

УДК 621.436.13:621.57

Р. Н. РАДЧЕНКО<sup>1</sup>, А. А. АНДРЕЕВ<sup>1</sup>, Д. В. КОНОВАЛОВ<sup>1</sup>, Л. БОХДАЛЬ<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина*<sup>2</sup> *Кошалинский технический университет, Польша*

## АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА СУДОВОГО МАЛООБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ

*Предложены схемы и проанализированы альтернативные варианты охлаждения наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля с помощью утилизирующей его теплоту эжекторной холодильной машины с использованием охлаждающего потенциала забортной воды в промежуточной ступени охлаждения и без его использования. Рассчитаны температурные режимы двух- и трехступенчатых охладителей и их глубина по ходу воздуха, определяющая аэродинамическое сопротивление и, соответственно, затраты мощности на его преодоление. Показано, что трехступенчатая система охлаждения наддувочного воздуха с отводом его теплоты забортной водой в промежуточной ступени охладителя обеспечивает глубокое охлаждение наддувочного воздуха при аэродинамическом сопротивлении, сопоставимом с двухступенчатыми охладителями когенерационного типа.*

**Ключевые слова:** *судовой малооборотный дизель, ступенчатое охлаждение, наддувочный воздух, теплоиспользующая холодильная машина, низкокипящее рабочее тело.*

### 1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Проблема охлаждения наддувочного воздуха при повышенных температурах наружного воздуха и забортной воды особенно остро стоит в высоконаддувных судовых длинноходовых малооборотных дизелях (МОД), степени повышения давления воздуха в которых  $\pi_k = 3 \dots 4,5$  (в перспективе  $\pi_k = 5$ ), а температура воздуха после турбокомпрессора (ТК) достигает  $220 \dots 260$  °С. Соответственно возрастают потери теплоты с охлаждающей наддувочный воздух водой и выпускными газами, что приводит к снижению термодинамической эффективности дизелей. Так, с повышением температуры наддувочного воздуха на 10 °С эффективный КПД МОД уменьшается примерно на 0,5 % и, соответственно, возрастает удельный расход топлива  $b_e$  [1–3].

В судовых МОД все более широкое распространение находят двухконтурные по воде (с промежуточным контуром пресной воды) и двухступенчатые по воздуху системы охлаждения когенерационного типа, в которых вода, нагретая в высокотемпературной ступени ОНВ<sub>ВТ</sub> охладителя наддувочного воздуха (ОНВ), используется для нагрева топлива, масла, питательной воды утилизационного котла, на теплофикационные нужды. Утилизация теплота наддувочного воздуха хотя и позволяет сократить его потери с охлаждающей водой, но не решает проблему поддержания стабильно низкой температуры наддувочного воздуха при высокой температуре забортной воды. Одним из направлений

ее решения является охлаждение наддувочного воздуха теплоиспользующими холодильными машинами (ТХМ), утилизирующими сбросную теплоту МОД: наддувочного воздуха, выпускных газов и других источников. Наиболее простыми и надежными являются теплоиспользующие эжекторные холодильные машины (ТЭХМ). Применение в ТХМ низкокипящих рабочих тел (НРТ) позволяло бы охлаждать наддувочный воздух даже ниже температуры забортной воды.

Такие трехконтурные теплоиспользующие системы охлаждения (ТСО) наддувочного воздуха – с дополнительным контуром НРТ – обеспечивают стабильно низкую температуру наддувочного воздуха независимо от температуры забортной воды. Очевидно, что полная независимость ТСО от климатических условий за бортом возможна в случае отсутствия в ней ступени охлаждения забортной водой, т.е. при двухступенчатой по воздуху и трехконтурной по хладоносителю системе охлаждения. В то же время неиспользование охлаждающего потенциала забортной воды возможно только при его компенсации холодом, генерируемым ТХМ, что в свою очередь возможно при наличии достаточных объемов сбросной теплоты МОД помимо теплоты самого наддувочного воздуха. Глубокая же утилизация теплоты наддувочного воздуха для компенсации охлаждающего потенциала забортной воды связана с увеличением поверхности ОНВ и, соответственно, затратами мощности на преодоление его аэродинамического сопротивления. С целью обеспечения надежности при эксплуатации исключается вариант

ТСО с непосредственным отводом тепла от наддувочного воздуха к НРТ, т.е. без промежуточного контура пресной воды.

**Цель работы** – сравнительная характеристика альтернативных вариантов ступенчатого охлаждения наддувочного воздуха судового МОД теплоиспользующей эжекторной холодильной машиной с использованием охлаждающего потенциала заборной воды в промежуточной ступени охлаждения и без его использования, выбор рационального варианта, обеспечивающего глубокое охлаждение наддувочного воздуха ниже температуры охлаждающей заборной воды.

## 2. Результаты исследования

Контуры теплоносителей альтернативных систем охлаждения наддувочного воздуха представлены на рис. 1.

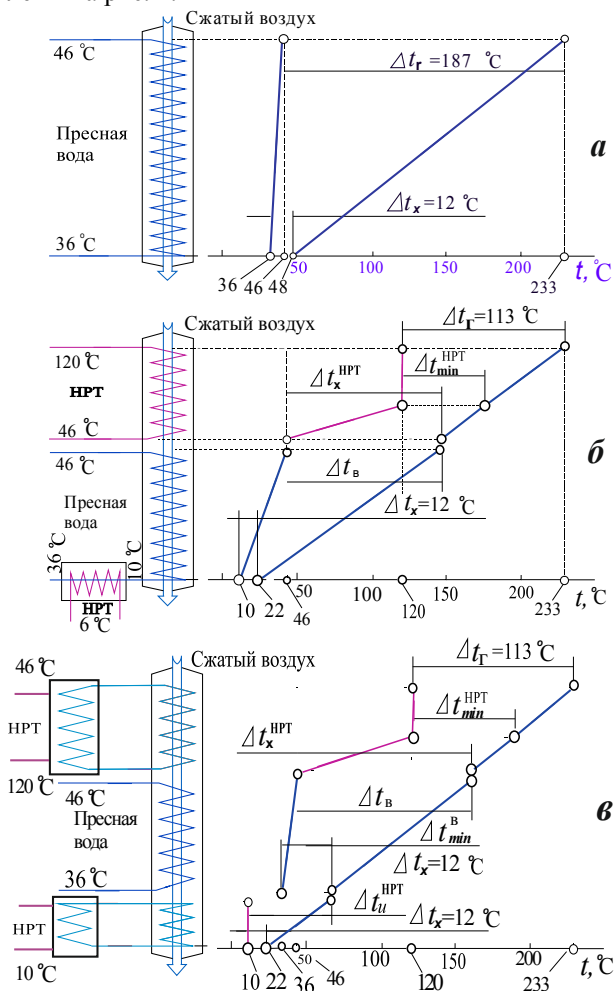


Рис. 1. Контуры теплоносителей альтернативных систем охлаждения наддувочного воздуха дизеля: **а** – традиционная одноступенчатая двухконтурная система охлаждения; **б** – двухступенчатая трехконтурная ТСО; **в** – трехступенчатая трехконтурная ТСО

В двухступенчатой ТСО (рис. 1, **б**) высокопотенциальная теплота наддувочного воздуха после турбокомпрессора (ТК) отводится промежуточным водяным контуром высокотемпературной ступени ОНВ<sub>ВТ</sub> к жидкому НРТ, кипящему в генераторе паров НРТ ТЭХМ при высоких давлении и температуре  $t_r = 100 \dots 120$  °С. В испарителе ТЭХМ жидкий НРТ испаряется при низком давлении, соответственно и температуре  $t_0 = 2 \dots 5$  °С, охлаждая воду, отводящую теплоту от наддувочного воздуха в низкотемпературной ступени ОНВ<sub>НТ</sub>. Такая ТСО представляет собой трехконтурную систему охлаждения наддувочного воздуха с пресной водой – в первом, НРТ – во втором и заборной водой – в третьем, разомкнутом, контурах охлаждения.

Генератор ТЭХМ состоит из двух секций: экономайзерной  $\Gamma_3$ , в которой происходит нагрев жидкого НРТ, поступающего из конденсатора с температурой конденсации, например  $t_k = 35 \dots 45$  °С, до температуры кипения НРТ в испарительной секции  $\Gamma_и$  генератора  $t_r = 100 \dots 120$  °С.

Изменение температуры наддувочного воздуха  $t_b$ , пресной воды  $t_w$  и хладагента  $t_0$  по глубине  $L$  двухступенчатого ОНВ (схема на рис. 1, **б**) по воздуху приведено на рис. 2.

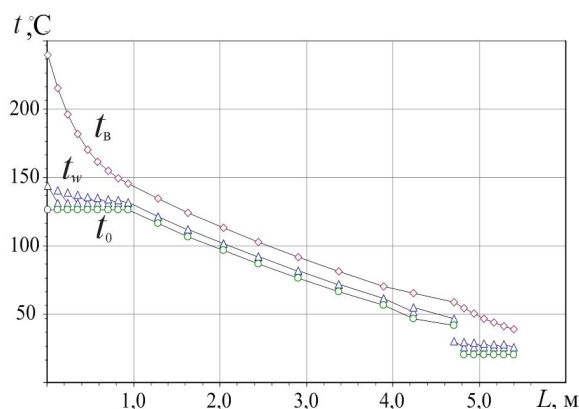


Рис. 2. Изменение температуры наддувочного воздуха  $t_b$ , пресной воды  $t_w$  и хладагента  $t_0$  по глубине  $L$  двухступенчатого ОНВ по воздуху

Хладагент – хладон R152b. Температуры кипения R152b в испарителе-охладителе воды (И-ВО)  $t_0 = 5$  °С, а в испарительной секции генератора ТЭХМ  $t_r = 120$  °С. При этом нагреву жидкого НРТ в экономайзерной секции генератора  $\Gamma_3$  от температуры конденсации  $t_k = 45$  °С до температуры кипения НРТ  $t_r = 120$  °С и его кипению при  $t_r$  в испарительной секции генератора  $\Gamma_и$  (изменению  $t_0$  от  $t_0 = t_k = 45$  °С до  $t_0 = t_r = 120$  °С) соответствует изменение температуры пресной воды  $t_w$ , отдающей тепло НРТ в генератор  $\Gamma_и$  и наддувочного воздуха  $t_b$ , отдающего тепло пресной воде в ОНВ<sub>ВТ</sub>.

Как видно, глубина ОНВ<sub>ВТ</sub> составляет  $L = 4,7$  м, т.е. 84 % всего двухступенчатого ОНВ ( $L = 5,6$  м), причем из них 3,7 м (66 %) приходится на экономайзерную секцию ОНВ<sub>ВТ</sub>, в которой происходит нагрев жидкого НРТ, поступающего из конденсатора ТЭХМ с температурой конденсации, например,  $t_k = 35...45$  °С до температуры кипения НРТ в испарительной секции  $\Gamma_{II}$  генератора ТЭХМ  $t_T = 100...120$  °С. Большая площадь поверхности экономайзерной секции ОНВ<sub>ВТ</sub> обусловлена низким температурным напором  $\theta \approx 10$  С при передаче тепла от наддувочного воздуха к пресной воде промежуточного контура, а затем и к жидкому НРТ, поступающему из конденсатора ТЭХМ с температурой  $t_k = 35...45$  °С в генератор.

На ОНВ<sub>НТ</sub> приходится 16 % поверхности ОНВ. При этом температурный напор в ОНВ<sub>НТ</sub> составляет примерно  $\theta \approx 20$  С, а в ОНВ<sub>ВТ</sub>  $\theta \approx 45$  С. Именно большая протяженность экономайзерной секции ОНВ<sub>ВТ</sub>, которая выполняет функции одновременно теплоиспользующей и охлаждающей воздух ступени, обуславливает большую глубину всего двухступенчатого ОНВ по ходу воздуха:  $L = 5,6$  м, соответственно и затраты мощности ТК двигателя на преодоление аэродинамического сопротивления.

Решением задачи сокращения поверхности проблемной экономайзерной секции ОНВ<sub>ВТ</sub> является избавление ее от функции охлаждения путем уменьшения глубины охлаждения воздуха в ОНВ<sub>ВТ</sub> (соответственно увеличением  $\theta$ ) и последующего его доохлаждения в штатном ОНВ заборной водой и окончательно – в ОНВ<sub>НТ</sub>, т.е. переход на трехступенчатую трехконтурную ТСО с включением ступени промежуточного охлаждения (ПО) наддувочного воздуха пресной водой и отводом от нее теплоты во внешнем контуре заборной водой (схема на рис. 1, в).

Площадь теплообмена ПО благодаря большому температурному напору  $\theta$  будет существенно меньше, чем экономайзерной секции ОНВ<sub>ВТ</sub>. Однако при этом уменьшится тепловая мощность  $Q_T$  ТЭХМ, следовательно, и генерируемая холодопроизводительность  $Q_0$ , дефицит которой должен быть компенсирован снижением тепловой нагрузки на ОНВ<sub>НТ</sub> за счет дополнительного отвода теплоты от воздуха в ПО.

На рис. 3 приведены изменения температуры воздуха  $t_B$  и пресной воды  $t_w$  по глубине  $L$  трехступенчатого ОНВ по воздуху и хладагента  $t_0$  в генераторе ( $t_0 = 120$  °С) и в испарителе НРТ (И-ОВ) при температурах воздуха на выходе экономайзерной секции ОНВ<sub>ВТ</sub> – его экономайзерной секции  $t_{B2}^{\text{ЭС}} = 50, 90$  и  $110$  °С.

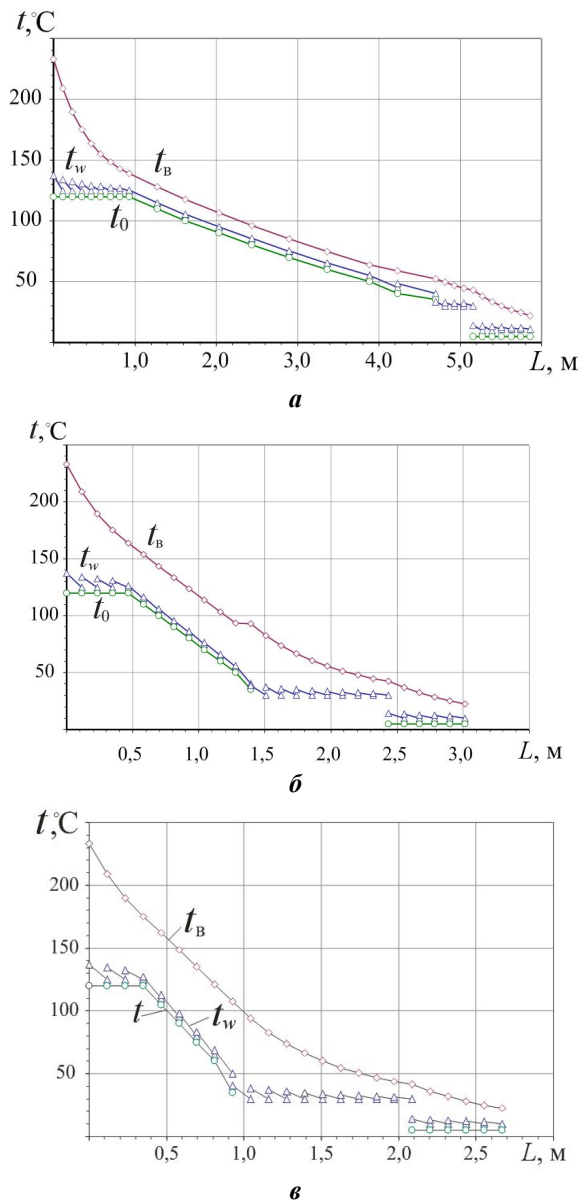


Рис. 3. Изменение температуры воздуха  $t_B$  и пресной воды  $t_w$  по глубине  $L$  трехступенчатого ОНВ и температуры хладагента  $t_0$  в генераторе ( $t_0 = 120$  °С) и в испарителе НРТ ( $t_0 = 5$  °С) при разных температурах воздуха на выходе экономайзерной секции ОНВ<sub>ВТ</sub>: **а** –  $t_{B2}^{\text{ЭС}} = 50$  °С; **б** –  $t_{B2}^{\text{ЭС}} = 90$  °С; **в** –  $t_{B2}^{\text{ЭС}} = 110$  °С

Как видно, с повышением температуры воздуха на выходе экономайзерной секции ОНВ<sub>ВТ</sub>: от  $t_{B2}^{\text{ЭС}} = 50$  °С до  $t_{B2}^{\text{ЭС}} = 110$  °С глубина ОНВ по ходу воздуха  $L$  уменьшилась от  $L = 5,6$  м до  $L = 2,3$  м, т.е. стала в два раза меньше глубины  $L$  базового варианта (см. рис. 2) при  $t_0 = 5$  °С для ТЭХМ без промежуточной ступени ПО охлаждения заборной водой. Аэродинамическое сопротивление  $\Delta P = 2900$  Па, что сопоставимо с показателями современных трубчатопластинчатых ОНВ.

Поскольку в течение рейса меняются температура  $t_{нв}$  и влажность  $\phi_{нв}$  наружного воздуха, соответственно воздуха в машинном отделении (МО) – на входе ТК, а значит и наддувочного воздуха после ТК, а также температура забортной воды  $t_{зв}$ , то температуру наддувочного воздуха  $t_{в2}$  после ОНВ<sub>НТ</sub> (на входе в наддувочный ресивер) и соответствующее сокращение потребления топлива МОД определяют для судового МОД на конкретной рейсовой линии.

В качестве примера рассмотрен контейнеровоз с главным двигателем 6S50ME-C корпорации MAN [3] (эксплуатационная мощность  $N_s = 10000$  кВт) на рейсовой линии Одесса-Гавана-Одесса. Изменение температуры  $t_{нв}$ , относительной влажности  $\phi_{нв}$  и влагосодержания  $d_{нв}$  наружного воздуха, температуры забортной воды  $t_{зв}$  в течение рейса Одесса-Гавана-Одесса (1.07...16.08.2009) дано на рис. 4,а, а на рис. 4,б – температуры наддувочного воздуха после традиционного охладителя забортной водой  $t_{вв2}$  и после низкотемпературной ступени ОНВ<sub>НТ</sub> трехступенчатой трехконтурной ТСО  $t_{в2}$ .

Как видно, на протяжении практически всего рейса температура наддувочного воздуха в трехступенчатой трехконтурной ТСО поддерживается стабильно низкой на уровне  $t_{в2} = 18...23$  °С, тогда как в традиционной системе охлаждения забортной водой  $t_{вв2} = 35...40$  °С.

Результаты расчетов с использованием программы для дизелей корпорации MAN [3] показали, что более глубокое охлаждение наддувочного воздуха в трехступенчатой трехконтурной ТСО (по сравнению с традиционной системой охлаждения

забортной водой) обеспечивает для МОД 6S50ME-C (мощность 10 МВт) на протяжении практически всего рейса уменьшение удельного расхода топлива на величину  $\Delta b_e \approx 2,0$  г/(кВт·ч). При этом относительная экономия топлива составляет 1,1...1,2 %, а абсолютная за рейс – около 18 т.

## Выводы

Проанализирована эффективность охлаждения наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля в двух- и трехступенчатых охладителях в составе трехконтурной ТСО на базе эжекторной холодильной машины, утилизирующей теплоту воздуха. В отличие от традиционных двухконтурных систем охлаждения (с пресной водой в первом контуре охлаждения и забортной – во втором), трехконтурная ТСО включает теплоиспользующую холодильную машину охлаждения пресной воды в качестве дополнительного промежуточного контура.

Показано, что глубина охладителя наддувочного воздуха трехступенчатой системы охлаждения, а значит и его аэродинамическое сопротивление, сопоставимы с двухступенчатыми охладителями систем охлаждения когенерационного типа.

На примере конкретного рейса показано, что утилизация теплоты наддувочного воздуха МОД в ТСО обеспечивает охлаждение наддувочного воздуха до температуры, близкой 20 °С, и сокращение удельного расхода топлива примерно на 2,0 г/(кВт·ч) по сравнению с традиционным охлаждением воздуха забортной водой.

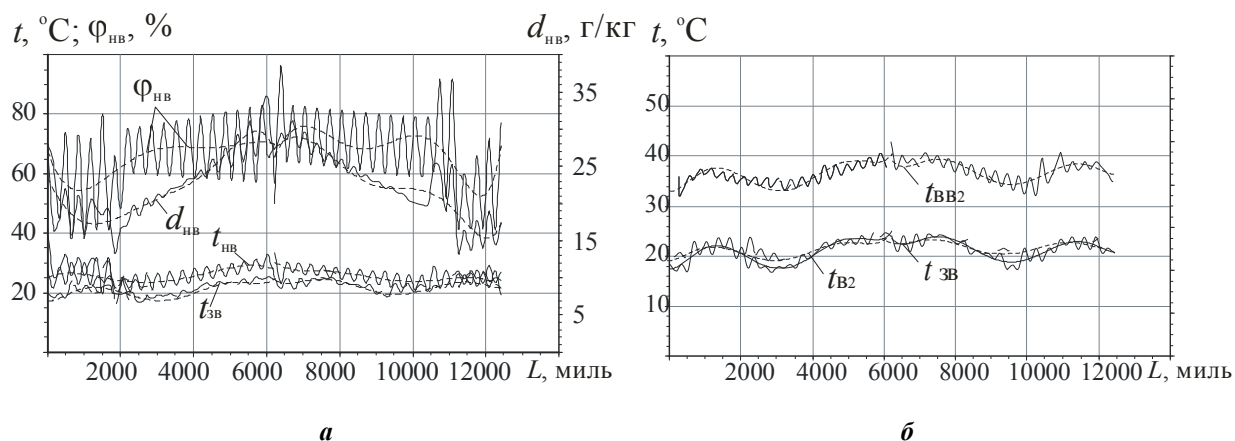


Рис. 4. Температуры  $t_{нв}$ , относительная влажность  $\phi_{нв}$  и влагосодержание  $d_{нв}$  наружного воздуха, температура забортной воды  $t_{зв}$  (а), а также температуры наддувочного воздуха после традиционного охладителя забортной водой  $t_{вв2}$  и после низкотемпературной ступени ОНВ<sub>НТ</sub> трехступенчатой трехконтурной ТСО  $t_{в2}$  в течение рейса Одесса–Гавана–Одесса (1.07...16.08.2009)

## Литература

1. *Influence of Ambient Temperature Conditions. Main engine operation of MAN B&W two-stroke engines [Text] // MAN Diesel & Turbo. – Copenhagen, Denmark, 2010. – 17 p.*

2. *Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO<sub>2</sub> emission [Electronic resource] // MAN B&W Diesel A/S. – Copenhagen,*

*Denmark, 2005. – Access mode: <http://www.mandieselturbo.de/files/news/files0505/P3339161.pdf>. – 10.03.2014.*

3. *MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-TII engines [Electronic resource]. – Copenhagen, Denmark : MAN Diesel. – 2010. – 357 p. – Access mode: [http://www.mandieselturbo.com/download/project\\_guides\\_tier2/printed/s90mcc8.pdf](http://www.mandieselturbo.com/download/project_guides_tier2/printed/s90mcc8.pdf). – 10.03.2014.*

*Поступила в редакцію 10.03.2014, рассмотрена на редколлегии 11.06.2014*

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор В. А. Голиков, Одесская национальная морская академия.

## АЛЬТЕРНАТИВНІ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ

*Р. М. Радченко, А. А. Андреев, Д. В. Коновалов, Лукаш Бохдаль*

Запропоновано схеми та проаналізовано альтернативні варіанти охолодження наддувного повітря суднового малообертового дизеля за допомогою ежекторної холодильної машини, що утилізує його теплоту, з використанням охолоджувального потенціалу заборотної води у проміжному ступені охолодження та без його використання. Розраховано температурні режими дво- та триступневих охолоджувачів і їхня глибина за ходом повітря, яка визначає аеродинамічний опір і, відповідно, витрати потужності на його подолання. Показано, що триступнева система охолодження наддувного повітря з відведенням його теплоти заборотною водою у проміжному ступені охолоджувача забезпечує глибоке охолодження наддувного повітря при аеродинамічному опорі, порівняному з двоступневими охолоджувачами когенераційного типу.

**Ключові слова:** судновий малообертовий дизель, ступінчасте охолодження, наддувне повітря, тепло-використовуюча холодильна машина, низькокипляче робоче тіло.

## ALTERNATIVE SCAVENGE AIR COOLING SYSTEMS OF MARINE LOW SPEED DIESEL ENGINE

*R. N. Radchenko, A. A. Andreev, D. V. Kononov, Łukasz Bohdal*

The schemes are proposed and alternative variants of cooling of scavenge air in marine low speed diesel engine by ejector cooling machine that utilizes its heat with use of sea water cooling potential in the intermediate cooling stage and without its use have been analyzed. The temperature regimes of two- and three stages coolers and their deep dimension along air stream, that influences upon aerodynamical pressure drop and corresponding power for its compensation, are calculated. It is shown that three stage scavenge air cooling system with taking its heat by sea water in the intermediate cooling stage provides scavenge air deep cooling with aerodynamical pressure drop corresponding to two-stage coolers of cogenerative type.

**Key words:** marine low speed diesel engine, stage cooling, scavenge air, waste heat recovery cooling machine, low boiling working fluid.

**Радченко Роман Николаевич** – канд. техн. наук, ст. научн. сотр., Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

**Андреев Артем Андреевич** – ассистент, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

**Коновалов Дмитрий Викторович** – канд. техн. наук, доц., Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

**Бохдаль Лукаш** – канд. техн. наук, доц., Кошалинский технический университет, Польша.