



УДК 621.431.74:621.43.068.9

© В. А. Лашко, Г. Д. Седельников, А. Ю. Попов, 2011

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЦЕНЫ ТОПЛИВА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ**

*Лашко В.А.* – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания» (ТОГУ), тел. 37-52-17, e-mail: kafdvs@rambler.ru; *Седельников Г. Д.* – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Тепловые энергетические установки», тел. (4217) 24-11-70; *Попов А. Ю.* – канд. техн. наук, доц. кафедры «Тепловые энергетические установки», тел. (4217) 24-11-70, e-mail: seu@knastu.ru (КнАГТУ)

Анализируется влияние мировых цен тяжелого и дизельного топлива на результаты параметрической и схемной оптимизации энергосберегающих систем малооборотного дизеля. Приводятся оптимальные параметры и показатели эффективности дизель-генераторных, турбогенераторных, валогенераторных, турбокомпаундных, комплексных и комбинированных энергосберегающих систем для уровня цен на топливо в октябре 2010 г. Наилучшими термодинамическими и экономическими показателями обладает комплексная турбогенераторная система с утилизацией теплоты уходящих газов, наддувочного воздуха и воды, охлаждающей цилиндры малооборотного дизеля, оборудованного турбокомпаундной системой.

Influence of the world prices of heavy and diesel fuel on the results of parametrical and circuit optimization of energy-efficient systems for low-speed diesel engine is analyzed. Optimum parameters and efficiency factors of diesel generator sets, turbo-generator systems, main engine driven generators, turbo compound systems, complex and combined energy-efficient systems for fuel prices as of October 2010 are given. The complex turbo-generator system with utilization of the leaving gases, supercharged air and the water that cools the cylinders of diesel, which features turbo- compound system, has the best thermodynamic and economic efficiencies.

*Ключевые слова:* малооборотный дизель, энергосберегающие системы, цена топлива, оптимизация, коэффициент полезного действия, сухая и полная масса, экономический эффект.

Продолжающийся рост цен на нефть и продукты ее переработки делает все более актуальной задачу экономии топлива на морских транспортных су-

дах Одним из путей ее решения является создание высокоэкономичных двигателей с эффективными энергосберегающими системами.

В статье [1] приведены результаты параметрической и схемной оптимизации энергосберегающих систем малооборотного дизеля (МОД) фирмы MAN B&W типа 7L80MC номинальной пропульсивной мощностью 20070 кВт, установленного на контейнеровозе «St. Petersburg Senator» дедвейтом 47 тыс. т германской постройки.

Оптимизационные исследования выполнены на основе методики, математических моделей и алгоритмов, подробное описание которых представлено в монографии [2]. В расчетах были заложены цены на тяжелое топливо 110 и на дизельное топливо 180 USD/т, что соответствовало уровню мировых цен на нефть 20–22 USD за баррель. С тех пор цена на нефть значительно возросла и составила в октябре 2010 г. 75–80 USD за баррель. Примерно пропорционально возросли и цены на бункерное топливо. Поэтому для современных условий представляет интерес анализ устойчивости полученных в [1] оптимальных решений и сделанных рекомендаций.

На основании обобщенной энергосберегающей системы МОД, разработанной с учетом предложений фирм Sulzer, MAN B&W, Renk Tacke, Hitachi и др. и представленной на рис. 1, формируются и оптимизируются параметры следующих вариантов дизельной установки:

$$D0 = \Gamma Д + ДГ + ВК(ТП + ОУ);$$

$$D1 = \Gamma Д + ДГ + УК(ТП) + ХПВ(ОУ);$$

$$B1 = \Gamma Д + РТО + УК(ТП) + ХПВ(ОУ);$$

$$KB1 = \Gamma Д + РТО / РТИ + УК(ТП) + ХПВ(ОУ);$$

$$T1 = \Gamma Д + УТГ + УК(ТП + УТГ) + ХПВ(ОУ);$$

$$T2 = \Gamma Д + УТГ + УК(ВП + УТГ) + ВО(НП + 25) + ХПВ(ОУ);$$

$$T3 = \Gamma Д + УТГ + УК(ВП + УТГ) + ВО(НП + 25) + ХПВ(ОУ + 11);$$

$$KT3 = \Gamma Д + УТГ + УК(ВП + УТГ) + ВО(НП + 25) + ХПВ(ОУ + 11) + TCS,$$

где в левой части в соответствии с предложенной в [1] классификацией даны признаки схем: Д – схема на основе дизельгенератора, В – на основе валогенератора, Т – на основе утилизационного турбогенератора, К – с турбокомпаундной системой, 0 – нет использования вторичных энергоресурсов, 1 – используется теплота отработавших газов, 2 – используется теплота отработавших газов и надувочного воздуха, 3 – используется теплота отработавших газов, надувочного воздуха и пресной воды, охлаждающей цилиндры дизеля; в правой части: ГД – главный двигатель, ДГ – дизель-генератор, ВК – вспомогательный котел, УК – утилизационный котел, ТП – тепловые потребители, ОУ – опреснительная установка, ХПВ – холодильник пресной воды, РТО – валогенератор, РТО / РТИ – комбинированная система «валогенератор – турбокомпаунд», УТГ – утилизационный турбогенератор, ВО – воздухоохладитель, ВП и НП – высоко- и низкочастотные потребители теплоты, 25 и 11 – подогреватели питательной воды УК (см. рис. 1), TCS – турбокомпаунд-



ная система; в скобках после ВК, УК, ХПВ, ВО перечислены потребители теплоты их рабочих сред.

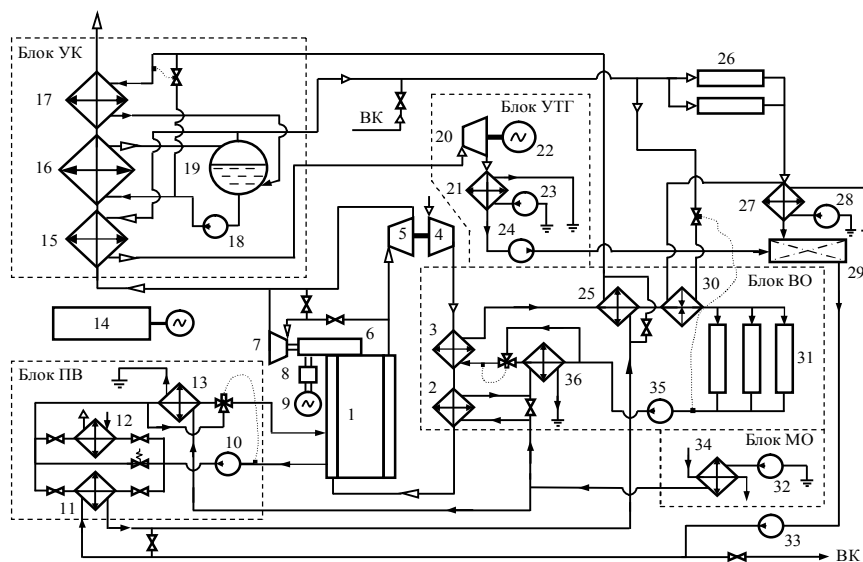


Рис. 1. Обобщенная энергосберегающая система МОД:

1 – ГД; 2, 3 – низко- и высокотемпературная секции воздухоохладителя; 4, 5 – компрессор и газовая турбина турбонаддувочного агрегата; 6 – редуктор фирмы Renk Tacke; 7 – утилизационная газовая турбина; 8 – устройство по поддержанию постоянной частоты вращения; 9 – электрогенератор; 10, 18, 23, 24, 28, 32, 33, 35 – насосы; 11, 25 – подогреватели питательной воды УК; 12 – опреснительная установка; 13, 36 – концевые охладители; 14 – ДГ; 15 – пароперегреватель; 16 – испаритель; 17 – экономайзер; 19 – сепаратор пара УК; 20, 22 – паровая турбина и электрогенератор; 21 – конденсатор пара утилизационного турбогенератора; 26, 31 – высоко- и низкочастотные потребители теплоты; 27 – атмосферный конденсатор пара; 29 – теплый ящик; 30 – паровой подогреватель; 34 – маслоохладитель; элементы 6, 8, 9 образуют валогенераторную систему (РТО), 6 и 7 – турбокомпаундную систему (ТКС), а сочетание 6, 7, 8 и 9 – комбинированную систему (РТО/РТИ).

Для оптимизации были выбраны 12 независимых параметров: температура  $t_{пе}$  и давление  $p_{пе}$  перегретого пара (давление в сепараторе УК  $p_{сеп}$ ), давление в конденсаторе УТГ  $p_{ко}$ , минимальный температурный напор в УК  $\Delta t_{мин}$ , недогрев воды до кипения в экономайзере  $\Delta t_{нед}$ , кратность циркуляции в УК  $k_{ц}$ , сопротивление газового тракта УК  $\Delta p_{г}$ , температурный напор на входе воздуха в высокотемпературную секцию воздухоохладителя  $\Delta t_3$ , температурные напоры на выходе питательной воды из подогревателей 11 и 25 (см. рис. 1)  $\Delta t_{11}$  и  $\Delta t_{25}$ , нагрев забортной воды в конденсаторе  $\Delta t_{ко}$  и маслоохладителе  $\Delta t_{мо}$ .

В качестве целевой функции при оптимизации параметров, как и в [1], принят дополнительный экономический эффект  $\Delta Э$ , получаемый исследуе-

мым вариантом за срок службы судна по сравнению с «нулевым» вариантом (Д0), где нет использования вторичных энергоресурсов. Эффективность энергосберегающих систем оценивалась также по ряду других показателей: коэффициентам использования теплоты топлива для главного двигателя  $K_{ГД}$  и для всей установки  $K_{дэу}$ , эффективному  $\eta_{дэу}$  и эксергетическому  $\eta_{ex}$  КПД установки, годовой экономии топлива  $\Delta B_T$  относительно «нулевого» варианта, сухой  $M$  и полной (с запасами на рейс)  $M_{\Sigma}$  массе установки и др.

По анализу информации ряда производителей и поставщиков нефтепродуктов, представленной в сети Интернет в октябре 2010 г., для расчетов были приняты мировые цены на тяжелое топливо 400 и на легкое (дизельное) 770 USD/т. Результаты оптимизационных расчетов приведены в таблице и на рис. 2, где дополнительно обозначены:  $P_{пэ}$  – потребность в электроэнергии на судне на расчетном режиме;  $P_{дг}$ ,  $P_{УТГ}$  – мощность дизель-генератора и УТГ на расчетном режиме;  $P_{вг}$ ,  $P_{ГП}$ ,  $P_{ТCS}$  – мощность валогенератора, гидропередачи и турбокомпаунда;  $G_{пе}$ ,  $G_{сн}$  – расход перегретого и насыщенного пара УК;  $G_{вк}$  – расход насыщенного пара вспомогательного котла;  $F_{ук}$  – площадь поверхности теплообмена УК;  $\eta_{ГД}$  – эффективный КПД главного двигателя;  $\Delta \bar{Z}_T$  – изменение затрат на топливо относительно «нулевого» варианта.

Анализируя полученные результаты и сопоставляя их с прежними [1], можно отметить следующее. Несмотря на значительный рост цен на топливо, большинство независимых параметров сохранило свои оптимальные значения (см. табл.). Изменения коснулись лишь некоторых параметров турбогенераторных схем и, в основном, Т1. В этом варианте уменьшились оптимальные температурные напоры в УК:  $\Delta t_{вх}$  с 75 до 20 °С,  $\Delta t_{min}$  с 20 до 15 °С,  $\Delta t_{нед}$  с 35 до 15 °С. Это привело к уменьшению температуры уходящих газов на 10 °С и, следовательно, к наращиванию поверхности теплообмена УК и его производительности по перегретому пару соответственно на 69 и 62 %. Вместе с понижением оптимального давления в конденсаторе с 8,5 до 6 кПа это дает прирост мощности УТГ до 173 кВт, т. е. на 92 %. Указанные изменения вполне закономерны, т. к. экономия топлива при его более высокой цене оправдывает удорожание оборудования традиционного турбогенераторного варианта Т1. Но этот вариант, как и прежде, не может обеспечить необходимого количества электроэнергии с помощью УТГ, т. к. предусматривает использование только теплоты уходящих газов, что, как показано в [2], в сочетании с современными МОД недостаточно. Некоторое перераспределение оптимальных значений параметров в комплексных системах Т2, Т3 и КТ3 практически не отразилось на паропроизводительности утилизационного котла и мощности турбогенератора (см. табл.).



Таблица

Оптимальные параметры и характеристики энергосберегающих систем  
(цены топлива 2010 г., дизель-генераторы на легком топливе)

Обозначение, ед. измерения	Вариант системы утилизации							
	Д0	Д1	В1	КВ1	Т1	Т2	Т3	КТ3
Оптимальные параметры								
$p_{не}$ ( $p_{сеп}$ ), МПа	–	(0,70)	(0,70)	(0,70)	0,60	0,60	0,60	0,60
$t_{не}$ , °С	–	–	–	–	223	211	216	234
$\Delta t_{вх}$ , °С	–	(79)	(80)	(110)	(20)	(45)	(40)	(40)
$p_{ко}$ , кПа	–	–	–	–	6,0	5,0	5,0	6,0
$\Delta t_{мин}$ , °С	–	30	35	60	15	5	5	5
$\Delta t_{нед}$ , °С	–	35	35	35	15	5	5	15
$\kappa_{ц}$ , –	–	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
$\Delta p_{г}$ , кПа	–	2,14	2,16	2,15	2,16	4,63	4,68	2,17
$\Delta t_{3}$ , °С	–	–	–	–	–	20	20	5
$\Delta t_{11}$ , °С	–	–	–	–	–	–	5	5
$\Delta t_{25}$ , °С	–	–	–	–	–	5	5	5
$\Delta t_{ко}$ , °С	–	–	–	–	5	5	4	5
$\Delta t_{мо}$ , °С	2,0	2,5	2,5	2,9	2,5	3,1	3,0	2,8
Характеристики систем								
$\Delta \mathcal{E}$ , млн USD	–	6,195	8,586	10,697	7,016	11,830	11,410	13,069
$P_{пэ}$ , кВт	865	820	805	773	826	812	828	830
$P_{дг}$ , кВт	865	820	–	–	653	–	–	–
$P_{утг}$ , кВт	–	–	–	–	173	765	767	832
$P_{вг}$ , кВт	–	–	805	773	–	–	–	–
$P_{гп}$ , кВт	–	–	–	–	–	47	61	–
$P_{тсг}$ , кВт	–	–	–	575	–	–	–	470
$G_{пэ}$ , кг/ч	–	–	–	–	1394	5303	5277	5654
$G_{сн}$ ( $G_{вк}$ ), кг/ч	(3638)	2800	2800	2800	2800	380	380	600
$F_{ук}$ , м <sup>2</sup>	–	250	245	207	833	1323	1329	1542
$\eta_{гд}$ , %	50,6	50,4	49,9	51,5	50,4	50,0	50,1	51,7
$\kappa_{гд}$ , %	50,6	58,5	57,5	59,4	61,7	69,4	69,4	73,0
$\eta_{дзг}$ , %	43,5	47,5	47,4	49,0	47,7	49,8	49,9	51,7
$\eta_{ех}$ , %	45,9	50,3	50,1	51,8	50,8	52,7	52,6	54,5

При современных ценах на топливо и работе дизельгенераторов на тяжелом топливе произошло более существенное изменение оптимальных параметров комплексных систем Т2 и Т3. Уменьшились температурные напоры в УК и на входе в воздухоохладитель, понизилось давление в конденсаторе до 6 кПа. В результате на фоне высоких цен на топливо становятся экономически оправданными УК с более развитой поверхностью теплообмена и, как следствие, большей паропроизводительности, а также турбогенераторы большей мощности. В рассматриваемых схемах Т2 и Т3 мощность УТГ составила 385 кВт. Однако это не позволило исключить из работы на ходовом режиме дизель-генераторы.

В схеме КТЗ увеличился недогрев воды до кипения в экономайзере с 5 до 15 °С, что уменьшило глубину утилизации газов в УК на 2 °С и его паропроизводительность на 315 кг/ч. Но снижение оптимального значения  $\Delta t_{\text{вх}}$  с 75 до 40 °С увеличило температуру перегретого пара до 234 °С, что позволило обеспечить нужную мощность УТГ 832 кВт (см. табл.).

Во всех исследуемых вариантах сохранился прежним состав судовой электростанции. Так, в схемах Т2 и Т3 недостаток мощности турбогенератора соответственно на 47 и 61 кВт компенсируется приводом циркуляционных насосов через гидropередачу от ГД (см. табл.). При работе дизельгенераторов на тяжелом топливе избежать параллельной работы УТГ и дизель-генераторов не удастся.

Повышение цен на топливо практически не привело в комплексной схеме утилизации с турбокомпаундной системой (КТЗ) к изменению глубины использования вторичных энергоресурсов МОД и, следовательно, термодинамических и массовых показателей. Это объясняется тем, что в отличие от других турбогенераторных схем, данный вариант позволяет обеспечить все потребности ходового режима судна в электрической и тепловой энергии только за счет вторичных энергоресурсов МОД, т. е. без дополнительных затрат топлива. Поэтому изменение цены топлива и не сказалось на выходных характеристиках системы КТЗ.

Сравнивая рассматриваемые энергосберегающие системы по тепловой эффективности (см. рис. 2) следует отметить, что, как и при низкой цене на топливо, наилучшим является вариант КТЗ. Турбокомпаунд повышает КПД двигателя почти до 52 %, что вместе с комплексной утилизацией позволяет получить коэффициент использования теплоты топлива для двигателя около 73 %. По сравнению с «нулевым» вариантом затраты на топливо снижаются на 17 % и экономия топлива может составить почти 3,5 тыс. т в год (рис. 2).

Валогенераторный вариант с турбокомпаундной системой (КВ1) выгодно отличается от турбогенераторных схем (Т1, Т2, Т3, КТЗ) простым, малогабаритным и легким УК, отсутствием турбогенератора, вакуумного конденсатора и обслуживающих их систем, а от других вариантов (Д0, Д1, В1) – меньшими расходами и запасами топлива. Поэтому этот вариант позволяет получить наименьшую сухую  $M$  и полную  $M_{\Sigma}$  массу установки (рис. 2).

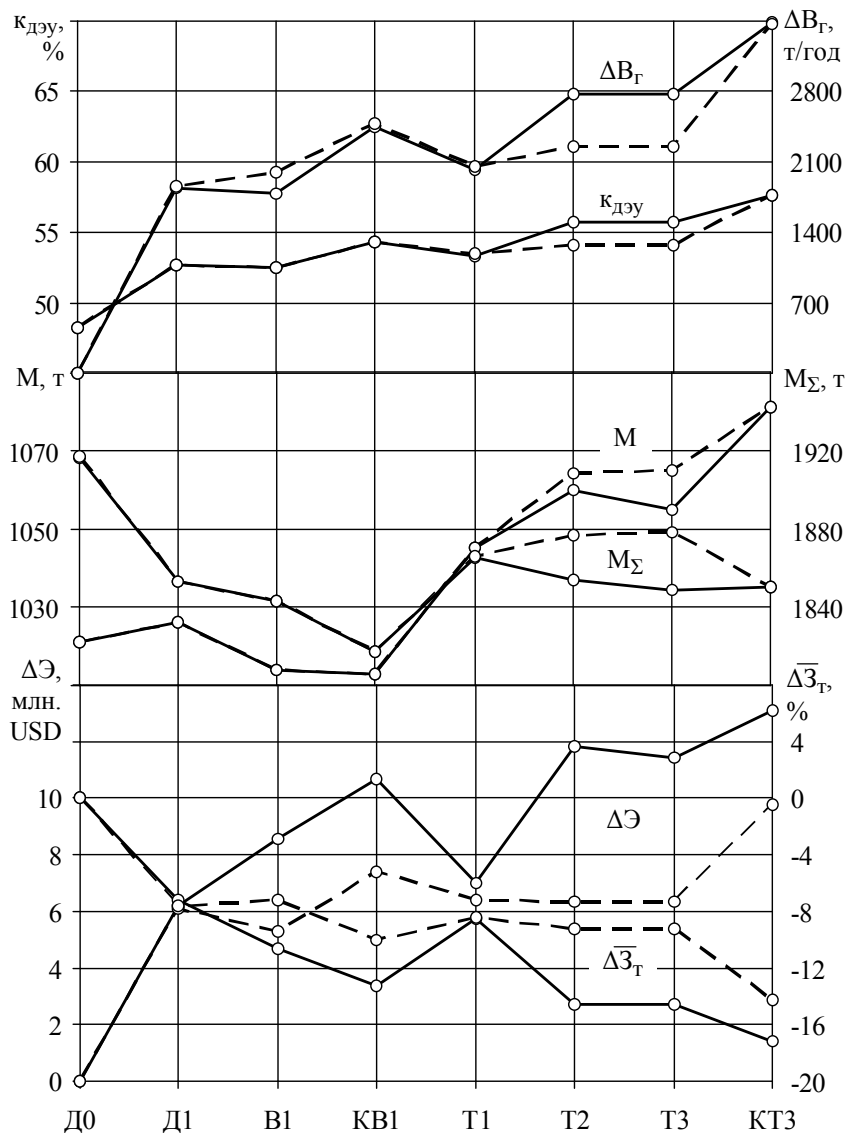


Рис. 2. Показатели эффективности систем утилизации  
теплоты МОД 7L80MC (цены топлива 2010 г.):  
— дизельгенераторы на дизельном топливе  
- - - дизельгенераторы на тяжелом топливе

Рост цен на топливо отразился на экономических показателях и на сравнительной экономической эффективности энергосберегающих систем. Комплексное использование вторичных энергоресурсов МОД в схемах T2, T3, KT3, как и прежде, позволяет исключить параллельную работу турбогенера-

тора и дизель-генератора на расчетном режиме (см. табл.). Но, если при относительно низкой цене на топливо эти варианты были практически одинаковы по дополнительному экономическому эффекту [1], то современный уровень цен на топливо стимулирует более полное использование вторичных энергоресурсов МОД, которое может обеспечить вариант КТЗ (см. рис. 2). Дополнительный экономический эффект за срок службы судна по сравнению с «нулевым» вариантом может составить более 13 млн USD (см. табл.).

Перевод дизель-генераторов на тяжелое топливо сопровождается дополнительным расходом пара на подогрев топлива, увеличением затрат на ремонт и обслуживание дизель-генераторов, но и снижением затрат на их топливо. В этом случае комплексная утилизация теплоты в схемах Т2 и Т3, несмотря на повышение общего уровня цен на топливо, становится неэффективной и экономически неоправданной. По дополнительному экономическому эффекту эти варианты почти не имеют преимуществ по сравнению с простым дизель-генераторным вариантом Д1 и уступают варианту КВ1, а особенно КТЗ (см. рис. 2). Использование теплоты надувочного воздуха, теплоты пресной охлаждающей воды и теплоты выхлопных газов МОД в утилизационном котле и в силовой газовой турбине, независимо от вида топлива дизель-генераторов, делает этот вариант наиболее предпочтительным как по тепловым, так и по экономическим показателям.

### Выводы

1. Результаты оптимизационных исследований энергосберегающих систем малооборотного дизеля 7L80МС при существенно различных ценах на топливо свидетельствуют об устойчивости оптимальных решений по большинству независимых параметров.
2. Изменение цены топлива не отразилось на термодинамических и массовых показателях исследуемых вариантов энергосберегающих систем.
3. Наименьшую сухую и полную массу имеет установка с двигателем, оборудованном системой «валогенератор – турбокомпаунд» и утилизационным котлом теплофикационного назначения.
4. При современных ценах на бункерное топливо наилучшими показателями по теплоиспользованию и экономической эффективности, независимо от вида топлива в альтернативных дизель-генераторных вариантах, обладает комплексная схема утилизации вторичных энергоресурсов малооборотного дизеля, оборудованного турбокомпаундной системой.

### Библиографические ссылки

1. Лашко В. А., Седельников Г. Д. Параметрическая и схемная оптимизация энергосберегающих систем малооборотных дизелей // Известия вузов. – Машиностроение. – 2002. – № 8.
2. Седельников Г. Д. Энергосберегающие системы малооборотных дизелей. – Владивосток: Дальнаука, 2003.