

ВЛИЯНИЕ ВИДА СУДОВОГО ТОПЛИВА НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ТАНКЕРА-ГАЗОВОЗА

М. Н. Покусаев¹, В. Г. Букин¹, И. М. Абачаров², В. П. Ермолаев¹

¹*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Российская Федерация*

²*Институт физики им. Х. И. Амирханова Дагестанского научного центра
Российской академии наук, Махачкала, Российская Федерация*

Проанализированы изменения требований к выбросам окислов, образующихся в результате сжигания топлива, в соответствии с Международной конвенцией по предотвращению загрязнения с судов МАРПОЛ 73/78. Рассматривается проблема повышения энергоэффективности крупнотоннажного танкера для перевозки газа при использовании различного судового топлива. Проведён энергетический аудит на танкере-газовозе дедвейтом 54 354 т и мощностью силовой установки 12 400 кВт. Энергетический аудит был проведён на основе шести рейсов танкера-газовоза, выполненных с 14 июня 2016 г. по 19 января 2017 г. В качестве инструмента оценки энергетической эффективности судна использовался эксплуатационный коэффициент энергетической эффективности (*EEOI*), который определяется в выбросах диоксида углерода на тонно-милю перемещения грузов. В ходе исследования использовался метод сравнительного анализа изменения вида использованного топлива в течение рассматриваемых рейсов. Сравнительный анализ проводился с учётом изменения расхода судового топлива при его использовании с разной низшей теплотворной способностью. Приведены основные характеристики используемого тяжёлого топлива RMG 380 и дизельного топлива DMA. Значения всех величин для расчёта эксплуатационного коэффициента энергетической эффективности были взяты из машинного журнала, журнала грузовых и нефтяных операций и отчётов *EEOI* из компании после каждого рейса. По результатам оценки сделаны выводы и разработаны перспективы по применению судового топлива и модификации судовой энергетической установки. Установлено, что использование сжиженного природного газа в качестве основного топлива повышает энергетическую и экономическую эффективность судна и удовлетворяет новые требования МАРПОЛ 73/78 к 2020 г. относительно содержания серы в топливе. Проведённые исследования и предварительные расчёты дают возможность прогнозировать повышение экономической эффективности крупнотоннажного флота при одновременной высокой экологичности.

Ключевые слова: эксплуатационный коэффициент энергетической эффективности, энергетический аудит, план управления энергоэффективностью судна, крупнотоннажный танкер для перевозки газа, судовая энергетическая установка.

Для цитирования: Покусаев М. Н., Букин В. Г., Абачаров И. М., Ермолаев В. П. Влияние вида судового топлива на энергоэффективность судовой энергетической установки танкера-газовоза // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 1. С. 78–88. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-78-88.

Введение

Актуальность научного исследования определена ужесточением требований к выбросам в атмосферу вредных веществ, которые содержатся в выхлопных газах главных судовых двигателей. Международная конвенция МАРПОЛ 73/78, принятая Международной морской организацией (ИМО), является основным документом, содержащим ряд мер по предотвращению загрязнения морской среды с судов. В приложении VI МАРПОЛ 73/78 содержатся требования относительно окислов, которые образуются при сжигании судового топлива. С целью мониторинга и сокращения загрязнений атмосферы предметами регламентации ИМО стали окислы азота (NO_x), окислы серы (SO_x) и окислы углерода (CO_x) [1].

Актуальность исследования и постановка задачи

Объектом научного исследования является танкер-газовоз VLGC¹ 2014 г. постройки. Малооборотный двигатель, установленный на объекте исследования, соответствует второму уров-

¹ VLGC (very large gas carrier) – крупнотоннажный танкер для перевозки газа.

ню (tier 2) ИМО, относительно выбросов окислов азота NO_x . Максимальный предел по выбросам NO_x уровня 2 для двигателей с номинальным числом вала $n < 130$ об/мин составляет $14,4 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ [1].

На объекте исследования контроль за выбросами окислов серы осуществляется мониторингом состава топлива. Бункеруемое топливо проходит анализ в подтверждённых лабораториях. Основным топливом на исследуемом танкере-газовозе является тяжёлое топливо RMG 380 с содержанием серы 2,39 % по массе. При эксплуатации судна в особом районе Карибского моря на судне используется дизельное топливо DMA с содержанием серы 0,08 % по массе.

На протяжении долгого времени остаётся открытым вопрос, как сократить выбросы углекислого газа, который является основным парниковым газом, выбрасываемым с судов. По поручению ИМО были проведены исследования, согласно результатам которых общие выбросы углекислого газа от судоходства в 2009 г. составили 1 млрд т, что образовало примерно 3,3 % выбросов CO_2 в результате сжигания газа [2]. По прогнозам, к 2020 г. выбросы углекислого газа от судоходства могут увеличиться более чем на 30 %, до 1,47 млрд т. На сокращение выбросов углекислого газа не удаётся повлиять изменением условий рабочего процесса в цилиндрах двигателя, как это используется для сокращения выбросов NO_x . Также на количество выбросов CO_2 не влияет и предварительная очистка бункеровочного топлива, как это делается для снижения выбросов SO_x . При сжигании определённого типа судового топлива в атмосферу выбрасывается соответствующее количество углекислого газа. Иными словами, загрязнять атмосферу в меньшей степени будет то судно, которое для совершения той же транспортной работы использует меньше топлива, т. е. обладает большей энергетической эффективностью [3].

Оценить энергоэффективность судна в самом простейшем случае можно по комплексному показателю качества судовой энергетической установки, определив расходные и ресурсные показатели. В современном судостроении осуществляется переход от частных случаев повышения коэффициента полезного действия (КПД) установки к комплексной оценке всех сторон воздействия на энергетические показатели судна [4].

В 2013 г. вступили в силу правила управления энергоэффективностью судна, которые включены в приложение VI Конвенции МАРПОЛ 73/78 [1]. Организация ИМО утвердила руководство по разработке плана управления энергоэффективностью судна (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP), которое определяет два основных требования [5]:

- для каждого нового судна валовой вместимостью более 400 т должны быть рассчитаны требуемый и допустимый конструктивный коэффициенты энергетической эффективности (*Energy Efficiency Design Index – EEDI*), величины которых не должны превышать ограничения, установленные резолюцией МЕРС.203 (62) [6];

- на каждом существующем и новом судне валовой вместимостью более 400 т должен иметься и выполняться индивидуальный SEEMP, который можно включить в судовую систему управления безопасностью, т. к. он направлен на снижение выбросов парниковых газов.

Судоходная компания разрабатывает для каждого судна план управления энергоэффективностью судна с использованием эксплуатационного коэффициента энергетической эффективности (*Energy Efficiency Operational Index – EEOI*), который является инструментом оценки уровня выбросов диоксида углерода с судов в эксплуатации. Инструмент разработан ИМО для обеспечения судовладельцев и операторов судов. Соображения ИМО относительно *EEOI* включены в Руководство по добровольному использованию эксплуатационного показателя энергетической эффективности МЕРС.1/Circ.684 [7], которое рекомендует *EEOI* в качестве эффективного инструмента для ограничения воздействия судоходства на глобальное изменение климата. В ходе научного исследования это руководство будет использовано в качестве примера, основанного на конкретных результатах, для мониторинга эффективной работы судна. Руководство раскрывает понятие эксплуатационного коэффициента энергетической эффективности, который выражается в CO_2 , выброшенного на единицу транспортной работы:

$$EEOI = M\text{CO}_2 / \text{Транспортная работа},$$

где выбросы CO_2 определяются на основе расхода топлива ($M\text{CO}_2$ – масса выбросов CO_2); Транспортная работа – это масса груза, т, умноженная на общее пройденное расстояние, измеряемое в морских милях.

EEOI для рейса рассчитывается по следующей формуле, в которой меньшее значение *EEOI* соответствует более энергоэффективному судну:

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_{ij} \cdot C_{Fj}}{m_{cargo} \cdot D_i},$$

где FC_{ij} – масса потребляемого топлива j главными и вспомогательными двигателями, котлами и другими потребителями, как записано в машинном журнале, в рейсе i , т; C_{Fj} – безразмерный переводной коэффициент приведения расхода топлива к выбросам CO_2 для топлива j , (т CO_2)/т; m_{cargo} – масса перевозимого груза в соответствии с транспортной накладной и журналом грузовых операций, т; D_i – пройденное судном расстояние для рейса i , как записано в судовом журнале, миля.

Для нескольких рейсов или их отрезков эксплуатационный коэффициент энергетической эффективности выражается следующим образом:

$$Average\ EEOI = \frac{\sum_i \sum_j (FC_{ij} \cdot C_{Fj})}{\sum_i m_{cargo, i} \cdot D_i}. \quad (1)$$

Соотношение между расходом топлива и массой CO_2 , выброшенного в окружающую среду, определяется из химического состава топлива, которое в основном состоит из углеводородов. Атомная масса углерода m_C равна 12,011 а.е.м, атомная масса водорода m_H равна 1 а.е.м. Массовая доля углерода в жидком топливе лежит в диапазоне 85–87,5 %, где дизельное топливо находится в более высоком диапазоне, а тяжёлое топливо – в более низком диапазоне. При сгорании топлива углеводород реагирует с кислородом, атомная масса которого m_O равна 15,9994, для каждой молекулы CO_2 требуется один атом углерода С. Отношение между атомной массой углекислого газа CO_2 и углерода С составляет 3,664. Умножив это значение на массовую долю углерода, мы получаем удельный выброс углекислого газа C_F . Для различных видов топлива – разное содержание углерода, а следовательно разный переводной коэффициент C_F . Содержание углерода и значение переводного коэффициента приведены в табл. 1 [7, 8].

Таблица 1

Содержание C_F и углерода в соответствии с видом топлива

Вид топлива	Ссылка	Содержание углерода	C_F (т CO_2)/т топлива)
Дизельное топливо / Газойль	ISO 8217 сорта DMX – DMB	0,875	3,206000
Лёгкое жидкое топливо (ЛЖТ)	ISO 8217 сорта RMA – RMD	0,86	3,151040
Тяжёлое жидкое топливо (ТЖТ)	ISO 8217 сорта RME – RMK	0,85	3,114400
Сжиженный нефтяной газ (СНГ)	Пропан	0,819	3,000000
	Бутан	0,827	3,030000
Сжиженный природный газ (СПГ)	–	0,75	2,750000
Метанол	–	0,375	1,375
Этанол	–	0,5217	1,913

Целью научного исследования является оценка энергетической эффективности судовой энергетической установки (СЭУ) газовоза типа VLGC при использовании различного вида топлива, что позволит предложить рекомендации данной серии судов по выбору вида топлива в связи с ужесточением требования к выбросам с судов в атмосферу с 1 января 2020 г. [1]. Энергетический аудит судна позволит также предложить модификации СЭУ для новых проектов судов.

Результаты научного исследования

Научное исследование проводилось на газовозе типа VLGC, основные характеристики которого приведены в табл. 2.

Основные характеристики судна

Параметр	Значение
Длина, м	225,1
Длина между перпендикулярами, м	220
Ширина, м	36,6
Осадка, м	12,0
Дедвейт, т	54 354
Максимальная продолжительная мощность главного двигателя MAN B&W G60ME-9.2-ТII, кВт	12 400
Максимальная продолжительная мощность дизель-генератора HMMSEN H21/32, кВт	1 300 × 3
Рабочее давление вспомогательного котла, бар	6,0
Паропроизводительность вспомогательного котла, т/ч	3
Достигнутый конструктивный коэффициент энергетической эффективности «Attained <i>EEDI</i> », гСО ₂ /т·миля	5,9506

Энергетический аудит был проведён на основе 6 рейсов танкера-газовоза, выполненных с 14 июня 2016 г. по 19 января 2017 г. Согласно руководству ИМО МЕРС.1/Circ.684 [7], термин «рейс» определяется как период от выхода судна из порта до выхода из следующего порта.

В данном научном исследовании используется метод сравнительного анализа изменения вида использованного топлива в течение рассматриваемых рейсов. Значения всех величин для расчёта эксплуатационного коэффициента энергетической эффективности были взяты из машинного журнала, журнала грузовых и нефтяных операций и отчётов *EEOI* из компании после каждого рейса. Энергетический аудит танкера-химовоза, изложенный исследователями в статье [9], основан на сравнительном анализе изменения вида использованного топлива в течение определённых рейсов при одинаковом расходе топлива. В настоящем научном исследовании данный сравнительный анализ проводится с учётом изменения расхода топлива при использовании судового топлива с разной низшей теплотворной способностью.

Энергетический аудит танкера-газовоза проведён на основе следующий рейсов:

31. Хьюстон (США) – Тукспан (Мексика), начался 23 ноября 2016 г. и завершился 14 декабря 2016 г.;

32. Тукспан (Мексика) – Хьюстон (США), начался 14 декабря 2016 г. и завершился 20 декабря 2016 г.;

33. Хьюстон (США) – Омоа (Гондурас), начался 20 декабря 2016 г. и завершился 29 декабря 2016 г.;

34. Омоа (Гондурас) – Тукспан (Мексика), начался 29 декабря 2016 г. и завершился 4 января 2017 г.;

35. Тукспан (Мексика) – Омоа (Гондурас), начался 4 января 2017 г. и завершился 11 января 2017 г.;

36. Омоа (Гондурас) – Тукспан (Мексика), начался 11 января 2017 г. и завершился 19 января 2017 г.

Во время данного периода эксплуатации судна было использовано тяжёлое топливо RMG 380 и дизельное топливо DMA. Основные характеристики данных топлив в соответствии с результатами подтверждённых лабораторных анализов, полученных на судно, приведены в табл. 3 и 4.

Основные характеристики тяжёлого топлива RMG 380

Показатель	Значение	Метод анализа
Кинематическая вязкость при 50 °С, мм ² /с	330,7	ASTM D7042
Плотность при 15 °С, кг/м ³	990,2	ISO 12185
Расчётный индекс углеродной ароматизации <i>CCAI</i>	853	ISO 8217
Массовая доля серы, %	2,39	ISO 8754
Температура вспышки в закрытом тигле, °С	> 70	ISO 2719-B
Температура застывания, °С	< 24	LP 1304
Кислотное число, мгКОН/г	0,3	ASTM D664
Содержание воды, % об.	0,22	ASTM D6304-C
Зольность, %	0,06	LP1001
Низшая теплотворная способность, кДж/кг	40 330	ISO 8217

Таблица 4

Основные характеристики дизельного топлива DMA

Показатель	Значение	Метод анализа
Кинематическая вязкость при 40 °С, мм ² /с	4 219	ISO 3104
Плотность при 15 °С, кг/м ³	846,9	ISO 12185
Массовая доля серы, %	0,08	ISO 8754
Цетановый индекс	58	–
Температура вспышки в закрытом тигле, °С	> 70	LP1503
Температура текучести, °С	< –6	LP 1304
Кислотное число, мгКОН/г	0,2	LP 2003
Содержание воды, % об.	–	ASTM D6304-C
Зольность, %	< 0,01	LP1001
Низшая теплотворная способность, кДж/кг	42 760	ISO 8217

Дизельное топливо DMA использовалось во время рейсов 31, 32 и 33, когда танкер-газовоз эксплуатировался в особом районе Карибского моря. В результате во время рейсов из общего расхода топлива (1 064,2 т) было использовано 142,8 т дизельного топлива. Расчёт эксплуатационного коэффициента энергетической эффективности представлен в табл. 5.

Таблица 5

Расчёт EEOI при использовании топлива DMA и RMG 380

Рейс	Расход топлива, т		Данные рейса		Транспортная работа, т·миля
	DMA	RMG 380	Груз, т	Расстояние, миля	$m_{cargo} \cdot D$
31. Хьюстон – Тукспан	29,9	208,7	34 401	535	18 404 535
32. Тукспан – Хьюстон	69,4	36,7	17 122	538	9 211 636
33. Хьюстон – Омоа	43,5	150,8	46 525	1 070	49 781 750
34. Омоа – Тукспан	–	162,9	40 582	1 101	44 680 782
35. Тукспан – Омоа	–	184,9	31 113	1 093	34 006 509
36. Омоа – Тукспан	–	177,4	21 057	1 084	22 825 788
Суммарная величина	142,8	921,4	190 800	5 421	178 911 000
$C_F((\text{тCO}_2)/\text{т топлива})$ согласно табл. 1	3,206000	3,114400	–	–	$S = \Sigma(m_{cargo} \cdot D)$
Выбросы CO ₂	$C = \Sigma(FC \cdot C_F)$	3 327,4	тCO ₂		
EEOI	$EEOI = C / S$	18,6	гCO ₂ /(т·миля)		

Полученная величина $EEOI = 18,6$ гCO₂/(т·миля), является опорной точкой в исследуемом сравнительном анализе. Количество CO₂, выброшенное в атмосферу, напрямую связано с расходом топлива, следовательно EEOI также является инструментом оценки в отношении топливной экономичности. Анализ изменения EEOI для определённых рейсов служит в качестве инструмента для контроля расхода топлива, чтобы определить возможные источники снижения расходов.

Данный танкер-газовоз при плавании в особом районе до 1 января 2015 г., когда содержание серы в любом жидком топливе не должно было превышать 1,00 % по массе, использовал тяжёлый мазут с низким содержанием серы (low sulfur heavy fuel oil – LS HFO) RMG 380, основные характеристики которого приведены в табл. 6.

Таблица 6

Основные характеристики тяжёлого топлива LS HFO RMG 380

Показатель	Значение	Метод анализа
Кинематическая вязкость при 50 °С, мм ² /с	196,7	ASTM D7042
Плотность при 15 °С, кг/м ³	989,5	ISO 12185
Расчётный индекс углеродной ароматизации CCAI	858	ISO 8217
Массовая доля серы, %	1,0	ISO 8754
Температура вспышки в закрытом тигле, °С	> 70	ISO 2719-B
Температура застывания, °С	< 24	LP 1304
Кислотное число, мгКОН/г	0,1	ASTM D664
Содержание воды, % об.	0,23	ASTM D6304-C
Зольность, %	0,03	LP1001
Низшая теплотворная способность, кДж/кг	40 780	ISO 8217

Так как низшая теплотворная способность LS HFO RMG 380 меньше, чем у DMA, расход топлива для поддержания определённой мощности СЭУ увеличится. Корректирующий расход топлива для низшей теплотворной способности рассчитывается по следующей формуле:

$$CCCV = \frac{FC \cdot Q_{hi}^p}{Q_{hj}^p},$$

где *CCCV* (*Consumption corrected for calorific value*) – корректирующий расход топлива для низшей теплотворной способности, т; *FC* – масса потреблённого топлива главными и вспомогательными двигателями, котлами и другими потребителями, как записано в машинном журнале, за определённый рейс, т; Q_{hi}^p – низшая теплотворная способность для изначального используемого топлива, кДж/кг; Q_{hj}^p – низшая теплотворная способность для нового топлива при сравнительном анализе, кДж/кг.

При использовании другого вида топлива безразмерный переводной коэффициент приведения расхода топлива к выбросам CO₂ изменится, что должно привести к изменению *EEOI*. Расчёт эксплуатационного коэффициента энергетической эффективности при использовании LS HFO RMG 380 в особых районах до января 2015 г. приведён в табл. 7.

Таблица 7

Расчёт *EEOI* при использовании LS HFO RMG 380 в особых районах

Рейс	Расход топлива, т		Данные рейса		Транспортная работа, т·миля
	LS RMG 380	RMG 380	Груз, т	Расстояние, миля	$m_{cargo} \cdot D$
31. Хьюстон – Тукспан	31,4	208,7	34 401	535	18 404 535
32. Тукспан – Хьюстон	72,7	36,7	17 122	538	9 211 636
33. Хьюстон – Омоа	45,6	150,8	46 525	1 070	49 781 750
34. Омоа – Тукспан	–	162,9	40 582	1 101	44 680 782
35. Тукспан – Омоа	–	184,9	31 113	1 093	34 006 509
36. Омоа – Тукспан	–	177,4	21 057	1 084	22 825 788
Суммарная величина	149,7	921,4	190 800	5 421	178 911 000
C_F (тCO ₂)/т топлива) согласно табл. 1	3,114400	3,114400	–	–	$S = \Sigma(m_{cargo} \cdot D)$
Выбросы CO ₂	$C = \Sigma(FC \cdot C_F)$	3 335,8	тCO ₂		
<i>EEOI</i>	$EEOI = C / S$	18,65	гCO ₂ /(т·миля)		

Сравнительный анализ исследуемых ситуаций, рассматриваемых в табл. 5 и 7, определяет, что *EEOI* незначительно повышается при использовании LS RMG 380 в особых районах плавания. Несмотря на снижение в малой степени энергоэффективности судна при использовании LS RMG 380, данная ситуация до 1 января 2015 г. являлась наиболее экономически выгодной для судоходной компании из-за разницы в цене за метрическую тонну топлива.

На исследуемом судне основными потребителями пара с вспомогательного и утилизационного котла являются расходной и отстойный танки тяжёлого топлива, тёплый ящик, система кондиционирования воздуха, высокотемпературный контур системы охлаждения главного двигателя, расходной и отстойный танки нефтеостатков, бункеровочные танки тяжёлого топлива. Дизельное топливо не требует предварительного подогрева перед перекачкой и впрыском в цилиндр двигателя. Также при использовании дизельного топлива объём нефтеостатков уменьшается в два раза. В связи с вышеизложенным расход топлива вспомогательного котла снижается до 70 %. Следовательно, если исследователям не удастся до 2020 г. снизить содержание серы в тяжёлом топливе до 0,5 %, то СЭУ данного судна позволит использовать только дизельное топливо. Что поспособствует модернизации паровой системы данного проекта и установке вспомогательного котла с наименьшей производительностью, а пар с утилизационного котла позволит использовать для турбогенератора, что значительно снизит расход топлива СЭУ.

Прогнозируя данную ситуацию к 2020 г., в табл. 8 приведён расчёт эксплуатационного коэффициента энергетической эффективности при использовании дизельного топлива DMA. Расход топлива в данном случае рассчитывается с учётом экономии топлива для вспомогательного котла до 70 % при использовании только дизельного топлива и с изменением низшей теплотворной способности топлива в соответствии с формулой (1).

Расчёт *EEOI* при использовании топлива DMA

Рейс	Расход топлива, т	Данные рейса		Транспортная работа, т·миля
	DMA	Груз, т	Расстояние, миля	$m_{cargo} \cdot D$
31. Хьюстон – Тукспан	209,1	34 401	535	18 404 535
32. Тукспан – Хьюстон	97,3	17 122	538	9 211 636
33. Хьюстон – Омоа	181,3	46 525	1 070	49 781 750
34. Омоа – Тукспан	150,1	40 582	1 101	44 680 782
35. Тукспан – Омоа	170,8	31 113	1 093	34 006 509
36. Омоа – Тукспан	163,2	21 057	1 084	22 825 788
Суммарная величина	971,8	190 800	5 421	178 911 000
C_F (тCO ₂)/т топлива согласно табл. 1	3,206000	–	–	$S = \Sigma(m_{cargo} \cdot D)$
Выбросы CO ₂ , $C = \Sigma(FC \cdot C_F)$	3 115,7	тCO ₂		
$EEOI = C/S$	17,41	гCO ₂ /(т·миля)		

Сравнительный анализ ситуаций, рассматриваемых в табл. 5 и 8, определил, что использование дизельного топлива DMA на объекте исследования с 2020 г. значительно снизит величину *EEOI* – до 17,41 гCO₂/(т·миля). На момент bunkеровки топлива, использованного в рассматриваемых рейсах, 4 октября 2016 г. в порту Хьюстон (США) цены на данные виды топлива были следующие: RMG 380 – 256 долл./т, DMA – 489 долл./т [10]. Для рассматриваемой ситуации при использовании тяжёлого топлива RMG 380 и дизельного топлива DMA общие экономические затраты составили 305 708 долл., а для ситуации при использовании только дизельного топлива DMA – 475 210 долл. Из этого следует, что несмотря на значительное снижение *EEOI* при использовании дизельного топлива DMA, данная исследуемая ситуация является экономически не выгодной с разницей в общих затратах на топливо 169 502 долл.

Использование СПГ в качестве основного топлива повысит энергетическую и экономическую эффективность судна. Это обусловливается следующими основными факторами:

- малая величина безразмерного переводного коэффициента приведения расхода топлива к выбросам CO₂ для СПГ (табл. 1);
- повышение объёма грузовых танков за счёт малого объёма танков СПГ;
- высокое значение низшей теплотворной способности (СПГ $Q_H^p = 50\,000$ кДж/кг) снижает расход топлива.

Использование СПГ полностью соответствует новым требованиям МАРПОЛ 73/78 [1] к 2020 г. относительно содержания серы в топливе в связи с полным отсутствием серы. Применение СПГ на судне также имеет ряд других технических причин: существенное снижение содержания NO_x в выхлопных газах энергетической установки; практически полное отсутствие в выхлопных газах твёрдых частиц, что определяется особенностями процесса сгорания газа; повышение ресурса судовых поршневых двигателей, снижение нагарообразования [11].

В судоходной компании имеется ряд новых танкеров LPG¹, введённых в эксплуатацию в 2016 г., основные характеристики которых приведены в табл. 9 [12].

Таблица 9

Основные характеристики танкера LPG

Параметр	Значение
Длина между перпендикулярами, м	178,9
Ширина, м	29,4
Осадка, м	11,2
Дедвейт, т	27 906
Максимальная продолжительная мощность главного двигателя MAN B&W 6S50ME-C8.2-GI, кВт	8 100
Максимальная продолжительная мощность дизель-генераторов 6L20/8L20, кВт	1 055×2 / 1 420×2
Общий объём танков СПГ, м ³	2,322
Общий объём танков тяжёлого топлива, м ³	1 879
Общий объём танков дизельного топлива, м ³	236

¹ LPG (Liquefied Petroleum Gas) – сжиженный нефтяной газ.

Судовая энергетическая установка на данной серии судов способна использовать в качестве топлива СПГ, тяжёлое и дизельное топливо. Сжиженный природный газ хранится в двух танках, которые расположены на главной палубе. Применение СПГ вместе с дизельным топливом в особых районах повышает энергоэффективность судна. Ведущие специалисты компании в данной сфере находятся в процессе исследования и модернизации программного обеспечения и главного двигателя, чтобы позволить использовать в качестве топлива этан (C₂). При перевозке танкером этана использование груза в качестве топлива повысит энергетическую и экономическую эффективность судна [13].

Двухтопливный газовый главный двигатель (dual fuel gas engine) MAN B&W G70ME-C 9.2 отличается от главного двигателя, который установлен на объекте исследования, MAN B&W G60ME-9.2-ТII только наличием системы подвода газового топлива. На судовой палубе Hyundai, где был построен исследуемый танкер-газовоз, двухтопливный газовый двигатель MAN B&W G70ME-C 9.2 был установлен в основном на LNGC¹. Но Hyundai включил также данный газовый двигатель в СЭУ контейнеровоза [14].

Инфраструктура бункеровки СПГ на суда, которые не являются LNGC, в настоящее время усиленно развивается как в России, так и за рубежом. В Хьюстоне (США), где бункеруется исследуемое судно, имеются терминалы бункеровки СПГ. Вариант использования дизельного топлива на объекте исследования после 2020 г. является наиболее экономически эффективным, чем модернизация СЭУ, а именно внедрение газовой системы. Установка двухтопливных главных и вспомогательных двигателей, системы подачи и хранения газового топлива на новых судах данного проекта изначально повысит энергетическую и экономическую эффективность.

Заключение

Проведённый энергетический аудит исследуемого танкера-газовоза, который был основан на базе сравнительного анализа, определил, что повышение энергоэффективности возможно эксплуатационными мерами, такими как использование различных видов топлива. По представленным в работе результатам исследований доказано, что наиболее энергетически и экономически выгодным видом топлива для соблюдения жёстких требований международной конвенции МАРПОЛ 73/78 с 2020 г. является дизельное топливо DMA.

В ходе дальнейших исследований целесообразно рассмотреть вопросы внедрения двухтопливных газовых двигателей на новые суда данной серии и снижения содержания серы в тяжёлом топливе до требуемых значений. Жёсткие требования, которые вступят в силу после 2020 г., могут привести к серьёзной проблеме невозможности использования тяжёлого топлива в энергетике без применения эффективных скрубберов. Таким образом, применение новых требований относительно содержания серы в топливе целесообразно отложить на достаточный срок для поиска новых решений в исследуемых вопросах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Международная конвенция по предотвращению загрязнения моря с судов (МАРПОЛ 73/78)*. Книга III. СПб.: ЦНИИМФ, 2017. 412 с.
2. *Energy Efficiency related Rules and Regulation – EEDI and Ship Design. EEDI and other EEE Rules and Regulation*. URL: http://laradi.fi/images/files/syyspaivat_2014/Deltamarin_Elg_EE_Rules_and_Regulations_-_EEDI.pdf (дата обращения: 22.01.2018).
3. *Егоров Г. В., Колесник Д. В.* Оценка энергоэффективности грузовых судов смешанного плавания // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. Одесса: Изд-во ОГМА, 2012. Вып. 18. С. 27–43.
4. *Иванченко А. А., Петров А. П., Живлюк Г. Е.* Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов // Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2015. № 3 (31). С. 103–112.
5. *Руководство 2016 года по разработке плана энергоэффективностью судна (ПУЭС)*. СПб.: ЦНИИМФ, 2018. 44 с.
6. *Resolution MEPC.203 (62)*. Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973. URL: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/GHG/Documents/eedi%20amendments%20RESOLUTION%20MEPC203%2062.pdf> (дата обращения: 30.01.2018).

¹ LNGC (Liquefied Natural Gas Carrier) – танкер, перевозящий СПГ.

7. IMO. MEPC.1/Circ.684. URL: http://www.imo.org/en/OurWork/environment/pollutionprevention/airpolltion/documents/technical%20and%20operational%20measures/mepc.1_circ.684_guidelines%20for%20voluntary%20use%20of%20eoci.pdf (дата обращения: 02.01.2018).

8. Resolution MEPC.245 (66). Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. URL: [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee \(MEPC\)/Documents/MEPC.245\(66\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee (MEPC)/Documents/MEPC.245(66).pdf) (дата обращения: 07.01.2018).

9. Acomi N., Acomi O. C. The influence of different types of marine fuel over the energy efficiency operational index. European Geosciences Union General Assembly 2014. Energy Procedia 59. 2014. С. 243–248.

10. Houston Bunker Prices. URL: <http://shipandbunker.com/prices/am/usgac/us-hou-houston# IFO380> (дата обращения: 01.02.2018).

11. Луцкевич А. М., Крестьянцев А. Б. Использование СПГ на водном транспорте: утопия или разумный выбор? URL: <http://oilandgasforum.ru/data/files/Day3/Lutskevich.pdf> (дата обращения: 15.01.2018).

12. Pocket plan. URL: https://navigatorgas.datadial.info/wp-content/uploads/2015/12/NAV106_Pocket-GuideAurora_011015_A-Alternative.pdf (дата обращения: 08.02.2018).

13. Navigator Aurora delivery. URL: <http://www.navigatorgas.com/2016/08/02/delivery-navigator-aurora> (дата обращения: 07.02.2018).

14. The Dual Fuel engine for propulsion of merchant ships. URL: <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/marketing-publications/korean-yards-2015/presentations/2-05-me-gi-market-leader.pdf?sfvrsn=4> (дата обращения: 11.02.2018).

Статья поступила в редакцию 18.12.2018

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Покусаев Михаил Николаевич — Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; г-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой эксплуатации водного транспорта; pokusaev@astu.org.

Букин Владимир Григорьевич — Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; г-р техн. наук, профессор; профессор кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; bukinvg@mail.ru.

Абачараев Ибрагим Мусаевич — Россия, 367015, Махачкала; Институт физики им. Х. И. Амirkhanova Дагестанского научного центра Российской академии наук; г-р техн. наук, профессор; ведущий научный сотрудник отдела физико-технических проблем машиноведения; abacharaev@yandex.ru.

Ермолаев Владимир Павлович — Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; аспирант кафедры эксплуатации водного транспорта; Ermol17@mail.ru.



INFLUENCE OF FUEL TYPE ON ENERGY EFFICIENCY OF A GAS CARRIER POWER PLANT

M. N. Pokusaev¹, V. G. Bukin¹, I. M. Abacharaev², V. P. Ermolaev¹

¹*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation*

²*Institute of Physics named after H. I. Amirkhanov,
Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russian Federation*

Abstract. The article analyzes the changes in requirements for oxide emissions resulted from fuel combustion in accordance with the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships MARPOL 73/78. The problem of improving the energy efficiency of large-capacity gas

tankers is studied by using different types of marine fuel. An energy audit was carried out on board a gas carrier with deadweight of 54,354 tons and propulsion system power of 12,400 kW. The energy audit relied on data of six voyages of a gas-carrier from July 14, 2016 to January 19, 2017. The Energy Efficiency Operational Index defined as carbon dioxide emissions per ton-mile of cargo movement, was used as a tool for assessing the energy efficiency of the ship. The research included the methods of comparative analysis of fuel change during the voyages. The comparative analysis was applied to calculate changes of consuming fuels with different lower calorific value. There have been given general characteristics of heavy fuel RMG 380 and diesel fuel DMA. Values of all parameters for analysis of operational coefficient of power efficiency were taken from the engineer's log, cargo record book and oil record book, as well as from energy efficiency operation indicator reports of the company after each voyage. Based on the results of the assessment, the conclusions were drawn and perspectives were developed concerning the use of marine fuels and modification of the ship power plant. It has been inferred that using liquefied natural gas as main fuel increases power and economic efficiency of a ship and meets new requirements of MARPOL 73/78 to 2020 on sulfur content in fuel. The conducted research and preliminary calculations make it possible to predict an increase in the economic efficiency of a large-tonnage fleet while maintaining a high environmental friendliness.

Key words: energy efficiency operational index, energy audit, ship energy efficiency management plan, heavy tonnage gas carrier, ship power plant.

For citation: Pokusaev M. N., Bukin V. G., Abacharaev I. M., Ermolaev V. P. Influence of fuel type on energy efficiency of a gas carrier power plant. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2019;1:78-88. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-78-88.

REFERENCES

1. *Mezhdunarodnaia konventsiia po predotvrashcheniiu zagriazneniia moria s sudov (MARPOL 73/78). Kniga III* [The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL 73/78) Book III]. Saint-Petersburg, TsNIIMF Publ., 2017. 412 p.
2. *Energy Efficiency related Rules and Regulation – EEDI and Ship Design. EEDI and other EEE Rules and Regulation*. Available at: http://laradi.fi/images/files/syyspaivat_2014/Deltamarin_Elg_EE_Rules_and_Regulations_-_EEDI.pdf (accessed: 22.01.2018).
3. Egorov G. V., Kolesnik D. V. Otsenka energoeffektivnosti gruzovykh sudov smeshannogo plavaniia [Evaluation of power efficiency of cargo ships of mixed navigation]. *Avtomatizatsiia sudovykh tekhnicheskikh sredstv: nauchno-tehnicheskii sbornik*. Odessa, Izd-vo OGMA, 2012. Iss. 18. Pp. 27-43.
4. Ivanchenko A. A., Petrov A. P., Zhivliuk G. E. Energeticheskaia effektivnost' sudov i reglamentatsiia vybrosov parnikovykh gazov [Ship power efficiency and regulation of greenhouse gas emissions]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2015, no. 3 (31), pp. 103-112.
5. *Rukovodstvo 2016 goda po razrabotke plana energoeffektivnost'iu sudna (PUES)* [Sea guidance for the development of a ship energy efficiency management plan 2016]. Saint-Petersburg, TsNIIMF Publ., 2018. 44 p.
6. *Resolution MERS.203 (62). Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973*. Available at: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/GHG/Documents/eedi%20amendments%20RESOLUTION%20MEPC203%2062.pdf> (accessed: 30.01.2018).
7. *IMO. MEPC.1/Circ.684*. Available at: http://www.imo.org/en/OurWork/environment/pollutionprevention/airpolltion/documents/technical%20and%20operational%20measures/mepc.1_circ.684_guidelines%20for%20voluntary%20use%20of%20eeoi.pdf (accessed: 02.01.2018).
8. *Resolution MEPC.245 (66). Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships*. Available at: [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee\(MEPC\)/Documents/MEPC.245\(66\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee(MEPC)/Documents/MEPC.245(66).pdf) (accessed: 07.01.2018).
9. Acomi N., Acomi O. C. *The influence of different types of marine fuel over the energy efficiency operational index*. European Geosciences Union General Assembly 2014. *Energy Procedia* 59, 2014. Pp. 243-248.
10. *Houston Bunker Prices*. Available at: <http://shipandbunker.com/prices/am/usgac/us-hou-houston#IFO380> (accessed: 01.02.2018).
11. Lutskevich A. M., Krest'iantsev A. B. *Ispol'zovanie SPG na vodnom transporte: utopiia ili razumnyi vybor?* [Using LNG on water transport: utopia or a judicious choice?]. Available at: <http://oilandgasforum.ru/data/files/Day3/Lutskevich.pdf> (accessed: 15.01.2018).
12. *Pocket plan*. Available at: https://navigatorgas.datadial.info/wp-content/uploads/2015/12/NAV106_Pocket-GuideAurora_011015_A-Alternative.pdf (accessed: 08.02.2018).

13. *Navigator Aurora delivery*. Available at: <http://www.navigatorgas.com/2016/08/02/delivery-navigator-aurora> (accessed: 07.02.2018).

14. *The Dual Fuel engine for propulsion of merchant ships*. Available at: <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/marketing-publications/korean-yards-2015/presentations/2-05-me-gi-market-leader.pdf?sfvrsn=4> (accessed: 11.02.2018).

The article submitted to the editors 18.12.2018

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pokusaev Mikhail Nikolaevich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Operation of Water Transport; pokusaev@astu.org.

Bukin Vladimir Grigorievich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Heat Power Engineering and Refrigeration Machines; bukinvg@mail.ru.

Abacharaev Ibragim Musaevich – Russia, 367015, Makhachkala; Institute of Physics named after H. I. Amirkhanov of Dagestan Scientific Center of Russian Academy of Sciences; Doctor of Technical Sciences, Professor; Leading Researcher of the Department of Physical and Technical Problems of Engineering Science; abacharaev@yandex.ru.

Ermolaev Vladimir Pavlovich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Postgraduate Student of the Department of Operation of Water Transport; Ermol17@mail.ru.

