

УДК 621.57

**СИРОТА А.А.**, Николаевский государственный гуманитарный университет им. Петра Могилы,  
г. Николаев, Украина

**РАДЧЕНКО Н.И., КОНОВАЛОВ Д.В.**, Национальный университет кораблестроения имени  
адмирала Макарова, г. Николаев, Украина

**Сирота Олександр Архипович** – к.т.н., доцент кафедри техногенної безпеки МДГУ ім. Петра Могили

**Радченко Микола Іванович** – д.т.н., професор Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, НДІ проблем екології та енергозбереження

**Конвалов Дмитро Володимирович** – к.т.н., доцент Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, НДІ проблем екології та енергозбереження

# ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ТРИГЕНЕРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Визначено основні напрямки тригенераційних технологій у судновій енергетиці. Показано, що комплексне використання теплоти відхідних газів і стисненого повітря дизельних двигунів і газових турбін для охолодження зовнішнього повітря на вході в двигуни та стисненого повітря забезпечує підвищення коефіцієнта корисної дії двигунів на 1...4% залежно від температури відхідних газів.*

*The main directions of trygeneration technologies in ship energetic have been determined. It is shown that complex recovery of diesel engines and gas turbines waste gases and compressed air to cool surrounding air at the engines inlet and to deep cool of compressed air provides increasing engines efficiency by 1...4% in dependence of waste gases temperature.*

## **1** Анализ состояния проблемы

Одним из основных и перспективных направлений повышения эффективности судовых энергетических установок (СЭУ) является использование их вторичных энергоресурсов (ВЭР): теплоты, отводимой с продуктами сгорания, водой, охлаждающей ДВС, и от наддувочного воздуха. Наибольшее распространение получило использование

энергии уходящих газов в утилизационных котлах (УК) и газовых турбинах (УГТ) турбонаддувочного агрегата. Однако коэффициент использования теплоты газов остается все же невысоким и составляет  $\psi = 0,5...0,6$  [1-3]. Для рыбопромысловых судов эти потери достигают 35...40 % теплоты сгорания топлива [4]. Но из-за опасности сернистой коррозии при работе главных ДВС во время

промысла на режимах долевых нагрузок и соответственно при пониженной температуре выхлопных газов их теплота практически не используется. Утилизационные котлы работают, как правило, на ходовом режиме, причем производимый в них пар идет на общесудовые нужды: паровое отопление, нагрев воздуха в паровых нагревателях системы кондиционирования воздуха в зимнем режиме работы, получение пресной воды в опреснительных установках, подогрев топлива и масла с целью уменьшения их вязкости при транспортировке, на технологические потребители пара – выпарные аппараты рыбомучных установок, хозяйственно-бытовые нужды (камбуз, прачечные, душевые).

Практически все СЭУ в дополнение к основным видам энергии (механической или электрической) вырабатывают и теплоту в виде пара или нагретой воды, т.е. являются установками когенерационного типа. В зависимости от последующего использования полученной тепловой энергии когенерационные установки можно разбить на две группы:

1) технологического назначения с использованием выработанного ими пара или нагретой воды для внешних по отношению к СЭУ потребителей (отопление, опреснительные установки и т.п.);

2) энергетического назначения, обеспечивающие соответствующую подготовку рабочего тела самих СЭУ.

Если в первом случае сокращается расход топлива по судну в целом, а показатели энергетической эффективности самой СЭУ остаются неизменными, то во втором – улучшаются и последние (КПД главного двигателя, его удельный расход топлива, мощность).

Частным случаем когенерации является тригенерация – совместная выработка трех видов энергии за счет использования одного первичного источника энергии. Как правило, под третьим видом энергии (в дополнение к тепловой и механической или электрической энергии) предполагается холод. Тригенерация предусматривает дополнение базовой когенерационной установки холодовырабатывающей надстройкой, работающей по общему или разделному с базовой установкой циклу.

Наряду с проблемой утилизации ВЭР существует и другая проблема – ухудшение энергетических показателей СЭУ при повышенных температурах наружного воздуха на входе в их двигатели. Так, каждые 10 °С повышения температуры наружного воздуха вызывают снижение КПД ДВС на 0,5...0,7 % и мощности на 5...10 % [1, 2].

## 2. Обоснование гипотез решения проблемы, постановка цели и задач исследования

Весьма перспективными являются технологии, позволяющие одновременно решать обе проблемы: охлаждать наружный воздух на входе двигателей, используя в то же время энергию их ВЭР. Это так называемые тригенерационные технологии энергетического назначения (в отличие от тригенерационных технологий технологического назначения).

На всех транспортных судах, и в частности транспортных рефрижераторах, основная доля топлива приходится на обеспечение хода судна (рис. 1). На рыбоперерабатывающих и промысловых судах к судовым электростанциям подводится электроэнергия, вырабатываемая в большинстве случаев валогенераторами. Поэтому при меньшей (по сравнению с

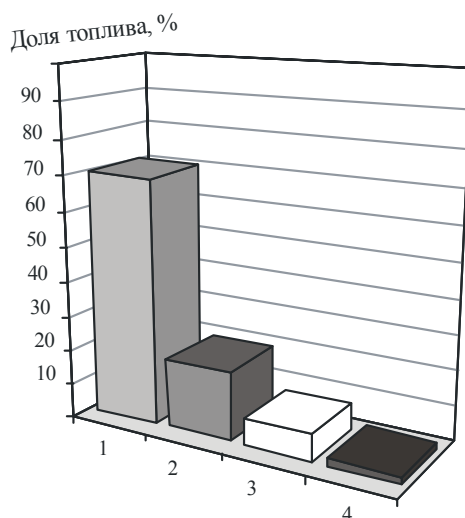
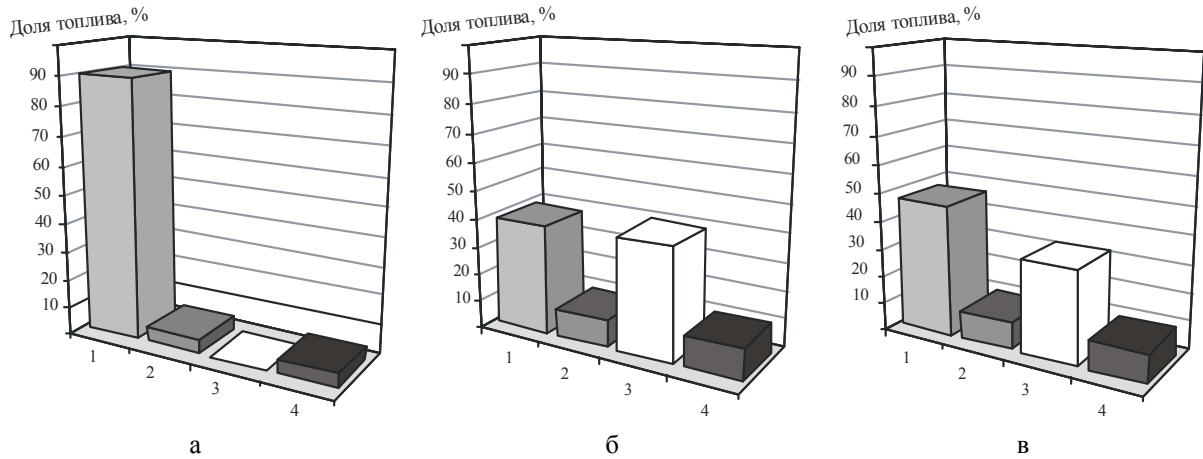
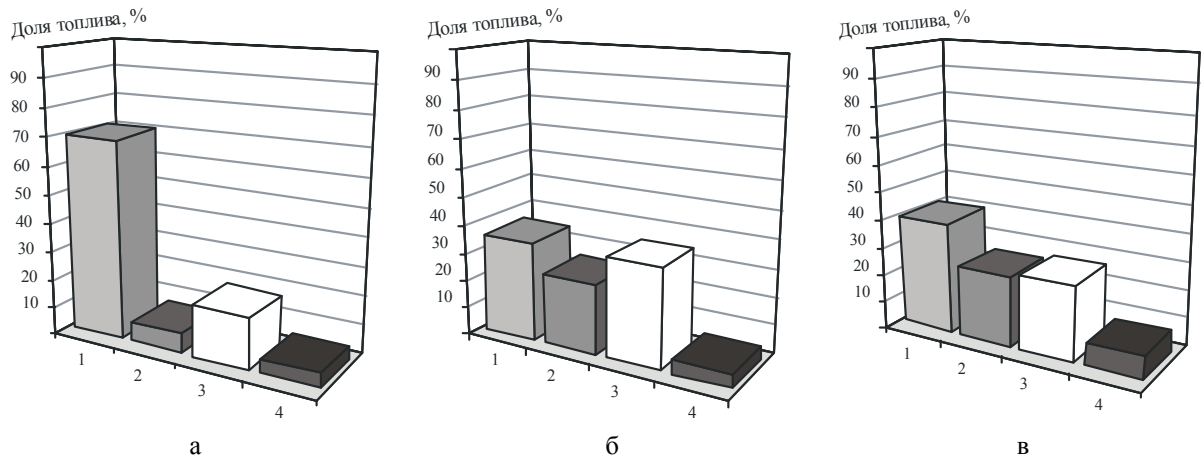


Рис. 1. Статьи расходования топлива на транспортном рефрижераторе:

1 – ход судна; 2 – холодильная установка; 3 – котельная установка; 4 – остальные потребители



**Рис. 2.** Статьи расходования топлива на рыбоперерабатывающем судне типа “Антарктида” на разных режимах эксплуатации судна: а – переходы на промысел и обратно; б – на промысле; в – в целом за рейс; 1 – ход судна; 2 – холодильная установка; 3 – котельная установка; 4 – остальные потребители



**Рис. 3.** Статьи расходования топлива на рыбопромысловом судне на разных режимах эксплуатации судна: а – переходы на промысел и обратно; б – на промысле; в – в целом за рейс; 1 – ход судна; 2 – холодильная установка; 3 – котельная установка; 4 – остальные потребители

Эффективность использования ВЭР СЭУ и, следовательно, энергетические показатели СЭУ определяются особенностью эксплуатации судов: на транспортных судах объемы тепловой энергии, производимой в когенерационных системах на базе пароводяных утилькотлов, превосходят потребности судна в ней, на рыбопромысловых же, наоборот, на режимах частичных нагрузок тепловой потенциал ВЭР СЭУ недостаточно высокий, чтобы использовать его для производства водяного пара. Реализация теплового потенциала ВЭР СЭУ, в первом случае – избыточного, а во втором – относительно низкого уровня, возможна путем перехода когенерационных СЭУ на тригенерацию с использованием низкипящих рабочих тел

(НРТ).

Снижение температуры уходящих газов и увеличение потерь теплоты в охладителях наддувочного воздуха имеет место и в современных СЭУ с высокоэкономичными малооборотными длинноходными ДВС, а также в ГТУ с промежуточным охлаждением сжатого воздуха и регенерацией теплоты. Во всех случаях из-за уменьшения температуры уходящих газов возможности традиционных когенерационных систем на базе пароводяных УК резко сокращаются, и целесообразным является применение тригенерации с использованием НРТ.

В современных ДВС довольно значительны уровень и объемы тепловых потерь с

наддувочным воздухом. Его можно рассматривать, наряду с уходящими газами, в качестве мощного источника тепловой энергии, использование которой позволит существенно повысить эффективность двигателей. Однако вопросы комплексного использования ВЭР разного теплового потенциала (уходящих газов, наддувочного воздуха, охлаждающей ДВС воды) для производства энергетического холода остаются нерешенными, а соответствующие технические решения отсутствуют.

Таким образом, основными гипотезами решения проблемы являются: применение тригенерационных технологий с НРТ в качестве рабочего тела, т.е. технологий на базе фазовых переходов, для повышения эффективности СЭУ; комплексная утилизация в них теплоты уходящих газов и наддувочного воздуха. Исходя из этих гипотез сформулированы **цель исследования** – повышение эффективности СЭУ путем применения тригенерационных технологий с фазовым переходом НРТ и использованием ВЭР СЭУ, а также его **задачи**: разработка принципов комплексной утилизации теплоты разных ВЭР и рациональной организации рабочих процессов тригенерационных систем с фазовыми переходами НРТ, а также реализующих эти принципы схемных решений, которые обеспечивали бы максимальное повышение энергетических показателей СЭУ.

### 3. Анализ результатов исследования

Анализ эффективности использования тригенерации в СЭУ производился для двух вариантов утилизации теплоты уходящих газов двигателей: с применением тригенерационной установки после пароводяного УК (температура уходящих газов на входе в установку  $t_{r1} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и непосредственно после двигателя СЭУ ( $t_{r1} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ), т.е. когда УК не работает либо из-за снижения температуры уходящих газов (на режимах частичных нагрузок, когда водяной пар получают от вспомогательных котлов), либо при отсутствии потребителей тепловой энергии на судне. Зачастую на ходу судна вырабатываемая в УК тепловая энергия превосходит потребности судна в ней. Тогда целесообразно использовать ее избыток в тригенерационных технологиях. В качестве тригенерационных систем рассматривались теплоиспользующие холодильные машины (ТХМ) с фазовым переходом НРТ, включающие генератор парообразного НРТ высокого давления, в котором используется теплота уходящих газов двигателей СЭУ, и испаритель НРТ низкого давления, в котором произведенный холод используется для предварительного охлаждения наружного воздуха на входе двигателей, а в случае его избытка – еще и для глубокого охлаждения наддувочного воздуха ДВС или

промежуточного охлаждения воздуха между компрессорными ступенями ГТД. В свою очередь, генератор состоит из испарительной и экономайзерной секций. В последней происходит нагрев жидкого НРТ до температуры кипения. При этом может использоваться теплота как уходящих газов (экономайзерная секция располагается в газоходе двигателя), так и сжатого воздуха (экономайзерная секция вынесена из газохода).

В результате расчетов было установлено, что утилизация теплоты уходящих газов после пароводяного УК ( $t_{r1} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$ ) путем тригенерации обеспечивает заметное приращение КПД ( $\eta = 1,0 \dots 1,5 \%$ ) как ДВС, так и ГТД, причем для ДВС – только если допускается понижение температуры уходящих газов до величины  $t_{yx.g} \approx 90 \text{ }^\circ\text{C}$  (малосернистые топлива, водотопливные эмульсии, выполнение экономайзерных поверхностей из специальных материалов). При этом экономайзерная секция генератора парообразного НРТ располагается в газоходе ДВС. В случае же ограничения температуры уходящих газов значениями  $t_{yx.g} \approx 140 \text{ }^\circ\text{C}$  эффект от применения тригенерации снижается ( $\eta = 0,5 \dots 1,0 \%$ ), а повышение температуры  $t_{yx.g}$  возможно путем установки экономайзерной секции в линии наддувочного воздуха, т.е. комплексной утилизации теплоты разных источников ВЭР СЭУ.

Повышение температуры  $t_{r2}$  до  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  (исключающей сернистую коррозию) возможно путем разбиения экономайзерной секции на две ступени с вынесением низкотемпературной ступени в линию наддувочного воздуха ДВС (охлаждающей ДВС воды). При этом исходная температура наддувочного воздуха может быть достаточно низкой:  $t_{b1} = 100 \dots 120 \text{ }^\circ\text{C}$ .

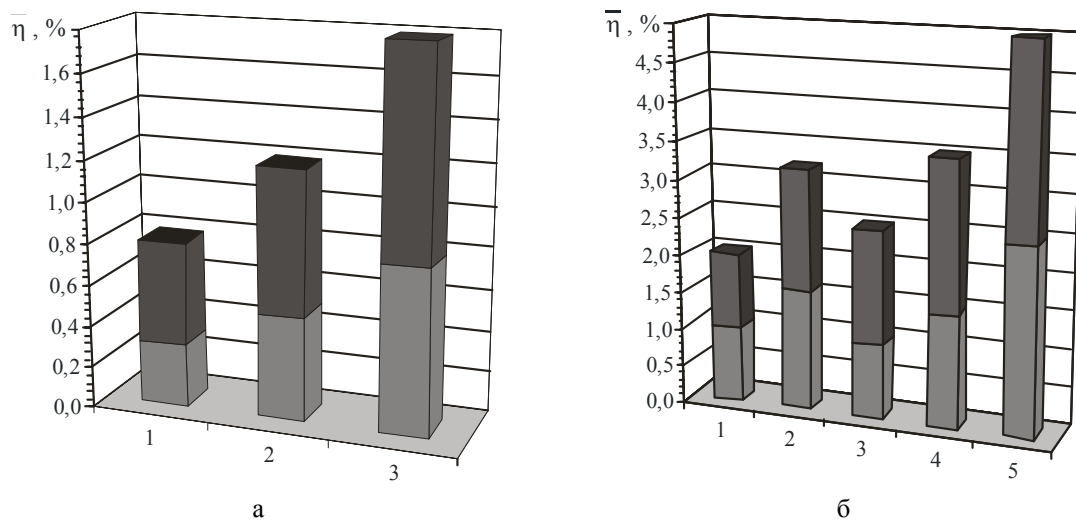
Комплексная утилизация теплоты разных источников ВЭР ДВС целесообразна не только как обеспечивающая максимальное увеличение эффективности СЭУ, но и с точки зрения надежной, исключая возникновение сернистой коррозии, эксплуатации экономайзерной секции, поскольку при повышенной температуре уходящих газов  $t_{r1} \geq 250 \text{ }^\circ\text{C}$  перед генератором их температуры  $t_{r2}$  после экономайзерной секции генератора уменьшается ниже предельно допустимой. Поэтому необходимо выносить экономайзерную секцию из газоразборного тракта ДВС с утилизацией в ней теплоты других источников ВЭР: наддувочного воздуха или охлаждающей ДВС воды. При этом приращение КПД  $\eta$  ДВС за счет охлаждения циклового воздуха в испарителе тригенерационной системы (по сравнению с базовым вариантом без тригенерации) составляют:  $\eta = 1,5 \dots 3,5 \%$  (экономайзер вынесен из газохода ДВС) против  $\eta = 1,0 \dots 2,0 \%$  (экономайзер в газоходе ДВС). Меньшие

величины в указанных диапазонах значений соответствуют температуре кипения НРТ в испарителе  $t_0 = 0$  °С, большие –  $t_0 = 10$  °С; температура уходящих газов после отвода теплоты системой тригенерации составляет  $t_{r2} = 140...160$  °С, а температура наддувочного воздуха на входе в экономайзер  $t_{в1}$  должна быть не менее 140 °С.

В случае применения тригенерации в когенерационной СЭУ (с пароводяным УК при  $t_{r1} = 180$  °С) произведенный холод полностью используется для охлаждения наружного воздуха на входе двигателя. При повышенной температуре уходящих газов ( $t_{r1} = 250$  °С) образуется практически двойной избыток холодопроизводительности (сверх потребностей для охлаждения наружного воздуха на входе

двигателя), который целесообразно использовать для глубокого промежуточного охлаждения сжатого воздуха: наддувочного воздуха ДВС или воздуха между компрессорными ступенями ГТД. При этом достигается максимальное приращение КПД.

Результаты анализа эффективности тригенерации в судовых ДВС для случаев использования теплоты уходящих газов после пароводяного утилькотла ( $t_{r1} \approx 180$  °С) и непосредственно после ДВС ( $t_{r1} \approx 250$  °С) представлены на рис. 4, *а* и *б* соответственно. При этом рассматривались следующие ограничения по температуре уходящих газов после их охлаждения в генераторе парообразного НРТ: температура уходящих газов поддерживалась достаточно высокой  $t_{r2} = 160$  °С, чтобы



**Рис. 4. Приращение КПД ДВС  $\eta$  за счет охлаждения циклового воздуха при разных температурах уходящих газов на входе  $t_{r1}$ , после испарительной  $t_{r,n2}$  и экономайзерной  $t_{r2}$  секций генератора; наддувочного воздуха на входе экономайзера  $t_{в1}$ ; кипения НРТ низкого давления  $t_0 = 0$  и 10 °С: *а* – генератор НРТ после УК ( $t_{r1} = 180$  °С); *б* – генератор НРТ после ДВС ( $t_{r1} = 250$  °С); 1 – экономайзер в газоходе ( $t_{r2} = 160$  °С); 2 – экономайзер на линии наддувочного воздуха ( $t_{r,n2} = 160$  °С); 3 – экономайзер в газоходе ( $t_{r,n2} = t_r + 20$  °С); 4 – экономайзер на линии наддувочного воздуха ( $t_{r,n2} = t_r + 20$  °С;  $t_{в1} = 140$  °С); 5 – экономайзер на линии наддувочного воздуха ( $t_{r,n2} = t_r + 20$  °С;  $t_{в1} = 160$  °С); светлые участки –  $t_0 = 0$  °С; темные участки –  $t_0 = 10$  °С**

Как видно из рис. 4, *а*, использование тригенерации с утилизацией теплоты газов после УК обеспечивает приращение КПД  $\eta = 0,4...1,2$  % при вынесении экономайзерной секции генератора НРТ в линию наддувочного воздуха (при этом температура уходящих газов после испарительной секции остается достаточно высокой  $t_{r2} \approx 140...160$  °С). При размещении экономайзера в газоходе эффект гораздо ниже:  $\eta = 0,2...0,8$  %. Максимальное же приращение КПД  $\eta = 0,8...1,8$  % возможно только в случае, если допускаются более низкие температуры  $t_{r2} \approx$

80...100 °С.

Намного больший эффект достигается при утилизации теплоты уходящих газов с более высокой температурой:  $t_{r1} \approx 250$  °С. Как видно из рис. 4, *б*, наиболее предпочтительной является комплексная тригенерация с использованием в экономайзере теплоты наддувочного воздуха, которая обеспечивает приращение КПД  $\eta = 1,5...3,0$  % (при  $t_{r2} \approx 140...160$  °С) и даже  $\eta = 2,5...5,0$  % (при высоких температурах наддувочного воздуха  $t_{в1} = 180$  °С).

**Выводы.**

1. Комплексное использование теплоты ВЭР двигателей СЭУ для охлаждения циклового воздуха (воздуха на входе двигателей, наддувочного воздуха ДВС и воздуха между компрессорными ступенями ГТД) в системах тригенерации обеспечивает приращение КПД (по сравнению с базовым вариантом без тригенерации)  $\eta = 1,5 \dots 3,5 \%$  (экономайзер вынесен из газохода двигателя) против  $\eta = 1,0 \dots 2,0 \%$  (экономайзер в газоходе двигателя). Меньшие величины в указанных диапазонах значений соответствуют температуре кипения НРТ в испарителе  $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , большие –  $t_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ .
2. В случае применения тригенерации совместно с традиционной утилизацией теплоты уходящих газов в пароводяном утилькотле, когда  $t_{r1} \approx 180 \text{ }^\circ\text{C}$ , приращение КПД  $\eta$  ДВС за счет охлаждения циклового воздуха в испарителе тригенерационной системы (по сравнению с базовым вариантом без тригенерации) составляет  $\eta = 0,8 \dots 1,8 \%$ . При этом температура уходящих газов после тригенерационного контура устанавливается на уровне  $t_{r2} \approx 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , что с точки зрения сернистой коррозии допустимо только для ГТД. Вынесение экономайзера из газохода в этом случае нецелесообразно, поскольку высокотемпературный тепловой потенциал сжатого воздуха может быть утилизирован в

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Селиверстов В.М. Утилизация тепла в судовых дизельных установках. – М.: Судостроение, 1973. – 251 с.
2. Артемов Г.А., Горбов В.М. Судові енергетичні установки. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – 356 с.
3. Маслов В.В. Утилизация теплоты судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1990. – 144 с.
4. Коршунов Л.П. Утилизация тепла на судах флота рыбной промышленности. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 232 с.