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 1999. – Вып. 3. – Одесса: ОГМА. – С. 28-39.

УДК 532.5

Рященко Б.П. Лавриненко М.И.
ОНМА ИФ

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЗАИЛИВАНИЯ СУДОВЫХ БАЛЛАСТНЫХ ТАНКОВ

Не преднамеренный перенос патогенных организмов с водяным балластом судов представляет собой одну из основных угроз для Мирового океана [1]. Для решения этой проблемы Международная Морская Организация (ИМО) посредством Резолюции А.774(18), а впоследствии Резолюцией А.868(20) сформулировала основные правила и рекомендации по управлению водяным балластом судов в целях предотвращения распространения экзогенных организмов [2].

В 2004 года ИМО приняла «Международную конвенцию о контроле судовых балластных вод и осадков и управления ими» (МК УБВ 2004). На этой же международной конференции были дополнительно приняты четыре резолюции, регламентирующие некоторые действия данной конвенции (рис. 1, табл. 1).

Структурная взаимосвязь положений конвенции (МК УБВ 2004) относительно требований и стандартов управления балластных вод и принятых с ней резолюций представлена на рис. 1. Краткий комментарий к правилам конвенции по разделу “В”, “D” и “E” приведен в табл. 2.

Конвенция вступит в силу через 12 месяцев после даты подписания ее не менее 30-ти государств с общей суммарной валовой вместимостью тоннажа торговых судов не менее 35 % от мирового торгового флота (ст. 18 МК УБВ 2004). С этого момента требования по управлению балластными водами и осадками в балластных танках войдут в процедуру контроля судов государства порта. Данное право наступает у прибрежного государства в силу его суверенитета над территориальными и внутренними водами.

В качестве основных методов предотвращения переноса патогенных организмов посредством судовых балластных вод конвенция (МК УБВ 2004) рассматривает два варианта, либо замена балласта в открытом море на глубокой воде в соответствии с требованиями Правил В-4 и D-1, либо технологическая его обработка согласно стандарту качества (Правило D-2). Относительно метода замены балласта, то конвенция ограничивает сроки его использования в за-

висимости от года постройки судна и объема его балластных танков. В этих случаях конвенция предусматривает переход на чисто технологические системы обработки балласта (Правило В-3).



Рис. 1. Структурная взаимосвязь основных положений Конвенции (МК УБВ 2004)

Таблица 1. Перечень резолюций, принятых совместно с Международной Конвенцией

Резолюция 1	Будущая работа Организации, которая касается Международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управления ими.
Резолюция 2	Использование механизмов принятия решений при обзоре стандартов в соответствии с правилом D-5.
Резолюция 3	Содействие техническому сотрудничеству и помощи.
Резолюция 4	Обзор приложения к Международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управления ими.

**Таблица 2. Краткая аннотация правил
раздела “В”, “D”, “E” конвенции**

РАЗДЕЛ В.	
Правило В-1	СОДЕРЖИТ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕДУР УПРАВЛЕНИЯ БАЛЛАСТНЫМИ ВОДАМИ И УДАЛЕНИЯ ОСАДКОВ.
Правило В-2	СОДЕРЖИТ ПРАВИЛА ПРОТОКОЛИРОВАНИЯ ВСЕХ ДЕЙСТВИЙ В ЖУРНАЛЕ ОПЕРАЦИЙ С БАЛЛАСТНЫМИ ВОДАМИ
Правило В-3	* Судно, построенное до 2009 года: - с объемом балластных танков от 1500 до 5000 м³ осуществляет управление балластными водами согласно стандарту замены балласта (Правило D -1) до 2014 года, а после этого согласно стандарту качества обработки балласта (Правило D - 2); - с объемом балластных танков менее 1500 или более 5000 м³ осуществляет управление балластными водами согласно стандарту Правила D -1 до 2016 года, а после этого согласно стандарту Правила D-2. - Судно, построенное в 2009 году или позднее, с объемом балластных танков менее 5000 м³ осуществляет управление балластными водами согласно стандарту Правила D -2. - Судно, построенное в 2012 году или позднее, с объемом балластных танков 5000 м³ и более осуществляет управление балластными водами согласно стандарту Правила D -2.
Правило В-5	* На всех судах извлекаются и удаляются осадки из отсеков, предназначенных для перевозки водяного балласта, в соответствии с положениями судового плана управления балластными водами. * Суда, построенные в 2009 году и позднее должны проектироваться и строиться с учетом необходимости сведения к минимуму приема и нежелательного захвата осадков, облегчения их удаления и доступа к отбору проб.
РАЗДЕЛ D	
Правило D-1	* Последовательный метод, при котором балластные танки осушаются и вновь заполняются чистой водой (эффективность замены 95% по объему). * Проточный метод, при котором каждый балластный танк прокачивается трехкратным объемом забортной воды (эффективность замены 95% по объему).
Правило D-2	* Суда, применяющие обработку водяного балласта не должны допускать сброс более 10 жизнеспособных организмов на 1 м ³ размером 50 мкм и более, а также 10 организмов и более на 1 см ³ от 10 до 50 мкм.
РАЗДЕЛ E	
Суда валовой вместимостью 400 рег. тонн и более подлежат освидетельствованию с целью установления, что план управления балластными водами, требуемый Правилom В-1, а также конструкция, оборудование, системы, устройства, приспособления и материалы или процессы полностью отвечают применимым требованиям настоящей Конвенции.	

Следует признать, что на современном этапе ни одна из морских держав, включая Украину, не готова на уровне технических решений к выполнению положений регламентируемых конвенцией (МК УБВ 2004). Только отсутствием эффективных технологий обработки балластных вод и технологий извлечения осадков из балластных танков можно объяснить задержку в ратификации конвенции (МК УБВ 2004) морскими державами на данный момент времени.

К примеру, предложенный конвенцией стандарт качества обработки балласта по биологическому составу на момент сброса балласта достаточно жесткий (Правило D-2). По мнению авторов статьи, данный стандарт нацелен на мотивацию перехода к новым, более эффективным, технологиям обеззараживания балласта от патогенных организмов.

Касательно технологий удаления осадков из балластных танков для судов находящихся в эксплуатации, то выполнение требований положений конвенции (МК УБВ 2004) крайне затруднено из-за низкой их эффективности и малой рентабельности существующих методов.

Исторически так сложилось, что многие морские порты расположены в устьях рек и суда вынуждены балластироваться забортной водой, содержащей значительное количество мелкодисперсного ила. Практика эксплуатации судов ОАО «УДП» показывает, что толщина слоя осадка ила в балластных танках составляет ~ 200 мм за 3-х летний период эксплуатации судна. Для регулярного удаления осадка ила из балластного танка судно необходимо дооборудовать специальной системой взрыхления и удаления ила. Исследования, проведенные ЮЖНИИМФом, подтвердили работоспособность метода затопленных струй забортной воды, выходящей из сопел, расположенных вблизи днища танка между стрингерами.

К недостаткам данного способа удаления осадков следует отнести: необходимость дооборудования балластных танков стационарной системой трубопроводов с сопловыми насадками, а также механизма по перемещению моющих машинок в проекции танка. Низкая эффективность метода требует, как правило, проведения повторного цикла зачистки.

Вполне очевидно, что наиболее эффективным средством борьбы с образованием осадков в танках является обработка балласта уже на стадии его приема на борт судна.

Для очистки балластной воды от нерастворимых взвесей в судовой практике обычно используют механические и физико-химические ме-

тоды очистки. Выбор конкретного метода очистки зависит от размера частиц дисперсной фазы суспензии. При этом эффективность любого процесса очистки определяют два фактора. Фактор «внешней стесненности» потока, связанный с геометрическими размерами рабочей камеры очистительного комплекса. И фактор «внутренней стесненности» потока, определяемый показателями турбулентного потока обрабатываемой суспензии в камере. При этом структуру данного турбулентного потока характеризуют две величины: это среднее значение диссипации энергии за единицу времени на единицу массы жидкости E и кинематическая вязкость среды ν [3]. Другими словами, фактор «внешней стесненности» потока влияет на величину пути пробега частицы до соударения, а фактор «внутренней стесненности» потока отвечает непосредственно за механизм процесса агрегации взаимодействующих частиц в объеме суспензии.

Практика разрушения устойчивых гетерогенных суспензий показывает, что процесс агрегации частиц может быть достаточно успешным при использовании метода тонкой фильтрации либо метода мембранных технологий. В обоих случаях поры фильтра (либо мембраны) должны иметь размер соизмеримый с размером извлекаемых частиц суспензии. При очистке тонкодисперсных суспензий резко возрастает гидравлическое сопротивление прокачки балласта через очистительный комплекс. Одновременно с этим уменьшается ресурс работы фильтрующего элемента

Альтернативным вариантом безреагентной очистки балластной воды является использование фильтра с плавающей загрузкой из гранул пенополистирола. Промывка фильтра осуществляется нисходящим потоком осветленной воды из пространства над фильтром. К преимуществу данного метода можно отнести его простоту и эффективность регенерации загрузки. Метод технологичен в условиях эксплуатации судна. Гидравлическое сопротивление прокачки балласта зависит от размера гранул и толщины слоя загрузки, дисперсности суспензии и объемного количества взвеси в принимаемом балласте. К основному недостатку метода следует отнести слишком низкую скорость процесса очистки (режим проток очищаемого балласта должен быть только ламинарным).

Особенностью процесса балластировки современного судна является высокая скорость приема балласта. Основным фактором, тормозящим этот процесс, является качество принимаемого балласта. Согласно требованию Конвенции (МК УБВ 2004) балласт необходимо

очистить от взвесей и обеззаразить его от патогенных организмов до соответствующих норм.

Решение данного вопроса лежит в плоскости создания высокоскоростных очистных комплексов. Отличительной особенностью этих комплексов является то, что очистка балласта от взвесей и его обеззараживание от патогенных организмов должна происходить только в режиме развитой турбулентности. В этих условиях совместить процесс очистки и процесс обеззараживания в рамках одного подхода крайне проблематично. Очевидно, что поставленную задачу целесообразно разделить на два этапа. Первый этап - это решение задачи по проблеме очистки балласта от взвесей. Второй этап связан с поиском новых технологий биологической деактивации патогенных организмов в балласте до норм Конвенции.

Анализ дисперсного состава илистых отложений в балластных танках судов ОАО «УДП» показал, что 75 % массы пробы составляют частицы размером диапазона $\sim (8 \dots 11)$ мкм, при этом содержание более крупных частиц не превышает 1,9 % [4].

Резкую интенсификацию процесса седиментации тонкодисперсных стабилизированных суспензий можно добиться путем преобразования мелких частиц взвеси в устойчивые агрегаты.

Согласно кинетической теории гетерокоагуляции ДЛФО [5] агрегация твердых частиц определяется результатом сил взаимодействия двойного электрического поля каждой из частиц и межмолекулярных сил Ван-Дервальса. Другими словами, если соударяющиеся частицы обладают кинетической энергией взаимодействия достаточной для преодоления величины энергетического барьера, то процесс образования агрегатов будет успешным. При этом устойчивость агрегатов к процессу вторичного дроблению определяется знаком разницы между величиной “высоты” энергетического барьера и величиной градиента перепада давления вблизи агрегата частиц.

Таким образом, для создания благоприятных условий процесса сцепления частиц в агрегаты необходимо:

1. Резко увеличить число соударений частиц в объеме суспензии.
2. Обеспечить кинетическую энергию взаимодействия двух соударяющихся частиц больше величины энергетического барьера.
3. В объеме обрабатываемой суспензии исключить градиенты по перепаду давления во избежание вторичного дробления образованных агрегатов.

На основании вышеизложенного, авторами предлагается метод гидродинамической обработки балластных вод турбулентным полем течения Куэтта. Выбор данного типа течения объясняется отсутствием появлением градиента давления в объеме жидкости даже при турбулентном режиме течения. При этом характер поля турбулентного потока принимается в качестве основного фактора процесса агрегации частиц. В этом случае оптимизацию процесса агрегации частиц (кинематику агрегации $dD/d\tau$) необходимо проводить с учетом взаимосвязи коэффициента G , характеризующего неоднородное гидродинамическое поле течения Куэтта, и кинематической вязкости среды ν .

Кроме того, можно предположить, что условия гидродинамической обработки балластных вод негативно влияют на патогенную флору балласта. Другими словами, энергия турбулентного поля может быть фатальной для некоторых видов патогенных организмов. Однако проверка данного тезиса требует проведения самостоятельных комплексных исследований.

Таким образом, предлагаемый в статье метод гидродинамической обработки балластных вод турбулентным полем является наиболее интересным и перспективным направлением в исследовании вопроса очистки и обеззараживания балласта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Конференция ООН по окружающей среде и развитию, Июнь 1992 года, Рио-де-Жанейро (Бразилия).
2. Резолюция ИМО 1993 года А.774(18). «Руководство по предотвращению внесения нежелательных водных и патогенных организмов в результате сброса с судов водяного балласта и осадков». Резолюция ИМО 1997 года А.868(20). «Руководство по контролю водяного балласта судов и управлению им для сведения к минимуму переноса вредных водных и патогенных организмов».
3. Рященко Б.П. Анализ процесса глубокой очистки льяльных вод судов с учетом теории турбулентности // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2009. – Вып. 23. – О.: ОНМА. – С. 51-57.
4. Разработка методов очистки от ила междудонных отсеков судов СДП. Отчет НИР, Отдел морской коррозии Физико-механического института им. Г.В. Карпенко АН УССР, Одесса, 1989 г.
5. Дерягин Б.В., Духин С.С., Рулев Н.Н. Кінетична теорія флотації малих частинок і флотаційної водо очистки // Вісник академії наук Української РСР, січень 1980. - №1. – С.5-17.

РЕФЕРАТЫ

УДК 621.431.74

Гончаров И.В., Колегаев М.А., Ханмамедов С.А. Переход горения в детонацию в судовых малооборотных длинноходовых дизелях // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 25. – Одесса: ОНМА. – С. 4-9.

Показано, что в современных длинноходовых дизелях серии ME процессы горения топлива при третьей подаче, перед открытием клапана, имеют детонационный характер.

Библ. 7.

Goncharov I.V., Kolegayev M.A., Khanmamedov S.A. The Viscosity of Fuel-Air Mixes // Ship Power Plants: Sc.-Tech. Col. – 2010. – No 25. – Odessa: ONMA. – P. 4-9.

Combustion process in modern ME-type long stroke low speed diesels at the third stage injection, before the valve opening, have knocking character.

Bibl. 7.

УДК 621.431.74-571-581

Половинка Э.М., Кабачюра В.В., Албул Д.А. Вязкость топливовоздушных смесей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 25. – Одесса: ОНМА. – С. 10-17.

Представлены результаты экспериментального исследования вязкости топливовоздушных смесей. Зависимость вязкости от состава и давления смесей даны в графической и аналитической форме. Для аналитического представления использован аппарат множественной линейной регрессии.

Табл. 5. Ил. 6. Библ. 3.

Polovinka E.M., Kabatsyura V.V., Albul D.A. The Viscosity of Fuel-Air Mixes // Ship Power Plants: Sc.-Tech. Col. – 2010. – No 25. – Odessa: ONMA. – P. 10-17.

The results of an experimental research of viscosity of fuel-air mixes are submitted. Dependences of viscosity on structure and the pressure of mixes are given in the graphic and analytical form. Analytical interpretation was made by multiple linear regression.

Tabl. 5. Fig. 6. Bibl. 3.

УДК 629.123.1.001

Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Обоснование выбора шага винта в условиях доштормового волнения на коротких морских линиях // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 25. – Одесса: ОНМА. – С. 18-32.

Проведен анализ условий, при которых возможно управление шагом ВРШ с целью путевой экономии топлива. Предложена методика определения среднего значения шагового отношения в заданных условиях доштормового волнения.

Ил. 10. Библ. 12.

Suvorov P., Tarasenko T. Justification for choosing of the CPP pitch in swell conditions for short sea shipping lines // Ship Power Plants: Sc.-Tech. Col. – 2010. – No 25. – Odessa: ONMA. – P. 18-32.

The conditions under which one can control CPP pitch to track fuel economy. Authors propose methods for determining the average value of the pitch relationship in swell conditions.

Fig. 10. Bibl. 12.

УДК621.822.2

Хлопенко Н.Я., Гаврилов С.А. Экспериментальные исследования эффективности работы выравнивающего устройства с разгружающими сильфонами // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 25. – Одесса: ОНМА. – С. 33-38.

Показано, что гидравлическое выравнивающее устройство с разгружающими сильфонами полностью выравнивает нагрузки по подушкам и защищает масляную пленку от вибрационного разрушения.

Ил. 4. Библ. 9.

Khlopenko N.Y., Gavrilov S.A. Experimental investigation of work effectiveness of compensating device with unloading bellows // Ship Power Plants: Sc.-Tech. Col. – 2010. – No 25. – Odessa: ONMA. – P. 33-38.

It is shown that hydraulic compensating device with unloading bellows completely compensates loading bearer and protects oil layer from vibrating destruction.

Fig. 4. Bibl. 9.

УДК 621.791.92

Воробьев В.Л. Математическое моделирование динамической контактной задачи для судовых деталей с покрытием // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 25. – Одесса: ОНМА. – С. 40-49.

Построенная динамическая модель для исследования напряженно-деформируемых полей в деталях с покрытием.

Ил. 2. Библ. 6.

Vorobev V.L. Mathematical Modeling of Dynamic Contact Problem for Ship Parts with Coating // Ship Power Plants: Sc.-Tech. Col. – 2010. – No 25. – Odessa: ONMA. – P. 40-49.

Mathematical of Dynamic model for mode of deformation study in the parts with coating is presented.

Fig. 2. Bibl. 6.

УДК 629.12.06: 628.84:517.3

Голиков В.А., Капустин В.И. Способы повышения надежности операторов судовых эргатических систем // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 25. – Одесса: ОНМА. – С. 49-55.

Исследуются психоэмоциональные свойства объекта управления – оператора судовых систем путем воздействия на него волновым тепловым потоком и дискретным инфразвуковым полем, что позволит сохранять надежность эргатических систем судна в течение длительного периода, сохраняя оперативную готовность оператора.

Табл. 3. Библ. 7.

Golikov V.A., Kapustin V.I. Means for Increasing Reliability of Operators of Shipboard Ergative Systems // Ship Power Plants: Sc.-Tech. Col. – 2010. – No 25. – Odessa: ONMA. – P. 49-55.

Psychoemotional features of control object – shipboard systems operator by influencing him with wave thermal flow and discreet infrasound field are investigated. This will preserve reliability of shipboard ergative systems during long period of time by preserving operative readiness of operator.

Tabl. 3. Bibl. 7.

УДК 681.518.55

Sandler A.K., Drozd E.B. Модернизация системы управления грузовым краном // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 25. – Одесса: ОНМА. – С. 56-59.

Предложен вариант модернизации системы управления краном, направленный на повышение безопасности управления грузовыми операциями.

Ил. 3. Библ. 5.

Sandler A., Drozd H. Modernization of a control system by the cargo crane // Ship Power Plants: Sc.-Tech. Col. – 2010. – No 25. – Odessa: ONMA. – P. 56-59.

The variant of modernization of a control system by the crane directed on increase of safety of management by cargo operations is offered

Fig. 3. Bibl. 7.

УДК 621.431.74.72

Khanmamedov S.A., Burlachenko O.V. Механизм образования углеродных отложений в проточной части судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 25. – Одесса: ОНМА. – С. 60-71.

На основе анализа существующих моделей строения и процессов возникновения углеродных частиц, а также экспериментальных данных по кластерообразованию предлагается модель формирования углеродных частиц в проточной части СДВС.

Ил. 2. Библ. 37.

Khanmamedov S.A., Burlachenko O.V. The Mechanism of Carbon Sediments Formation in Air-Gas Channel of Marine Diesels // Ship Power Plants: Sc.-Tech. Col. – 2010. – No 25. – Odessa: ONMA. – P. 60-71.

On the basis of the analysis of existing models of a structure and processes of occurrence of carbon particles, and also experimental data on cluster formation the model of formation of carbon particles in flowing part ships internal-combustion engine is offered.

Fig. 2. Bibl. 37.

УДК 621.438:62-233

Кирюхин А.Л. Совершенствование методов анализа динамики валопроводов судовых турбинных установок // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 25. – Одесса: ОНМА. – С. 72-78.

Представлен подход к анализу динамики судовых валопроводов на основе метода расчёта динамических систем с сосредоточенными параметрами, учитывающего нелинейность реакций опор.

Ил. 2. Библ. 9.

Kiryukhin A.L. Methods of Analysis of Marine Turbine Plants Shafting Dynamics Perfection // Ship Power Plants: Sc.-Tech. Col. – 2010. – No 25. – Odessa: ONMA. – P. 72-78.

Presents the approach to analysis of marine shafting dynamics on the basis of method of analysis of dynamic systems with lumped parameters that takes into account non-linearity of bearings reactions.

Fig. 2. Bibl. 9.

УДК 656.61

Дейнего Ю.Г. Организационное обеспечение командным составом судна подготовки и проведения инспекции судна властями государства порта // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 25. – Одесса: ОНМА. – С. 79-86.

Систематизируются основные требования Парижского, Токийского и Черноморского Меморандумов, регламентируется организация подготовки командным составом морских судов к инспектированию властями государства порта.

Библ. 3.

Deynego Y.G. Organizational Support of Preparation and Inspection Performance of the Ship with State Port Authorities by Ship Command Staff // Ship Power Plants: Sc.-Tech. Col. – 2010. – No 25. – Odessa: ONMA. – P. 79-86.

Систематизируются основные требования Парижского, Токийского и Черноморского Меморандумов, регламентируется организация подготовки командным составом морских судов к инспектированию властями государства порта.

Bibl. 3.

УДК 681.7.068

Сандлер А.К., Логишев И.В., Сандлер А.А. Структурная модель инвариантного волоконного акселерометра // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 25. – Одесса: ОНМА. – С. 87-92.

Предложен вариант модернизации волоконно-оптических акселерометров, направленный на повышение помехозащищенности датчика

Ил. 2. Библ. 13.

Sandler A., Logishev I., Sandler A. Structural model of invariant fiber accelerometer // Ship Power Plants: Sc.-Tech. Col. – 2010. – No 25. – Odessa: ONMA. – P. 87-92.

The variant of modernization of an invariant fiber accelerometer directed on increase of protection by sensor is discussed.

Fig. 2. Bibl. 13.

УДК 531.15

Артемченко О.С., Кардашев Д.Л. Електромеханічні аналогії в електричних машинах з декількома степенями вільності // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – № 25. – Одесса: ОНМА. – С. 93-97.

Розглянуто електромеханічні аналогії на прикладі складних електромеханічних систем з двома степенями вільності, за допомогою системи рівнянь Лагранжа - Максвелла з дисипативною функцією Релея. Метод електромеханічних аналогій можна застосувати при моделюванні вібраційних характеристик циліндрових втулок судових дизелів.

Іл. 1. Бібл. 3.

Artemenko O.S., Kardashev D.L. Mechanical and Electrical Analogy in Electrical Machines with Some Degrees of Freedom // Ship Power Plants: Sc.-Tech. Col. – 2010. – No 25. – Odessa: ONMA. – P. 93-97.

The mechanical and electrical analogy is considered on the example of the electromechanical systems with two degrees of freedom by the system of Lagrange – Maxwell equations with the dissipative function of Rayleigh. The method of electromechanical analogy can be used for the modeling of vibration characteristics of cylinder liners in ship's diesel engines.

Fig. 1 Bibl. 3.

УДК 629.5.035.8

Kardash V.P. Система удержания и стабилизации положения гребных валов судов / В.П. Кардаш // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – Вып. 25 – Одесса: ОНМА. – 2010. – С. 98-103.

Проанализированы условия работы подшипников качения, служащих для удержания и стабилизации положения валов в винто-рулевых колонках с Z-образными редукторами. Предложен способ повышения их долговечности, а также мероприятия по оснащению конструкции ВРК вспомогательным оборудованием.

Ілл. 4. Бібл. 4.

Kardash V.P. The System for Supporting and Stabilizing Shaft Positions of Marine Propellers / V.P. Kardash // Ship Power Plants: Sc.-Tech. Col. – 2010. – No 25. – Odessa: ONMA. – P. 98-103.

Ball bearing work conditions that support and stabilize shaft positions in propeller columns with Z-shaped reduction gears are analyzed. The method to increase their longevity as well as arrangements to equip rudder propeller with auxiliary equipment is suggested.

Fig. 4. Bibl. 4.

УДК 621.436.004.1

Мацкевич Д.В., Сагин С.В., Ханмамедов С.А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – Вып. 25 – Одесса: ОНМА. – 2010. – С. 109-118.

Рассмотрена методика мониторинга реологических характеристик циркуляционного масла среднеоборотного двигателя с целью определения времени замены масла и идентификация технического состояния элементов двигателя.

Іл. 4. Бібл. 3.

Matskevich D.V., Sagin S.V., Khanmamedov S.A. Change of Rheological Properties of Lubricant Oils in Circulating System in the Process of Middle Speed Diesel

Operation // Ship Power Plants: Sc.-Tech. Col. – 2010. – No 25. – Odessa: ONMA. – P. 109-118.

The method of rheological properties of circulating system of middle speed diesel is considered aiming to determine the time of oil change and technical state identification of diesel elements.

Fig. 4. Bibl. 3.

УДК 532.5

Рященко Б.П. Лавриненко М.И. Состояние и перспективы развития технологии предотвращения заиливания судовых балластных танков // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – Вып. 25 – Одесса: ОНМА. – 2010. – С. 119-125.

На основе анализа структурной взаимосвязи положений конвенции (МК УБВ 2004) и принятых резолюций сформулирована концепция подхода к интенсификации процесса агрегации тонкодисперсной фазы балластных вод в турбулентном поле течения Куэтта.

Табл. 2. Ил. 1. Библ. 5.

Ryashchenko B.P. Lavrinenko M.I. State and Views of the Development of Ballast Tank Silting Prevention Technology // Ship Power Plants: Sc.-Tech. Col. – 2010. – No 25. – Odessa: ONMA. – P. 119-125.

On the basis of structural interrelation of provisions of convention on water ballast control (2004) and IMO resolutions the concept was formulated as to intensification of aggregation process of the fine-dispersed phase of ballast water in the turbulent field of Couett flow.

Tabl. 2. Fig. 1. Bibl. 5.

ПРАВИЛА

оформления и представления рукописей для сборника «Судовые энергетические установки»

Научно-технический сборник Одесской национальной морской академии «Судовые энергетические установки» является научным изданием, в котором в соответствии с постановлением Президиума ВАК Украины могут публиковаться основные результаты диссертационных работ по профилю судовой энергетики.

Рукопись представляется на электронном носителе в формате «Microsoft Word» с бумажной копией, подписанной всеми авторами, и с контактной информацией: адреса, телефоны. К статье обязательно прилагается реферат объёмом *не более* 300 печатных знаков на русском и английском языках. Объём статьи — до 0,5 авторского листа с учётом иллюстраций и подрисуночных подписей.

Статья должна содержать постановку проблемы в общем виде и её связь с важными научными или практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций по теме статьи, формулирование целей статьи (постановку задачи), изложение основного материала с необходимыми обоснованиями, выводы и перспективы дальнейших исследований.

Требования к оформлению.

Формат бумаги А5 (148×210) Все поля — 16 мм. Текст через 1 интервал, *Times New Roman*, 11 пт; таблицы, заголовки таблиц, подрисуночные подписи — 10 пт.

Переменные, функции, векторы, матрицы и т.п. оформляются шрифтом *Antiqua*. Переменные выполняются наклонным шрифтом, векторы — полужирным, без наклона; греческие символы — во всех случаях без наклона; индексы: латинские — с наклоном, кириллические — без наклона. Размеры в *Equation (MathType)*: основной — 11 пт, увеличенный — 16,5 пт, индекс — 7 пт, субиндекс — 6 пт. Во всех случаях разметка формул в копии рукописи обязательна. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Формулы отделяются от текста строками высотой 2 пт.

Таблицы следует располагать на одной странице (кроме случаев, когда таблица занимает больше 1 страницы). Заголовки — 10 пт, без переноса, интервал перед — 8 пт, после — 2 пт, основной шрифт таблицы — 10 пт. Рисунки отделяются от текста сверху интервалом 8 пт, от названия — 2 пт. Название рисунка — кегль 10 пт, без переноса, интервал после — 8 пт. На все таблицы и рисунки должны быть ссылки в тексте статьи.

Единицы физических величин должны соответствовать ГОСТ 8.417-81 «Единицы физических величин» и иметь общепринятые обозначения.

Перед названием статьи указываются индекс УДК, фамилии и инициалы авторов, сокращённые наименования учреждений, где работают авторы. Заголовок статьи оформлять стилем Заголовок 1, кегль 11 пт, без переноса, все прописные, интервал: перед — 8 пт, после — 2 пт.

Иллюстрации, подготовленные в графических редакторах, дополнительно прилагаются на диске в качестве отдельных файлов в исходном формате. Размер надписей должен обеспечивать их читаемость (8-10 пт). Для сканированных рисунков прилагается оригинал в туши на белой бумаге достаточной плотности. На обороте указывается номер и принадлежность к статье.

Библиографические описания должны соответствовать требованиям ВАК.

Редакция предоставляет электронный шаблон статьи с примерами оформления.

Контактные телефоны редакции (048) 733-49-24, 733-23-52.

e-mail: seu@ma.odessa.ua

Судовые энергетические установки:
научно-технический сборник.
Выпуск 25.

Подписано к печати 01.10.2010. Формат 60×84/16.
Уч.-изд. л. 7,16. Тираж 100. Зак. № И-7-12-47.

ОНМА, центр „Видавінформ”
Свидетельство ДК № 1292 от 20.03.2003
65029, г. Одесса, ул. Дидрихсона, 8
тел./факс: (0482) 34-14-12
publish@ma.odessa.ua