

DOI 10.15589/jnn20150503
 УДК 621.436.13
 А65

IMPROVING THE EFFICIENCY OF MARINE LOW-SPEED ENGINE BY COOLING CHARGING AIR IN THERMOTRANSFORMER

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ МОД ОХЛАЖДЕНИЕМ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА В ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРЕ

Artem A. Andreev
 artem_andreev@ukr.net
 ORCID: —

Natalya B. Andreeva
 e-mail: —
 ORCID: —

А. А. Андреев
 канд. техн. наук, в.о. доц.

Н. Б. Андреева
 канд. пед. наук, доц.

Kherson Branch of National University of Shipbuilding

Херсонский филиал Национального университета кораблестроения, г. Херсон

Abstract. The possibility of installing of waste heat cooling system in a engine room of a transport vessel was proved. The waste heat recovery ejector cooling machine utilizing the heat of scavenge air as an example of thermotransformer is shown. The dependence of the efficiency of the two-stroke low-speed diesel on the temperature of the scavenge air in the marine environment and the feasibility of heat recovery are shown. Payback of waste heat cooling system for the two-stroke low-speed diesel was calculated.

Keywords: heat transformation; waste heat recovery cooling machine; two-stroke low-speed engine; scavenge air.

Аннотация. Доказана возможность установки теплоиспользующей установки охлаждения в машинном отделении судна. Как термотрансформатор рассмотрена теплоиспользующая эжекторная холодильная машина, которая утилизирует теплоту наддувочного воздуха МОД. Показана зависимость эффективности МОД от температуры наддувочного воздуха в судовых условиях, а также целесообразность утилизации теплоты. Рассчитан срок окупаемости теплоиспользующей системы охлаждения наддувочного воздуха для МОД.

Ключевые слова: трансформация теплоты; теплоиспользующая холодильная машина; МОД; наддувочный воздух.

Анотація. Доведено можливість встановлення тепловикористовуючої установки охолодження в машинному відділенні судна. Як термотрансформатор розглянуто тепловикористовуючу ежекторну холодильну машину, що утилізує теплоту наддувочного повітря МОД. Показано залежність ефективності МОД від температури наддувочного повітря в судових умовах, а також доцільність утилізації теплоты. Розраховано термін окупності тепловикористовуючої системи охолодження наддувочного повітря для МОД.

Ключові слова: трансформація теплоты; тепловикористовуюча холодильна машина; МОД; наддувне повітря.

REFERENCES

- [1] Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation. MAN B&W Diesel A/S. Copenhagen, Denmark, 2005. 15 p.
- [2] Heim K. Existing and Future Demands on the turbocharging of Modern Large Two-stroke Diesel Engines. *8-th Supercharging Conference*. Dresden, 2002.
- [3] Andreev A. A., Radchenko N. I., Sirota A. A. *Teploispolzuyushchaya sistema okhlazhdeniya nadduvochnogo vozdukha sudovogo malooborotnogo dizelya* [Waste heat recovering scavenge air cooling system of marine low-speed diesel]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya — Aerospace technic and technology*, 2013, no. 1, issue 98, pp. 66–70.
- [4] Andreev A. A., Radchenko N. I., Sirota A. A. *Sravnitel'naya otsenka okhlazhdeniya nadduvochnogo vozdukha glavnogo sudovogo dizelya s utilizatsiey ego toploty i zabortnoy vody* [Comparative evaluation of the scavenge air cooling of the main marine diesel with waste heat utilization and seawater]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya — Aerospace technic and technology*. 2013, no. 2, issue 99, pp. 92–96.
- [5] Andreev A. A., Radchenko N. I. *Povyshenie toplivnoy effektivnosti glavnogo dvigatelya transportnogo sudna okhlazhdeniem nadduvochnogo vozdukha* [Fuel efficiency improving of the main engine transport vessel by

scavenge air cooling]. *Kholodilna tekhnika ta tekhnologiya — Refrigeration Engineering and Technology*, 2012, no. 4, issue 138, pp. 249–253.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Условия эксплуатации судовых малооборотных дизелей (МОД) отличаются значительным изменением в течение рейса температуры наружного воздуха, а значит, и наддувочного воздуха, а также температуры забортной воды $t_{зв}$, отводящей теплоту от наддувочного воздуха. Топливная эффективность МОД существенно зависит от температуры наддувочного воздуха, которая, в свою очередь, зависит от температуры охлаждающей воды (табл. 1).

В то же время объемы теплоты, отводимой от наддувочного воздуха, весьма значительные, и ее использование для его же охлаждения низкотемпературным термотрансформатором (ТТр) или теплоиспользующей холодильной машиной (ТХМ) позволяло бы удерживать температуру наддувочного воздуха даже ниже температуры охлаждающей забортной воды. Одним из возможных способов поддержания низкой (ниже температуры наружного воздуха) температуры охлаждающей воды является применение теплоиспользующей установки охлаждения наддувочного воздуха.

ЦЕЛЮЮ РАБОТЫ является повышение эффективности системы охлаждения наддувочного воздуха судовых МОД с помощью ТТр, а также разработка и анализ конструктивных схем системы охлаждения наддувочного воздуха с эжекторным ТТр для судового МОД.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Схема трехконтурной трехступенчатой системы охлаждения наддувочного воздуха МОД с эжекторным термотрансформатором (ЭТТр), которая использует теплоту наддувочного воздуха после турбокомпрессора (ТК), приведена на рис. 1.

Как видно, в термотрансформаторе используются теплообменники — штатные охладители наддувочного воздуха (ОНВ): высоко-, средне- и низкотемпературные ОНВ (ОНВ_{вт}, ОНВ_{ст} и ОНВ_{нт}), а наличие промежуточного водяного контура, к которому подключают теплообменники с фазовым переходом низ-

кокипящего рабочего тела (НРТ): генератор НРТ высокого давления и испаритель НРТ низкого давления, а также нагреватель жидкого НРТ — экономайзерная секция генератора, исключает необходимость внесения конструктивных изменений в тракт наддувочного воздуха вообще. Так, генератор паров НРТ высокого давления подключают к промежуточному водяному контуру высокотемпературной теплоиспользующей ступени ОНВ_{нт} (рис. 1), что обеспечивает его надежную эксплуатацию при вполне умеренных температурных напорах, определяемых температурой кипения НРТ в генераторе (120 °С), приемлемые габариты благодаря высокой интенсивности теплопередачи в процессе фазового перехода НРТ (кипения НРТ) и исключает затраты энергии на преодоление аэродинамического сопротивления, которое имело бы место при размещении генератора НРТ в наддувочном тракте МОД.

Возможно некоторое увеличение поверхности низкотемпературной ступени ОНВ_{нт} и соответственно ее аэродинамического сопротивления, обусловленное повышенной тепловой нагрузкой из-за более глубокого охлаждения воздуха по сравнению с его охлаждением путем отвода теплоты забортной водой. Однако резерв мощности современных высокоэффективных ТК, сверх необходимой для наддува, достаточный для преодоления аэродинамического сопротивления ОНВ_{нт}. О наличии такого резерва свидетельствуют системы утилизации энергии выпускных газов МОД мощностью свыше 20 МВт судов современной постройки, в которых 10...12 % общего расхода выпускных газов подают на утилизационную газовую турбину, минуя ТК.

Для проверки предполагаемого эффекта от применения теплоиспользующей системы охлаждения наддувочного воздуха на судах с МОД были получены данные натурных испытаний на современных эксплуатируемых судах-контейнеровозах: «MAERSK SEMARANG» (номер IMO 9350070), «CMA CGM BERLIOZ» (номер IMO 9222297) и «VILLE D'AQUARIUS» (номер IMO 9125607),

Таблица 1. Изменение удельного расхода топлива Δb_c , %, в неспецификационных климатических условиях (по данным фирмы «MAN B&W»)

Параметр	Условия изменения	При сохранении p_z	Без сохранения p_z
		Δb_c , %	Δb_c , %
Температура воды, охлаждающей наддувочный воздух	Повышение на каждые 10 °С	+0,60	+0,41
Температура воздуха на входе в турбокомпрессор	Повышение на каждые 10 °С	+0,20	+0,71
Давление воздуха на входе в ТК	Повышение на 10 мбар	+0,02	-0,05

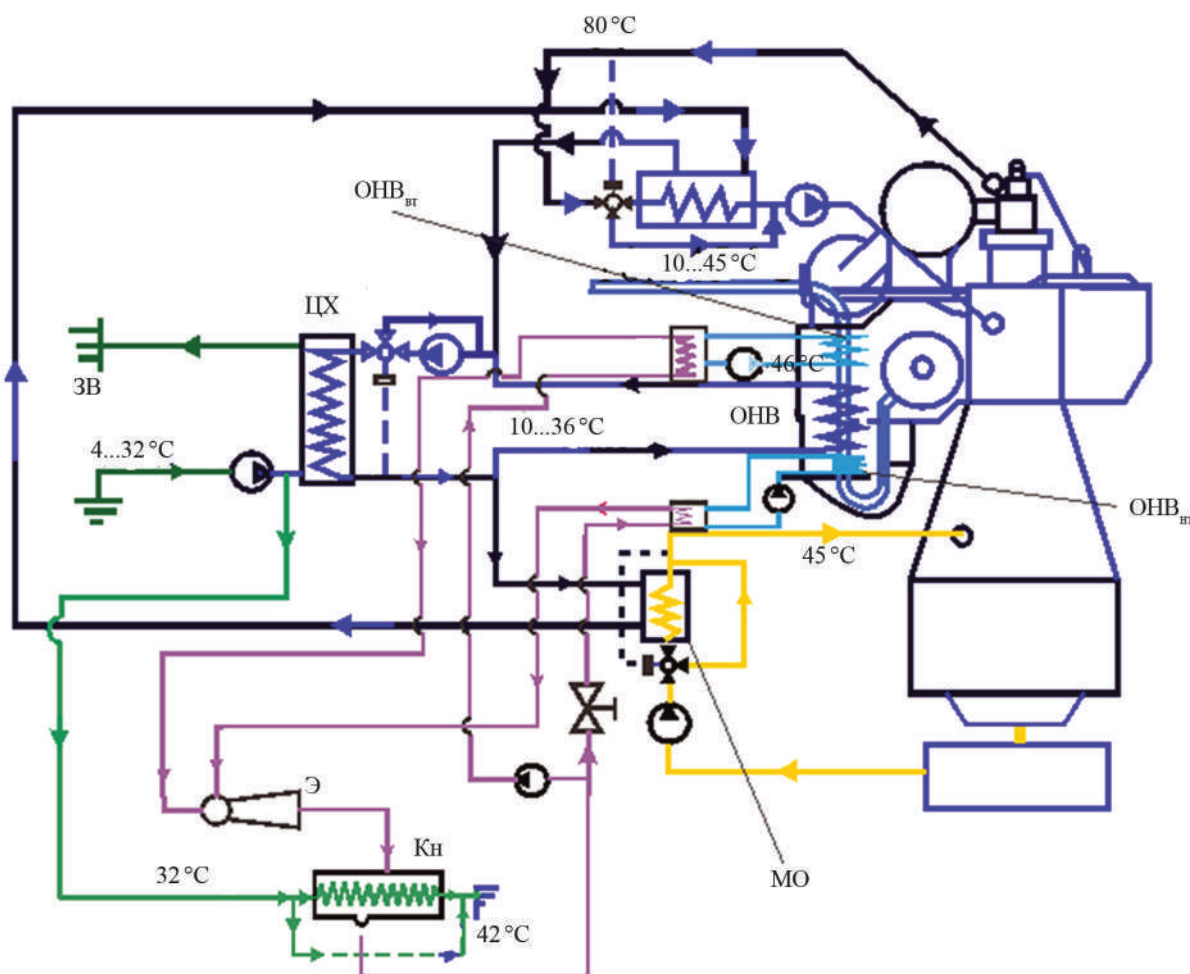


Рис. 1. Схема трехконтурной трехступенчатой системы охлаждения наддувочного воздуха МОД с эжекторным термотрансформатором, которая использует теплоту наддувочного воздуха после ТК:

ОНВ_{вт} — высокотемпературная ступень охладителя наддувочного воздуха; ОНВ_{нт} — низкотемпературная ступень охладителя наддувочного воздуха; ЦХ — центральный холодильник; МО — маслоохладитель; Кн — конденсатор; 3В — забортная вода; Э — эжектор; ОНВ — охладитель наддувочного воздуха

курсующих на различных рейсовых линиях. На судне «MAERSK SEMARANG» во время эксплуатации его на рейсовой линии Рио-де-Жанейро – Гамбург в августе–октябре 2012 года проводились замеры параметров главного двигателя 12K98MC-C фирмы «MAN B&W» и параметров окружающей среды. Аналогичные замеры производились и на остальных судах в разное время (VILLE D'AQUARIUS — апрель–июнь 2014 г.; главный двигатель — 8RTA84C фирмы «Wartsila»; CMA CGM BERLIOZ — январь–апрель 2015 г.; главный двигатель — 12K98MC-C).

В соответствии с режимами эксплуатации проводились измерения различных параметров указанных главных двигателей, в частности температуры в наддувочном ресивере, температуры в машинном отделении, расхода топлива, мощности МОД (рис. 2). Все измерения проводились автоматизированными системами регистрации, результат обрабатывался

с помощью ЭВМ в режиме реального времени. Максимальная, соответствующая сумме систематической погрешности и доверительного интервала Стьюдента, величина погрешности определения расхода топлива и мощности двигателя не превышала 2%.

В результате экспериментальных исследований были получены зависимости удельного расхода топлива b_e от температуры t_s наддувочного воздуха в ресивере (рис. 3). Как видно из рис. 3, с повышением температуры наддувочного воздуха удельный расход топлива МОД возрастает, причем при разных температурах воздуха на входе $t_{нв}$ графики остаются приблизительно эквидистантными.

При установке термотрансформатора на судне возникает вопрос об размещении дополнительного оборудования. Элементы термотрансформатора могут быть расположены в любом помещении судна, но для удобства эксплуатации, упрощения доступа

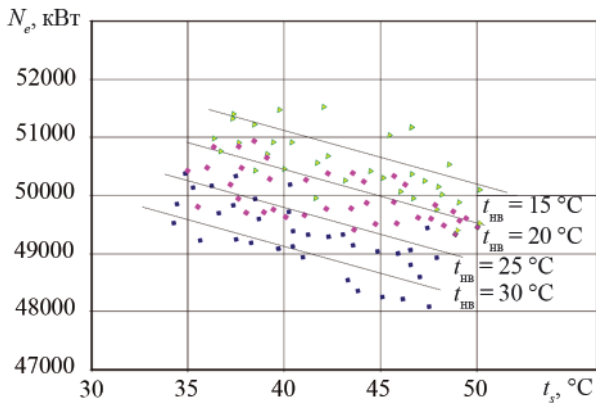


Рис. 2. Мощность МОД в зависимости от температуры наддувочного воздуха t_s при различных температурах воздуха на входе $t_{нв}$ для двигателя 12K98MC-C фирмы «MAN B&W»

к оборудованию, уменьшения связующей арматуры размещать их целесообразнее всего в машинном отделении судна. Как показали результаты эскизного проектирования, выполненного на базе расчетов основных элементов теплоиспользующей системы охлаждения, их габариты позволяют размещать термотрансформатор в машинном отделении без затруднений. На рис. 4 показана возможная компоновка теплообменников теплоиспользующей установки охлаждения на балкере типа «КИИВ», в качестве главного двигателя принят МОД марки 6S50ME-B9.5-ТII фирмы «MAN B&W» с эффективной мощностью $N_e = 10680$ кВт.

Как видно, габаритные размеры наибольших элементов термотрансформатора (генератор, конденсатор, испаритель) относительно небольшие и их расположение позволяет обеспечить достаточное удобство обслуживания. При установке теплоиспользующей системы охлаждения на судах с большей мощностью главного двигателя вопросы расположения термотрансформатора упрощаются, так как их машинное отделение имеет большие запасы свободных площадей и объемов.

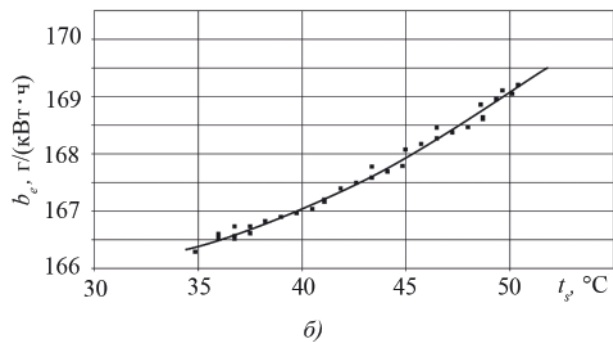
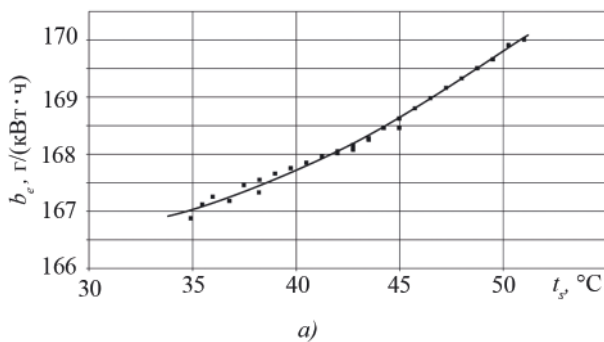


Рис. 3. Удельный расход топлива двигателя b_e в зависимости от температуры наддувочного воздуха t_s при постоянной нагрузке двигателя и различных температурах воздуха на входе $t_{нв}$:

а — $t_{нв} = 45$ °C; б — $t_{нв} = 35$ °C

Охлаждение наддувочного воздуха в теплоиспользующей установке охлаждения до температуры ниже температуры воздуха, охлаждаемого в традиционном водяном ОНВ, обеспечивает сокращение удельного b_e и общего B_e расходов топлива. Результаты расчетов снижения удельного расхода топлива Δb_e , полного расхода топлива МОД марки 5S60ME-B8.2-ТII фирмы «MAN B&W» (эффективная мощность в точке L_1 — $N_e'' = 11900$ кВт и эксплуатационная $N_e^3 = 10000$ кВт) в абсолютных ΔB_e и относительных $\overline{\Delta B_e}$ величинах показывают, что практически на протяжении всего рейса уменьшение удельного расхода топлива составляет $\Delta b_e = 2,0$ г/(кВт·ч), относительная экономия потребления топлива $\overline{\Delta B_e} = 1,1 \dots 1,2$ %, а абсолютная экономия потребления топлива ΔB_e за рейс для МОД с эксплуатационной мощностью 10 МВт составляет около 18 т по сравнению с традиционной системой охлаждения наддувочного воздуха МОД. Относительная экономия потребления топлива увеличивается при использовании теплоиспользующей установки охлаждения на судах с главными двигателями больших мощностей.

Был произведен расчет срока окупаемости теплоиспользующей установки охлаждения наддувочного воздуха главного двигателя балкера типа «Libertas» с главным двигателем 5S60ME-B8.2-ТII (мощность в точке оптимизации $N_0 = 10500$ кВт; эксплуатационная мощность $N_3 = 10000$ кВт).

При этом капитальные затраты на теплоиспользующую установку охлаждения воздуха на входе ГД рассчитывали исходя из мощности ГД в точке оптимизации N_0 , а сокращение потребления топлива двигателем — при эксплуатационной мощности N_3 , которая меньше N_0 . Результаты расчетов показали, что срок окупаемости зависит от стоимости топлива и при современной цене составляет менее двух лет.

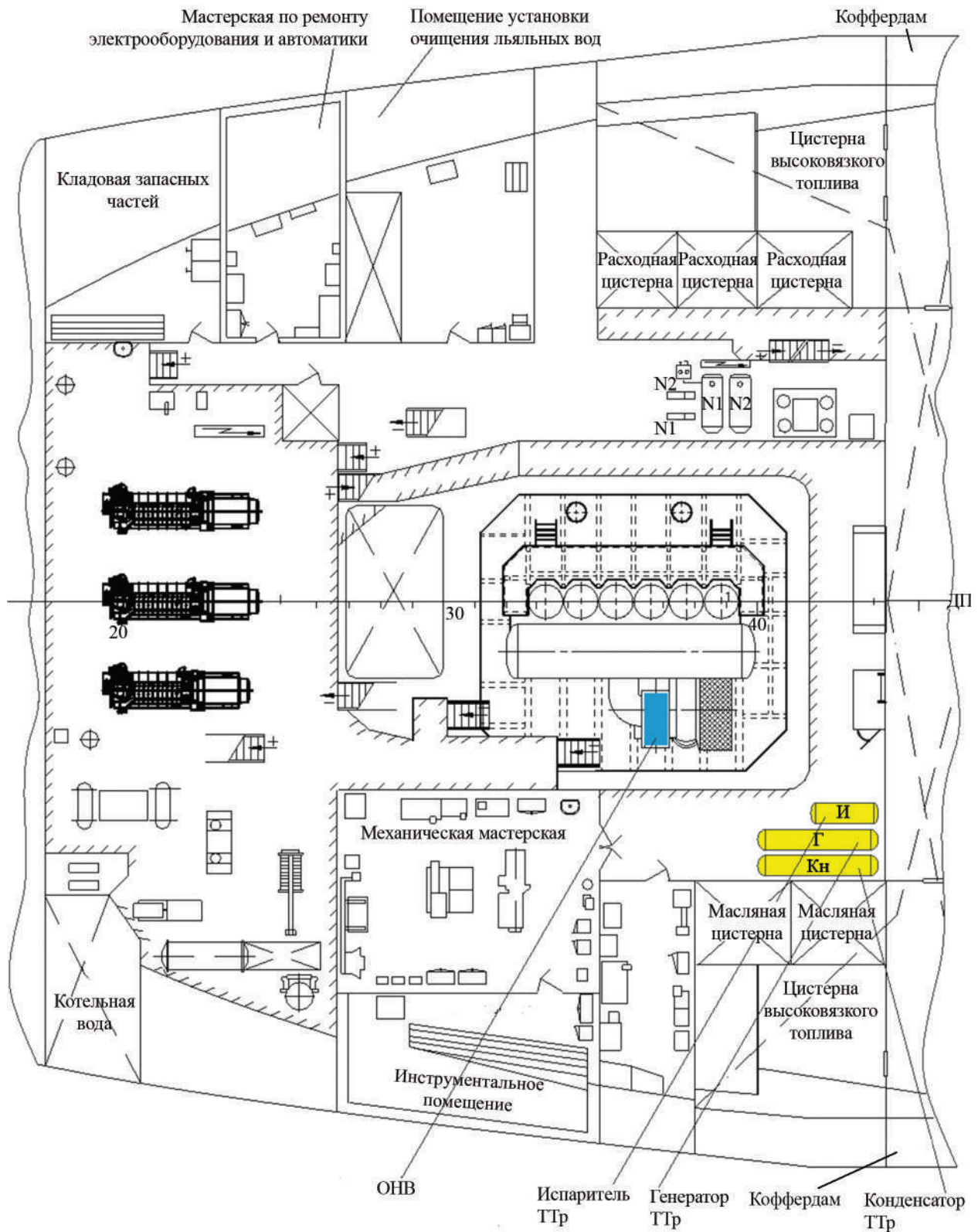


Рис. 4. Расположение элементов термотрансформатора в машинном отделении балкера «КИВ» (1 платформа)

ВЫВОДЫ. Доказана возможность установки теплоиспользующей установки охлаждения в машинном отделении судна. Определены условия эксплуатации ДУ транспортных судов, при которых утилизация теплоты наддувочного воздуха обеспечивает сокращение рейсового расхода топлива на 1,0...1,6% и годового — 1,0...1,5%. Показана целесообразность данного решения утилизации теплоты и рассчитан срок окупаемости теплоиспользующей системы охлаждения наддувочного воздуха для МОД.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation / MAN B&W Diesel A/S // Copenhagen, Denmark. — 2005. — 15 p.
- [2] **Heim, K.** Existing and Future Demands on the turbocharging of Modern Large Two-stroke Diesel Engines / K. Heim // 8-th Supercharging Conference. — Dresden. — 2002.
- [3] **Андреев, А. А.** Теплоиспользующая система охлаждения наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля / А. А. Андреев, Н. И. Радченко, А. А. Сирота // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2013. — № 1 (98). — С. 66–70.
- [4] **Андреев, А. А.** Сравнительная оценка охлаждения наддувочного воздуха главного судового дизеля с утилизацией его теплоты и забортной водой / А. А. Андреев, Н. И. Радченко, А. А. Сирота // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2013. — № 2 (99). — С. 92–96.
- [5] **Андреев, А. А.** Повышение топливной эффективности главного двигателя транспортного судна охлаждением наддувочного воздуха / А. А. Андреев, Н. И. Радченко // *Холодильна техніка та технологія*. — 2012. — Вип. 4 (138). — С. 249–253.

© А. А. Андреев, Н. Б. Андреева

Надійшла до редколегії 21.09.2015

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *М. І. Радченко*