

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.436

О. К. Безюков,
В. А. Жуков,
К. А. Воробей

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Статья посвящена оценке энергетического и экологического эффекта, полученного в результате использования в судовых энергетических установках газопоршневых двигателей. Приведена сравнительная характеристика газомоторных топлив, проанализирован опыт их использования на водном транспорте. Для двигателя ТМЗ-8481, конвертированного в судовую, выполнены расчеты показателей рабочего цикла и состава отработавших газов при использовании различных видов топлива. Показана перспективность применения газопоршневых двигателей внутреннего сгорания в условиях ужесточения экологических требований к судовым энергетическим установкам. Сформулированы задачи, требующие решения при внедрении газопоршневых двигателей внутреннего сгорания на водном транспорте. Для достижения максимального энергетического и экологического эффекта необходима комплексная модернизация основных систем газопоршневых двигателей: топливоподдачи, наддува, охлаждения, автоматического регулирования, обеспечение безопасности судовых энергетических установок с газопоршневыми двигателями. Отмечается, что сокращение затрат, связанных с внедрением газопоршневых двигателей, может быть обеспечено за счет совершенствования проектирования и эксплуатации газопоршневых двигателей и максимального использования инфраструктуры, созданной для наземного транспорта, работающего на газовом топливе.

Ключевые слова: газовое топливо, газопоршневые двигатели, энергетические показатели, экологические требования, состав отработавших газов, безопасность эксплуатации.

АКТУАЛЬНОСТЬ проблемы использования газопоршневых двигателей (ГПД) в составе судовых энергетических установок (СЭУ) обусловлена двумя факторами: стремлением сократить потребление топлив нефтяного происхождения и необходимостью повышения экологической безопасности СЭУ. Влияние выбросов СЭУ на глобальное состояние воздушного бассейна является ограниченным, составляя 5 – 7 % от общего количества выбросов вредных веществ стационарными энергетическими установками и наземными транспортными средствами [1]. Однако, из-за большой агрегатной мощности, судовые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) могут являться основными источником загрязнения атмосферы в таких локальных зонах, как порты, гидротехнические сооружения, акватории рек в черте города. Эмиссия токсичных соединений и твердых частиц с отработавшими газами регламентирована российскими и международными стандартами (Euro, IMO, TA-Luft, Tier). В ближайшие годы следует ожидать ужесточения экологических требований к поршневым ДВС, прежде всего, по содержанию в отработавших газах оксидов азота NO_x , снижение выбросов которых является одной из актуальных задач современного судового двигателестроения.

Наряду с ужесточением существующих норм вводятся ограничения на выбросы парниковых газов, основным из которых является диоксид углерода (CO_2). Вступившая в силу в 1994 г. Рамочная конвенция ООН об изменении климата (UNFCCC) и Киотский протокол 1997 г. установили обязательства для стран-участниц в отношении снижения выбросов CO_2 . В период 2008 – 2012 гг. развитые страны должны были сократить выбросы парниковых газов как минимум на 5 %. Установленные требования фактически означают необходимость принятия следующих мер: снижение расхода топлива, которое неизбежно приведет к эквивалентному снижению выбросов с ОГ про-

дуктов неполного сгорания топлива (сажи, углеводородов, оксидов углеводородов, бенз(а)пирена, формальдегида); использование новых источников энергии; применение альтернативных топлив. В соответствии с требованиями Приложения VI МК МАРПОЛ 73/78 происходит планомерное ужесточение требований к содержанию оксидов серы, азота и углерода, а также твердых частиц в выбросах морских судов [2].

Перспективными газообразными топливами следует считать природный газ и альтернативные топлива, представляющие собой химические соединения, не являющиеся продуктами переработки нефти. Сравнительный анализ различных видов альтернативных топлив для судовых энергетических установок с точки зрения токсичности отработавших газов выполнен в работе [3], в которой с учетом особенностей хранения и использования различных газообразных топлив сделан вывод о наибольшей перспективности природного газа.

К перспективным и альтернативным топливам в настоящее время относят природный газ — метан (CH_4), водород (H_2), биогаз на основе метана, сжиженные углеводородные газы: пропан (C_3H_8) и бутан (C_4H_{10}). Задача снижения выбросов вредных веществ может быть также решена за счет использования в составе СЭУ двухтопливных двигателей, конструкции которых представлены в работах [1], [4].

Для водного транспорта расширение применения природного газа представляется наиболее вероятным. Использование водорода и биогаза с учетом объемов их производства и особенностей получения может рассматриваться лишь в отдаленной перспективе. Известно, что природный газ на 98 – 99 % состоит из метана. Исходя из этого, были определены [4] массовые доли компонентов продуктов сгорания (табл. 1), количества отработавших газов и диоксида углерода в них на 100 кВт мощности двигателя (табл. 2) при полном сгорании топлива.

Таблица 1

Состав продуктов сгорания различных видов топлива

Топливо	Элементарный состав		Массовые доли			
	С	Н	g_{CO_2}	$g_{\text{H}_2\text{O}}$	g_{N_2}	g_{O_2}
Дизельное	0,872	0,128	0,0700	0,0352	0,7424	0,1484
Природный газ (метан)	0,75	0,25	0,0512	0,05162	0,748	0,149

Таблица 2

Количество отработавших газов и CO_2 на 100 кВт мощности

Топливо	Количество отработавших газов, кг/ч	Количество CO_2 , кг/ч
Дизельное	1015,128	71,94
Природный газ (метан)	1028,3	52,67

Характерной особенностью газовых топлив является повышенное по сравнению с традиционными углеводородными топливами соотношение *водород — углерод* (табл. 3), что обеспечивает более высокое качество рабочего процесса и экологическую чистоту продуктов сгорания.

Таблица 3

Соотношение *водород — углерод* для различных видов топлива

Топливо	Химическая формула	Соотношение Н/С
Метан	CH_4	4,0
Пропан	C_3H_8	2,7
Бутан	C_4H_{10}	2,5
Бензин	C_mH_n	2,0
Дизельное топливо	C_mH_n	1,8
Мазут	C_mH_n	1,7

Проведенное сравнение табличных данных показывает, что применение в качестве топлива для ДВС природного газа обеспечивает существенное сокращение количества вредных выбросов по сравнению с использованием топлив на основе нефти: полностью исключаются выбросы серы, кардинально (на 90 %) снижаются выбросы оксидов азота (NO_x), снижение выбросов парниковых газов на эквивалентную мощность составляет 25 – 30 %, что является дополнительным аргументом в пользу перевода судовых двигателей на газовое топливо в свете современных экологических требований ИМО.

Двигатели на природном газе классифицируют по признакам, приведенным в табл. 4 [5].

Таблица 4

Классификация двигателей на природном газе

Двигатели, работающие на природном газе		
По способу смесеобразования	По типу воспламенения топливно-воздушной смеси	По принципу регулирования
Двигатели с внешним смесеобразованием	Газовые двигатели с принудительным воспламенением от электрической искры	Двигатели с количественным регулированием
Двигатели с внутренним смесеобразованием регулированием (раздельная подача газа и воздуха в цилиндрах)	Газовые двигатели с форкамерно-факельным зажиганием	Двигатели с качественным регулированием
	Газодизели с самовоспламенением от запальной дозы дизельного топлива	Двигатели со смешанным регулированием

Используются два принципиально различных способа перевода дизельных двигателей на питание газовым топливом.

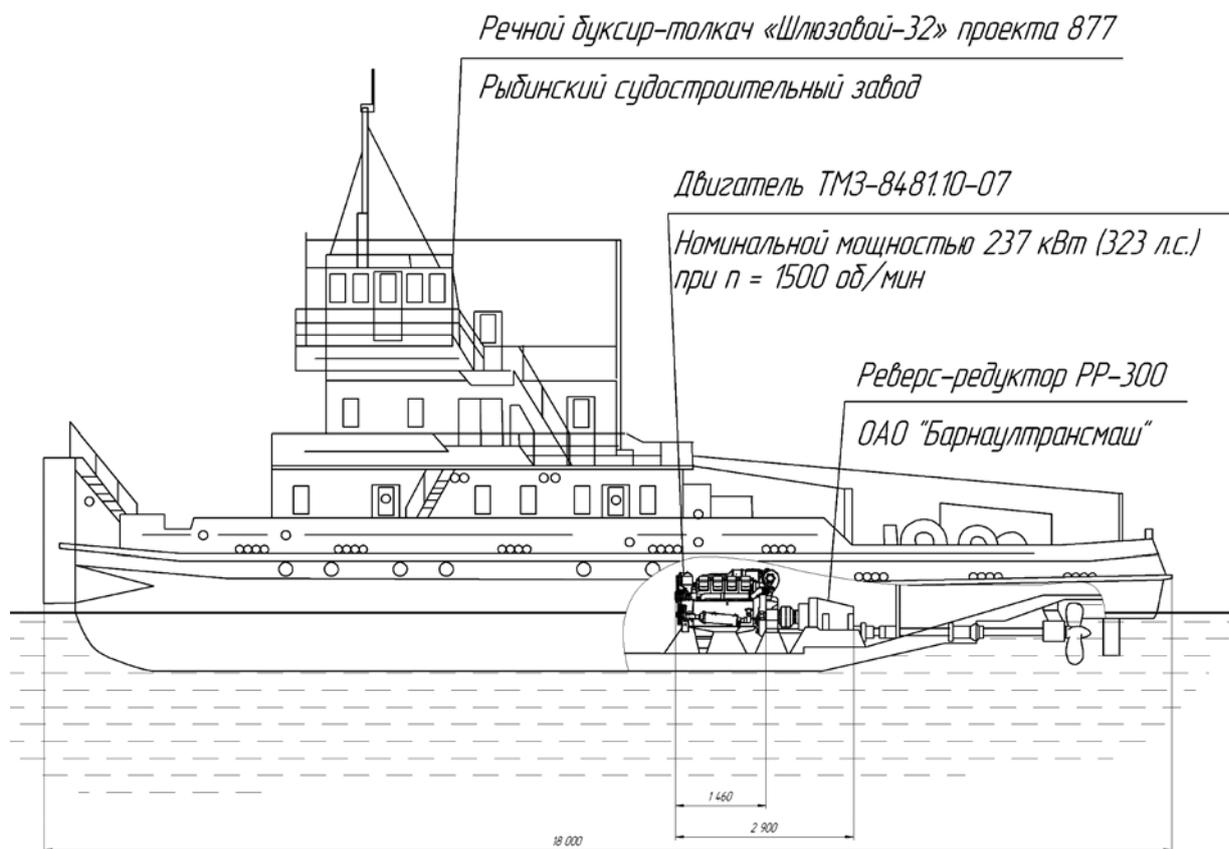
1. *Конвертация дизельного двигателя в двигатель внутреннего сгорания с воспламенением газозвушной смеси от искры* (полное замещение топлива). Данный способ является достаточно радикальным и связан со значительным изменением конструкции базового двигателя. При этом с двигателя демонтируют дизельную топливную аппаратуру, уменьшают степень сжатия до 11 – 16 единиц, устанавливают систему зажигания, топливоподающую газовую систему. В результате двигатель работает на газовом топливе, которое имеет стоимость ниже, чем дизельное топливо. Экологические параметры отработавших газов конвертированного дизеля, как правило, выше исходного двигателя. При работе с использованием данного способа обеспечиваются номинальные мощности с незначительным снижением КПД с базовым двигателем. После выполнения конвертации двигатель уже не может больше работать на дизельном топливе.

2. *Использование газодизельного режима*. В газодизельном режиме в двигатель подают два топлива: основное дизельное (но в меньшем количестве, чем в базовом), дополнительное газовое (топливо для замещения). При этом основное дизельное топливо играет роль «запальной» дозы для воспламенения интегральной газозвушной топливной смеси. Существенным преимуществом газодизельного цикла является то, что мощность источника зажигания в нем значительно больше, чем в двигателе с искровым зажиганием. Кроме того, рабочая смесь поджигается не в одной точке у холодной стенки, а в центре заряда. Благодаря этому одной из важных особенностей газодизельного процесса является возможность надежной работы двигателя на обедненной рабочей смеси. При использовании данного способа сохраняется возможность быстрого перехода с газового топлива на дизельное и обратно. У быстроходных дизельных двигателей расход жидкого топлива, используемого для воспламенения и полного сгорания газозвушной смеси, составляет 10 – 20 % количества, расходуемого при обычном дизельном процессе. В средне- и малооборотных двигателях требуется лишь 5 – 8 % дизельного топлива для воспламенения. В настоящее время существуют опытные модели двигателей, использующие 1 % пилотного топлива, и ведутся работы по дальнейшему уменьшению его количества. Именно такой способ воспламенения реализован

фирмой Wärtsilä в двухтопливном двигателе 20DF, а также двигателях, разработанных фирмой MAN Diesel & Turbo для СЭУ [6] и получивших одобрение классификационных обществ [7].

Опыт использования газового топлива на морском и речном транспорте как в нашей стране, так и за рубежом проанализирован в работах [8], [9]. На основе анализа сделан вывод о том, что внедрение газа на речном флоте следует рассматривать как одну из важнейших государственных задач, направленных на повышение экономической эффективности эксплуатации судов и обеспечение экологической безопасности. При этом наиболее рациональным следует считать переоборудование выпускаемых в России дизелей для работы на газовом топливе.

Объектом исследований при оценке экономической эффективности перевода на газовое топливо, основным компонентом которого является метан, был выбран двигатель 8ЧН14/14 производства ОАО «Гутаевский моторный завод» (ТМЗ-8481.10-07). Двигатель проектировался как автотракторный для использования в сельскохозяйственной и военной технике, однако он имеет хорошие перспективы для конвертации в судовой [10] технике, прошел необходимую модернизацию [11], получил одобрение Российского речного регистра и используется в качестве главного двигателя на теплоходах проекта 877. Схема буксира-толкача «Шлюзовой-32» данного проекта приведена на рисунке.



Буксир-толкач проекта 877 с главным двигателем 8ЧН14/14

Для двигателя 8ЧН14/14 с использованием пакета программы Diesel RK Net, разработанной на кафедре поршневых и комбинированных двигателей МГТУ им. Н. Э. Баумана, был выполнен многовариантный тепловой расчет [12], результаты которого приведены в табл. 5. Полученные данные свидетельствуют о том, что перевод двигателя 8ЧН14/14 на альтернативные виды топлива не приводит к существенному снижению технико-экономических показателей, а учитывая различную цену топлив, может оказаться экономически целесообразным. Экономические аспекты перевода судовых дизелей проанализированы авторами в работе [13]. Основная доля затрат при этом связана с созданием инфраструктуры, включающей заправочные базы, нормативной базы

и переподготовкой экипажей судов. С целью минимизации затрат, накопления и обобщения опыта проектирования и эксплуатации судов, работающих на газовом топливе, целесообразно начать его внедрение с судов, работающих в городских акваториях: лоцманских катеров, прогулочных и экскурсионных судов, буксиров и толкачей портового флота. В этом случае может быть эффективно использована сеть заправочных станций и инфраструктура наземного транспорта.

Дополнительный экономический эффект может быть получен в результате того, что использование газового топлива обеспечивает повышение ресурсных показателей двигателей, так как газ не смывает масляную пленку со стенок гильзы цилиндров, увеличивается срок службы масла из-за пониженного нагарообразования в камере сгорания. По имеющимся статистическим данным, собранным на автомобильном транспорте, наработки ГПД до среднего и капитального ремонта превышают соответствующие периоды для поршневых двигателей, работающих на жидких углеводородных топливах в 1,5 раза.

Таблица 5

Показатели работы двигателя 8ЧН14/14 при использовании различных видов топлива

Показатель работы двигателя	Вид используемого топлива		
	Дизельное (ГОСТ 305-82)	Природный газ (метан CH ₄)	Этанол (C ₂ H ₅ OH)
Обороты коленчатого вала, мин ⁻¹	1900		
Степень сжатия	16,5		
Коэффициент избытка воздуха (оптимальный)	1,7	1,0	1,0
Угол опережения впрыска / зажигания (оптимальный), °ПКВ	20	15 – 25	10 – 20
Эффективная мощность, кВт	300	300	300
Эффективный крутящий момент, Н·м	1685	1511	1508
Среднее индикаторное давление, МПа	1,617	1,750	1,549
Среднее эффективное давление, МПа	1,406	1,586	1,480
Часовой расход топлива, кг/ч	60	66 (эквивалентно 95,8 м ³ /ч метана)	73,8
Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)	205	220	246
Индикаторный КПД	0,440	0,443	0,433
Эффективный КПД	0,40	0,382	0,394
Механический КПД	0,875	0,860	0,860

Для оценки экологического эффекта от перевода двигателя 8ЧН14/14 на газовое топливо в программе Diesel RK Net был рассчитан состав продуктов сгорания при использовании различных видов газового топлива и различных составов газоздушных смесей. Результаты расчетов приведены в табл. 6, где α_c — коэффициент избытка воздуха, обеспечивающий стехиометрический состав смеси; $\alpha_{пр}$ — коэффициент избытка воздуха предельно обедненной смеси, при кото-

ром обеспечивается устойчивая работа двигателя; α_{\max} — коэффициент избытка воздуха смеси, при котором достигается максимальное среднее индикаторное давление.

Таблица 6

Состав продуктов сгорания при использовании в двигателе 8ЧН14/14 газового топлива

Топливо	Коэффициент избытка воздуха	Мольные доли компонентов отработавших газов						
		H ₂	H ₂ O	N ₂	NO _x	CO	CO ₂	O ₂
Природный газ (метан CH ₄)	$\alpha_c = 1,0$	–	0,229	0,656	–	–	0,114	0,0009
	$\alpha_{\text{пр}} = 1,34$	–	0,180	0,685	0,003	–	0,087	0,045
	$\alpha_{\max} = 0,90$	0,016	0,228	0,633	0,007	0,02	0,102	0,0009
Этанол (C ₂ H ₅ OH)	$\alpha_c = 1,0$	–	0,308	0,692	–	–	–	0,0003
	$\alpha_{\text{пр}} = 1,25$	–	0,258	0,715	0,002	–	–	0,0272
	$\alpha_{\max} = 0,95$	0,001	0,310	0,686	–	–	–	0,0003

Данные, полученные расчетным путем, а также приведенные в работе [14] подтверждают, что перевод судовых двигателей на газовое топливо снижает отрицательное воздействие СЭУ на окружающую среду, обеспечивая выполнение как существующих, так и перспективных экологических требований Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78).

Особое внимание при использовании ГПД в составе СЭУ необходимо уделять вопросам безопасности. Особую опасность представляют аварии, связанные с утечкой газа, вызывающей пожары и взрывы. Наиболее вероятные аварии при использовании газового топлива подробно проанализированы в работе [15]. Риск возникновения указанных опасностей необходимо учитывать при выборе способа хранения и использования газового топлива на судне при проектировании его энергетической установки. Имеющийся опыт использования газомоторного топлива на водном транспорте свидетельствует о том, что наиболее перспективным из них, таким как применение сжиженного природного газа, конструкции емкостей для его хранения и места их расположения, должно уделяться особое внимание.

Результаты численных экспериментов, стендовых испытаний ГПД и опыт, накопленный при их эксплуатации, свидетельствует о том, что использование газового топлива приводит к изменению протекания рабочего цикла, перераспределению составляющих теплового баланса, изменению температур отработавших газов и охлаждающей жидкости. Как правило, переход на газовое топливо приводит к росту температуры отработавших газов и понижению температуры охлаждающей жидкости. Именно поэтому перевод двигателя на газовое топливо не должен ограничиваться модернизацией его топливной системы. Для получения максимального энерго-экологического эффекта от внедрения ГПД в СЭУ необходимо определить оптимальные для них параметры наддува и охлаждения, провести модернизацию этих систем, в том числе с использованием технических решений, приведенных в работе [16], и обеспечить автоматическое регулирование параметров охлаждения и наддува ГПД в соответствии с концепцией, изложенной в статье [17].

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Использование ГПД в составе СЭУ целесообразно как с энергетической, так и экологической точки зрения.
2. Максимальный энергоэкологический эффект от перехода на газовое топливо возможен при комплексной модернизации систем топливоподачи, охлаждения, наддува и автоматического регулирования ГПД.
3. Определение оптимальных параметров наддува и охлаждения при переходе на газовое топливо требует дополнительных исследований.

4. Использование ГПД в составе СЭУ требует повышенного внимания к обеспечению взрыво- и пожаробезопасности.

5. Для снижения затрат, связанных с внедрением ГПД на водном транспорте, необходимо совершенствование методологии проектирования судов различного назначения (газовозы, буксиры, пассажирские) с комбинированными энергетическими установками, что позволит ускорить процесс модернизации существующих и строительства новых судов, работающих на газомоторном топливе, отвечающим всем современным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котиков Ю. Г. Транспортная энергетика / Ю. Г. Котиков, В. Н. Ложкин. — М.: ИЦ «Академия», 2006. — 272 с.

2. Международная конвенция MARPOL 73/78. Приложение VI «Предотвращение загрязнения атмосферы судами». Кн. 3. — СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2000. — 281 с.

3. Баранов В. А. Анализ перспективности применения различных видов альтернативного топлива на морских судах / В. А. Баранов, А. А. Сергеев, В. К. Шурпяк // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2010. — № 33. — С. 99–126.

4. Хачиян А. С. Сравнительная оценка выбросов двуокси углерода различными двигателями / А. С. Хачиян // Перспективы развития энергетических установок для автотранспортного комплекса: сб. науч. тр. МАДИ (ТУ). — М., 2006. — С. 4–9.

5. Дорохов А. Ф. Особенности применения газообразных топлив в судовых энергетических установках / А. Ф. Дорохов, И. А. Апкаров, Хоан Коанг Лыонг // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2012. — № 2. — С. 70–75.

6. Examining the Exploitation of Methanol as a Fuel Type // Diesel facts. — 2015. — № 2. — Pp. 6–7.

7. Dual-Fuel L35/44DF Engine Moves towards Market Entry // Diesel facts. — 2015. — № 2. — P. 11.

8. Власов А. А. Придет ли природный газ на смену мазуту? [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.korabel.ru/news/comments/prid_t_li_prirodniy_gaz_na_smenu_mazutu.html (дата обращения: 12.10.2015).

9. Киселев Д. М. Суда на природном газе: опыт эксплуатации и перспективы развития / Д. М. Киселев, В. К. Новиков, В. В. Попов, К. И. Федин, И. В. Маслов // Речной транспорт (XXI век). — 2013. — № 3 (62). — С. 62–64.

10. Жуков В. А. Перспективы конвертации автомобильных двигателей в судовые в аспекте экологических нормативов / В. А. Жуков, М. С. Курин // Труды 11-й Международной конференции «Актуальные проблемы современной науки». — Ч. 3. Механика и машиностроение. — Самара: Изд-во СамГТУ, 2010. — С. 41–45.

11. Жуков В. А. Модернизация системы охлаждения дизеля 8ЧН14/14 для его использования в составе судовой энергетической установки / В. А. Жуков, А. Е. Ратнов // Двигатели внутреннего сгорания. — 2012. — № 2. — С. 59–64.

12. Безюков О. К. Анализ перспективности газопоршневых ДВС / О. К. Безюков, В. А. Жуков, О. И. Яценко // Двигатели внутреннего сгорания. — 2014. — № 2. — С. 45–51.

13. Безюков О. К. Экономические аспекты перевода флота на газомоторное топливо / О. К. Безюков, В. А. Жуков // Актуальные проблемы экономики и управления на водном транспорте: материалы науч.-практ. конф. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — С. 31–34.

14. Безюков О. К. Газомоторное топливо на водном транспорте / О. К. Безюков, В. А. Жуков, О. И. Яценко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 31–39.

15. Блинков А. Н. Анализ способов применения газового топлива в судовых энергетических установках / А. Н. Блинков, А. А. Власов, В. К. Шурпяк // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2011. — № 34. — С. 177–179.

16. Жуков В. А. Перспективы совершенствования систем охлаждения судовых дизелей / В. А. Жуков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 131–137.

17. Безюков О. К. Современная концепция регулирования охлаждения судовых дизелей / О. К. Безюков, В. А. Жуков, В. Н. Тимофеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 93–103.

THE ANALYSIS OF POWER AND ECOLOGICAL EFFECTS OF APPLICATION OF GAS-PISTON ENGINES IN SHIP'S POWER PLANT

The article is devoted to value of power and ecological effects in the result of gas-piston engine's application in ship's power plant. Comparative characteristics of different kinds of gas fuel for internal combustion engines are given in the article. Experience of use gas-fuel for ship's engines was considered. For the engine TMZ-8481, which was converted into the ship's engine the calculation of parameters of working cycle and the composition of exhaust gas in the case of using different kinds of fuel was realized. Prospects of widening gas-piston internal combustion engines' employment into conditions of rising ecological requirements for ship power plant are shown. Problems, which must be solved for spreading gas-piston engines on water transport, are formulated. For achievement of maximal power and ecological effects is necessary complex modernization of main engine's systems: fuel system, supercharge system cooling system and automatic regulation. The ensuring of safety of ship's power plant with gas-piston internal combustion engines is very important. The cutting down of economical expenditure connected with application gas-piston engines on water transport may be provided in the case of perfect of project and exploitation of it's and maximal using of gas structure for motor land transport.

Keywords; gas-fuel, gas-piston engines, power parameters, ecological requirements, composition of exhaust gas, safety of exploitation

REFERENCES

1. Kotikov, Ju. G., and V. N. Lozhkin. *Transportnaja jenergetika*. M.: Izd-kij centr "Akademija", 2006.
2. Mezhdunarodnaja konvencija MARPOL 73/78. Prilozhenie VI «Predotvrashhenie zagryaznenija atmosfery sudami». Kn. 3. SPb.: ZAO CNIIMF, 2000.
3. Baranov, V. A., A. A. Sergeev, and V. K. Shurpjak. "Analiz perspektivnosti primeneniya razlichnyh vidov al'ternativnogo topliva na morskikh sudah." *Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 33 (2010): 99-126.
4. Hachijan, A. S. "Srvnitel'naja ocenka vybrosov dvoukisi ugleroda razlichnymi dvigateljami." *Perspektivy razvitiya jenergeticheskikh ustanovok dlja avtotransportnogo kompleksa: sb. nauchnyh trudov MADI (TU)*. M., 2006: 4-9.
5. Dorokhov, A. F., I. A. Apkarov, and Hoang Quang Luong. "Characteristics of the use of the gaseous fuel in marine power plants." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2012): 70-75.
6. "Examining the Exploitation of Methanol as a Fuel Type." *Diesel facts*. 2 (2015): 6-7.
7. "Dual-Fuel L35/44DF Engine Moves towards Market Entry." *Diesel facts*. 2 (2015): 11.
8. Vlasov, A. A. Pridet li prirodnyj gaz na smenu mazutu? Web. 12.10.2015 <http://www.korabel.ru/news/comments/prid_t_li_prirodnyj_gaz_na_smenu_mazutu.html>.
9. Kiselev, D. M., V. K. Novikov, V. V. Popov, K. I. Fedin, and I. V. Maslov. "Suda na prirodnom gaze: opyt jekspluatacii i perspektivy razvitiya." *River transport (XXIst century)* 3(62) (2013): 62-64.
10. Zhukov, V. A., and M. S. Kurin. "Perspektivy konvertacii avtomobil'nyh dvigatelej v sudovye v aspekte jekologicheskikh normativov." *Trudy 11-j Mezhdunarodnoj konferencii «Aktualnye problemy sovremennoj nauki»*. Ch. 3 *Mehanika i mashinostroenie*. Samara: Izd-vo SamGTU, 2010: 41-45.
11. Zhukov, V. A., and A. E. Ratnov. "Modernization of cooling system diesel engine made by tutaev motor plant for using in structure of shipping power mounting." *Internal Combustion Engines* 2 (2012): 59-64.
12. Bezjukov, O. K., V. A. Zhukov, and O. I. Yashenko. "Analysis of gas-piston engine's outlook." *Internal Combustion Engines* 2 (2014): 45-51.
13. Bezjukov, O. K., and V. A. Zhukov. "Jekonomicheskie aspekty perevoda flota na gazomotornoe toplivo." *Aktualnye problemy jekonomiki i upravlenija na vodnom transporte: materialy nauch.-prakt. konferencii*. SPb.: Izd-vo GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2014: 31-34.
14. Bezjukov, O. K., V. A. Zhukov, O. I. Jashhenko. "Dual-fuel engines on water transport." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 31-39.
15. Blinkov, A. N., A. A. Vlasov, and V. K. Shurpjak. "Analiz sposobov primeneniya gazovogo topliva v sudovyh jenergeticheskikh ustanovkah." *Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 34 (2011): 177-179.

16. Zhukov, V. A. "Outlook of improving of ship diesel engine's cooling system." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 131–137.

17. Bezjukov, O. K., V. A. Zhukov, and V. N. Timofeev. "Contemporary conception of regulation in cooling system of ship's diesel engines." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 93–103.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Безюков Олег Константинович —
доктор технических наук, профессор.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
okb-nayka@yandex.ru

Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, доцент.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
va_zhukov@rambler.ru

Воробей Константин Александрович - аспирант.
Научный руководитель:

Жуков Владимир Анатольевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_sdvs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bezyukov Oleg Konstantinovich —
Dr. of Technical science, professor.

Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
okb-nayka@yandex.ru

Zhukov Vladimir Anatolevich —
Dr. of Technical science, associate professor.

Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
va_zhukov@rambler.ru

Vorobej Konstantin Aleksandrovich — postgraduate.
Supervisor:

Zhukov Vladimir Anatolevich
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_sdvs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 21 октября 2015.

УДК 629.5.035-233.1-233.21-036.5.004.62:629.5.018.713

**Г. А. Кушнер,
В. А. Мамонтов,
А. А. Халявкин**

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ФОРМЫ И КОЭФФИЦИЕНТА ЖЕСТКОСТИ МОДЕЛЕЙ ДЕЙДУДНЫХ ПОДШИПНИКОВ ИЗ КАПРОЛОНА

Рассматриваются результаты исследований формы и коэффициента жесткости капролоновых втулок. Отмечается, что износ дейдвудных подшипников приводит к возникновению колебаний гребного вала и винта. Описано экспериментальное исследование моделей дейдвудных подшипников из капролона. Построены графики зависимости толщин втулок по их длине. Представлены формы износа модели втулки, составлены уравнения регрессии, их характеризующие. Отмечается, что механическое поведение капролона является функцией времени и температуры, при этом увеличение коэффициента жесткости подшипника приводит к увеличению частоты собственных колебаний вала. Описана методика испытаний образцов, изготовленных из бывшего в эксплуатации дейдвудного подшипника. Построен график зависимости отношения длин образцов от задаваемой нагрузки. Установлено наличие неоднородности распределения коэффициента жесткости в зависимости от степени износа.

Ключевые слова: судовой валопровод, дейдвудный подшипник, износ, коэффициент жесткости.

Введение

Дейдвудные подшипники большого числа судов изготавливаются из капролона, в процессе эксплуатации изнашиваясь неравномерно по длине подшипника. Износ вызывает неравномерную