

УДК 656.07:338.47

Кирис В.А.
ОНМА

ТЕНДЕНЦИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТА

Под энергоэффективностью многие институты предлагают понимать рациональное использование энергии или использование меньшего количества энергии для обеспечения установленного уровня производства продукта при технологических процессах на производстве. В течение последних десятилетий проблеме энергоэффективности уделяют всё большее внимание. Это связано как с существенным подорожанием энергоресурсов, так и с усиливающейся в последнее время заботой об окружающей среде. С 70-х годов прошлого века многие страны внедряют программы по повышению энергоэффективности.

Материалы по введению в транспортную отрасль энергоэффективных технологий, в 2010 г. подготовило Международное энергетическое агентство [1]. Объясняется это тем, что транспорт представляет собой область с наиболее высоким топливо- и энергопотреблением.

Согласно Второму семинару ИМО по выбросу парниковых газов (2009), в 2007 году судоходство произвело около 870 тонн парниковых газов, что составляет приблизительно 2,7% от мировых выбросов CO₂, сделанных человеком.

Связь между выбросами парниковых газов и энергоэффективностью заключается в следующем. Выбросы CO₂ определяются граммами газа, выброшенными на тонну груза за милю пути (гр(CO₂)/т•миль), что, в свою очередь, зависит от количества сожжённого топлива.

В руководящих документах ИМО энергоэффективность определяется именно этим параметром – гр (CO₂)/т•миль, а понятия «энергоэффективность» и «экологичность» в резолюциях связаны.

К резолюциям ИМО касательно энергоэффективности относятся:

1. МЕРС.203(62). Включает в Приложение VI конвенции МАРПОЛ правила энергоэффективности;
2. МЕРС.212(63). Содержит методику вычисления достигнутого конструктивного коэффициента энергоэффективности (attained energy efficiency design index (EEDI)) для новых

- судов;
3. МЕРС.213(63). Утверждает методику для разработки судового плана по энергоэффективности (ship energy efficiency management plan (SEEMP));
 4. МЕРС.214(63) содержит методику оценки и сертификации конструктивного коэффициента энергоэффективности;
 5. МЕРС.215(63) – это методика расчёта относительных линий (reference lines), используемых вместе с оценкой конструктивного коэффициента энергоэффективности.

В резолюциях МЕРС.203(62) и МЕРС.212(63) Международной Морской Организацией (ИМО) вводится понятие "конструктивного коэффициента энергоэффективности" ($K_{КЭ}$). Это понятие распространено на: новые суда; новые суда, подвергшиеся серьёзному переоборудованию; новые или существующие суда, подвергшиеся настолько серьёзному переоборудованию, что считаются морской администрацией государства заново сконструированными.

С 1 января 2013 г. или после этой даты при первоначальном освидетельствовании новых судов, попадающих под требования главы 4 Приложения 6 к МАРПОЛ, до ввода их в эксплуатацию и до первой выдачи Международного свидетельства энергоэффективности судна необходимо подтвердить, что судно соответствует требованиям главы 3 Приложения 6 к МАРПОЛ, а достигнутый $K_{КЭ}$ судна соответствует требованиям правила 21 Приложения 6. Кроме этого, на судне должен находиться Судовой план управления энергоэффективностью судна в соответствии с правилом 22 Приложения 6 к МАРПОЛ.

Расчетный достигнутый конструктивный коэффициент энергоэффективности судна $K_{КЭ(p)}$ не должен превышать уровень предельно допустимого базового значения для однотипного судна. Такой подход, благодаря внедрению новых технологических решений, позволяет: применять экономичные двигатели; широко использовать утилизацию отходящей теплоты; применять альтернативные источники энергии; увеличить грузместимость и расчётную скорость судна путем оптимизации форм корпуса и пропульсивного комплекса.

В [2] нами была проверена методика расчёта $K_{КЭ}$ на примере судна-контейнеровоза MSC Faustina, постройки 2012 года, которое не относилось к новым судам, и расчёт $K_{КЭ}$ для него не был обязательным. По результатам расчёта MSC Faustina полностью удовлетворяла

требованиям ИМО по энергоэффективности до 2020 года, что говорит об относительной мягкости этих требований.

Модель расчета критерия конструктивной энергоэффективности судна в представленном виде – это начальный, но необходимый этап оптимизации энергетических потоков в пропульсивном комплексе судна.

Резолюция МЕРС.213(63) приводит пример методов повышения энергоэффективности. К таким методам относятся:

1. Планирование рейса. Оптимальный маршрут и точное его выполнение способствует повышению энергоэффективности.
2. Погодное планирование. На отдельных маршрутах затраты на преодоление плохих условий плавания могут быть выше, чем затраты на преодоление лишнего пути с целью избежать эти плохие условия.
3. Временное планирование. Коммуникация со следующим портом даёт возможность раннего предупреждения о доступности причала и, как следствие, возможность планирования оптимальной скорости судна.
4. Оптимизация скорости судна. Один из наиболее действенных методов уменьшения расхода топлива и повышения энергоэффективности.
5. Оптимизация развиваемой мощности главного двигателя.
6. Оптимальное управление судном. Включает в себя постановку на оптимальный дифферент, принятие оптимального количества балласта, оптимизация судового винта и улучшение набегающего потока воды, оптимизация авторулевых.
7. Обслуживание корпуса.
8. Оптимизация работы судовой энергетической установки. Включает в себя систематическое уменьшение механических потерь и потерь теплоты.
9. Обслуживание судовой энергетической установки. Использование системы контроля износа может быть полезным инструментом для поддержания высокой эффективности судовой энергетической установки.
10. Утилизация теплоты. Современные системы могут использовать тепло выхлопных газов при производстве электричества или в валомоторе.
11. Улучшение управления флота. Лучшая утилизация мощностей флота может улучшить энергоэффективность всего флота. К

примеру, метод может сократить или вовсе избежать балластных переходов.

12. Оптимизация грузовых операций.

13. Управление электроэнергией. Пересмотр потребления электроэнергии может открыть пути оптимизации управления электроэнергией.

14. Использование альтернативных видов топлива.

Весомым методом повышения энергоэффективности СЭУ является утилизация отводимой от двигателя теплоты. Существует несколько способов утилизации теплоты: утилизация энергии отработавших газов, утилизация теплоты охлаждающей жидкости, утилизация теплоты машинного масла.

Утилизация теплоты, отводимой от тепловых двигателей

Расходы на эксплуатацию энергетических установок морских судов составляют 70-80% от общих затрат [3]. Поэтому, повышение энергоэффективности судовых энергетических установок (СЭУ) является важнейшей задачей. Экономичность СЭУ до начала-середины 70-х годов прошлого столетия была невелика (к.п.д. главных двигателей едва достигал 37% при температуре выхлопа минимум 375°C) и при их относительно небольшой мощности. Это вызвало необходимость создания и широкого применения судовых систем глубокой утилизации теплоты, спрос на которые обусловил и резкий скачок цен на топливо в конце третьей четверти прошлого столетия. Последнее стимулировало развитие технических решений, способствовавших существенному повышению экономичности главных двигателей. К настоящему времени к.п.д. главных двигателей превысил 50% при существенном снижении значения бросовой теплоты продуктов сгорания и увеличении доли низкопотенциальной теплоты охлаждающей воды.

Такое положение обусловлено:

- применением постоянного давления наддува, что привело к снижению температуры выхлопа и существенно снизило долю потерь с выхлопными газами;
- использованием высокоэкономичных турбоагрегатов, что в сумме с предыдущим фактором позволило снизить температуру выхлопа до 240°C;

- повышением температуры пресной воды, охлаждающей цилиндры, до 75 – 80°C.

Разрабатываются все более совершенные системы утилизации отходящей теплоты, которые становятся все более сложными. В лучших системах эффективность использования отходящей теплоты достигает 60% за счет применения более эффективных утилизационных котлов, подогрева питательной воды, утилизационных турбогенераторов двух давлений и т.д. [4].

Особенностью современных дизелей (в отличие от докризисного периода) является их работа на тяжелом топливе [5] за исключением их запуска и работы на маневрах.

В конечном итоге современные высокоэффективные малооборотные двигатели характеризуются повышенным до $\cong 57\%$ к.п.д. и сниженным удельным расходом топлива до $\cong 152$ г/кВт*ч [6], что обусловлено различными схемами повышения их энергоэффективности.

Существует несколько способов утилизации теплоты: утилизация энергии отработавших газов, утилизация теплоты охлаждающей жидкости, утилизация теплоты машинного масла.

Утилизация теплоты отходящих газов

Энергоэффективность судна зависит не только от эффективного к.п.д. главных двигателей, она определяется также и затратами энергии на приводы вспомогательных механизмов, систему тепло- и энергоснабжения и т.д. Утилизация бросовой теплоты на судах может дать значительную экономию топлива и вместе с тем добиться снижения выбросов CO₂. Кроме того, это позволит снизить себестоимость перевозки груза, а также улучшить условия обитаемости экипажа без дополнительных затрат мощности. Вторичные энергоресурсы на судах велики и вопросы по их утилизации остаются открытыми.

В результате работы ведущих дизелестроительных фирм в 80-х годах по совершенствованию рабочих процессов дизелей и их газотурбоагрегатов эффективный к.п.д. дизельных установок повысился с 40-42% [7] до 50% и выше, что привело к перераспределению потерь теплоты. Эффективность применения систем глубокой утилизации теплоты отработавших газов резко снизилась в связи с существенным снижением температуры выхлопных газов, поэтому можно

утверждать, что возможности повышения эффективности работы судовых дизелей утилизацией отходящей с продуктами сгорания теплоты практически исчерпаны и в последнее время появилось устойчивое мнение о том, что и использование комплексных систем утилизации теплоты ничего, кроме трудностей по их обслуживанию и ремонту не дает [8,9].

Достаточно актуальным способом повышения энергетической эффективности СЭУ остается утилизация теплоты охлаждающих жидкостей.

Утилизация теплоты охлаждающих жидкостей

Утилизация теплоты смазочного масла затруднена несколькими факторами. Как известно, удельная теплоемкость машинного масла почти вдвое ниже, чем теплоемкость воды ($1,67 \div 2,01$ кДж/(кг·К) при 20^oС). Также низкой является теплопроводность (0,117 Вт/(м·К)).

В современных дизельных установках широко применяют схемы утилизации другой основной потери теплоты главных двигателей – теплоты охлаждающей главный двигатель жидкости в опреснительных установках различных типов.

Для определения резервов повышения энергетической эффективности СЭУ целесообразно рассчитать расход тепловой энергии на производство дистиллята.

Определение расхода теплоты на опреснение морской воды

С целью повышения эффективности процесса опреснения, поиска новых и совершенствования известных способов воздействия на морскую воду, необходимо определить минимальную работу опреснения, тем более, что имеющиеся в литературе данные весьма противоречивы. В частности, в ряде работ отмечается, что минимальный расход энергии на опреснение может быть достигнут только в процессах, не связанных с изменением агрегатного состояния воды.

Пример расчета этой величины для опреснения гиперfiltrацией (обратным осмосом) приведен в [10]. В результате расчета минимальная работа на получение тонны опресненной воды получилась равной 3,27 кВт·ч без учета расхода энергии на преодоление гидравлического сопротивления мембраны или фильтрующей пленки, учет

которой (без реального подтверждения) позволит автору считать 5 кВт · ч на тонну максимальным расходом.

Опреснение испарением можно представить как классической самопроизвольной изобарно-изотермический процесс, для которого справедливо уравнение

$$\Delta H - T \Delta S = \Delta G$$

где: ΔG - свободная энергия Гиббса или полезная работа;

ΔH – изменение энтальпии при опреснении;

T - температура опреснения;

ΔS - изменение энтропии при опреснении.

Опреснение испарением представляется следующими процессами:

- испарением при давлении паров раствора P_p ;
- сжатием пара от давления паров раствора P_p до давления паров чистой воды P_o при температуре T_o ;
- конденсацией пара при давлении P_o .

Тогда затраченная на опреснение энергия будет равна работе сжатия плюс разница между теплотой испарения (парообразования) и теплотой конденсации.

Подведенная (как впрочем и отведенная) энергия в виде теплоты изотермического процесса в TS диаграмме изображается прямоугольной площадью $T \Delta S$, которая, в связи с изложенным, определяется выражением

$$T \Delta S = Q_1 - Q_2 - RT \ln \frac{P_o}{P_p}$$

Тогда затраченная на опреснение энергия будет равна работе сжатия плюс разница между теплотой испарения (парообразования) и теплотой конденсации.

Так как разница между абсолютными значениями теплоты испарения и теплоты конденсации достаточно мала (морская вода относится к разбавленным растворам) и эти теплоты имеют противоположные знаки, минимальная работа опреснения испарением может быть определена по формуле работы изотермического процесса, которая для одного моля воды запишется в виде

$$\Delta G = RT \ln \frac{P_o}{P_p} = \frac{R_{\mu}}{\mu} T \ln \frac{P_o}{P_p},$$

где: $R_{\mu} = 8314$ Дж/моль · град – универсальная газовая постоянная;

P_o - давление насыщения паров чистой воды, Н/м²;

P_p - давление насыщения паров рассола, Н/м².

Давление насыщения паров чистой воды определяется по соответствующим таблицам (температуре испарения Т), а давление насыщения рассола с учетом повышения температуры кипения в зависимости от концентрации солей в рассоле определяется по табл. А.32 [11].

Таким образом, принимая повышение температуры кипения на 0,35⁰С, для Т = 40⁰С, получим

$$P_p = 7378,4 \text{ Па}$$

$$P_o = 7532,98 \text{ Па.}$$

Тогда на 1 т опресненной воды получим

$$\begin{aligned} \Delta G &= \frac{8314}{18} 313,15 \cdot \ln \frac{7532,98}{7378,4} \cdot 1000 = \frac{8314}{18} \cdot 1000 \cdot 313,15 \cdot 0,0207 = \\ &= 2998962 \text{ Дж} = 0,83 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \end{aligned}$$

Полученное значение минимального расхода энергии на опреснение достаточно хорошо согласуется со значением 0,845 кВт·ч на м³, полученным для температуры 25 [12].

Однако даже самые совершенные и экономичные опреснительные установки характеризуются гораздо большим расходом энергии.

Расход теплоты в опреснителе Aqua-100-HW, установленном на судне MOL Generosity по результатам исследований при различных режимах работы главного двигателя при постоянной производительности опреснителя в 31 м³/сут приведен в [13].

Из имеющихся данных видно, что фактические затраты энергии на опреснение гораздо больше расчётных и возникает проблема более детальной комплексной оценки минимальных энергозатрат. Для расчета реальной минимально необходимой энергии на выделение солей из морской воды, необходимо на молекулярном уровне рассмотреть энергию взаимодействия основных ионов с молекулами воды.

Так как количество бросовой теплоты в любой СЭУ достаточно большое, следующим этапом исследований является увязка режимов работы СЭУ с непрерывной работой судовых опреснителей. Последнее позволит накапливать пресную воду для последующей сдачи на берег. Так, в [14] определена экономическая эффективность использования глубокой утилизации тепла охлаждающей воды ДВС для крупнотоннажного танкера – водозавода. В данном случае предлагается балластный переход использовать для производства пресной воды. При этом при существенно м экономическом эффекте рентабельность за эксплуатационный период работы танкера дедвейтом 49370 т в период перевозки груза и производства дистиллята составит 17,5%. При рентабельности за эксплуатационный период работы с загрузкой в одном направлении, равной 10,7%. Следует отметить, что обычно рентабельность использования основных фокусов судна не превышает 11-12%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Transport energy efficiency, Implementation of IEA Recommendations since 2009 and next steps. Kazunori Kojima, Lisa Ryan; September 2010. <https://www.iea.org/publications/>
2. Голиков В. А., Обертюр К. Л., Кирис В. А. Модель расчета конструктивной энергоэффективности морского судна на примере контейнеровоза. Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып. 29. – Одесса: ОНМА, 2012. С. 23-34.
3. Видуцкий Л.М. Зарубежная судовая энергетика в 1982 г. // Судостроение, 1983. – № 12. – С. 13–20.
4. Калинина М.И., Баракан Г.Х. Повышение топливной экономичности ЭУ на судах японской постройки // Судостроение. – 1983. – № 2. – С. 31–35.
5. Коршунов Л.П. Энергетические установки промышленных судов: Учебник. – Л.: Судостроение, 1991. – 360 с.
6. Проектирование пропульсивной установки судов с прямой передачей мощности на винт: Учебное пособие / В.П. Шостак, В.И. Гершаник, В.П. Кот, Н.С. Бондаренко; Под ред. В.П. Шостака. – Николаев: УГМТУ, 2003. – 500 с.
7. Судовые энергетические установки: Учебник / Г.А. Артемов, В.П. Волошин, Ю.В. Захаров, А.Я. Шквар. – Л.: Судостроение,

1987. – 480 с.
8. Klinton H., Jakobsen B. MAN–B&W engine application BDP–system: Prospectus / MAN–B&W. – 1988. – 54 p.
 9. Маслов В.В. Утилизация теплоты судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1990. – 144 с.
 10. Коваленко В.Ф., Лукин Г.Я. Судовые водоопреснительные установки. Л., «Судостроение», 1970, 304 с.
 11. Хорн Р. Морская химия – (структура воды и химия гидросферы). Издательство «Мир», Москва, 1972, 398 с.
 12. Додж Б.Ф., Эшпай А.М. Термодинамика некоторых процессов опреснения воды. В сб. Опреснение соленых вод. Материалы 137-й национальной конференции Американского химического общества. М., ИЛ, 1963. – 344 с.
 13. Кирис В.А. Определение расхода теплоты на опреснение морской воды.//Матер. науч.-техн. конф. на тему «Энергетика судна: эксплуатация та ремонт» - Одеса: ОНМА, 2014. – С. 41 – 46.
 14. Коваленко В.Ф., Винников В.В. Глубокая утилизация и рациональное использование тепла СЭУ. Одесса – 2002, - 180 с. (поліграфічний центр фірми «Система – сервіс»).