

УДК 621.577.4  
К 17

## РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ФУНКЦИИ ЦЕЛИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ СУДОВОЙ ТЕПЛОНАСОСНОЙ ПАРПРОИЗВОДЯЩЕЙ УСТАНОВКИ

И. В. Калиниченко, преп.;  
А. А. Андреев, канд. техн. наук, доц.;  
Н. Б. Андреева, канд. пед. наук, доц.

*Херсонский филиал Национального университета кораблестроения, г. Херсон*

**Аннотация.** Для определения эффективности теплонасосной паропроизводящей установки на основе метода глобального критерия была разработана комплексная функция цели, в которой использовались три типа критериев оптимизации: энергетические, массогабаритные и экологические.

**Ключевые слова:** теплонасосная паропроизводящая установка, комплексная функция цели, критерий оптимизации, рабочий агент.

**Анотація.** Для визначення ефективності теплонасосної паровиробної установки на основі методу глобального критерію була розроблена комплексна функція мети, в якій використовувалися три типи критеріїв оптимізації: енергетичні, массогабаритні та екологічні.

**Ключові слова:** теплонасосна паровиробна установка, комплексна функція мети, критерій оптимізації, робочий агент.

**Abstract.** For the determination of the heat pump steam-producing plant efficiency the complex objective function has been designed on the basis of the global criterion method. The function of the objective consists of three types of optimization criteria: power, mass-dimensional and ecological ones.

**Keywords:** heat pump steam-producing plant, complex objective function, optimization criterion, working agent.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одним из перспективных путей решения проблемы повышения эффективности комплексного использования топливно-энергетических ресурсов судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является применение на судах теплонасосных паропроизводящих установок (ТНПУ), источником потребляемой низкопотенциальной теплоты в испарителе у которых являлась бы вода системы охлаждения ДВС. Полученный в ТНПУ водяной пар давлением 0,3...0,5 МПа можно использовать, в частности, для подогрева груза на танкерах на ходовом режиме [1–3, 5, 9]. Однако для обоснованной оценки эффективности применения ТНПУ в каждом конкретном случае, а также оптимального выбора ее рабочих параметров необходимо разработать методику комплексной оптимизации параметров работы ТНПУ.

Чаще всего при оптимизации параметров работы теплонасосных установок используют стоимостные критерии. Однако, поскольку все элементы, машины и аппараты ТНПУ на сегодняшний день конструктивно оригинальны и их следует проектировать и изготавливать индивидуально, установить зависимость их стоимости от параметров работы (параметров оптимизации) практически невозможно.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В оптимизационных методиках отсутствует учет экологического влияния эксплуатации теплонасосных

установок на окружающую среду как вследствие прямого воздействия — эмиссии (выбросов) рабочего агента (РА), так и за счет косвенного воздействия — дополнительной эмиссии углекислого газа CO<sub>2</sub>, выделяемого в процессе сжигания органического топлива при выработке электроэнергии для привода машин и механизмов, которые входят в состав ТНПУ [7, 8].

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** — разработка комплексной функции цели для оптимизации параметров работы судовой ТНПУ.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для решения поставленной задачи было предложено рассмотреть другие (нестоимостные) критерии оптимизации ТНПУ, также имеющие непосредственную связь с параметрами оптимизации установки. Наиболее характерными критериями оптимизации могут быть три типа показателей ТНПУ: энергетические, массогабаритные и экологические. Наличие трех типов критериев может привести к ситуации, когда минимум по каждому из них достигается при различных параметрах оптимизации. При этом уменьшение одного критерия может привести к росту других (например, снижение массогабаритных характеристик ТНПУ может быть достигнуто при повышении ее энергопотребления). Таким образом, для решения данной оптимизационной задачи возникает необходимость перехода от однокритериальной к многокритериальной оптимизации параметров работы ТНПУ.

Для определения эффективности ТНПУ на основе метода глобального критерия была разработана комплексная функция цели (критерий оптимизации)

$$k_{\text{опт}} = \lambda_{\text{эн}} k_{\text{эн}} + \lambda_{\text{мг}} k_{\text{мг}} + \lambda_{\text{экол}} k_{\text{экол}} + F_{\text{штр}},$$

где  $k_{\text{эн}}$ ,  $k_{\text{мг}}$  и  $k_{\text{экол}}$  — частные безразмерные критерии оптимизации, учитывающие соответственно энергетические, массогабаритные и экологические показатели ТНПУ;  $\lambda_{\text{эн}}$ ,  $\lambda_{\text{мг}}$  и  $\lambda_{\text{экол}}$  — коэффициенты весомости каждого из соответствующих частных критериев оптимизации, причем

$$\lambda_{\text{эн}} + \lambda_{\text{мг}} + \lambda_{\text{экол}} = 1;$$

$F_{\text{штр}}$  — функция штрафа, необходимая для реализации функциональных (технических) ограничений (например, по допустимым давлениям кипения и конденсации в цикле ТНПУ, допустимой температуре конца процесса сжатия в компрессоре или обеспечивающих целесообразные компоновки отдельных элементов и общую компоновку ТНПУ в машинном отделении судна и т. п.).

Частные безразмерные критерии оптимизации в общем виде находились как

$$k_j = \frac{W_j - W_{\text{опт}j}}{W_{\text{опт}j}}, \quad j = 1, 2, 3,$$

где  $W_j$  — текущее значение  $j$ -й частной оптимизируемой величины;  $W_{\text{опт}j} = \min W_j$  — базовое значение  $j$ -й оптимизируемой величины, равное ее минимальному значению без учета влияния других составляющих.

Комбинации коэффициентов весомости  $\lambda_{\text{эн}}$ ,  $\lambda_{\text{мг}}$  и  $\lambda_{\text{экол}}$ , по которым учитывалось значение отдельных (частных) критериев оптимизации, определялись методом экспертных оценок.

В качестве энергетического критерия оптимизации параметров работы ТНПУ был принят расход топлива вспомогательным дизель-генератором, который затрачивается на выработку электроэнергии, необходимой для работы как приводных электродвигателей компрессоров и насосов ТНПУ (при неизменной ее паропроизводительности), так и систем, обслуживающих ТНПУ. Этот критерий в наибольшей мере характеризует эксплуатационные затраты при работе ТНПУ и рассчитывается по формуле

$$W_{\text{эн}} = b_e^{\text{БДГ}} (\Sigma N_{\text{к}} + \Sigma N_{\text{н}} + \Sigma N_{\text{авт}}) \quad \text{кг/ч},$$

где  $b_e^{\text{БДГ}}$  — удельный расход топлива вспомогательным дизель-генератором, кг/(кВт·ч), который принимается по данным фирм-производителей;  $\Sigma N_{\text{к}}$ ,  $\Sigma N_{\text{н}}$ ,  $\Sigma N_{\text{авт}}$  — суммарное потребление электроэнергии, кВт, соответственно приводными двигателями компрессоров ТНПУ, приводными двигателями насосов, системами автоматического управления и контроля (определяется по результатам расчетов указанных аппаратов и элементов ТНПУ).

В качестве массогабаритного критерия оптимизации была принята суммарная масса ТНПУ и той ча-

сти энергокомплекса судна, которая пропорциональна приросту электроэнергии, расходуемой на работу ТНПУ. Учитывая, что основным объектом, на котором планируется использование ТНПУ, являются танкеры с достаточно большими объемами машинного отделения, было принято минимизацию объема ТНПУ не задействовать. Выбранный критерий в наибольшей мере характеризует капитальные затраты на изготовление ТНПУ:

$$W_{\text{мг}} = W_{\text{ТНПУ}} + g_{\text{уд}}^{\text{БДГ}} (\Sigma N_{\text{к}} + \Sigma N_{\text{н}} + \Sigma N_{\text{авт}}) + W_{\text{эн}} \tau_{\text{ТНПУ}} \quad \text{кг},$$

где  $W_{\text{ТНПУ}}$  — масса ТНПУ, кг (определяется по результатам расчетов аппаратов и элементов ТНПУ);  $g_{\text{уд}}^{\text{БДГ}}$  — удельная масса вспомогательного дизель-генератора, кг/кВт (рассчитывается на основании данных фирм-производителей);  $\tau_{\text{ТНПУ}}$  — время работы ТНПУ в течение одного кругового рейса, ч (определялось для каждого конкретного наливного судна как продолжительность его ходового режима с разогревом груза).

В качестве экологического критерия оптимизации был принят показатель общего эквивалента глобального потепления **TEWI (total equivalent warming impact)**. Глобальное потепление напрямую связано с содержанием в озоновом слое Земли парниковых газов, в том числе и производных хладонов, являющихся рабочими агентами ТНПУ. Количественно воздействие парниковых газов на глобальное потепление можно оценить по формуле [10, 11]

$$W_{\text{экол}} = TEWI = GWP L \tau_{\text{сл}} + GWP m [1 - \alpha] + \beta E \tau_{\text{сл}} \quad \text{кг CO}_2,$$

в которой учитываются как прямое воздействие РА на глобальное потепление вследствие его утечек ( $GWP L \tau_{\text{сл}}$ ) и потерь при утилизации ( $GWP m [1 - \alpha]$ ), так и косвенное воздействие за счет энергопотребления ТНПУ ( $\beta E \tau_{\text{сл}}$ ).

Входящая в формулу величина  $GWP$ , которая называется потенциалом глобального потепления (**global warming potential**) используемого РА, описывает, насколько его единица массы вносит вклад в глобальное потепление за определенный период времени по сравнению с той же самой массой  $\text{CO}_2$  (для  $\text{CO}_2$   $GWP = 1$ ). Как правило, при расчетах показателя общего эквивалента глобального потепления **TEWI** используют потенциал глобального потепления парниковых газов с временным интервалом 100 лет —  $GWP_{100}$ . Для ряда наиболее распространенных РА холодильных машин и тепловых насосов значения  $GWP_{100}$  приведены в табл. 1.

Переменная  $L$ , кг/год, характеризует утечку РА в атмосферу за год. Норма утечки для хладоновых систем составляет 5...10% в год от массы  $m$ , кг, рабочего агента во всей установке (учитывая тяжелые условия эксплуатации ТНПУ, связанные с повышенной вибрацией и качкой судна, в разработанной методике утечки принимались равными 10%).

Таблица 1. Свойства ряда рабочих агентов установок, реализующих обратный термодинамический цикл

Марка рабочего агента	Химическая формула	Критические		Нормальная температура кипения $t_n$ , °C	Значение $GWP_{100}$
		температура $t_{кр}$ , °C	давление $P_{кр}$ , МПа		
R11	CFCl <sub>3</sub>	198,00	4,370	23,65	4000
R12	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	112,00	4,119	-29,74	10000
R13	CF <sub>3</sub> Cl	28,75	3,868	-81,59	11700
R13B1	CF <sub>3</sub> Br	66,90	3,946	-57,77	5600
R14	CF <sub>4</sub>	-45,65	3,745	-128,02	6500
R22	CHF <sub>2</sub> Cl	96,13	4,990	-40,81	1700
R23	CHF <sub>3</sub>	26,30	4,811	-82,14	12000
R32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	78,40	5,843	-51,67	550
R41	CH <sub>3</sub> F	44,60	5,856	-79,64	97
R113	CF <sub>2</sub> ClCFCl <sub>2</sub>	214,00	3,389	46,82	5000
R114	CF <sub>2</sub> ClCF <sub>2</sub> Cl	145,70	3,333	3,63	9300
R115	CF <sub>2</sub> ClCF <sub>3</sub>	79,94	3,192	-38,97	9300
R116	CF <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	19,70	2,883	-78,21	9200
R123	CF <sub>3</sub> CHCl <sub>2</sub>	183,79	3,674	27,85	93
R124	CF <sub>3</sub> CHFCl	122,50	3,634	-12,05	620
R125	CF <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	66,25	3,631	-48,55	3400
R134a	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F	101,06	4,056	-26,15	1300
R142b	CF <sub>2</sub> ClCH <sub>3</sub>	136,45	4,138	-9,20	2400
R143a	CF <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	73,10	4,110	-47,58	4300
R152a	CHF <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	113,50	4,491	-24,54	120
R161	CH <sub>2</sub> FCH <sub>3</sub>	102,15	5,026	-37,75	12
R170 (этан)	CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	32,27	4,934	-88,63	3
R218	CF <sub>3</sub> CF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	71,90	2,677	-36,81	8600
R290 (пропан)	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	96,81	4,269	-41,97	3
R717 (аммиак)	NH <sub>3</sub>	132,40	11,397	-33,34	0
R744 (углекислота)	CO <sub>2</sub>	31,06	7,380	-94,50	1
R1270 (пропилен)	CH <sub>2</sub> =CHCH <sub>3</sub>	91,80	4,614	-47,75	3

Сама же масса РА  $m$  определяется по результатам расчетов машин, аппаратов и трубопроводов ТНПУ.

Время эксплуатации (срок службы)  $\tau_{ср}$ , год, теплонасосного оборудования в стационарных условиях может достигать 15–20 лет. Для судовой ТНПУ срок ее службы, т. е. календарная продолжительность эксплуатации от начала функционирования или ее возобновления после капитального ремонта до наступления предельного состояния, не может превышать нормативный срок службы судна, который устанавливается исходя из экономических соображений и составляет в настоящее время в среднем 20–25 лет в зависимости от его эксплуатационного назначения и строительной стоимости. Однако предельное состояние многих судовых технических средств наступает до истечения нормативного срока службы судна. Так, по данным ЦНИИМФ, средний срок службы судовых теплообменных аппаратов не превышает 8 лет. Учитывая, что теплообменные аппараты являются одним из наиболее определяющих элементов ТНПУ, в разработанной методике принималось  $\tau_{ср} = 8$  лет.

Коэффициент утилизации  $\beta$  указывает долю утилизованного РА по окончании эксплуатации установки. Для стран ЕС его принимают не менее  $\alpha = 0,75$ .

Величина  $\beta$  представляет собой эмиссию (выброс) CO<sub>2</sub> при производстве 1 кВт·ч электроэнергии: при сжигании угля  $\beta = 1,14$  кг/(кВт·ч), нефти —  $\beta = 0,96$  кг/(кВт·ч), мазута —  $\beta \approx 0,6$  кг/(кВт·ч), природного газа —  $\beta = 0,58$  кг/(кВт·ч). При выработке электроэнергии гидроэлектростанциями, атомными энергетическими установками, электростанциями на возобновляемых источниках энергии (солнечными, геотермальными, ветровыми и т. п.)  $\beta = 0$ , так как выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу не происходит. Для стационарной энергетики значение  $\beta$  зависит от доли каждого вида получения электроэнергии в общем энергобалансе страны. В Норвегии, например, 99,6% всей электроэнергии производится на гидроэлектростанциях, поэтому коэффициент выброса CO<sub>2</sub> составляет в среднем  $\beta = 0,05$  кг/(кВт·ч). В то же время в Дании 91% электроэнергии вырабатывают

на тепловых станциях при сжигании угля, что определяет эмиссию  $\beta=1,1$  кг/(кВт·ч). В среднем же принимают для Европы  $\beta=0,513$  кг/(кВт·ч), для Северной Америки  $\beta=0,672$  кг/(кВт·ч), для Японии  $\beta=0,581$  кг/(кВт·ч) [11].

Для судовых условий при выработке электроэнергии вспомогательными дизель-генераторами или валогенераторами с приводом от главных дизелей, когда в обоих случаях сжигается жидкое нефтяное топливо (мазут), коэффициент выброса  $\text{CO}_2$  может быть принят  $\beta=0,6$  кг/(кВт·ч). Если же в ходовом режиме судна для производства электроэнергии используется утилизационный паротурбогенератор, газотурбогенератор (схема «турбокомпаунд») или утилизационная силовая установка на низкокипящем рабочем теле [4], а также если привод машин ТНПУ осуществляется непосредственно водяным паром от утилизационного парогенератора, то  $\beta=0$ .

Годовые затраты электроэнергии при эксплуатации ТНПУ определялись как

$$E = (\Sigma N_k + \Sigma N_n + \Sigma N_{\text{авт}}) \tau_{\text{ТНПУ}} z_p \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{год},$$

где  $z_p$  — количество круговых рейсов судна на конкретном направлении перевозок за год (навигационный период), которое может быть ориентировочно рассчитано по формуле

$$z_p = \frac{n_{\text{ср}}}{L_p / 24v_s + \tau_{\text{ст}} + \tau_{\text{ман}}},$$

где  $n_{\text{ср}}$  — среднеэксплуатационное количество рабочих дней в году (продолжительность навигационного периода работы судна), которое принимается в зависимости от типа судна и его дедвейта: например, для танкера дедвейтом свыше 20 тыс. т  $n_{\text{ср}}=332$  суток [6];  $L_p$  — длина рейсовой линии, миль (может быть принята равной дальности плавания судна, которая приводится в его спецификации);  $v_s$  — средняя эксплуатационная скорость судна, уз;  $\tau_{\text{ст}}$  и  $\tau_{\text{ман}}$  — продолжительность, суток, в течение одного кругового рейса судна соответственно стоянок (с грузовыми операциями и без грузовых операций) и маневров.

Эксплуатационная скорость судна может быть определена исходя из его технической скорости  $v_t$  (приводится в спецификации судна) как

$$v_s = v_t k_{\text{реал}} \text{ уз},$$

где  $k_{\text{реал}}$  — коэффициент реализации технической скорости хода судна (для танкеров он лежит в диапазоне 0,70...0,96 и зависит от их дедвейта и направления перевозок).

Валовая продолжительность стоянок  $\tau_{\text{ст}}$  наливных судов для перевозки нефтепродуктов (учитывающая время грузовых и вспомогательных операций, а также время простоев по метеорологическим и другим причинам) зависит от чистой грузоподъемности судна, рода перевозимого груза, а также производительности судовых или береговых устройств и систем загрузки-выгрузки. В расчетах принимаются значения времени стоянки танкеров, полученные на основании статистических данных, в зависимости от их дедвейта и направления перевозки. Время маневров судна в портах за круговой рейс также определяется путем статистической обработки соответствующей информации и может быть принято  $\tau_{\text{ман}}=0,3...0,5$  суток.

## ВЫВОДЫ

1. Учитывая потребность в оптимальном выборе для каждого конкретного случая рабочих параметров судовой ТНПУ, невозможность установления достоверных стоимостных характеристик элементов ТНПУ, а также необходимость учета экологического воздействия ТНПУ на окружающую среду, была разработана методика комплексной многокритериальной оптимизации параметров работы ТНПУ, в которой использовались три типа критериев оптимизации: энергетические, массогабаритные и экологические.

2. В качестве энергетического критерия оптимизации был принят расход топлива вспомогательным дизель-генератором, затрачиваемый на выработку электроэнергии для привода машин ТНПУ и работы обслуживающих ее систем.

3. В качестве массогабаритного критерия оптимизации была принята суммарная масса ТНПУ и той части энергокомплекса судна, которая пропорциональна приросту электроэнергии, расходуемой на работу ТНПУ.

4. В качестве экологического критерия оптимизации был принят показатель общего эквивалента глобального потепления  $TEWI$ .

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Андреев, А. А. Оценка эффективности утилизации вторичной теплоты судовых ДВС теплонасосной паропроизводящей установкой [Текст] / А. А. Андреев, И. В. Калининченко. — Одеса : Наукові праці ОНАХТ, 2011. — Вип. 39, т. 1. — С. 63–68.
- [2] Андреев, А. А. Сравнительная оценка энергетической эффективности судовых паропроизводящих установок различных типов [Текст] / А. А. Андреев, И. В. Калининченко // 36. науч. пр. НУК. — Николаїв : НУК, 2007. — №2 (413). — С. 100–106.
- [3] Андреев, А. А. Теплонасосное направление генерирования водяного пара в промышленной энергетике [Текст] / А. А. Андреев // Промышленная теплотехника. — 2007. — Т. 29, №4. — С. 73–77.

- [4] **Андреев, А. А.** Утилизация вторичных тепловых ресурсов судовых ДВС [Текст] / А. А. Андреев // Двигатели внутреннего сгорания. — 2006. — № 2. — С. 149–154.
- [5] **Андреев, А. А.** Эколого-энергетические аспекты внедрения на судах теплонасосных паропроизводящих установок [Текст] / А. А. Андреев, И. В. Калиниченко // Научно-методический журнал. — Николаев : Вид-во МДГУ ім. П. Могили. — 2007. — Т. 61. Вип. 48. Техногенна безпека. — С. 46–52.
- [6] **Краев, В. И.** Экономическое обоснование при проектировании морских судов [Текст] / В. И. Краев. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л. : Судостроение, 1981. — 280 с.
- [7] **Мацевитый, Ю. М.** Термoeкономический анализ теплонасосной системы теплоснабжения [Текст] / Ю. М. Мацевитый, Н. Б. Чиркин, М. А. Кузнецов // Проблемы машиностроения. — 2010. — Т. 13, № 1. — С. 42–51.
- [8] **Оносовский, В. В.** Моделирование и оптимизация холодильных установок [Текст] / В. В. Оносовский. — Л. : Изд-во Ленинград. ун-та, 1990. — 206 с.
- [9] **Пат. на корисну модель № 29056, Україна, МПК F22B 3/00, F25B 30/00.** Спосіб утилізації низькопотенційної теплоти теплонасосним парогенератором [Текст] / Андреев А. А., Калініченко І. В. ; заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова ; заявл. 29.05.07 ; опубл. 10.01.08.
- [10] TEWI-анализ компрессорных агрегатов при работе на традиционных и альтернативных хладагентах [Текст] / Г. К. Лавренченко, И. В. Волобуев, В. П. Железный, О. В. Лысенко // Холодильная техника. — 2000. — № 2. — С. 10–13.
- [11] Energy and Global Warming Impacts of CFC Alternative Technologies [Text] / S. K. Fischer, P. J. Hughes, P. D. Fairchild (Oak Ridge National Laboratory), C. L. Kusik, J. T. Dieckmann, E. M. McMahon, N. Hobday (Arthur D. Little, Inc.) : Report to the Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study and to the US Department of Energy. — December 1991. — 520 p.

---

© І. В. Калініченко, А. А. Андреев, Н. Б. Андреева

Надійшла до редколегії 14.05.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК  
д-р техн. наук, проф. *С. І. Сербін*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 3, 2012