

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕНЕРИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИННОВАЦИОННЫХ СИСТЕМ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ГЛАВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МОРСКИХ СУДОВ

Рак А.Н., Бирюков А.Б.

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

Аннотация

В настоящее время в судоходной отрасли всего мира очень большое внимание уделяется сокращению выбросов в окружающую среду парниковых газов. Для этого на судах применяются системы утилизации тепла продуктов сгорания главных двигателей, которые позволяют вырабатывать электрическую энергию, но вопросы их технической эксплуатации практически не рассматриваются. Целью данной статьи является разработка упрощенной методики расчета, позволяющей оценить эксплуатационные характеристики таких систем не только в номинальном режиме, а и в режимах отличных от него. Данная статья будет полезна не только электромеханикам морских судов, а другим специалистам, занимающимся технической эксплуатацией флота.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, утилизация теплоты, главный двигатель, морское судно.



METHOD OF DETERMINATING THE GENERATING ABILITY OF THE INNOVATIVE SYSTEMS OF THE MAIN ENGINES OF MARINE VESSELS

Alexander N. Rak, Alexey B. Biryukov

Donetsk National Technical University, Donetsk

Abstract

Currently, the shipping industry around the world pays great attention to reducing greenhouse gas emissions into the environment. For this, ships utilize heat recovery systems for the combustion products of the main engines, which allow the generation of electric energy, but the issues of their technical operation are practically not considered. The purpose of this article is to develop a simplified calculation methodology that allows us to evaluate the operational characteristics of such systems not only in the nominal mode, but also in modes different from it. This article will be useful not only to the marine electro-technical officers, but to other specialists involved in the technical operation of the fleet.

Key words: internal combustion engine, heat recovery, main engine, marine vessels.

Введение (Introduction)

С подписанием в 1997г. Киотского протокола регулирование выбросов парниковых газов (ПГ) и связанная с этим экономическая деятельность, которое до этого являлось исключительной прерогативой национальных правительств, стало объектом



международных соглашений. Этим было положено начало сокращению выбросов ПГ в атмосферу для сдерживания глобального потепления и устанавливались квоты по выбросам для нескольких развитых стран. Подписание в Париже 12 декабря 2015г. Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата стало результатом усилий мирового сообщества, направленных на регулирование выбросов ПГ и ограничивающее их на уровне 1,5°C. Для морской отрасли все правовые и технические вопросы регламентируются Международной морской организацией (далее ИМО) в рамках международной конвенции MARPOL-73/78 по загрязнению с судов. Хотя *Парижское* соглашение прямо не упоминает ИМО в качестве основного форума для решения проблемы выбросов ПГ в море, но оно распространяется абсолютно на все антропогенные выбросы ПГ из всех секторов.

Деятельность ИМО по разработке своих инструментов (Международных конвенций, Циркуляров и др.) осуществляется рабочими органами – Комитетами ИМО. Одним из них является Комитет по защите морской среды, который, в частности, работает над развитием вышеуказанной конвенции.

Конвенция имеет 6 приложений. Приложение VI [1] посвящено защите атмосферы от загрязнения с судов. Помимо известных мер, принимаемых по защите атмосферы от выбросов окислов серы, окислов азота и твердых частиц, ИМО выступила с инициативой разработки инструмента по защите атмосферы от ПГ.

Эти требования вошли в главу 4 Приложения VI к данной конвенции и направлены на снижение эмиссии ПГ с судов. В соответствии с [2] на сектор экономики, связанный с морской отраслью (международные, каботажные морские перевозки и рыболовство), приходится 3,3% выбросов CO₂. Там же приводится информация по количественным выбросам для конкретных типов морских судов.

Так, в соответствии с указанным выше Приложением VI, выбросы ПГ рекомендуется учитывать с помощью индекса энергоэффективности (Energy Efficiency Design Index – EEDI), который *характеризует энергетические возможности технического средства при наименьших затратах ресурсов для выработки энергии.*

В ряде случаев, его оценка производится с учетом установленного на судне оборудования, пренебрегая возможностями применения *инновационных технологий* в энергетике, интегрированным подходом к определению тех возможностей, которые не очевидны, но присутствуют при проектировании судна. В простейшем случае оценка выполняется по комплексному показателю качества судовой энергетической установки, исходя из ее расходных и ресурсных показателей.

В то же время, в современном двигателестроении и судостроении не только декларируется, но и происходит переход от частных случаев повышения КПД агрегата к комплексной интегральной оценке всех аспектов влияния на энергетические показатели самого судна. Повышение эффективности и экологической безопасности проектов были изучены на фоне необходимости удовлетворения требований ИМО, вступивших в силу в 2013г. Исследования показали, что потенциал для экономии энергии велик, в некоторых случаях он достигает 50%. В связи с возникшей потребностью введения показателя, свидетельствующего об эффективности судна в отношении топливной экономичности и выбросов ПГ, предлагалось ввести конструктивный индекс CO₂, а также индикатор эксплуатационной эффективности, который определяет эффективность судна по количеству CO₂ в тоннах, выброшенного отдельной установкой за период рейса судна на тонну перевезенного груза на расстояние в 1 милю.

Снижение эмиссии ПГ определяется в соответствии с Поправкой к Приложению VI к MARPOL по техническим мерам сокращения выбросов ПГ с судов в соответствии с Резолюцией ИМО МЕРС.203(62) вступившей в силу 1 января 2013 года.



Достигнутый индекс должен определяться в соответствии с пересмотренным «Руководством ИМО по методу расчета Конструктивного индекса для новых судов, 2012», приведённом в Резолюции МЕРС.212(63):

$$EEDI = \frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot Capacity \cdot v_{ref} \cdot f_w} \quad (1)$$

$$+ \frac{\left(\left(\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot Capacity \cdot v_{ref} \cdot f_w}$$

где SFC - удельный расход топлива двигателя [$г/кВт час$]; C_F - безразмерный переводной коэффициент между расходом топлива в двигателе ($г$) и выбросами CO_2 ($г$), определёнными по содержанию углерода в конкретном топливе [$г CO_2 / г топлива$]; P_{MEi} , - показатель мощности каждого главного двигателя (ГД), равный 75% от его номинальной мощности за вычетом мощности, потребляемой валогенератором (в случае его наличия); P_{AE} - показатель требуемой мощности вспомогательных двигателей для обеспечения электроэнергией при максимальной загрузке судна; P_{PTI} - показатель, равный 75% номинальной мощности, потребляемой каждым гребным электродвигателем с учётом механических потерь в нем и без учёта потерь в генераторе; P_{AEff} - показатель сокращения электрической энергии за счёт использованию энергоэффективных технологий (использование отходящего тепла ГД), которые в [3] называют *инновационными*; P_{eff} - показатель сокращения мощности ГД за счёт применения инновационных технологий в пропульсивной установке при 75% мощности ГД; f_i - фактор вместимости судна, учитывающий необходимость выполнения требований по ограничению вместимости судна, например требований которые применяются к судам ледового класса; f_j - корректирующий фактор, учитывающий специфическую конструкцию элементов судов, например, судов ледового класса; f_w - безразмерный коэффициент, учитывающий снижение скорости при определённом неблагоприятном состоянии моря в зависимости от высоты и частоты волны, а также от скорости ветра; f_{eff} - коэффициент доступности каждой инновационной технологии; v_{ref} - скорость судна, измеренная на глубокой воде с учётом соответствующей вместимости (дедвейт или валовая вместимость в зависимости от типа судна) в соответствии с вышеуказанным Руководством [узлы]. Более детально с расчетом коэффициентов f_i , f_j , f_w и f_{eff} можно ознакомиться в [4,5].

Растущий интерес к снижению эксплуатационных расходов на судах и сокращению выбросов ПГ предусматривают меры, обеспечивающие оптимальное использование топлива, используемого для ГД. Следуя тенденции по повышению общей эффективности судна после первого нефтяного кризиса в 1973 году, КПД ГД возрос, и на сегодняшний день составляет около 50%. Это высокое значение, помимо прочего, привело к низким значениям удельного расхода топлива, а также к, соответственно, более низкой температуре отработавших газов (ОГ) после турбокомпрессоров (ТК). Несмотря на то, что энергоэффективность потребляемого топлива, которая составляет 50%, является относительно высокой, поэтому основной задачей для судовладельца по-прежнему является дальнейшее снижение не только эксплуатационных расходов, но и общего расхода топлива. Это также может привести к дальнейшему сокращению выбросов CO_2 .



Таким образом, вопросы, связанные с генерированием электрической энергии при минимизации топливных затрат являются весьма актуальными.

Цель работы – разработка и обоснование адекватности упрощенной методики определения генерирующей способности системы утилизации тепла главных двигателей морских судов.

Материалы и методы (Materials and Methods)

На рис.1 показано сравнение тепловых балансов для наиболее распространенных типов малооборотных ГД с системой утилизации тепла (СУТ) ОГ и без нее. Как следует из рис.1 основным источником отработанного тепла ГД является тепловыделение ОГ, на которые приходится около половины общего отработанного тепла, т.е. около 25% от общей энергии топлива. Энергия ОГ ГД на сегодняшний день является наиболее привлекательной среди источников отработанного тепла на судне из-за теплового потока и температуры. При этом для ГД в сочетании с СУТ общий КПД увеличится примерно до 55%. Формула (1) позволяет рассмотреть возможность добавления СУТ на судно, проанализировать ее эффективность и выполнить соответствующую настройку.

В соответствии с [6] можно генерировать электрическую энергию до 11% от мощности ГД, используя энергию ОГ в СУТ, содержащей как паровые (ПТ), так и газовые турбины (ГТ), и в сочетании с использованием энергии продувочного воздуха для подогрева питательной воды утилизационного котла (УК).

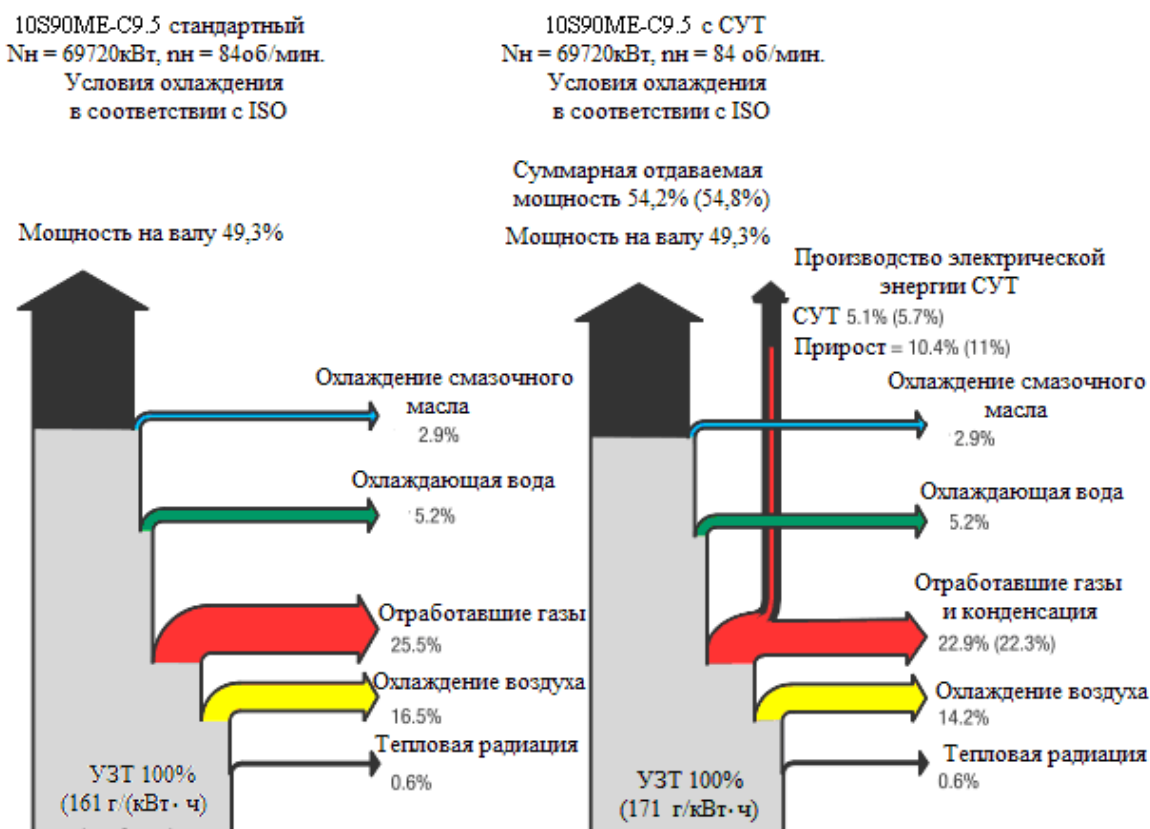


Рис. 1. Тепловой баланс ГД с системой утилизации тепла и без нее

Данные для различных мощностей ГД и комбинаций данных систем приведены в табл.1 и табл.2, соответственно. В будущем могут быть предусмотрены специальные варианты и комбинации вышеуказанных систем.

Таблица 1

Рекомендованные к применению типы турбин при различных мощностях ГД

Мощность ГД, кВт	Тип турбин
>25000	ГТ и ПТ
<25000	ГТ или ПТ
<15000	ГТ или Органический цикл Ренкина

Таблица 2

Максимальная мощность, получаемая при применении турбин различных типов

Тип турбин	Получаемая максимальная мощность, %
ГТ	3-5
ПТ (одного давления)	4-7
ПТ (двух давлений)	5-8
СУТ (ГТ+ПТ)	8-11

В настоящее время вопросами создания СУТ активно занимаются такие известные фирмы, как SIEMENS (ФРГ) и ABB (Шведско-Швейцарское совместное предприятие), Mitsubishi (Япония). Среди отечественных исследований в плане СУТ в судовых дизельных установках следует отметить Селиверстова В.М., Маслова В.В., а для других отраслей хозяйственной деятельности следует отметить работы Соколова Я.Е. и Лисенко В.Г. Существующие методики являются очень сложными, требуют учета очень большого количества исходной информации и, в основном, рассчитаны на судомехаников поскольку вопросы производства всех видов энергии на морских судах, независимо от государственной принадлежности и формы собственности, находятся в их компетенции. Вопросы передачи и распределения электрической энергии, а также контроля показателей ее качества и учета, находятся в компетенции судового электромеханика. Поэтому он должен уметь оценивать генерирующие возможности таких систем.

Результаты (Results)

В стандартной высокоэффективной версии ГД температура ОГ относительно низкая после ТК, и достаточна для производства пара, необходимого для отопления судна с помощью стандартного котла, работающего на ОГ, встроенного в дымовую трубу.

Схема СУТ приведена на рис. 2. Принцип действия системы состоит в следующем: большая часть ОГ из выпускного коллектора (ВК) поступает на турбокомпрессор (ТК), обеспечивающий работу ГД, а их меньшая часть поступает на ГТ, приводящую в действие генератор, присоединенный к ней. Горячие ОГ, прошедшие через ТК и ГТ поступают в УК, где нагревается часть воды из системы охлаждения ГД, используемой для производства пара, направляемого на ПТ для производства электроэнергии.

Для разработки методики определения генерирующих возможностей всей системы использованы стандартные зависимости, описывающие процессы идеального и реального сжатия и расширения газов [7]. В наиболее общем случае СУТ представлена двумя ГТ (одна из которых используется для ТК, а вторая для выработки электроэнергии), УК и ПТ, предназначенной для выработки электроэнергии. Расчеты ГТ ведутся при помощи зависимостей, используемых для идеального цикла, с последующим упрощенным учетом необратимости процессов. В связи с тем, что в рассматриваемых



условиях ГТ является не отдельным тепловым двигателем, а элементом системы ГД-СУТ, работа на ее валу может быть определена как работа элементарного термодинамического процесса, связанного с расширением продуктов сгорания от давления ПС до давления близкого к атмосферному.

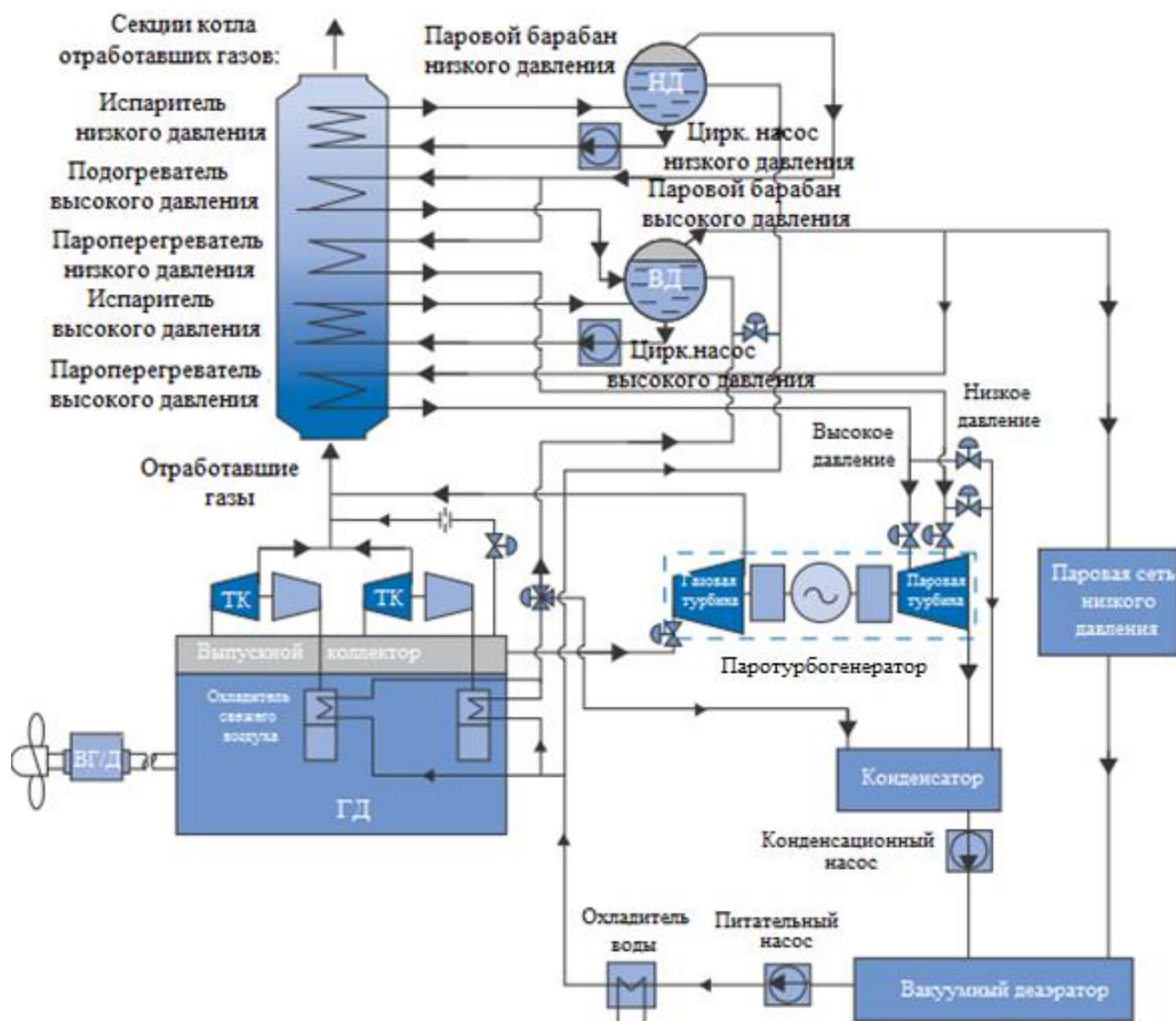


Рис. 2. Схема системы утилизации и производства электроэнергии на судне

Основные зависимости, используемые для расчета: температура воздуха, сжимаемого в компрессоре, для случая адиабатического сжатия определяется в соответствии с выражением:

$$T_{2B} = T_{1B} \left(\frac{P_{кЛ}}{P_B} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (2)$$

где T_{1B} – температура окружающего воздуха, К; $P_{кЛ}$ – давление перед впускными клапанами, Па; P_B – давление атмосферного воздуха, Па; $k = 1.4$ – показатель адиабаты для двухатомных газов.



С учетом необратимости процесса сжатия конечная температура воздуха определяется как:

$$T_{3B} = T_{1B} + \frac{T_{2B} - T_{1B}}{\eta_{oi}^{ГТК}}, \quad (3)$$

где $\eta_{oi}^{ГТК}$ - внутренний относительный КПД проточной части компрессора.

Требуемая мощность для привода воздушных ТК:

$$N_{CB} = G_B \cdot c_B \cdot (T_{3B} - T_{1B}), \quad (4)$$

где G_B - расход воздуха через турбокомпрессор (ТК), кг/с; c_B - теплоемкость воздуха, кДж/кг·К.

Температура ОГ после расширения в ГТ привода компрессора для случая адиабатического расширения определяется в соответствии с выражением:

$$T_{2ПС-ГТК} = T_{1ПС} \left(\frac{P_B}{P_{BX}} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (5)$$

где P_{BX} - давление газов в ВК после ГД, Па; $T_{1ПС}$ - температура продуктов сгорания в ВК, К.

Температура ОГ после расширения в ГТ привода компрессора с учетом необратимости процесса:

$$T_3'' = T_{1ПС} - \eta_{oi}^{ГТ-ТК} \cdot (T_{1ПС} - T_{2ПС}), \quad (6)$$

где $\eta_{oi}^{ГТ-ТК}$ - внутренний относительный КПД проточной части ГТ привода ТК.

Мощность, развиваемая на ГТ привода воздушных ТК:

$$N_{CB} = G_{ТК} \cdot c_{nc} \cdot (T_{1ПС} - T_3''), \quad (7)$$

где $G_{ТК}$ - расход ОГ, проходящих через ТК, кг/с; c_{nc} - теплоемкость ОГ с учетом их теплоемкости и температуры, Дж/(кг·К).

На основании приравнивания мощностей ТК и приводящей его в движение ГТ, определяется массовый расход ОГ, который необходимо отводить на ГТ привода ТК.

Остальные ОГ отправляются на ГТ, вырабатывающую электроэнергию:

$$G_{ГТ} = G_{ПС} - G_{ТК}, \quad (8)$$

где $G_{ПС}$ - общий массовый расход ОГ после ГД, кг/с

Температура ОГ после расширения в ГТ, производящей электроэнергию T_3' определяется аналогично случаю расчета ГТ привода ТК с учетом соответствующего значения внутреннего относительного КПД проточной части ГТ.

Мощность ГТ, предназначенной для производства электроэнергии

$$N_{ГТ} = G_{ГТ} \cdot c_B \cdot (T_{1ПС} - T_3'), \quad (9)$$

Средневзвешенное значение температуры ОГ на входе в УК с учетом смешивания газов после ГТ привода ТК и ГТ, генерирующей электроэнергию, К:

$$T_{ВХ.УК} = \frac{G_{ГТ} \cdot T_3' + G_{ТК} \cdot T_3''}{G_{ПС}}, \quad (10)$$

Количество теплоты, передаваемой в УК производимому пару.

$$Q_{УК} = G_B \cdot c_B \cdot (T_{ВХ.УК} - T_{ВДТ}), \quad (11)$$

где $T_{ВДТ}$ - температура ОГ на выходе из УК, К.



Мощность генерации электрической энергии ПТ за счет пара произведенного в УК.

$$N_{ПТ} = \eta_{oi}^K \cdot Q_{УК}, \quad (12)$$

где η_{oi}^K – ориентировочное значение КПД генерирующего комплекса на базе УК и ПТ.

Обсуждение (Discussion)

Очень важным моментом является количество и качество исходной информации. Для ее получения можно пользоваться типовыми характеристиками для двухтактных дизелей, приведенными, например в [8] или другими источниками. Но, как показывает практический опыт, в них информация по ряду позиций носит ограниченный рекламно-информационный, искаженный, а иногда и вообще закрытый характер.

Нами для исследований использовалась программа on-line CEAS Engine Calculation MAN B&W [9]. С ее помощью нами получена информация, необходимая для применения предложенной методики, представленная как в виде графических зависимостей (рис. 3), так и в виде табл. 3. Недостаток программы состоит в том, что в ней приведены сведения не все типы ГД и, в случае необходимости, информацию следует дополнительно запрашивать непосредственно у производителя.

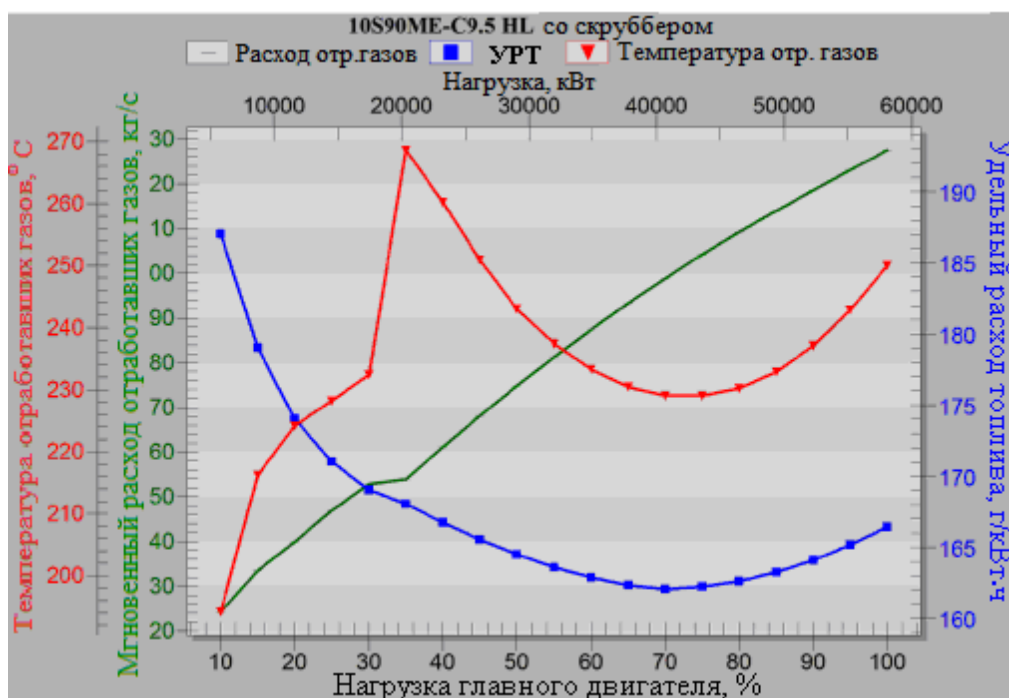


Рис. 3. Характеристики главного двигателя MAN 10S90ME-C9.5HL

В соответствии с методикой разработанной выше были проведены исследования, позволяющие определять количество энергии, производимой на судне ГТ и ПТ в режимах, отличающихся от приведенных в инструкциях по технической эксплуатации.

Результаты расчетного определения развиваемой мощности элементов СУТ в зависимости от мощности ГД представлены на рис. 4 и в табл. 4.

Кривая мощности, генерируемой энергии при помощи ПТ (3), полученная с помощью предлагаемой методики, находится несколько выше, чем кривая (1). Кривая мощности ГТ (5), полученная с помощью предлагаемой методики практически совпадает с кривой (2).



Таблица 3

Исходные данные для расчета по приведенной методике

Нагрузка ГД, %	Мощность, кВт	Частота вращения, мин ⁻¹	Удельный расход топлива, г/кВт·ч	Мгновенный расход газа, кг/с	Давление отработавших газов перед выпускными клапанами, кПа	Температура отработавших газов, К
100	58100	84	166,5	127,5	405	523
90	52290	81,1	164,1	118,7	368	510
80	46480	78	162,6	109,2	336	503
75	43575	76,3	162,2	104,2	322	503
70	40670	74,6	162,1	98,8	302	502
60	34860	70,8	162,9	87,4	261	506
50	29050	66,7	164,5	74,8	221	516

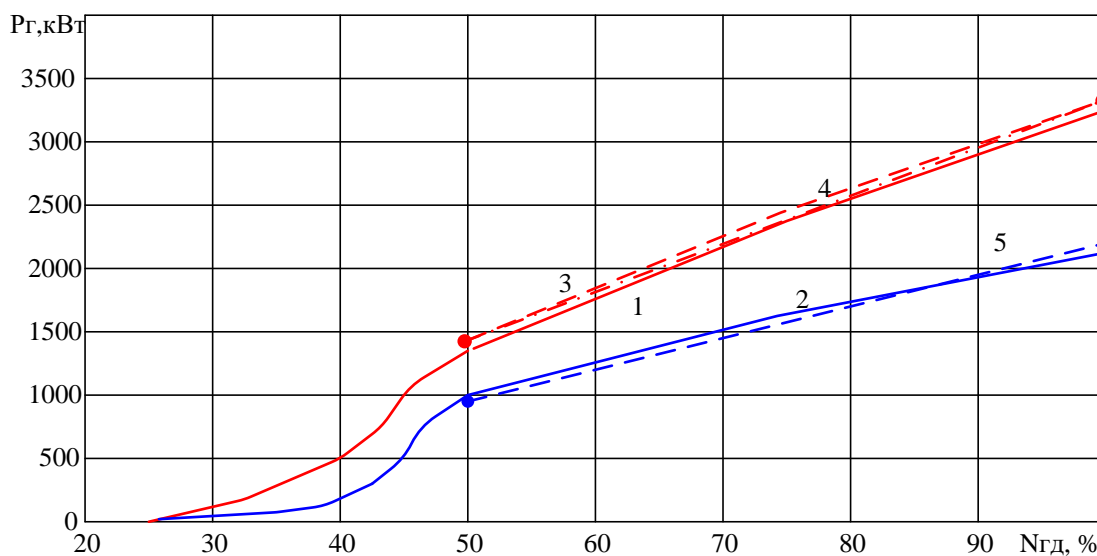


Рис. 4 Генерируемая на судне энергия:

1 - ПТ в соответствии с [11]; 2 - ПТ в соответствии с (11); 3 - ГТ в соответствии с [11];
4 - ГТ в соответствии с (8)

Таблица 4

Мощность генерируемая СУТ для ГД MAN B&W 10S90ME-9.2-ТII

Количество цилиндров ГД	Генерируемая мощность		ГТ	ПТ	Суммарная
	Нгд, %	кВт	кВт	кВт	
10	100	58100	2185	3196	4939
	75	43575	1529	2301	3358



Как указывается в [10] работа ГД с нагрузкой менее 50% номинальной ассоциируется с большими допущениями и, кроме того в отечественной нормативно-технической документации рекомендуется эксплуатировать ГД в режимах близких к номинальному, т.е. $\approx 90\%$ [11]. Поэтому при работе ГД в диапазоне 50-90% от номинальной мощности ГД зависимость (3) можно аппроксимировать линейной зависимостью кривая (4). При этом наибольшее отклонение наблюдается только в точке при нагрузке ГД 75%, но, как показывают расчеты, они не превышают 4,25%. Для остальных точек они будут значительно меньше. Кривые (2) и (5) практически идентичны. Тогда, для определения мощностей, генерируемых с помощью ПТ и ГТ в режимах отличных от номинального, достаточно будет по данным соответствующих инструкций взять данные для режимов нагрузки 75% и 100% от номинальной мощности ГД и провести через них прямую до режима нагрузки 50%. Полученные данные сравнивались с данными для ГД MAN B&W 10S90ME-9.2-ТII, приведенными в [6]. Сравнение данных, полученных по предлагаемой методике и результатами, представленными в открытой печати, не превышают 5%, что является вполне допустимым.

Выводы (Conclusion)

1. Предлагаемая методика, позволяет определять количество генерируемой энергии на судне в режимах, отличающихся от данных приведенных в ИТЭ для любых типов главных двигателей, на которых применяются системы утилизации тепла отработавших газов.

2. С помощью предложенной методики можно определять количество энергии, производимой отдельно каждым из типов турбогенераторов (паровых или газовых). При этом предпочтение тому или другому типу турбогенератора следует отдавать на основании технико-экономического сравнения.

3. Информация, приведенная в ограниченном виде в соответствующих инструкциях, является достаточной не только для оценки генерирующих возможностей ГД при номинальной нагрузке, но и для подтверждения соответствия главной энергетической установки требованиям конвенции MARPOL 73/78 в части повышения энергоэффективности судна и сокращения выбросов ПГ (при нагрузке 75%).

Библиографический список

1. Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов. Приложение VI (пересмотренное) к Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, измененной Протоколом 1978 года к ней (МАРПОЛ 73/78). СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2012. 762 с.
2. Control of greenhouse gas emissions from ships engaged in international trade: Fifteenth conference of the parties Cop 15. Copenhagen, Denmark: IMO, 2019. 44 p. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/imo_awg-lca_8_submission.pdf.
3. IMO Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation. Module 2 - Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines. London: IMO, 2016. 45 p. URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/M2%20EE%20regulations%20and%20guidelines%20final.pdf>.
4. Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. Resolution MEPC.212(63). Annex 8. London: IMO, 2012. 20 p. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPC/Documents/MEPC.212\(63\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPC/Documents/MEPC.212(63).pdf).
5. Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. Resolutions MEPC.308(73). Annex 5. London: IMO, 2018, 36 p. URL:



[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308\(73\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308(73).pdf).

6. Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption, Emissions and EEDI. Copenhagen, Denmark: MAN Diesel & Turbo, 2014. 32 p. URL: <https://mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technical-papers/waste-heat-recovery-system.pdf>.
7. Шелудченко В.И., Кравцов В.В., Волкова О.Г. Техническая термодинамика. Севастополь: «Вебер», 2002. 326 с.
8. Pounder's Marine Diesel Engines and gas Turbines / Ed. D. Woodyard. 8th Edition. Oxford, GB: Butterworth-Heinemann, 2003. 912 p.
9. CEAS engine calculations [Сайт]: MAE Energy Solutions. URL: <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/ceas-engine-calculations> (дата обращения 30.10.21).
10. MAN B&W S90ME-C8.2-TII. Project Guide. Copenhagen, Denmark: MAN Diesel & Turbo, 2014. 318 p. URL: https://www.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/epub/S90ME-C8_2.pdf.
11. Техничко-экономические характеристики судов морского флота. РД 31.03.011-90. М.: В/О «Мортехинформреклама», 1992. 232 с.

References

1. IMO. (2017). *MARPOL Annex VI & NTC 2008 with Guides for Implementations*. International Maritime Organization.
2. IMO. (2019). *Control of greenhouse gas emissions from ships engaged in international trade: Fifteenth conference of the parties Cop 15*. International Maritime Organization. https://unfccc.int/sites/default/files/imo_awg-lca_8_submission.pdf.
3. IMO. (2016). *IMO Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation. Module 2 - Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines*. International Maritime Organization. <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/M2%20EE%20regulations%20and%20guidelines%20final.pdf>.
4. IMO. (2012). *Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. Resolution MEPC.212(63). Annex 8*. International Maritime Organization. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.212\(63\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.212(63).pdf).
5. IMO. (2018). *Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. Resolutions MEPC.308(73). Annex 5*. International Maritime Organization. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308\(73\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308(73).pdf).
6. MAN Diesel & Turbo. (2014). *Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption, Emissions and EEDI*. MAN Diesel & Turbo. <https://mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technical-papers/waste-heat-recovery-system.pdf>.
7. Sheludchenko, V.I., Kravtsov, V.V., & Volkova, O.G. (2002). *Tehnicheskaya termodinamika [Engineering Thermodynamics]*. Veber. [In Russian]
8. Woodyard, D. (Ed.). (2003). *Pounder's Marine Diesel Engines and gas Turbines*. (8th Edition). Butterworth-Heinemann.
9. MAE Energy Solutions (n.d.). *CEAS engine calculations*. Retrieved October 30, 2021 from <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/ceas-engine-calculations>
10. MAN Diesel & Turbo (2014). *MAN B&W S90ME-C8.2-TII. Project Guide*. MAN Diesel & Turbo. https://www.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/epub/S90ME-C8_2.pdf.



11. GEM TsNIIMFom. (1992). *Tehnico-ekonomicheskie harakterisyiki sudov morskogo flota. RD 31.01.011-90 [Technical and economic characteristics of the vessels ships]*. Morteinformreklama. [In Russian].

Сведения об авторах

Рак Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика и теоретические основы электротехники», электромеханик морских судов.
Донецкий национальный технический университет (г. Донецк).
E-mail: lion15ua@rambler.ru.

Бирюков Алексей Борисович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая теплофизика».
Донецкий национальный технический университет (г. Донецк).
SPIN-код: [3186-0680](#).
E-mail: teplofizika@yandex.ru.

Authors about

Alexander N. Rak, Cand. of tech. Sciences (PhDS), Associated Professor, electro-technical officer of marine vessels.
Donetsk National Technical University, Donetsk city.
E-mail: lion15ua@rambler.ru.

Alexey B. Biryukov, Dr. of Tech. Sciences (DSc), Professor.
Donetsk National Technical University, Donetsk.
ORCID: [0000-0002-8146-2017](https://orcid.org/0000-0002-8146-2017).
E-mail: teplofizika@yandex.ru.

