

- Colorado. 1974.-200p.
4. Straty G.C., Goodwin R.D. Dielectric constants and polarizability of saturated and compressed fluid nitrogen // Cryogenics.-1973.-vol.36.-p.712...715.
 5. Komissarov K.B., Moiseenko A.E., Muravlyov O.I., Frolov A.B. Experimental installation for the research of the electrical properties of liquefied gases. "Issues of power engineering and cryogenic equipment on the railway", Rostov-on-Don, РИИЖТ, 1988.- 66-74.
 6. Komissarov K.B., Moiseenko A.E. Experimental stand for the study of cryoagents and their electro-physical properties. Department in All-Union Institute of Scientific and Technical Information № 3956-B-916. 1991.
 7. Natural gas as a motor fuel for transport / F.G. Gainullin, A.I. Gritsenko, Yu.N. Vasiliev, L.S. Zolotar-evsky. M.: Nedra, 1986. 225 c.
 8. Komissarov K.B. Constructive and technological features of liquefied gas gasifiers and cryogenic fuel systems for transport engines. Rostov-on-Don: Rostov State Transport University. 1996. 164 c.
 9. Straty G.C., Goodwin R.D. Dielektrik Constant and Polarizability of Saturated and Compressed Fluid Methan.- Gryogenics. 1973,vol.13, p.712.
 10. Kondrat'ev S.I. Teoreticheskie osnovy upravleniya krupnotonnazhnymi sudami po kriteriyam bezopasnosti i energosberezheniya. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Novorossiysk, 2004.
 11. Hekert E.V., Nikolaev N.I., Gerasidi V.V. Kontrol' sostoyaniya dvigatelya firmy "CATERPILLAR" SAT 3512 gruntonasosnoj ustanovki zemsnyarada po vibracionnym parametram/Morskije intelektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-1 (39). S. 100-105.

УДК 621.431.74

DOI: 10.34046/aumsuomt91/17

ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ И ДВИГАТЕЛЕЙ СУДОВ ПОРТОВОГО ФЛОТА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПГ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА

А.И. Епихин, кандидат технических наук, доцент

С.А. Худяков, доктор технических наук, профессор

Статья посвящена практическим вопросам, решение которых играет ключевую роль в разработке и реализации проектов переоборудования судовых дизельных ДВС портового флота для использования газового топлива. Проанализирована структура судов портового флота, выявлены основные типы и модели используемых двигателей. Предложены типовые решения, позволяющие организовать мелкосерийное производство комплектов для экономически обоснованной конверсии ДВС в рамках осуществления текущих ремонтов.

Ключевые слова: газовая топливная система, переоборудование дизельного двигателя, экологические нормы выбросов, сгорание топлива, цена топлива.

This article is devoted to decision of practical problems, which help to develop and implement the projects of marine diesel engines conversion for gas fuel use. The structure and specifications of port fleet were explored and the basic types and models of diesel engines were found. Several typical solutions were suggested for small-series production of basic set of hardware for economically viable conversion of engines during the service and maintenance of vessels.

Keywords: gas fuel system, diesel engine conversion, ecologic exhaust regulation, fuel combustion, price of fuel.

Введение (Introduction)

В конце второй декады XXI века вопрос переоборудования судов для использования СПГ в качестве топлива получил дополнительную актуальность, поскольку, помимо высоких цен на традиционные виды морского топлива, существенно ужесточились экологические нормы, ограничивающие вредные выбросы в атмосферу, и просматривается тенденция к дальнейшему их ужесточению.

Проблематика рассматриваемого вопроса включает себя комплекс частных задач и условий, носящих конструктивный, технический, технологический и организационный характер,

при этом конкретных подходов к практической реализации мероприятий по переоборудованию судов на настоящий момент не выработана – большинство публикаций носит исключительно экономический характер.

Актуальность проблемы (The urgency of problem)

Актуальность отказа от использования нефтепродуктов в качестве моторного топлива для судов на протяжении последних лет продиктована двумя важнейшими факторами – ростом стоимости традиционных видов жидкого топлива и ужесточающимися экологическими нормами. Динамика оптовых цен на дизельное топливо в

РФ приведена на рисунке 1, там же приведен график, иллюстрирующий рост портовых сборов. Анализ данных позволяет понять, что для обеспечения экономической целесообразности портовой деятельности необходимо либо повышать ставки и тарифы портовых сборов (компетенция Федеральной службы по тарифам), либо снижать их себестоимость. Представляется очевидным, что наиболее рациональным способом является снижение себестоимости эксплуатационных из-

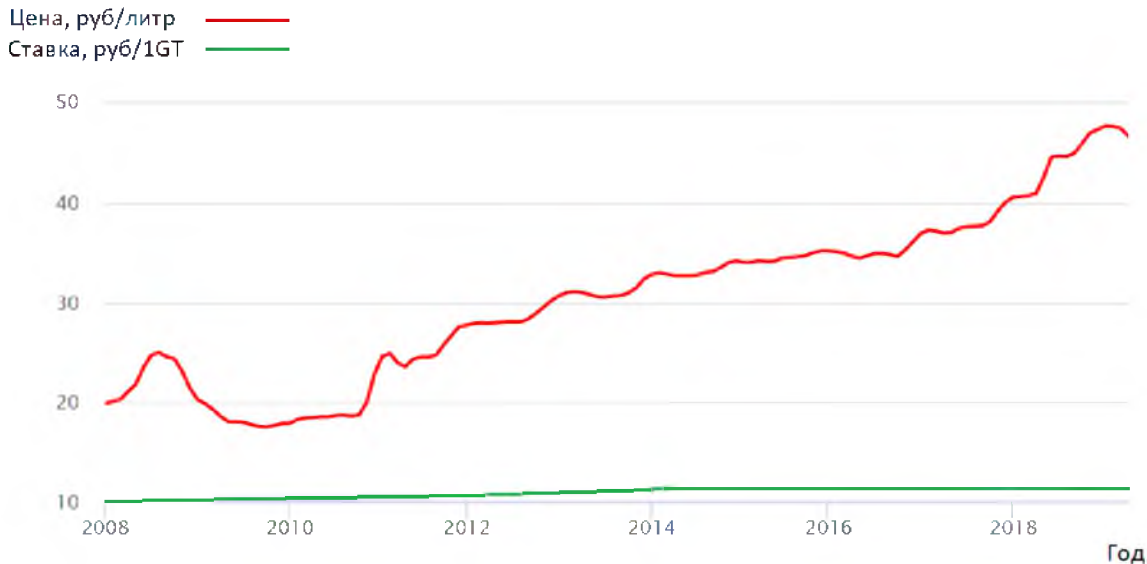


Рисунок 1 – Сравнение динамики роста оптовых цен на дизельное топливо и усредненного тарифа по корабельным сборам в портах РФ

Тенденция к ужесточению экологических норм MARPOL Tier, регулирующих предельно допустимые выбросы вредных веществ от судовых ДВС в атмосферу (NO_x , SO_x , CO_x и пр.), уже привела к невозможности эксплуатации судов, не соответствующих жестким требованиям, в некоторых акваториях (Балтийское и Северное море, побережье США, Северный ледовитый океан), и в ближайшие годы площадь таких акваторий существенно увеличится. Также в контексте экологии следует учесть возможные загрязнения в случаях аварий на судах, что вносит дополнительный негативный вклад в риски нарушения экосистем. Применительно к традиционно используемому в отечественном портовом флоте ДВС, существуют лишь три очевидных и реализуемых на практике пути снижения вредных выбросов в атмосферу от судов портового флота [2]:

- переход на более дорогостоящие виды жидкого топлива (газойль и прочие дистилляты), не требующие существенных дополнительных расходов на переоборудование судов;
- использование газового топлива, требующего переоборудования ДВС и топливной системы;

держек, при этом значительная их часть приходится на портовый флот.

Экономический эффект от использования СПГ в качестве топлива для судов портового флота может быть ориентировочно оценен в 20-25% [1], однако, стоимость модернизации судов может быть достаточно высока, ввиду чего оценку срока окупаемости необходимо производить отдельно для каждого типа судов и конкретных моделей судовых ДВС.

- использование современных систем механической и каталитической очистки отработанных газов.

Первый вариант при действующих ценах на топливо не соответствует критериям экономической целесообразности, второй вариант требует значительных расходов на переоборудование и вывода судна из эксплуатации на некоторый период времени, третий является труднореализуемым по конструктивным соображениям, поскольку большинство судов портового флота характеризуются малыми габаритами и отсутствием геометрической возможности для установки громоздкого дополнительного оборудования.

Характеристика судов портового флота (The port fleet vessel specifications)

Для судов портового флота наибольшей численностью характеризуются буксиры, ввиду чего представляется целесообразным рассмотреть проблематику статьи именно в проекции на буксирные суда. Структура буксирного флота РФ по сроку эксплуатации судов приведена на рисунке 2.

Средний возраст буксиров, эксплуатируемых в портах РФ, составляет порядка 27 лет, что позволяет сделать выводы об их неполном соответствии современным экологическим нормам и

значительной степени выработки ресурса. Таким образом, в ряде случаев появляется возможность компенсировать потенциальные потери времени на вывод из эксплуатации для переоборудования за счет одновременного проведения трудоемких операций по техническому обслуживанию и текущему ремонту.

В таблице 1 приведены наиболее распространенные модели судов портового флота и основные параметры их ДВС, представляющие практический интерес в контексте рассматриваемой проблематики.

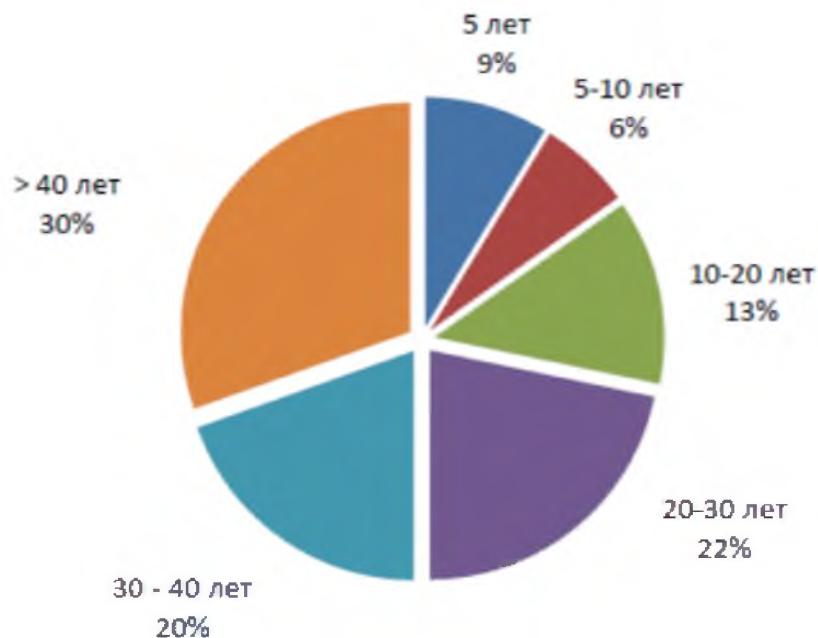


Рисунок 2 – Структура буксирного флота по возрасту судов

Таблица 1 – Наиболее распространенные суда портового флота РФ

Модель ДВС	Проект	Год нач. вып.	Кол-во в экспл.*	Мощность, кВт	Тип двигателя
2× 6 ДР-30/50-4-2	498	1962	150	600	Ряд, 6ц, 2т, б/к, рев.
2X 8ЧНП 25/34	04983	1983	80	590	Ряд, 8ц, 4т, т/к охл, нерев.
2× Cummins KTA50M2 / 2X Cat C32	90600	2003	41	1044 / 746	V-обр, 12ц, 4т, т/к охл, нерев. / Ряд, 6ц, 4т, т/к охл., нерев.
2× Cat3512C	16609	2004	33	1500	V-обр, 12ц, 4т, т/к охл, нерев.
2× 726MTBF-40	134	1968	30	852	Ряд, 8ц, 2т, б/к, рев.
2× 8ЧНСП 18/22	P-47	1975	30	232	Ряд, 8ц, 4т, б/к, т/к охл, нерев.
2× MTU 16V4000M63R	02790	2011	10**	1684	Ряд, 16ц, 4т, т/к охл, нерев.
2× CatC280	02980	2016	7**	1245	V-обр, 8ц, 4т, т/к охл, нерев.
2× Cat C18	04690	2015	5**	448	Ряд, 6ц, 4т, т/к охл, нерев.
2× МАК 6M25	21110	2005	2**	2650	Ряд, 9ц, 4т, т/к охл, нерев.

Примечание: (*) информация о количестве судов каждого проекта получена из различных открытых источников и может быть неточной. (**) для судов постройки после 2010 года количество указано без учета строящихся в настоящее время судов.

Особенности переоборудования судовых дизельных ДВС для использования газообразного топлива (The features of marine diesel engines conversion for gas fuel usage)

Разнообразие типов и моделей используемых на буксирном флоте РФ двигателей (двух- и четырехтактные, с механическим и электронным управлением и т.п.) не позволяет разработать единый подход к переоборудованию их для функционирования в двухтопливном режиме. Также следует отметить, что существенное влия-

ние при разработке проекта переоборудования на выбор конструктивных и технологических решений оказывает предполагаемый к использованию тип и состав газообразного топлива – например, в состав СПГ входит, преимущественно, метан, а также примеси различных прочих газообразных углеводородов в различных концентрациях, диоксид углерода, водяные пары и прочие элементы, при этом молекулярная масса неметановых углеводородов в составе СПГ, как правило, существенно больше, чем у метана, и обладает более высокой энергией, выделяемой при сгорании,

что, в свою очередь, может приводить к существенным детонационным явлениям при работе ДВС [3].

Метан, в свою очередь, обладает высоким октановым числом (порядка 130), что позволяет судить о высоких антидетонационных свойствах при использовании его в поршневых ДВС с искровым зажиганием, что, в свою очередь, является неблагоприятным для двигателей с воспламенением от сжатия, поскольку в них требуется достижение значительно более высокой степени сжатия, в процессе достижения которой возможно спонтанное воспламенение топливовоздушной смеси. Значимость данного фактора трудно переоценить, поскольку он оказывает принципиальное влияние на стабильность рабочего цикла всей судовой энергетической установки в целом.

Анализ мировой практики переоборудования дизельных двигателей для использования газа в качестве топлива показал [3], что существуют два теоретических способа минимизации процессов самовоспламенения смеси в процессе сжатия ранее ВМТ – это снижение компрессии в цилиндрах на величину порядка 15% при сжатии предварительно подготовленной топливовоздушной смеси или использование впрыска газа под высоким давлением в камеру сгорания непосредственно в момент воспламенения. В обоих случаях используется пилотный впрыск незначительной дозы дизельного топлива для инициирования процесса воспламенения в количестве, определяемом конструктивными и технологическими особенностями конкретного проекта.

Наиболее часто при переоборудовании дизельных ДВС используется первый способ, когда подача газо-воздушной смеси в цилиндр осуществляется при низком давлении, с последующим ее нагревом за счет сжатия и впрыском запального топлива в момент прохождения ВМТ [4, 7, 8].

Второй из перечисленных способов менее технологичен ввиду физико-химических особенностей рассматриваемого газообразного топлива, и требует использования более специфического и дорогостоящего оборудования, а также способствует повышению опасности процессов функционирования ДВС, но при этом характеризуется большими значениями термического КПД двигателя. Для обоснования выбора такого варианта рабочего процесса необходимо оценивать не только ценовую составляющую, но и энергетические потери на обеспечение высокого давления при впрыске газа в цилиндр. Поскольку задачи исследования носят общий характер, представля-

ется целесообразным использование первого, более универсального способа.

Также практика переоборудования судовых, железнодорожных и энергетических дизельных ДВС для использования газа в качестве топлива показывает, что снижение компрессии для стабилизации газового режима работы неминуемо влечет за собой снижение мощности в дизельном режиме, что может быть компенсировано внесением конструктивных изменений в ЦПГ, особенно для двигателей устаревших конструкций – оптимизация формы рабочих поверхностей ГБЦ и головок поршней позволяет в большей степени нивелировать потери КПД. Температура пламени при сгорании в кислороде для СПГ составляет порядка 2100 °С, что почти вдвое превышает значение аналогичного показателя дизельного топлива (1100 °С) – соответственно, в большинстве случаев переоборудования необходимо внести соответствующие изменения в систему охлаждения цилиндров и нагнетателя [3].

Снижение мощности дизельных ДВС при переводе на использование газообразного топлива, в конечном итоге, составляет единицы процентов [3], что в полной мере компенсируется экономическим эффектом от снижения стоимости топлива.

Несмотря на логичность отказа от использования жидкого топлива при переоборудовании рассматриваемых ДВС, в подавляющем большинстве случаев возможность его использования сохраняется. Несмотря на очевидные негативные факторы, такие как потеря мощности и нарушение оптимальных режимов работы ввиду внесенных конструктивных изменений в ходе оптимизации для использования в качестве топлива СПГ, а также значительные объемы корпуса судна, занимаемые танками для жидкого топлива, жидкостную топливную систему невозможно демонтировать ввиду использования ее в качестве запальной. Также, наличие второй топливной системы позволяет использовать ее в качестве резервной, что без дополнительных затрат существенно повышает общий уровень надежности при технической эксплуатации судна. При наличии исходной топливной системы, в целях увеличения срока службы переоборудованных ДВС, представляется целесообразным использование режима запуска на дизельном топливе с последующим автоматическим переключением на газообразное по достижении номинальной частоты вращения и рабочей температуры.

Технические решения и основные проблемы практической реализации
(The technical solutions and basic problems of realization)

В качестве первой и наиболее важной проблемы, связанной с переоборудованием судовых дизелей для использования в качестве топлива СПГ, следует рассматривать различия в физике условий сгорания топлива – без внесения конструктивных изменений в ЦПГ и корректировки технологического процесса сгорания топливной смеси невозможно достичь приемлемых показателей либо по режиму работы, либо по КПД двигателя [3]. Дополнительно следует отметить, что в рамках рассматриваемой тематики нередко упускается важная особенность терминологии – экономически оправданным способом переоборудования судовых дизельных ДВС является только использование газо-дизельного, а не газового процесса сгорания, когда для воспламенения газозоообразной топливной смеси используется запальная порция дизельного топлива, а не принудительное искровое зажигание, требующее более глубокой доработки конвертируемого ДВС [4].

В качестве второй ключевой проблемы переоборудования ДВС следует рассматривать корректный выбор типа используемого газа, поскольку их физико-химические характеристики существенно различаются как при процессе сгорания, так в остальных технологических процессах, связанных с использованием газозоообразного топлива для судовых двигателей.

Вне зависимости от конструкции и цикла работы дизельного ДВС, для его переоборудования под использование газозоообразного топлива используются следующие дополнительные или дорабатываемые элементы:

- ГБЦ. Необходимо наличие дополнительного отверстия для клапанов впуска газа в каждом цилиндре;

- Головка поршня. Высота должна быть уменьшена для снижения компрессии, поверхность фрезерована под специальный профиль, обеспечивающий наилучшие завихрения топливозоообразной смеси в процессе движения поршня для лучшего перемешивания компонентов;

- Газовый клапан. Обеспечивает впуск газозоообразного топлива в цилиндры – целесообразно использовать клапаны с электронным управлением для получения возможности точной настройки параметров газового режима ДВС, а также для исключения необходимости замены или доработки распределительных валов;

- Дизельные форсунки. При наличии механически управляемых форсунок, необходимо обеспечить, как минимум, электрически или пневматически управляемый отсечной гидравлический клапан, позволяющий ограничить впрыск дизельного топлива в цилиндр до минимально требуемого запального объема. Оптимальным решением является переоборудование топливной системы на электронное управление, но данное решение требует дополнительного экономического обоснования;

- Электронный блок управления необходим для реализации управления и контроля функций смены режимов функционирования ДВС и обеспечения технической и технологической безопасности;

- Газовая топливная система. Состоит из трубопроводов, емкостей для хранения, а также автоматики безопасности;

- Система охлаждения. Ввиду повышенной температуры сгорания рассматриваемого газозоообразного топлива, предполагается реализация мер по повышению эффективности системы охлаждения ДВС. В качестве базового варианта целесообразно использование дополнительного электрического или механического циркуляционного насоса, подключаемого при использовании газового режима ДВС, с целью повышения расхода охлаждающей жидкости, вне зависимости от типа и конструкции системы охлаждения.

Особое внимание при разработке проектов переоборудования двигателей необходимо уделять организации системы хранения СПГ на судах [5]. Существует три варианта организации:

- сборки из стандартных промышленно производимых баллонов, объединенных единой рампой;

- стационарно монтируемые емкости;

- сменные топливные емкости.

Использование сборок из стандартных баллонов целесообразно при отсутствии на судах достаточных единых объемов для размещения стационарных емкостей, поскольку в данном случае существенно увеличивается вес топливной системы, но пространство используется более равномерно и возникает возможность распределения баллонов для более рационального использования свободных объемов судна и корректной центровки его по массе. Данный вариант характеризуется наибольшей стоимостью реализации.

Использование стационарных емкостей позволяет, в сравнении с первым вариантом, снизить вес системы хранения СПГ и стоимость

оборудования, но требует наличия соответствующих геометрических возможностей для их размещения.

Использование сменных топливных емкостей для СПГ позволяет существенно снизить потери времени, расходуемого на заправку судна, за счет смены порожних емкостей на заполненные. Данный вариант пригоден для реализации при наличии возможности установки таких емкостей на палубе, и незначительно отличается по цене от стационарных танков.

Дополнительные требования к разработке проектов переоборудования судов для использования СПГ в качестве топлива вносят действующие и перспективные нормативные документы. К наиболее важным положениям рассмотренных в рамках анализа нормативов следует отнести, в первую очередь, два подхода к конструктивной реализации систем питания двигателей газообразным топливом: предполагается два варианта реализации систем [6] – газоопасный и газобезопасный.

Газоопасный метод предполагает реализацию систем хранения, распределения, регулирования и транспортировки открытым способом, а меры безопасности сводятся к установке в зонах вероятных утечек газоанализаторов, получения сигнала срабатывания которых приводит к отключению подачи газа. Использование такого типа газотопливной системы характеризуется наименьшей стоимостью оборудования и трудоемкостью реализации, однако, считается допустимым при наличии резервной жидкотопливной системы, поскольку назначение и функции рассматриваемых судов не предполагает возможности аварийной остановки двигателей без неприемлемого уровня повышенного риска.

Газобезопасный метод предполагает прокладку трубопроводов, регулирующего оборудования и систем хранения в специальных вентилируемых кожухах, изолированных от основных внутренних объемов судна и помещений. Такой вариант реализации газовой топливной системы практически полностью снижает риски образования пожаро- и взрывоопасных концентраций газов, но при этом значительно повышает технологическую сложность и стоимость реализации проекта переоборудования.

Также следует дополнительно отметить, что при разработке проекта переоборудования жидкотопливных ДВС для использования газообразного топлива необходимо прорабатывать технические нормы и инструкции по эксплуатации, ТО и Р, поскольку использование новых (нестандартных) режимов функционирования рабочего цикла ДВС требует иных подходов к

организации технологического процесса эксплуатации.

Заключение (Conclusion)

Таким образом, можно утверждать, что наиболее рациональным и экономически целесообразным решением при разработке проектов переоборудования дизелей судов портового флота для использования газового топлива являются типовые экономичные решения для конкретных моделей двигателей, предполагающие двухтопливный режим работы, с газоопасным исполнением топливной системы и резервным дизельным режимом, при реализации электронного управления подачей топлива. Предполагаемые комплекты ЗИП для переоборудования типовых ДВС, при адаптации к мелкосерийному производству, характеризуются незначительной стоимостью изготовления, монтажа и пуска наладки, и при этом позволяют в наибольшей степени обеспечить как существенное снижение вредных выбросов, так и экономию на стоимости топлива.

В качестве нерешенных вопросов комплексной проблемы переоборудования дизельных ДВС для использования газового топлива остаются особенности организации процесса бункеровки судов, требующие принятия организационных решений на местном уровне, а также переподготовки кадров для обеспечения корректной эксплуатации переоборудованных и двухтопливных ДВС судов в целом.

Существенным препятствием в реализации проекта переоборудования дизелей портового флота на газовое топливо является отсутствие требований на эту модернизацию в Правилах Российского МРС.

Литература

1. Безюков О.К., Жуков В.А., Яценко О.И. Газомоторное топливо в водном транспорте // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова.–2014.– №6.
2. Taufiq Chougle. 7 Ways for ships to meet MARPOL NOx Tier III Regulation // MarineInSight news.– 2017.– 10.
3. Norman L. Helgeson and others. User guide for conversion to dual fuel operation of EMD 645 engines on navy generator sets. Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme (California, USA), 1997.
4. Ведрученко В.Р. и др. О технических решениях при переводе транспортных и судовых ДВС на использование газообразного топлива // Омский научный вестник.–2014.– №4.
5. Хасанов И.И., Гимаева А.Р. Особенности бункеровки топлива для судов на сжиженном природ-

ном газе // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья.–2017.– № 3.

6. Шурпяк В.К., Власов А.А., Пронин Е.Н. Разработка требований Российского Морского Регистра Судоходства по использованию газа в качестве топлива на судах, не являющихся газовозами // Материалы Международная конференция по судостроению, судоходству, деятельности портов и освоению океана и шельфа «НЕВА-2011».– Санкт-Петербург, 2011.
7. Худяков С.А., Башкатов В.А. Особенности дизелей фирмы MANB&W серии ME-GI и их топливной системы // Эксплуатация морского транспорта.–2018.– №2 (87).
8. Худяков С.А., Башкатов В.А. Системы подвода газа для дизелей фирмы MANB&W серии SME-GI // Эксплуатация морского транспорта.–2018.– №3 (88).

References

1. Bezjukov O.K., Zhukov V.A., Yashenko O.I. The gas-motor fuel on the marine transport // The messenger of State University of marine and river fleet named S.O.Makarov, #6/2014
2. Taufiq Chougle. 7 Ways for ships to meet MARPOL NOx Tier III Regulation // MarineInSight news, 10/2017

3. Norman L. Helgeson and others. User guide for conversion to dual fuel operation of EMD 645 engines on navy generator sets. Naval Facilities Engineering Service Center, Port Huenme (California, USA), 1997

4. Vedruchenko V.R. and oth. The technical solutions in conversion or transport and marine engines for gas fuel usage // Omsk scientific messenger, #4/2014
5. Khasanov I.I., Gimayeva A.R. The particular features for bunkering of LNG-fueled vessels // Transportation and storage of oil-products and hydrocarbon materias, #3/2017
6. Shkrupyak V.K., Vlasov A.A., Pronin E.N. The development of Russian State Marine Register regulations for gas usage as a fuel for non-gas-carrying vessels // The materials of International conference for shipbuilding, shipping, port practice, ocean and shelf exploration “NEVA-2011”, Saint-Petersburg, 2011
7. Khudyakov S.A., Bashkatov V.A. Features of MAN B & W diesel engines of the ME-GI series and their fuel system // Sea Transport Operation, No. 2 (87), 2018
8. Khudyakov S.A., Bashkatov V.A. Gas supply systems for diesel engines of the company MAN B & W series SME-GI // Operation of maritime transport, No. 3 (88), 2018.