

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-804-817

**ANALYSIS CORRECTITUDE SIMULATORS PROGRAMS
OF DIESELSIM DPS 100-GFCA, DPS 100 L-MC AND CALCULATING
HEAT LOAD LIMIT CHARACTERISTIC FOR THIS ENGINES****V. N. Kuchеров**

G.I. Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok, Russian Federation

This study work has been done on simulators of DPS 100-GFCA, DPS 100 L-MC type, Kongsberg Maritime (Norway). They simulate the working process of modern long-stroke diesel engines 6L 90GFCA and 5L90MC, B&W and MAN B&W as a part of supertanker propulsion plant, including all elements and systems of propulsion plant at vary operating conditions.. The programs show the complex interaction of factors and characteristics when solving complex tasks, defining co-operation of diesel engine and propulsion system's elements. This investigation is necessary for analyses the efficiency, completeness and adequacy of solving problems that are reproduced by simulators in comparison with real processes in propulsion plant. The study purpose was the checking of programs correctness. The solving of such problems can be attributed to the category of scientific research. The practical significance of the study work consists of correcting of obtained by simulators data and to define some data of individual tasks, especially in the case of limit characteristics of the heat load. Marked mistakes in the working process simulation can be useful for the designers of the new generation simulators. This information contains analysis of the correctness of computer programs, calculating working process changing in simulated diesel engines under different service conditions. In the course of study work the comparative analysis of simulators data of work process was made under normal and malfunction conditions of simulated elements. The number of mistakes devoted to the problem of heavy screw characteristics in ice conditions was also represented in the study work.

There are many mistakes and simplifications in some parameters behavior in case of malfunction at some elements of the engine. In programs the influence of back pressure after gas turbine, as a major factor, and air resistance of cylinder at air supply of the engine are omitted. There are a lot of mistakes in analyzing fuel oil injection parts malfunction. For exemplify, the leakage from wore plunger and barrel of fuel injection pump and injector simulator reproduce as simple lost of fuel dosage with decreasing exhaust gas and cylinder wall temperature. Really this faults lead to defective fuel atomizing and influence combustion and working process. As a result will be dropping time injection open, time begin ignition and combustion process degradation with increasing exhaust gas and cylinder wall temperature. This malfunction and especially leaking injector needle are the most often at operating condition and always lead to increasing exhaust gas temperature and heat load of this cylinder. Existing programs has no characteristics to limit heat load. They are calculated by using data from 6S50MC, UECL, UECL2 diesels as mathematical model for each simulated engine. Then they are added for use. When the audience of different level competence works on simulators, its work should provide competent and comprehensive understanding of complex processes of ship's machinery.

Many errors and simplifications in behaviour some parameters in case of malfunction at some elements of engine are eventual and not negative only. As known, the most effective form of teaching is interactive mode. It is recommended for instructor to analyze and discuss simulators data to consider the questions in all its aspects with cadets and engineers after making every task.

Keywords: Simulator, simulators program, training learning, simulated processes, mistakes, discorrections, pitch characteristics, heat stresses, mechanical stresses, thermal load limit characteristics.

For citation:

Kuchеров, Vladimir N. "Analysis correctitude simulators programs of DIESELSIM DPS 100-GFCA, DPS 100 L-MC and calculating heat load limit characteristic for this engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 804–817. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-804-817.

УДК 004: 621.43: 629.5**АНАЛИЗ КОРРЕКТНОСТИ ПРОГРАММ ТРЕНАЖЁРОВ DIESELSIM
DPS 100-GFCA, DPS 100 L-MC И ПОСТРОЕНИЕ ОГРАНИЧИТЕЛЬНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПО ТЕПЛОВОЙ НАПРЯЖЁННОСТИ ДИЗЕЛЕЙ****В. Н. Кучеров**ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского»,
Владивосток, Российская Федерация

Работа выполнена на тренажерах типа DPS 100-GFCA и DPS 100L-MC фирмы Kongsberg Maritime (Норвегия), которые имитируют работу современных длинноходных дизелей 6L90GFCA и 5L90MC фирмы B&W и MAN B&W в составе пропульсивного комплекса крупнотоннажных танкеров, включая все элементы и системы силовой установки при различных условиях эксплуатации. Целью исследований являлась проверка корректности программ, отображающих сложное взаимодействие факторов и параметров при решении комплексных задач, определяющих работу главного двигателя в составе пропульсивного комплекса судна при нарушениях в функционировании основных элементов главного двигателя, а также при работе по «тяжелым» винтовым характеристикам. Подобные задачи относятся к разряду научных исследований. Практическая значимость исследования состоит в корректировке полученных данных, уточнении отдельных задач и особенно в вопросах разработки ограничительных характеристик по тепловой напряженности двигателя. Отмеченные ошибки в моделировании рабочих процессов могут быть полезны для разработчиков тренажеров нового поколения. В ходе исследования и сравнительного анализа, полученных на тренажёре данных, выявлены неточности, недоработки и ошибки в моделировании многих параметров рабочего процесса, а также в особенностях работы двигателя на утяжеленных винтовых характеристиках в ледовых условиях. Показаны рабочие режимы на ограничительных характеристиках по тепловой напряженности дизелей S50MC, UECL, UECLS2, которые приняты за математическую модель для имитируемых двигателей. Разработанные характеристики показаны в линейных и логарифмических координатах. Отмеченные упрощения и даже ошибки в моделировании сложных процессов нельзя считать только негативными. После выполненных слушателями исследований на тренажёрах преподаватель может в интерактивной форме дискуссии или круглого стола провести развернутый анализ корректности полученных результатов в широком аспекте сопутствующих факторов влияния.

Ключевые слова: тренажёр, компьютерная программа, моделируемые процессы, неточности, упрощения, винтовые характеристики, тепловая и механическая напряженность, ограничительные характеристики.

Для цитирования:

Кучеров В. Н. Анализ корректности программ тренажёров DIESELSIM DPS 100-GFCA, DPS 100 L-MC и построение ограничительных характеристик по тепловой напряжённости дизелей / В. Н. Кучеров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 804–817. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-804-817.

Введение (Introduction)

Технический прогресс и совершенствование силовых установок современных судов неразрывно связаны с появлением и развитием микропроцессорных систем управления и контроля параметров в системах и элементах силовых установок. Дальнейшее совершенствование и расширение сфер, направлений и объема внедрения микропроцессорных систем привели к созданию электронно-управляемых механизмов. По сложности и ответственности к ним, в первую очередь, относятся главные и вспомогательные двигатели внутреннего сгорания, надежность которых определяет безопасность мореплавания.

Для изучения новой техники и овладения навыками управления и эксплуатации современных главных (ГД) и вспомогательных двигателей в составе судовой энергетической установки требуются максимально реалистичные тренажеры машинных отделений (ТМО). Для идентификации явлений, обобщения и умения применять теоретические знания в анализе комплекса параметров, в частности, на главных и вспомогательных двигателях, тренажёр позволяет курсантам приобретать навыки механика-эксплуатационника.

Для совершенствования подготовки специалистов и глубокого понимания взаимосвязей между параметрами рабочего процесса двигателей и пропульсивного комплекса в целом очень большое значение имеет корректность программ и полнота информации, которую отображает тренажёр. Наиболее важны адекватность данных, полученных на тренажере, в сравнении с реальным двигателем и его убедительная реалистичность при работе со слушателями курсов повышения квалификации — как с младшими механиками (уровень эксплуатации), так и со вторыми и старшими механиками (уровень управления) в соответствии с классификацией Международной конвенции ПДМНВ-78/95. Данная подготовка особенно важна с механиками, которые не работали на современных судах. В работе [1] рассмотрены показатели эффективности ТМО фирм

KongsbergMaritime (Норвегия), *Transas* (Россия) и *Unitest Marine* (Польша), которые используются в морских учебных заведениях морского и рыбопромыслового флота России. В качестве показателей эффективности выбраны реалистичность, функциональность, надежность и качество обучения. Указанные показатели тренажёра должны отвечать требованиям Международной конвенции о подготовке, дипломировании и несении вахты моряков ПДМНВ-78/95 [2] и Международного кодекса по управлению безопасностью эксплуатации судов [3].

Этим же вопросам посвящена статья [4], в которой приведен полный перечень минимального стандарта компетенций по международной конвенции ПДМНВ-78/95 для подготовки механиков на уровне «эксплуатации» и «управления». Далее показано, какие позиции конвенционных требований выполняются, а какие нет (вплоть до ведения технической документации и др.). Предлагается разработать программы для работы по всем позициям функций, включая работу с документацией. В работе [5] излагается опыт тренажёрной подготовки судомехаников для повышения их теоретических знаний и профессиональной подготовки в целом. Работа [6] также посвящена вопросам повышения эффективности и безаварийности работы судовой энергетической установки (СЭУ) посредством тренажёрной подготовки ее операторов. В статье [7] рассматривается программа и этапы комплексной предрейсовой подготовки инженерно-технического состава судна с использованием тренажера ERS 5000 FULL MISSION компании *Transas* с оценкой уровня тренажёрной подготовки по методике конвенции ПДНВ-95. В статье [8] приводится список средств поэтапной подготовки специалистов с использованием трехуровневой системы управления судовыми электроэнергетическими установками с дизель-генераторными агрегатами. В работе [9] рассматривается надежность эргатических составляющих морских тренажёрно-обучающих систем. Все эти работы касаются методики обучения, рациональных приемов работы со слушателями, психологического, человеческого и других факторов, влияющих на эффективность тренажёрной подготовки, но не рассматривают вопросы технической корректности информации, которая выдается тренажером.

Целью выполненного исследования является сравнительный анализ корректности программ и, соответственно, полученных на тренажере данных о параметрах рабочего процесса и характере их протекания при нормальном и измененном состоянии элементов дизеля в составе пропульсивной установки судна в различных условиях эксплуатации, а также разработка ограничительных характеристик по тепловой напряженности моделируемых двигателей, которые отсутствуют в программах. Разработка этих вопросов имеет аналитический исследовательский характер. К числу решаемых задач, имеющих практическую значимость, следует отнести выявление упрощений, явных недоработок и ошибок в программах тренажеров, которые могут оказать отрицательное влияние на теоретический и практический уровень профессиональной подготовки слушателей. Выявленные недоработки могут быть использованы для совершенствования программ при создании новых модификаций тренажеров.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для проведения исследований использовались тренажёры лабораторной базы Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского, г. Владивосток. Тренажёры типа DPS 100-GFCA и DPS 100L-МС фирмы *Kongsberg Maritime* [10] имитируют рабочий процесс ГД в различных условиях плавания судна, в том числе при изменении или нарушении нормального функционирования основных элементов ГД, таких как турбокомпрессор и система воздухообеспечения с ее приборами и устройствами, топливная аппаратура высокого давления и фазы топливоподачи, состояние поршневых колец, гидродинамические параметры гребного винта в составе пропульсивного комплекса судна. Отрабатываются и более простые задачи, связанные с эксплуатацией ГД (например влияние внешних условий на рабочий процесс двигателя и тепловое состояние деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ), выполнение стендовых и ходовых испытаний ГД при его работе на винт фиксированного и регулируемого шага с индентификацией и осциллографированием параметров индикаторного процесса и топливоподачи, нарушения в работе масляных и охлаждающих насосов).

В тренажёре DPS 100-GFCA моделируется силовая установка танкера дедвейтом 180000 т с достаточно современным длинноходным дизелем 6L90GFCA. Помимо ГД имитируется работа дизель-генераторов, паровых котлов, механизмов утилизации теплоты и других основных элементов, включая работу всех систем, обслуживающих СЭУ с их автоматикой, системами контроля, характерными нарушениями в работе и т. д.

Тренажёр DPS 100L-МС моделирует силовую установку танкера дедвейтом 184000 т с двигателем 5L90МС. Тренажёр типа DPS 100-GFCA является реальным полномасштабным прототипом центрального поста управления (ЦПУ) силовой установкой крупнотоннажного судна. Он имеет исчерпывающую по функциональности панель мнемосхем с кнопками открытия-закрытия клапанов, запуска и остановки механизмов всех систем и элементов СЭУ (рис. 1).

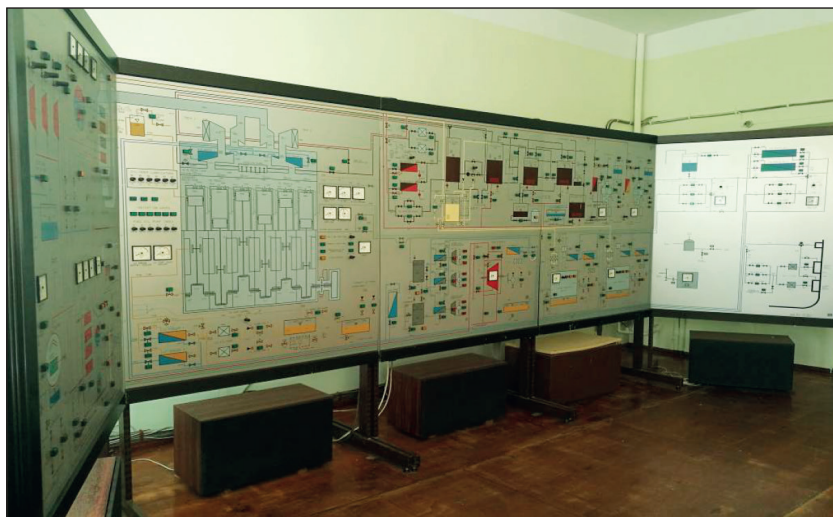


Рис. 1. Мнемосхемы тренажёра типа DPS 100-GFCA

Имеется местный пост управления главным двигателем с медленным проворачиванием ГД при пробных пусках. Запуск в работу каждого механизма сопровождается звуком с характерным для него уровнем и тональностью, создавая реальный эффект присутствия в машинно-котельном отделении. Центральный пост управления с буквенно-цифровым отображением информации на экране монитора имеет панель, где дополнительно показаны основные параметры силовой установки аналоговыми стрелочными указателями, включая панель с крупными указателями основных параметров пропульсивного комплекса: мощность на валу ГД, частота вращения вала, шаговое отношение гребного винта и скорость судна (рис. 2).



Рис. 2. Пост управления тренажёра типа «DPS 100-GFCA»

Эта информация важна оператору при отработке задач при работе ГД по «тяжелым» винтовым характеристикам, например в ледовых условиях или на режимах маневрирования. Тренажёр имеет реальную систему контроля параметров всех систем и уровней рабочих жидкостей, включая шламовые цистерны с аварийно-предупредительной сигнализацией и указанием диапазона рабочих значений, а также системами блокировок. В левой части поста управления имеется панель информации о числе и типе работающих дизель-генераторов, валогенератора или утилизационного турбогенератора с их приоритетами автоматического включения.

На горизонтальной части панели показаны режимы работы основных механизмов систем и устройств (№ 1 или 2, «авто»). Имеется главный распределительный щит для ручного включения генераторов, управления параметрами и контроля нагрузок. Для индицирования и диагностирования рабочего процесса, технического состояния элементов цилиндропоршневой группы и топливной аппаратуры имеется все четыре блока фирмы *Autronika*: индицирование параметров рабочего процесса ГД, осциллографирование процессов топливоподачи, термоанализатор контроля теплового состояния деталей ЦПГ (цилиндровая втулка в поясе первого поршневого кольца в верхней мертвой точке, цилиндрическая крышка, седло выпускного клапана) и датчики технического состояния поршневых колец с распечаткой полученных данных на принтере (см. рис. 2). Котельная и утилизационная установки имеют свой пост управления.

Благодаря высокой информативности, реалистичности процессов и объема получаемой информации оператор или судовой механик может видеть в целом состояние всей силовой установки и пропульсивного комплекса судна на любых режимах работы, не обращаясь к страницам на мониторе, где отображаются все параметры силовой установки с допускаемыми отклонениями. Данные тренажёры используются также в высших учебных заведениях Федерального агентства по рыболовству, Новороссийском государственном университете им. адм. Ф. Ф. Ушакова и др.

Тренажёр DPS 100L-MC выполнен на основе компьютерной сети, где инструктор вводит задачу на несколько мониторов. По информативности и объёму исследуемых процессов и тематике решаемых задач он во многом сопоставим с рассмотренным ранее тренажёром. Он проще и дешевле в исполнении, но имеет в данном варианте только шесть рабочих мест, поскольку каждый курсант работает на своем мониторе, последовательно вызывая на экран, например, каждую систему для подготовки ее к работе. Основным недостатком тренажёров данного типа является их низкая реалистичность и отсутствие информации о состоянии силовой установки в целом в период решения задач, связанных, в первую очередь, с изменением режимов работы пропульсивного комплекса судна. На аналогичной основе группового обучения в компьютерной сети разработаны тренажеры типа ERS 4000 фирмы *Transas*, где инструктор управляет классом до 12 рабочих мест обучаемых.

Результаты (Results)

Тренажёры позволяют выполнять большое количество лабораторных работ, в основном на уровне подготовки вахтенных механиков по программе вуза. При постановке более сложных задач на тренажере DPS-100-GFCA, которые заложены в типовой перечень (таких как анализ условий работы системы воздухообеспечения дизеля, топливоподающих элементов с их неисправностями и нарушениями), в работе имеются явные упущения, упрощения и неверные данные для анализа по алгоритму контрольных показаний параметров при наличии различных неисправностей. Так, нарушения с протечками топлива при впрыскивании с увеличенными зазорами в прецизионных парах «игла – корпус распылителя» и в плунжерной паре топливного насоса высокого давления входят в разные задачи, хотя это единая система высокого давления при впрыске топлива. В данных индицирования дизеля при номинальной мощности показано максимальное давление впрыска топлива 482 бар (48,2 МПа), а это явная ошибка, которая будет создавать у слушателей неверное представление о параметрах впрыскивания топлива. Даже у дизеля первой степени наддува VTBF это значение составляет 60,0 – 70,0 МПа, а в дизелях LMC — 90,0 МПа и более, в аккумуляторных системах впрыска — 90,0 МПа.

В задаче о влиянии изнашивания в прецизионных элементах плунжерной пары и распылителя изменение энергетических и теплотехнических параметров отражено правильно, кроме показателей и критериев тепловой напряженности: температур цилиндровой втулки, крышки и седла выпускного клапана. Указанные протечки даже при самом малом «объеме задания» примитивно отображают ее как потерю цикловой подачи топлива и, как следствие, понижение тепловой напряженности и уменьшение температуры отработавших газов. Однако в эксплуатации это наиболее частое нарушение, наряду с подтекающей иглой форсунки, которое однозначно приводит к ухудшению качества распыливания, уменьшению действительного угла опережения подачи топлива, увеличению фазы догорания топлива на линии расширения, повышению тепловой напряженности деталей цилиндропоршневой группы и росту температуры отработавших газов. Указанные в задаче изменения параметров не могут наблюдаться на работающем дизеле, поскольку при значительных протечках топлива невозможен даже запуск дизеля.

В задаче «утечка топлива через форсунку (износ направляющей иглы форсунки)» энергетические параметры двигателя уменьшаются исключительно как простая потеря топлива без связи ее с качеством распыливания и сгорания. На осциллограмме процесса топливоподачи правильно отражается падение давления впрыскивания и продолжительности подачи топлива, но при этом не изменяется R_p (скорость нарастания давления до открытия иглы форсунки) и действительный угол опережения подачи. Как и в предыдущей задаче, неверно отображается падение температуры отработавших газов на цилиндре *до* и *после* турбины и уменьшение температуры на цилиндровой втулке, крышке и седле выпускного клапана. Как известно, частые случаи повышения температуры газов на одном из цилиндров с уменьшением $P_{\max}(P_z)$, в первую очередь, взаимосвязаны с ухудшением технического состояния форсунки по указанным ранее причинам. Если замена форсунки не изменяет положение, причину ищут в техническом состоянии топливного насоса высокого давления, его клапанов и плунжерной пары. Плохая работа топливной аппаратуры всегда повышает тепловую напряженность цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и способствует выгораниям на выпускных клапанах и седлах (естественно, при возросшей температуре).

В задаче «неисправности турбокомпрессора» при анализе системы газотурбинного наддува отсутствуют такие важные составляющие потерь напора, как сопротивление газотока между продувочным ресивером и на входе в турбину (сопротивление при продувке), а также противодействие за турбиной и его существенное влияние на параметры наддува и тепловую напряженность. Чрезмерно завышено влияние сопротивления на всасывающем фильтре компрессора на параметры рабочего процесса. Так, ввод этой неисправности даже в объеме 10 % уже приводит к предельным значениям температуры продувочного воздуха и срабатыванию сигнализации по данному параметру. Позитивно, что во всех этих заданиях ухудшение воздухообеспечения дизеля взаимосвязано с повышением температуры деталей ЦПГ и температуры отходящих газов на цилиндре и газовой турбине.

Особое значение в практической деятельности судового механика имеет выбор ограничительных характеристик по механической и тепловой напряженности дизеля при работе на различных режимах по внешней и винтовой характеристике. Как известно, винтовая характеристика, определяющая зависимость параметров двигателя от частоты вращения вала, работающего на гребной винт, не является собственной характеристикой двигателя, поскольку энергетические и другие его параметры изменяются по закону потребления мощности винтом. В этой сложной системе выделяют гидромеханический комплекс, а именно: валы, гребные винты, корпус судна с рулевым устройством. Гидромеханический комплекс совместно с главным двигателем образуют пропульсивный, или движительный комплекс. Задающим элементом в этой системе является судно, а точнее, зависимость полного сопротивления движению его корпуса в воде от скорости судна. Крутящий момент и мощность, потребляемая винтом, зависят от гидродинамических параметров винта, которые связаны с изменением сопротивления движению судна.

Таким образом, каждому отдельному условию плавания со своим сопротивлением движению корпусу судна соответствует своя характеристика винта, а, следовательно, и двигателя. В основу сравнения винтовых характеристик положена теоретическая или номинальная винтовая

характеристика, которая снимается на стенде, где двигатель нагружается гидротормозом по характерному для винта закону потребления мощности от оборотов, и номинальная (100 %) мощность достигается при номинальной частоте вращения вала. Из сопоставления с теоретической винтовой характеристикой устанавливается понятие гидродинамически «тяжелого» и «легкого» винта и, соответственно, его характеристики [11]. В этом состоит актуальность разработки ограничительных характеристик по тепловой напряженности ГД и умения применять их в различных условиях плавания. В первую очередь, это относится к условиям работы двигателя с возросшим сопротивлением движению судна, т. е. по «тяжелым» винтовым характеристикам с винтом фиксированного шага. К ним относятся условия плавания в шуге, битом льду, преодоление ледовых перемычек в шторм, при обрастании корпуса и гребного винта, наличии бухтин, вмятин, отслоении краски на корпусе судна, при буксировках, плавании на мелководье с глубиной менее 10 – 15 осадок судна и т. д.

Основными показателями механической напряженности в практике эксплуатации являются максимальное давление цикла $P_{\max}$, частота вращения вала n и крутящий момент $M_{\text{кр}}$ на коленчатом валу дизеля, а также динамическая составляющая — средняя скорость нарастания давления при сгорании топлива и разность давлений $P_{\max}$ и $P_{\text{сot}}$ (давление в конце процесса сжатия). При работе двигателя с газотурбинным наддувом по «тяжелой» характеристике частота вращения, ограниченная упором топливной рейки на номинальном указателе нагрузки, будет уменьшаться. С уменьшением n падает расход газа на турбину и, как следствие, снижается мощность турбины с уменьшением давления наддува. Далее пропорционально снизится давление конца сжатия $P_{\text{сot}}$ и $P_{\max}$, если отсутствует система VIT (Variable Injection Timing), которая изменением угла опережения подачи топлива поддерживает постоянным и номинальным $P_{\max}$ в диапазоне нагрузок по мощности от 110 % до режимов около 78 %. В любом случае условие не превышения максимального давления будет соблюдено. По винтовой характеристике крутящий момент $M_{\text{кр}}$ изменяется по квадратичной параболе по одному закону со средним эффективным давлением $P_{\text{те}}$. Постоянство этих параметров на уровне номинальных значений графически выражается прямой линией из начала координат в точку номинального значения эффективной мощности и частоты вращения в поле винтовых характеристики и легко определяется при индизировании двигателя. Однако работа дизеля по условию постоянства крутящего момента на уровне номинального значения $M_{\text{кр,ном}}$ допускается только на ограниченном начальном участке прямой. Далее вступает в силу ограничения по тепловой напряженности. На начальном участке ограничительной характеристики по тепловой напряженности параметром ограничения может быть коэффициент избытка воздуха для сгорания в любом режиме α_x при условии $\alpha_x \geq \alpha_{\text{ном}}$ ($\alpha_{\text{ном}}$ — коэффициент избытка воздуха на номинальной мощности). Эта кривая располагается и протекает по прямой постоянства крутящего момента $M_{\text{кр,ном}}$ и далее переходит в более крутую характеристику не превышения плотности теплового потока на текущем режиме $q_x \leq q_{\text{ном}}$ ($q_{\text{ном}}$ — тепловой поток на номинальном режиме). Для конкретного дизеля с его системами охлаждения это условие подчиняется закону не превышения температур деталей ЦПГ (температуры цилиндровой втулки, крышки и седла выпускного клапана).

На тренажерах ограничительные характеристики по тепловой напряженности отсутствуют вообще. В работе [12] автором показаны основные упущения в корректности программ тренажеров и построены упрощенные ограничительные характеристики по тепловой напряженности имитируемых двигателей в объеме методического пособия для выполнения курсантами лабораторных работ. В предлагаемой работе представлены уточненные ограничительные характеристики, которые могут быть использованы другими учебными заведениями, имеющими указанные тренажеры.

На рис. 3 показано поле винтовых характеристик двигателя 6S50MC Mark6 фирмы MAN B&W в логарифмических координатах для построения ограничительных характеристик по тепловой напряженности для имитируемых на тренажерах дизелей LGFCA и LMC. Для сравнительного анализа рассмотрены ограничительные характеристики по тепловой напряженности дизеля UEC-L фирмы Mitsubishi в логарифмических координатах (не показаны на рисунке) с форсировкой рабочего процесса, сопоставимой с двигателем LGFCA.

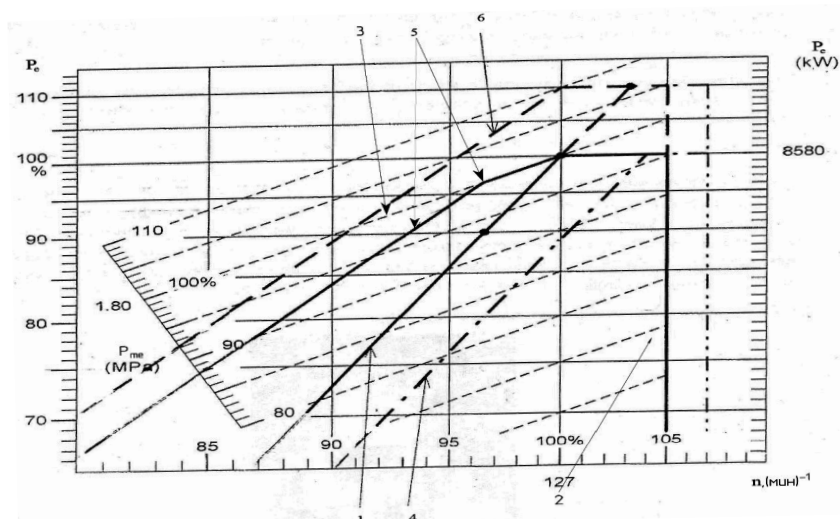


Рис. 3. Ограничительные характеристики по тепловой и механической напряженности в поле винтовых характеристик дизеля 6S50MC Mark 6 в логарифмических координатах:
1 — номинальная винтовая характеристика двигателя; 2 — режимы перегрузки двигателя;
3 — ограничительная характеристика по номинальному значению крутящего момента и среднего эффективного давления;
4 — характеристика рекомендованной гидродинамической «легкости» винта;
5 — ограничительная характеристика по тепловой напряженности двигателя;
6 — режимы перегрузок двигателя

На рис. 4 представлены ограничительные характеристики в поле различных нагрузок более форсированного дизеля UEC60LSII фирмы *Mitsubishi*, который сопоставим по параметрам рабочего процесса с двигателями типа SMC и LMC на графике и в тренажёре. Все характеристики указанных двигателей заимствованы из инструкций по их эксплуатации.

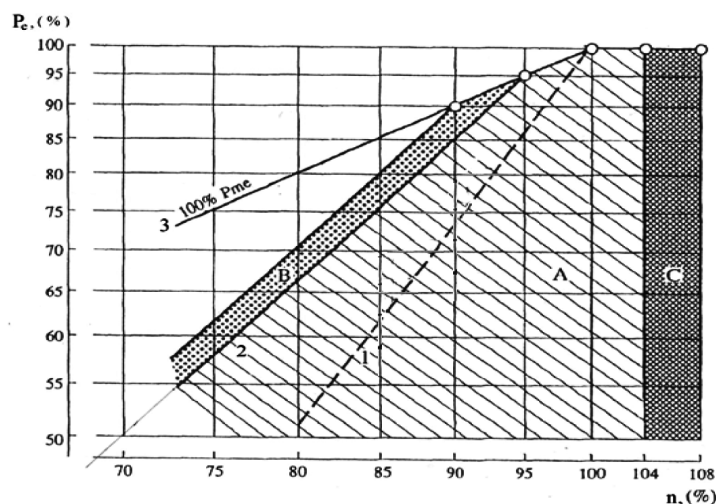


Рис. 4. Винтовые и ограничительные характеристики дизеля UEC60LSII:
1 — винтовая характеристика номинального режима;
2 — граница допускаемых режимов по тепловой напряженности;
3 — ограничительная характеристика по номинальному значению крутящего момента и среднего эффективного давления;
A — зона допускаемые режимы работы дизеля без ограничений;
B — зона режимы перегрузки, допускается работа в течение одного часа через 12 ч;
C — зона режимы перегрузки для ходовых испытаний

Расчеты и анализ протекания ограничительных характеристик по тепловой напряженности дизелей 6S50MC, UECL, UECLS2 показали практически совпадающие между собой в логарифми-

ческих координатах зависимости. При утяжелении винтовой характеристики разрешается работа по ограничительной характеристике $M_{кр.ном}$ только на ее начальном участке до снижения частоты вращения вала на 3,5 – 4,0 %. При дальнейшем утяжелении характеристики рекомендовано уменьшение нагрузки в одинаковой мере на всех указанных дизелях.

На рис. 5 и 6 показано поле винтовых и внешних характеристик двигателя L90GFCA, построенных по данным тренажера для различных условий плавания имитируемого танкера, на котором нанесена ограничительная характеристика по тепловой напряженности, рассчитанная по типовому графику для дизелей S50MC Mark 6 в логарифмических и линейных координатах, в том числе для режимов работы в шуге и мелкобитом льду. Также построены и приведены ограничительные характеристики по тепловой и механической напряженности в поле винтовых характеристик тренажера L90MC в логарифмических и линейных координатах (рис. 5, 7 и 8).

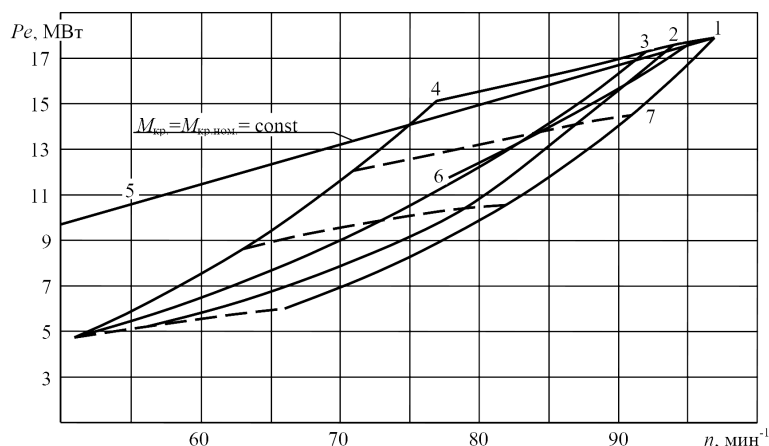


Рис. 5. Ограничительные характеристики двигателя 6L90GFCA в поле винтовых характеристик тренажера DPS100-GFCA в линейных координатах:

1 – 4 — внешняя номинальная характеристика;

1 – 5 — ограничительная характеристика по номинальному $M_{кр}$ и $P_{те}$;

1 – 6 — ые характеристики по тепловой напряженности; 7 — частичная характеристика

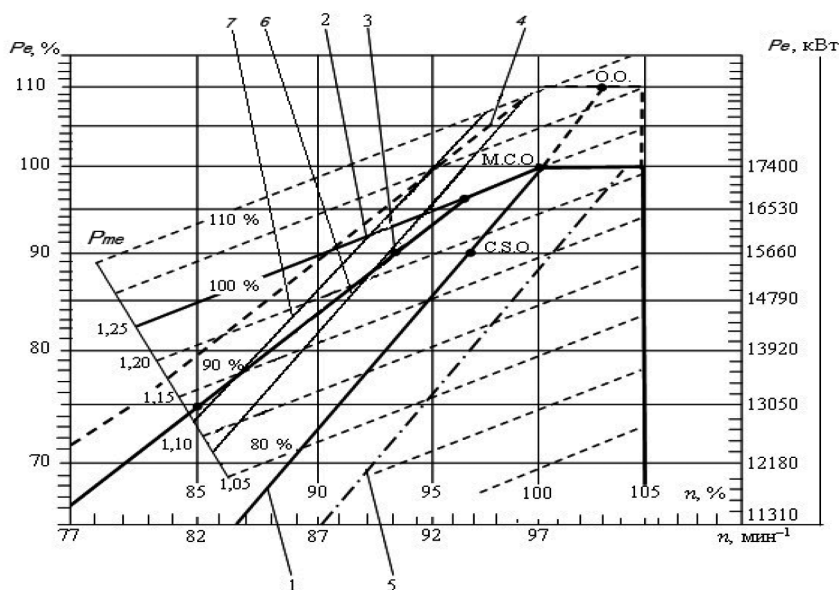


Рис. 6. Ограничительные характеристики дизеля 6L90GFCA в логарифмических координатах:

1 — номинальная винтовая характеристика; 2 — ограничительная характеристика по номинальному значению крутящего момента и среднего эффективного давления; 3 — ограничительная характеристика по тепловой напряженности; 4 — винтовая характеристика предельной мощности; 5 — рекомендованная характеристика для выбора степени легкости винта; 6 — ограничительная характеристика при работе в шуге; 7 — ограничительная характеристика при работе в битом льду

При анализе изменения рабочих параметров дизеля по утяжеленным характеристикам (шуга, битый лед, преодоление ледовых перемычек, швартовый режим) закономерно уменьшается частота вращения, секундный расход отработавшего газа и, соответственно, мощность турбины, давление продувочного воздуха и его плотность, а, следовательно, и коэффициент избытка воздуха при положении указателя нагрузки в положении номинального значения. Однако тренажер дает при этом уменьшение температуры отработавших газов в цилиндре, до и после турбины и далее на деталях ЦПГ, включая режим швартовый характеристики.

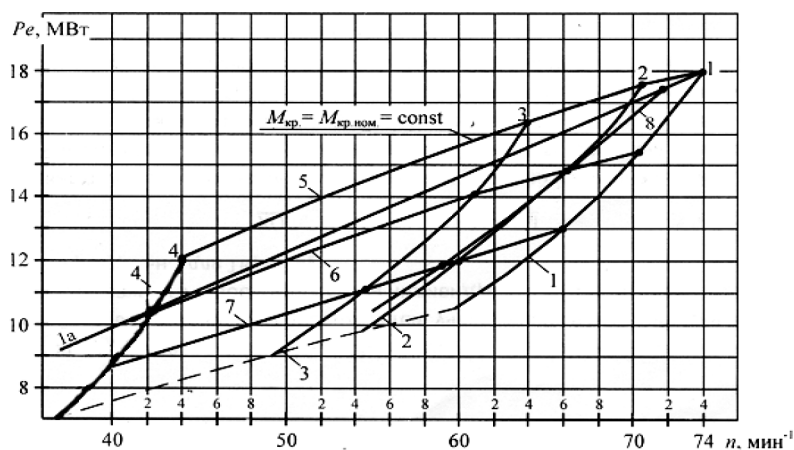


Рис. 7. Ограничительные характеристики двигателя 5L90MC в поле винтовых характеристик тренажера DPS100L-MC в линейных координатах:
1 — номинальная винтовая характеристика; 2 — винтовая характеристика двигателя при работе в шуге; 3 — винтовая характеристика при работе в битом льду;
4 — швартовая винтовая характеристика;
5 — номинальная внешняя характеристика; 6, 7 — частичные характеристики;
1 — 1a — ограничительные характеристики по номинальному значению $M_{кр}$ и P_{me} ;
1 — 8 — ограничительные характеристики по тепловой напряженности

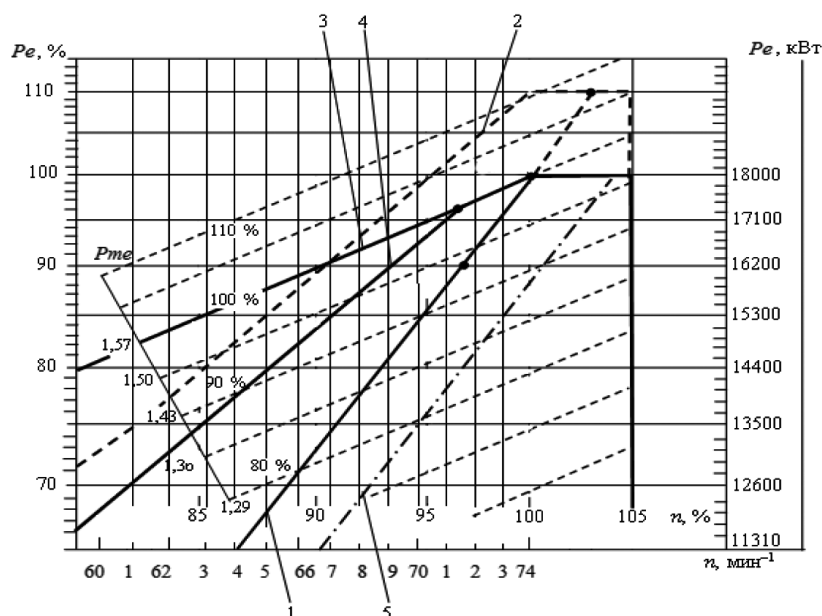


Рис. 8. Винтовые и ограничительные характеристики дизеля 5L90MC в логарифмических координатах:
1 — номинальная винтовая характеристика; 2 — винтовая характеристика максимальной мощности;
3 — ограничительная характеристика по номинальному значению $M_{кр}$, P_{me} ;
4 — ограничительная характеристика по тепловой напряженности;
5 — рекомендованная характеристика для выбора степени легкости винта

Как известно, температура отработавших газов определяет тепловое состояние рабочего тела вне цилиндра, и при падении секундного расхода газа происходит дополнительное расширение газа в более «свободных» газоходах с уменьшением температуры в значениях, характерных для каждой системы газообмена и наддува. Что касается уменьшения при этом температуры деталей ЦПГ и тепловой напряженности, то это очередная ошибка (см. ограничительные характеристики по тепловой напряженности на рис. 5 и 7). Согласно выполненным автором исследованиям, на дизеле 9RD90 [13] при утяжелении винтовой характеристики в условиях шторма 7 – 8 баллов и волнений 5 – 6 баллов по носу частота вращения при постоянном указателе нагрузки снизилась на $3,2 \text{ мин}^{-1}$, температура $t_{ог}$ на цилиндре повысилась на 17° , средняя температура цилиндровой крышки — на 20°C . Относительное увеличение перепада температуры по толщине крышки и соответственно плотности теплового потока составило 8 %. Естественно, степень отклонения параметров будет зависеть от параметров пропульсивного комплекса, таких как гидродинамическая «легкость гребного винта», тип системы наддува и газообмена, удельный расход воздуха на двигатель и других параметров, но характер влияния утяжеленной характеристики на тепловую напряженность дизеля не изменится. Что касается швартовного режима, то тренажер «позволяет» снять винтовую характеристику при зафиксированном номинальном указателе нагрузки без повышения тепловой напряженности. Допускаемый режим по механическим нагрузкам можно определить только по $M_{кр.ном}$ из рис. 5, при котором дизель будет уже значительно перегружен по тепловой напряженности. Ограничительные характеристики по тепловой напряженности на швартовном режиме не попадают в область эксплуатационных режимов на рис. 5 и 7.

Если вводить утяжеление винтовой характеристики при незафиксированной топливной рейке, то в режиме «шуга» регулятор выводит топливную рейку в положение 100 %, мощность возрастает на 7 %, крутящий момент — на 7 % по отношению к номинальным значениям, температуры деталей и отходящих газов возрастают на $5 - 7^\circ \text{C}$; сигнализация о перегрузке по крутящему моменту не срабатывает. В режиме «мелкобитый лед» сигнализация срабатывает, но указатель нагрузки остается в положении 100 %, мощность превышает номинальные значения на 5 %, крутящий момент — на 9 %, температура стенок и газов не изменяется по отношению к менее нагруженному режиму «шуга». И только в швартовном режиме регулятор выводит рейку в положение номинального значения крутящего момента. При этом температура по сравнению с режимом «шуга» понизилась на цилиндровой втулке на 22°C , на цилиндровой крышке — на 23°C , на седле выхлопного клапана — на 33°C , температура отходящих газов на цилиндре понизилась на 38°C и перед турбиной — на 53°C . Так, при испытании двигателя MAN K6Z57/80C по швартовной характеристике в балластном состоянии судна, температура на цилиндровой крышке и цилиндровой втулке достигла номинальных значений при частоте вращения вала $0,72n_{ном}$ [14].

В силу индивидуальности пропульсивного комплекса каждого судна, степени и особенностей наддува ГД устанавливаются пределы допустимых режимных параметров по швартовной характеристике: $n = (0,5 - 0,6)n_{ном}$; $P_{me} = (0,5 - 0,6)P_{me ном}$; $P_e = (0,25 - 0,3)P_{e ном}$ [15].

Обсуждение (Discussion)

В работе рассмотрены основные типы тренажеров машинного отделения, которые используются в высших учебных заведениях морского и рыбопромыслового флота. Описаны их возможности с позиции реалистичности, функциональности и применимости для повышения уровня и качества знаний курсантов и специалистов флота. Данное исследование выполнено на тренажерах типа DPS 100-GFCA и DPS 100L-MC фирмы *Kongsberg Maritime*, которые имитируют работу современных длинноходных дизелей 6L90GFCA и 5L90MC фирмы *B&W* и *MAN B&W* в составе пропульсивного комплекса крупнотоннажных танкеров, включая все элементы и системы силовой установки при различных условиях эксплуатации.

Целью исследований являлась проверка корректности программ, отображающих сложное взаимодействие факторов и параметров при решении комплексных задач, определяющих совмест-

ную работу ГД в составе пропульсивного комплекса судна. Указанные тренажеры действительно обладают большими возможностями для анализа многих эксплуатационных задач, но не все компьютерные программы адекватно отображают характер протекания сложных процессов и параметров, описывающих эти процессы. Основное внимание в статье уделено ошибкам, недоработкам и упрощениям в компьютерных программах по ГД, которые могут оказать отрицательное влияние на уровень знаний и понимание сложных эксплуатационных вопросов. Большинство ошибок наблюдается в моделировании процессов газообмена, наддува и особенно в процессах с нарушениями нормального функционирования топливной аппаратуры с последующим влиянием этих факторов на рабочий процесс и тепловую нагрузку двигателя. Работа двигателя по «тяжелым» винтовым и внешним характеристикам в ледовых условиях не увязана с ростом тепловой напряженности, а ограничительные характеристики по тепловым нагрузкам отсутствуют вообще.

Практическая значимость исследования состоит в корректировке полученных данных, уточнении отдельных задач, особенно в вопросах разработки ограничительных характеристик по тепловой напряженности двигателя. Отмеченные ошибки в моделировании рабочих процессов могут быть полезными для разработчиков тренажеров нового поколения. Выполненные работы [1], [5] – [9] посвящены показателям реалистичности, функциональности тренажеров, эффективности и качества обучения, но совершенно не касаются корректности получаемой на тренажере информации. Автор считает нецелесообразным создание тренажеров по всем позициям Международной конвенции о подготовке, дипломировании и несении вахты моряков (ПДМНВ-78/95), как предлагается в работе [4].

Выводы и предложения (Conclusions and Suggestions)

Показаны основные инженерные задачи по анализу рабочих процессов ГД в эксплуатации. Тренажеры имитируют рабочий процесс ГД в различных условиях плавания судна, в том числе при изменении или нарушении нормального функционирования основных элементов ГД, таких как турбокомпрессор и система воздухообеспечения с ее приборами и устройствами, топливная аппаратура высокого давления и фазы топливоподачи, состояние поршневых колец, гидродинамические параметры гребного винта в составе пропульсивного комплекса судна. Отрабатываются и более простые задачи, связанные с эксплуатацией ГД (например влияние внешних условий на рабочий процесс двигателя и тепловое состояние деталей цилиндропоршневой группы, выполнение стендовых и ходовых испытаний ГД при его работе на винт фиксированного и регулируемого шага с индицированием и осциллографированием параметров индикаторного процесса и топливоподачи, нарушения в работе масляных и охлаждающих насосов и т. д.). Выполнен анализ корректности компьютерных программ, описывающих рабочие процессы, тепловую и механическую напряженность современных дизелей в различных условиях эксплуатации. Выявлены упрощения и неверные представления о взаимосвязях параметров двигателя. Проанализированы ограничительные характеристики по тепловой и механической напряженности современных дизелей S50MC, UECL, UECLS2, показано протекание характеристик в логарифмических координатах для дизелей S50MC и UECLS2. На их основе разработаны и построены указанные характеристики для имитируемых двигателей, которые отсутствовали на тренажерах.

В процессе обучения курсантов и механиков флота на тренажерах следует указывать на отмеченные ошибки, искажающие важнейшие закономерности протекания рабочих процессов в современных дизелях. Работа на тренажерах слушателей разного уровня подготовки должна способствовать совершенствованию грамотного, всестороннего понимания взаимосвязанных процессов в судовой технике. Отмеченные многочисленные упрощения и даже принципиальные ошибки в моделировании сложных процессов в двигателе и пропульсивном комплексе в целом нельзя считать только негативными. После выполнения каждого опыта преподаватель должен поставить перед обучаемыми вопрос: *где и какие диагностические признаки расходятся с алгоритмом выявления неисправностей* и в интерактивной форме дискуссии вместе со слушателями проанализировать полученные результаты.

По мнению автора, оптимальным типом тренажера для обучения курсантов и младших механиков на уровне эксплуатации является тренажер типа DPS 100-GFCA, который является реальным полномасштабным прототипом ЦПУ силовой установкой крупнотоннажного судна. Высокая информативность, реалистичность процессов и полный объем получаемой информации позволяют обучаемому видеть в комплексе состояние всей силовой установки и пропульсивного комплекса судна на любых режимах работы, не обращаясь к страницам на мониторе. Умение видеть и правильно использовать эту информацию является основной задачей механика-эксплуатационника. Для обучения механиков на уровне управления необходимы тренажеры только с высокой корректностью программ, которые позволят специалисту рассмотреть важные вопросы для повышения уровня собственных знаний и квалификации. В данных случаях важна грамотная консультация инструктора, ибо на тренажере с примитивной информацией специалист даже посредственного уровня потеряет интерес к работе и обучаться не станет.

Надежная работа современных форсированных двигателей возможна только при грамотной и культурной их эксплуатации. Тренажерная подготовка должна проходить только совместно с лекционными занятиями для повышения теоретической и практической подготовки специалистов, для выработки умения анализировать сложные процессы, протекающие в элементах судовой техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соболенко А. Н.* Обобщение опыта эксплуатации тренажеров машинного отделения морского судна / А. Н. Соболенко, Ю. А. Корнейчук, Д. К. Глазюк // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 2. — С. 59–69.
2. Международная конвенция о подготовке, дипломировании и несении вахты моряков (ПДМНВ-78/95). — СПб.: Изд-во ЦНИИМФ, 1996. — 552 с.
3. Международный кодекс по управлению безопасностью (МКУБ) и руководства по его выполнению. — СПб.: Изд-во ЦНИИМФ, 2014. — 152 с.
4. *Vagabov I. I.* Diesel Simulator as Unique Means for Bringing of Marine Engineers' Competence in Conformity with the Requirements of the STCW 95 Convention / I. I. Vagabov, A. N. Sobolenko, Y. A. Korneychuk // Proc. of 5th Intern. Conf. on Engine Room Simulators (Singapore, 25-26 June 2001). — Singapore Polytechnic and Maritime Academy, 2001. — Pp. 158–166.
5. *Соболенко А. Н.* Обобщение опыта тренажерной подготовки судомехаников / А. Н. Соболенко // Материалы и доклады Междунар. науч.-технич. конф. «Фундаментальные исследования океанотехники и морской инфраструктуры: Теория. Эксперимент. Практика». — Комсомольск-на-Амуре, 2015. — С. 200–203.
6. *Соболенко А. Н.* Повышение эффективности и безаварийности работы СЭУ посредством тренажерной подготовки её операторов / А. Н. Соболенко, Д. К. Глазюк // Рыбное хозяйство. — 2014. — № 1. — С. 12–14.
7. Kongsberg Maritime [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.km.kongsberg.com/ (дата обращения: 03.04.2018).
8. *Сафин И. В.* Анализ опыта и технологии организации тренажерной подготовки по повышению компетенции инженерно-технического персонала судна на уровне управления в предрейсовый период / И. В. Сафин, К. Л. Обертюр // Судовые энергетические установки. — 2011. — № 28. — С. 92–98.
9. *Дорогань О. И.* Средства поэтапной подготовки специалистов по эксплуатации судового оборудования / О. И. Дорогань, В. М. Рябенский, А. О. Ушкаренко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. — 2014. — № 1. — С. 85–93.
10. *Боран-Кешишьян А. Л.* Надежность эргатических составляющих морских тренажерно-обучающих систем / А. Л. Боран-Кешишьян, Е. В. Хекерт // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 2. — С. 99–102.
11. *Возницкий И. В.* Судовые двигатели внутреннего сгорания: в 2 т. / И. В. Возницкий, А. С. Пунда. — М.: Моркнига, 2008. — Т. 2. — 470 с.
12. *Кучеров В. Н.* Проверка корректности программ тренажеров «Dieselsim» и построение ограничительных характеристик по тепловой напряженности дизелей / В. Н. Кучеров // Вестник морского государственного университета. — 2016. — № 74. — С. 114–118.

13. Кучеров В. Н. Условия охлаждения и повышение надежности цилиндропоршневой группы судовых малооборотных дизелей: дис. ... канд. техн. наук / Владимир Никанорович Кучеров. — Л.: ЛВИМУ им. адм. С. О. Макарова, 1986. — 331 с.

14. Кучеров В. Н. Работа дизеля по швартовной характеристике / В. Н. Кучеров // Вестник морского государственного университета. Серия: Судостроение и судоремонт. — 2015. — № 69. — С. 45–50.

15. Гаврилов В. С. Техническая эксплуатация судовых дизельных установок / В. С. Гаврилов, С. В. Камкин, В. П. Шмелев. — М.: Транспорт, 1975. — 295 с.

REFERENCES

1. Sobolenko, Anatoliy Nickolaevich, Yuriy Alekseevich Korneychuk, and Dmitry Konstantinovich Glazyk. "Summary of the operation practice of marine engine-room simulators." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2016): 59–69.

2. *Mezhdunarodnaya konventsia o podgotovke, diplomirovanii i nesenii vakhty moryakov (PDMNV-78/95)*. SPb.: ZAO TsNIIMF, 1996.

3. *Mezhdunarodnyi kodeks po upravleniyu bezopasnost'yu (MKUB) i rukovodstva po ego vypolneniyu*. SPb.: ZAO TsNIIMF, 2014.

4. Vagabov, I. I., A. N. Sobolenko, and Y. A. Korneychuk. "Diesel Simulator as Unique Means for Bringing of Marine Engineers' Competence in Conformity with the Requirements of the STCW 95 Convention." *Proc. of 5th Intern. Conf. on Engine Room Simulators (Singapore, 25-26 June 2001)*. Singapore Polytechnic and Maritime Academy, 2001. 158–166.

5. Sobolenko, A. N. "Obobshchenie opyta trenazhernoi podgotovki sudomekhanikov." *Materialy i doklady Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Fundamental'nye issledovaniya okeanotekhniki i morskoi infrastruktury: Teoriya. Eksperiment. Praktika»*. Komsomol'sk-na-Amure, 2015. 200–203.

6. Sobolenko, A. N., and D. K. Glazuk. "Improvement of efficiency and fail-safety of marine engines by means of their operators' simulator training." *Fisheries* 1 (2014): 12–14.

7. Kongsberg Maritime. Web. 3 Apr. 2018 <www.km.kongsberg.com/>.

8. Safin, I. V., and K. L. Obertyur. "Analiz opyta i tekhnologii organizatsii trenazhernoi podgotovki po povysheniyu kompetentsii inzhenerno-tekhnicheskogo personala sudna na urovne upravleniya v predreisovyi period." *Sudovye energeticheskie ustanovki* 28 (2011): 92–98.

9. Dorogan', O. I., V. M. Ryaben'kii, and A.O. Ushkarenko. "Credstva po etapnoi podgotovki spetsialistov po ekspluatatsii sudovogo oborudovaniya." *Naukovii visnik Khersons'koï derzhavnoi mors'koï akademii* 1 (2014): 85–93.

10. Boran-Keshish'yan, A. L., and E. V. Khekert. "Reliability of ergatic components of marine simulation training systems." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 2 (2012): 99–102.

11. Voznitskii, I. V., and A. S. Punda. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya*. Vol. 2. M.: Morkniga, 2008.

12. Kucherov, V.N. "Proverka korrektnosti programm trenazherov «Dieselsim» i postroenie ogranichitel'nykh kharakteristik po teplovoi napryazhennosti dizelei." *Vestnik morskogo gosudarstvennogo universiteta* 74 (2016): 114–118.

13. Kucherov, V. N. *Usloviya okhlazhdeniya i povyshenie nadezhnosti tsilindroporshnevoi gruppy sudovykh malooborotnykh dizelei*. PhD diss. L.: LVIMU im. adm. S. O. Makarova, 1986.

14. Kucherov, V. N. "Rabota dizelya po shvartovnoi kharakteristike." *Vestnik morskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sudostroyeniye i sudoremont* 69 (2015): 45–50.

15. Gavrilov, V. S., S. V. Kamkin, and V. P. Shmelev. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya sudovykh dizel'nykh ustanovok*. M.: Transport, 1975.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кучеров Владимир Никанорович —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Морской государственный
университет имени адмирала Г. И. Невельского»
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, д.50а
e-mail: Nadezkin@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kucherov, Vladimir N. —
PhD, professor
G.I. Nevelskoy Maritime State University
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: Nadezkin@msun.ru

Статья поступила в редакцию 24 мая 2018 г.
Received: May 24, 2018.