

УДК 621.577.4

**И. В. КАЛИНИЧЕНКО, А. А. АНДРЕЕВ***Национальный университет кораблестроения, Херсонский филиал, Украина***МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ СУДОВОЙ ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ**

*На основе метода глобального критерия разработана методика комплексной многокритериальной оптимизации параметров работы судовой парогенерирующей теплонасосной установки, в которой используются три типа критериев оптимизации: энергетические, массогабаритные и экологические. Данная методика используется в компьютерной математической модели для конструктивных расчетов основных агрегатов и аппаратов, а также выбора рабочего агента теплонасосной установки. Для экологического критерия оптимизации используются значения потенциала глобального потепления парниковых газов  $GWP_{100}$  для наиболее распространенных рабочих агентов холодильных машин и тепловых насосов. Для учета значимости отдельных критериев оптимизации используются коэффициенты весомости, которые определялись методом экспертных оценок.*

**Ключевые слова:** парогенерирующая теплонасосная установка, компьютерная математическая модель, комплексная функция цели, критерий оптимизации, рабочий агент, эквивалент глобального потепления.

**Постановка проблемы**

Использование на танкерах теплового насоса в качестве парогенерирующей теплонасосной установки (ПТНУ), утилизирующей низкопотенциальную теплоту (НПТ) воды, охлаждающей втулки цилиндров малооборотных судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС), является одним из перспективных путей решения проблемы повышения эффективности потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Полученный в ПТНУ водяной пар давлением 0,3...0,5 МПа можно использовать для нужд общесудовых потребителей и потребителей судовой энергетической установки (СЭУ) на ходовом режиме [1]. Для оценки эффективности применения ПТНУ в каждом конкретном случае и выбора оптимальных параметров необходимо разработать методику комплексной оптимизации параметров их работы, результаты которой могут быть использованы в компьютерной математической модели (ММ) для конструктивных расчетов основных агрегатов и аппаратов и выбора рабочего агента ПТНУ.

Чаще всего при оптимизации параметров работы теплонасосных установок (ТНУ) используют стоимостные критерии. Поскольку элементы, машины и аппараты ПТНУ, как правило, оригинальной конструкции и их необходимо проектировать индивидуально, установить зависимость их стоимости от параметров работы затруднительно.

**Анализ исследований по данной проблеме**

Теплонасосное направление утилизации вторичных тепловых ресурсов судовых дизелей для производства водяного пара в научно-технической литературе ранее уже рассматривалось. Например, в [2] рассматривались различные варианты теплоутилизирующих контуров на низкикипящих рабочих телах (НРТ) для получения водяного пара давлением 0,2 МПа и выше за счет теплоты наддувочного воздуха и охлаждающей ДВС воды. Однако здесь не был обоснован выбор рабочего агента, не произведены конструктивные расчеты основных аппаратов, а также не приведена методика компьютерного расчета цикла работы ПТНУ.

Анализ исследований в публикации [3] показал, что в оптимизационных методиках также отсутствует учет экологического влияния эксплуатации ТНУ на окружающую среду вследствие как прямого воздействия – эмиссии (выбросов) рабочего агента (РА), так и косвенного воздействия – дополнительной эмиссии углекислого газа  $CO_2$  в процессе сжигания органического топлива при выработке электроэнергии для привода машин и механизмов, входящих в состав ПТНУ.

**Целью** исследования является разработка методики комплексной многокритериальной оптимизации параметров работы судовой ПТНУ с учетом экологического влияния ее эксплуатации на окру-

жающую среду, результаты которой будут использованы в компьютерной ММ для конструктивных расчетов основных агрегатов и аппаратов, а также выбора рабочего агента ПТНУ.

### Изложение материала исследования

Для решения поставленной задачи было предложено рассмотреть другие (нестоимостные) критерии оптимизации ПТНУ, также имеющие непосредственную связь с параметрами оптимизации установки. Разработка компьютерной ММ и принцип ее построения и использования авторами была рассмотрена ранее [4]. Наиболее характерными критериями оптимизации могут быть три типа показателей ПТНУ: 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 ПТНУ может быть достигнуто при повышении ее энергопотребления). Таким образом, для решения данной оптимизационной задачи возникает необходимость перехода от однокритериальной к многокритериальной оптимизации параметров работы ПТНУ.

Для определения эффективности ПТНУ была разработана комплексная целевая функция (критерий оптимизации) на основе глобального критерия

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

где  $k_{\text{эн}}$ ,  $k_{\text{МГ}}$  и  $k_{\text{экол}}$  – частные безразмерные критерии оптимизации, учитывающие соответственно энергетические, массогабаритные и экологические показатели ПТНУ;  $\lambda_{\text{эн}}$ ,  $\lambda_{\text{МГ}}$  и  $\lambda_{\text{экол}}$  – коэффициенты весо-мости 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 ПТНУ, по допустимой температуре конца процесса сжатия в компрессоре и т.п.).

Частные безразмерные критерии оптимизации в общем виде находились как

$$k_j = (W_j - W_{\text{опт } j}) / W_{\text{опт } j}; \quad (j = 1, 2, 3),$$

где  $W_j$  – текущее значение  $j$ -той частной оптимизируемой величины;  $W_{\text{опт } j}$  – базовое значение  $j$ -той оптимизируемой величины, равное ее минимально-

му значению без учета влияния других составляющих:  $W_{\text{опт } j} = \min W_j$ .

Комбинации коэффициентов весо-мости  $\lambda_{\text{эн}}$ ,  $\lambda_{\text{МГ}}$  и  $\lambda_{\text{экол}}$ , которыми учитывалась значимость отдельных (частных) критериев оптимизации, определялись методом экспертных оценок.

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

$$W_{\text{эн}} = b_e^{\text{ВДГ}} (\Sigma N_{\text{к}} + \Sigma N_{\text{н}} + \Sigma N_{\text{авт}}),$$

где  $b_e^{\text{ВДГ}}$  – 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 ПТНУ, приводными двигателями насосов, системами автоматического управления и контроля (определяется по результатам расчетов указанных аппаратов и элементов ПТНУ).

В качестве массогабаритного критерия оптимизации была принята суммарная масса ПТНУ и той части энергокомплекса судна, которая пропорциональна приросту электроэнергии, расходуемой на работу ПТНУ. Выбранный критерий в наибольшей мере характеризует капитальные затраты на изготовление ПТНУ. Он находился по формуле, кг,

$$W_{\text{МГ}} = W_{\text{ПТНУ}} + g_{\text{уд}}^{\text{ВДГ}} (\Sigma N_{\text{к}} + \Sigma N_{\text{н}} + \Sigma N_{\text{авт}}) + W_{\text{эн}} \tau_{\text{ПТНУ}},$$

где  $W_{\text{ПТНУ}}$  – масса ПТНУ, кг (определяется по результатам расчетов аппаратов и элементов ПТНУ);  $g_{\text{уд}}^{\text{ВДГ}}$  – удельная масса вспомогательного дизель-генератора, кг/кВт (рассчитывается на основании данных фирм-производителей);  $\tau_{\text{ПТНУ}}$  – время работы ПТНУ 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 пар-

никовых газов, в том числе и производных хладонов, являющихся рабочими агентами ПТНУ. Количественно воздействие парниковых газов на глобальное потепление можно оценить по формуле [5, 6], кг CO<sub>2</sub>,

$$W_{\text{экол}} = TEWI = GWP \cdot L \cdot \tau_{\text{сл}} + GWP \cdot m \cdot [1 - \alpha] + \beta \cdot E \cdot \tau_{\text{сл}}$$

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

В работе [7] предложен метод расчета полной эквивалентной эмиссии парниковых газов, учитывающий энергетические затраты при получении конструкционных материалов, создания оборудования, а также утилизации хладагентов. 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 CO<sub>2</sub> (для CO<sub>2</sub> GWP = 1). Как правило, при расчетах показателя общего эквивалента глобального потепления TEWI используют потенциал глобального потепления парниковых газов с временным интервалом 100 лет – GWP<sub>100</sub>.

Переменная L, кг/год, характеризует утечку РА в атмосферу за год. Норма утечки для хладоновых систем связанные с повышенной вибрацией и качкой судна составляет 10 % в год от массы т, кг, рабочего агента во всей установке.

Время эксплуатации (срок службы)  $\tau_{\text{сл}}$ , год, теплонасосного оборудования в стационарных условиях может достигать 15–20 лет. 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, тогда принимаем равным  $\tau_{\text{сл}} = 8$  лет.

Коэффициент утилизации  $\alpha$  указывает долю утилизованного РА по окончании эксплуатации установки. Его принимают не менее  $\alpha = 0,75$ .

Величина  $\beta$  представляет собой эмиссию CO<sub>2</sub> при производстве 1 кВт·ч электроэнергии [5]. 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 CO<sub>2</sub> может быть принят  $\beta = 0,6$  кг/(кВт·ч).

Годовые затраты электроэнергии при эксплуа-

тации ПТНУ E, кВт·ч/год, определялись как

$$E = (\sum N_{\text{к}} + \sum N_{\text{н}} + \sum N_{\text{авт}}) \tau_{\text{ПТНУ}} z_{\text{р}}$$

где  $z_{\text{р}}$  – количество круговых рейсов судна на конкретном направлении перевозок за год (навигационный период); оно может быть ориентировочно рассчитано по формуле

$$z_{\text{р}} = \frac{n_{\text{СЕ}}}{\frac{L_{\text{р}}}{24v_{\text{с}}} + \tau_{\text{ст}} + \tau_{\text{ман}}}$$

Здесь:  $n_{\text{СЕ}}$  – 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. тонн  $n_{\text{СЕ}} = 332$  сут. [8];  $L_{\text{р}}$  – длина рейсовой линии, миль;  $v_{\text{с}}$  – средняя эксплуатационная скорость судна, уз.;  $\tau_{\text{ст}}$  и  $\tau_{\text{ман}}$  – продолжительность, сут., 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  $v_{\text{т}}$  (приводится в спецификации судна) как, уз.,

$$v_{\text{с}} = v_{\text{т}} k_{\text{реал}}$$

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.

## Выводы

Разработана методика комплексной многокритериальной оптимизации параметров работы ПТНУ, в которой использованы три типа критериев оптимизации: энергетические, массогабаритные и экологические. Результаты методики могут быть использованы в компьютерной ММ для расчета работы цикла и выбора рабочего агента ПТНУ, а также для конструктивных расчетов ее основных агрегатов и аппаратов.

## Литература

1. Андреев, А. А. Оценка эффективности утилизации вторичной теплоты судовых ДВС теплона-

сосной паропроизводящей установкой [Текст] / А. А. Андреев, И. В. Калинин // *Наукові праці ОНАХТ.* – Одеса, 2011. – Вип. 39, том. 1. – С. 63-68.

2. Радченко, Н. И. Теплоутилизирующие контуры на низкокипящих рабочих телах для ДВС [Текст] / Н. И. Радченко, А. А. Сирота // *Авіаційно-космічна техніка і технологія* : Зб. наук. пр. – Харків : ХАІ, 2002. – Вип. 31. Двигуни та енергоустановки. – С. 17-19.

3. Мацевитый, Ю. М. Термоэкономический анализ теплонасосной системы теплоснабжения [Текст] / Ю. М. Мацевитый, Н. Б. Чиркин, М. А. Кузнецов // *Проблемы машиностроения.* – 2010. – Т. 13, № 1. – С. 42-51.

4. Захаров, Ю.В. Оценка эффективности утилизации теплоты судовых главных дизелей теплонаносными паропроизводящими установками [Текст] / Ю.В. Захаров, А.А. Андреев, И.В. Калинин, В.И. Максимов // *Зб. наук. пр. НУК.* – 2005.

– № 2 (401). – С. 70-79.

5. Железный, В. П. Рабочие тела пароконпрессорных холодильных машин: свойства, анализ, применение [Текст] : моногр. / В. П. Железный, Ю. В. Семенюк. – Одесса : Фенікс, 2012. – 420 с.

6. Radermacher, R. TEWI Angles With a Twist [Text] / R. Radermacher // *Int. J. of Heating, Ventilating, Air Conditioning and Refrigerating Research.* – 2000. – Vol. 6, № 1. – P. 1 – 2.

7. Zhelezny, V. Assessment of Total Equivalent of Greenhouse Gases Emission in the Industry [Text] / V. Zhelezny, O. Hlieva, C. Artemenko // *CD Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Europeans Congress "Economics and Management of Energy in Industry" ISBN-972-99309-0-2, Lisboa, Portugal.* - 2004.

8. Краев, В. И. Экономическое обоснование при проектировании морских судов [Текст] / В. И. Краев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Судостроение, 1981. – 280 с.

*Поступила в редакцию 1.10.2014, рассмотрена на редколлегии 18.11.2014*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. проф. кафедры Н. И. Радченко, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев.

## МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЇ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ СУДНОВОЇ ПАРОГЕНЕРУЮЧОЇ ТЕПЛОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

*І. В. Калініченко, А. А. Андреев*

На основі методу глобального критерію розроблено методику комплексної багатокритеріальної оптимізації параметрів роботи суднової паровиробляючої теплонасосної установки, в якій використовуються три типи критеріїв оптимізації: енергетичні, масогабаритні та екологічні. Дана методика використовується в комп'ютерній математичній моделі для конструктивних розрахунків основних агрегатів і апаратів, а також вибору робочого агента теплонасосної установки. Для екологічного критерію оптимізації використовуються значення потенціалу глобального потепління парникових газів GWP<sub>100</sub> для найбільш поширених робочих агентів холодильних машин і теплових насосів. Для обліку значимості окремих критеріїв оптимізації використовуються коефіцієнти вагомості, які визначалися методом експертних оцінок.

**Ключові слова:** парогенеруюча теплонасосна установка, комп'ютерна математична модель, комплексна функція мети, критерій оптимізації, робочий агент, еквівалент глобального потепління.

## METHOD OF COMPLEX MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF PERFORMANCE PARAMETERS OF THE SHIP STEAM PRODUCING HEAT PUMP PLANT

*I. V. Kalinichenko, A. A. Andreev*

A method of complex multicriteria optimization of performance parameters of the ship heat pump steam producing plant has been developed on the basis of global criterion method. This method in the computer mathematical model for calculations of structural basic units and apparatus, as well as the selection working fluid heat pump system is used. The function consists of three types of optimization criteria: power, mass and volume, and ecological ones. For ecological optimization criterion the values of global warming potential of greenhouse gases GWP<sub>100</sub> for the most common working agents refrigerating machines and heat pumps are used. To account for the significance of individual optimization criterion are used weightiness coefficients, which were determined by expert assessments.

**Keywords:** steam producing heat pump plant, the computer mathematical model, the complex objective function, optimization criterion, working agent, the equivalent of global warming.

**Калініченко Іван Владимирович** – преподаватель кафедры теплотехники, Херсонский филиал Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Херсон, Украина, e-mail: kalinichenkoi80@ukr.net.

**Андреев Андрей Адольфович** – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой судового машиностроения и энергетики, Херсонский филиал Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Херсон, Украина.