

УДК 621.43.016:629.421.2

Ю.Л. МОШЕНЦЕВ<sup>1</sup>, А.А. ГОГОРЕНКО<sup>1</sup>, Д.С. МИНЧЕВ<sup>1</sup>,  
А.В. НАГОРНЫЙ<sup>1</sup>, Ю.С. МАКСИМОВ<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина*<sup>2</sup> *Компания «Zaliv Ship Design», Николаев, Украина*

## ВОЗМОЖНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУР ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В АЛЬТЕРНАТИВНОЙ СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЗОВ

*Представлены количественные возможности регулирования температур теплоносителей в малорасходной системе охлаждения дизельных двигателей магистральных тепловозов. Установлена возможность поддержания в малорасходной системе охлаждения рациональных температур воды и масла при обеспечении подогрева наддувочного воздуха на режимах частичных нагрузок двигателя и в условиях низких температур окружающей среды. Потенциальные возможности регулирования рассматриваемой системы оцениваются на основе получения максимально возможных (но не выше допустимых) температур воды, масла и наддувочного воздуха на данных режимах работы двигателя, характеризующихся низким значением степени повышения давления наддувочного воздуха.*

**Ключевые слова:** *охладитель масла, охладитель наддувочного воздуха, регулирование температуры, малорасходная система охлаждения, температура воздуха за охладителем.*

### Введение

Современные системы охлаждения двигателей тепловозов должны обеспечивать на номинальном режиме работы температуры воды и масла перед двигателем, близкие к 90...100 °С и минимально возможную температуру наддувочного воздуха. Наилучшие результаты для этих условий могут обеспечивать так называемые малорасходные системы охлаждения [1, 2]. Их эффективность по охлаждению наддувочного воздуха может достигать примерно до 0,96 [3, 1]. На частичных нагрузках и при снижении температур окружающей среды системы охлаждения должны поддерживать температуры воды и масла, максимально приближенные к указанным выше [4, 5]. Температура наддувочного воздуха на этих режимах должна изменяться по определенному закону, обеспечивающему наибольшую экономичность двигателя и максимально способствовать снижению эмиссии вредных веществ в выхлопных газах. В соответствии с [6 – 8] интенсивность охлаждения наддувочного воздуха с уменьшением нагрузки должна снижаться, а при низких нагрузках и низких температурах окружающей среды охлаждение должно заменяться подогревом. При создании современных систем охлаждения, прежде всего, решается задача обеспечения указанных температур теплоносителей для номинального режима при максимальной температуре окружающей среды. Возможность регулирования температур теплоносителей с уходом от но-

минального режима закладывается при создании систем охлаждения, но требует специальных разработок и исследований для конструктивного обеспечения таких возможностей и для их количественной оценки.

### Постановка задачи

Настоящая работа посвящена количественной оценке возможности регулирования температур теплоносителей в малорасходной системе охлаждения дизельных двигателей магистральных тепловозов. Ставится задача определить способность системы охлаждения обеспечивать поддержание рациональных температур воды и масла при подогреве наддувочного воздуха на частичных нагрузках двигателя.

### Основной материал статьи

Для решения поставленной задачи в системе охлаждения установлен терморегулятор Т (рис. 1), а также есть возможность изменять расход охлаждающего теплоносителя (воздуха, подаваемого вентиляторами).

При изменении режима работы двигателя терморегулятор направляет часть расхода теплоносителя внутреннего контура (ТВК), нагревающегося в двигателе, мимо радиаторов, что обеспечивает повышение температуры масла и наддувочного воздуха, а также высокую температуру воды перед двигателем. Снижение производительности вентиляторов

является дополнительной мерой регулирования, способствующей уменьшению затрат энергии на работу системы на этих режимах.

Для выполнения исследования система охлаждения рассчитывалась для номинального и четырех частичных режимов работы двигателя (табл. 1).

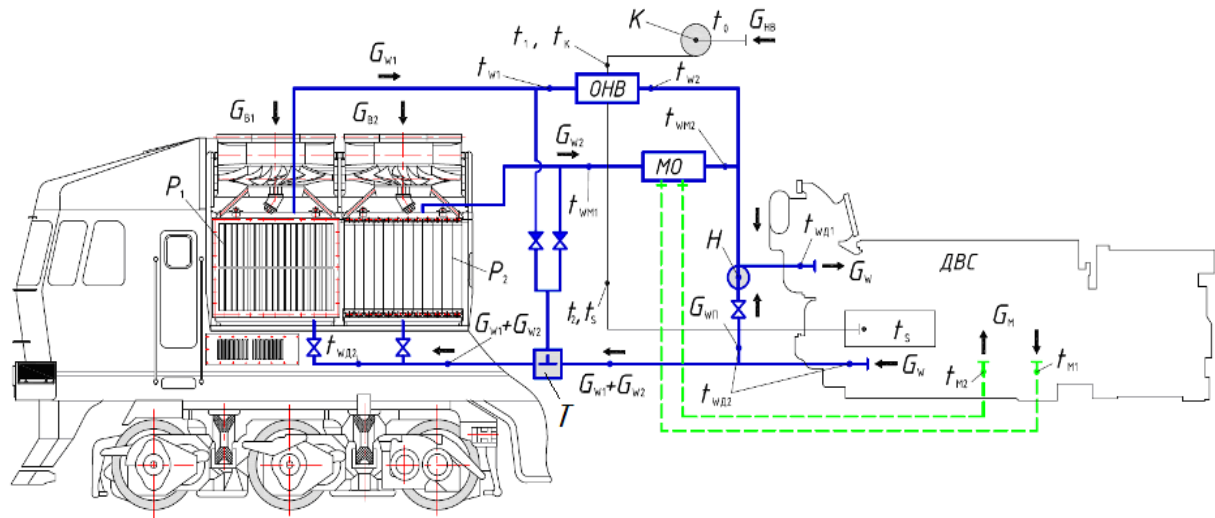


Рис. 1. Принципиальная схема системы охлаждения типа 2РК1М для магистрального тепловоза с двигателем типа 16ЧН 26/26 мощностью 2990 кВт

Таблица 1

Расчетные режимы работы двигателя типа 16ЧН 26/26

Обознач.	Единицы изм.	Параметр	Номинал	Частичные режимы			
				1	2	3	4
$n$	об/мин	Частота вращения вала двигателя	1000	966	896	797	654
$N_e$	кВт	Эффективная мощность на фланце двигателя	2992	2699	2254	1511	748
$P_k$		Степень повышения давления воздуха в компрессоре	2,684	2,451	2,085	1,484	1,104
$g_c$	кг/(кВт·ч)	Удельный эффективный расход топлива	0,206	0,206	0,208	0,218	0,246
$\eta_e$		Эффективный КПД двигателя	0,406	0,406	0,402	0,384	0,341
$p_e$	кПа	Среднее эффективное давление	1625	1518	1367	1031	622
$G_{нв}$	кг/с	Расход воздуха	5,30	4,48	3,62	2,32	1,30
$p_k$	кПа	Давление воздуха за компрессором	265,2	242,1	206,0	146,6	109,1
$T_k$	К	Температура воздуха за ТК	454,4	414,9	392,1	347,8	313,1
$T_s$	К	Температура воздуха за ОНВ	325,2	322,9	317,2	314,3	309,5
$Q_T$	кВт	Тепло, подведенное в цикл при сгорании топлива	7366,6	6656,7	5611,7	3939,7	2195,3
$Q_{г}$	кВт	Тепло, отведенное с отходящими газами	2305,7	2093,5	1794,5	1286,9	699,2
$Q_{w\Sigma}$	кВт	Суммарное количество теплоты, отведенное в охлаждающую воду/воздух	1058,0	962,9	865,5	702,9	477,0
$Q_{онв}$	кВт	Количество теплоты, отведенное в ОНВ	506,7	395,3	242,7	60,5	2,2
$Q_{m\Sigma}$	кВт	Суммарный теплоотвод в масло	531,0	511,7	461,99	386,0	279,9

При этом радиаторная система охлаждения (тепловозный вариант) была заменена стендовым аналогом, где водо-воздушные радиаторы были заменены водоводяными охладителями (ВВО). Расчеты выполнялись с использованием математической модели турбопоршневого двигателя в дифференциальной форме при его работе по тепловозной характеристике. Основой моделирования частичных режимов является номинальный режим, для которого установлены необходимые расходы воды через все ветви системы.

На первом этапе для частичных нагрузок были определены температуры воздуха в ресивере при отключенном терморегуляторе, постоянном КПД охладителя наддувочного воздуха и постоянной температуре охлаждающей воды на входе в него. По полученным данным составлена табл. 1. В таблице указаны температуры воздуха в ресивере двигателя при максимально допустимом загрязнении поверхностей теплообмена всех теплообменников. Данные получены при температуре окружающего воздуха 40 °С и охлаждающей воды внешнего контура на входе 35,5 °С. Температура масла на выходе из двигателя на номинальном режиме работы составляет 85,8 °С, а температура охлаждающей жидкости – 96,7 °С. При переходе на частичные нагрузки температуры теплоносителей изменяются. В соответствии с расчетами система охлаждения без применения регулирования с уменьшением нагрузки двигателя обеспечивает последовательное снижение температур воды, масла и воздуха. Это ухудшает условия работы двигателя (температура наддувочного воздуха снижается с 52,2 до 36,5 °С, воды за двигателем с 96,7 до 62,9 °С, а температура масла за двигателем снижается с 85,8 до 67,7 °С). В дальнейшем при расчете системы с регулированием осуществлялось повторное моделирование рабочего цикла двигателя с целью учета влияния изменения температур наддувочного воздуха и охлаждающих жидкостей на его внешний тепловой баланс.

Определение действительно возможных расходов воды на номинальном режиме работы выполнено на основе подробного гидравлического расчета системы, для которого рассчитаны гидравлические характеристики всех участков системы с введением тех дополнительных сопротивлений, которые необходимы для обеспечения требуемых расходов ТВК по ветвям системы. При моделировании частичных режимов были определены расходы воды и масла через все теплообменники и ветви системы с учетом изменения режимов работы насосов и с учетом неизменного состояния гидравлических характеристик ветвей, настроенных на номинальном режиме.

Для учета включения терморегулятора был выработан и принят закон, определяющий условия его

использования в системе. В соответствии с принятым законом, расходы ТВК через ОНВ и маслоохладитель (МО) с включением регулятора не изменяются. При этом расход ТВК через ВВО1 (охладитель, включенный последовательно с ОНВ) с включением терморегулятора мог составлять 0,6...0,9 от расхода через ОНВ, а расход через ВВО2 соответственно 0,3...0,4 от расхода через МО. Эффективность системы охлаждения по подогреву наддувочного воздуха оценивалась коэффициентом

$$\eta_{пв} = \frac{T_s - T_o}{T_{wd2} - T_o},$$

где  $T_o$  – температура окружающей среды, К;  $T_{wd2}$  – температура воды за двигателем, К.

Закон изменения температуры воздуха в ресивере двигателя в зависимости от нагрузки и температуры окружающей среды, при котором обеспечивается минимальный расход топлива, в настоящее время изучен в недостаточной степени, и исследования в этом направлении продолжаются. В связи с этим, оценивая возможности системы, принимаем следующее допущение. Считаем, что наиболее удачными для системы охлаждения являются результаты, при которых температуры воды, масла и наддувочного воздуха на режиме с  $P_k$ , близкими к единице, будут самыми высокими (но не выше допустимых). Допущение объясняется тем, что меньшие температуры такая система вполне в состоянии обеспечить при иных условиях регулирования.

Применение регулирования позволяет управлять изменением температур теплоносителей. На рис. 2 представлены наиболее удачные из полученных зависимостей для 4-го частичного режима (см. табл. 1), установленные при долях перепуска воды регулятором мимо ВВО1 и ВВО2 0,9 и 0,3 от расходов через ОНВ и МО соответственно.

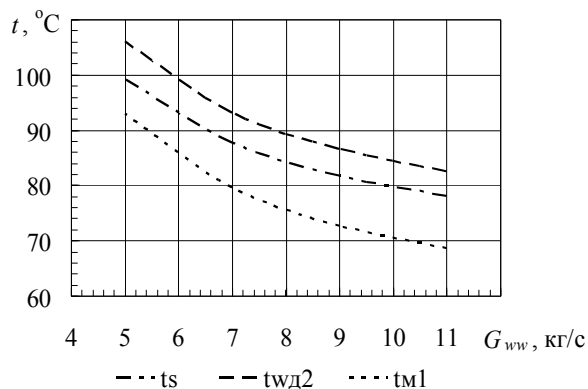


Рис. 2. Изменения температур теплоносителей на 4-м частичном режиме при использовании регулирования:  $t_s$  – воздух за ОНВ;  $t_{wd2}$  – вода на выходе из двигателя;  $t_{m1}$  – масло на входе в двигатель

Этот режим отличается наиболее низкими температурами теплоносителей и наименьшими тепловыми потоками от двигателя. При других настройках регулятора подогревы теплоносителей осуществляются хуже. Температуры теплоносителей получены при указанных настройках регулятора и при изменении расхода теплоносителя наружного контура (ТНК)  $G_{ww}$ . Минимум расхода ТНК ( $G_{ww} = 5$  кг/с) ограничен в связи с допустимым максимумом температуры ТВК в системе.

На рис. 3 приведены предельно достижимые значения эффективности системы охлаждения по подогреву наддувочного воздуха в зависимости от долей воды, перепускаемой терморегулятором мимо радиаторов каждой ветки, при минимально допустимом расходе ТНК  $G_{ww} = 5$  кг/с и предельно допустимых температур ТВК в системе.

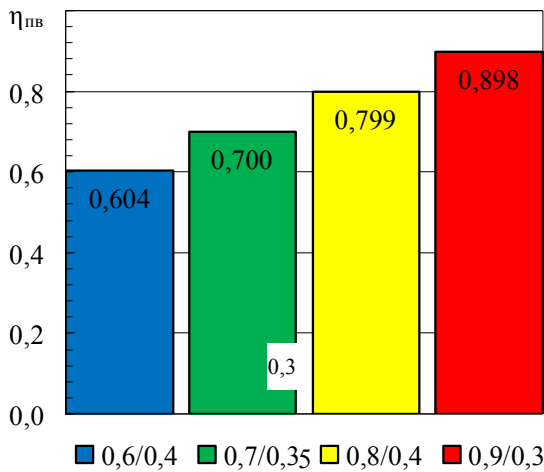


Рис. 3. Диаграмма изменения эффективности системы по подогреву наддувочного воздуха

На рис. 4 представлены результаты расчетов системы охлаждения для того же, 4-го частичного режима, при снижении температур окружающей среды  $t_o$  и температур ТНК  $t_{ww}$  ( $t_o = t_{ww}$ ). Расчеты выполнены для уже указанной, наиболее удачной настройки регулятора.

Как видно из рис. 4, с понижением температур окружающей среды и ТНК, температуры теплоносителей после подогрева снижаются, но до указанных на рисунке температур это снижение остается в пределах приемлемых значений. Дальнейшее снижение расхода ТНК и изменение настройки терморегулятора позволяет в этих условиях получить более удачные значения температур. Так, при снижении расхода ТНК с 5 до 4,3 кг/с и иных настройках терморегулятора (мимо ВВО1 и ВВО2 0,8 и 0,4 от расходов через ОНВ и МО соответственно) можно получить:

$$t_s = 94,2 \text{ } ^\circ\text{C}, t_{wd2} = 107,9 \text{ } ^\circ\text{C}, t_{m1} = 92,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

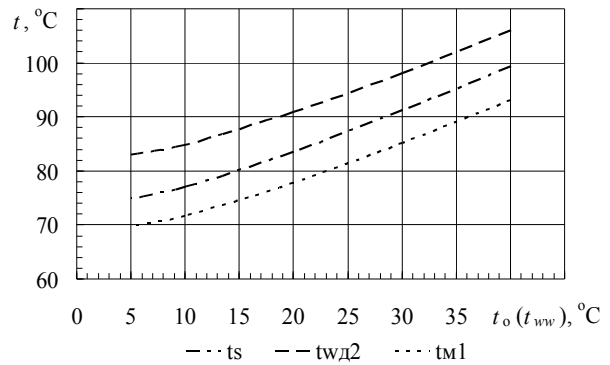


Рис. 4. Изменение температур теплоносителей системы при разных температурах внешних теплоносителей на режиме 0,9/0,3 работы регулятора и  $G_{ww} = 5$  кг/с

Следует иметь в виду, что с дальнейшим понижением температуры окружающего воздуха и ТНК улучшение результатов регулирования за счет снижения расхода ТНК становится проблематичным в связи с достижением очень низких скоростей в каналах радиаторов. Низкие скорости и малые расходы ТВК через радиаторы в условиях отрицательных температур могут быть причиной появления ледяных пробок (замерзания) в каналах теплообменников. Соответственно должны быть установлены пределы снижения расхода ТВК через радиаторы в зимних условиях.

В результате расчетов, выполненных с использованием разработанной методики, установлено, что при снижении нагрузки двигателя и при отсутствии регулирования, температуры теплоносителей в системе снижаются (наддувочного воздуха до 36,5 °С, воды и масла за двигателем до 62,9 и 67,7 °С). Это позволяет считать, что работа системы без терморегулирования на частичных режимах неэффективна.

На основании серии расчетов для работы системы на частичных режимах с включением терморегулятора и при регулировании расхода ТНК при температуре окружающего воздуха 40 °С для режима 25 % нагрузки установлено, что система обеспечит температуру воды за двигателем 106,1 °С, масла – 93,1 °С, а наддувочного воздуха – 99,4 °С.

При снижении окружающей температуры и температуры ТНК ( $t_o = t_{ww1} = 5$  °С) и сохранении тех же условий регулирования температуры теплоносителей снижаются и составляют

$$t_s = 74,9 \text{ } ^\circ\text{C}, t_{wd2} = 82,9 \text{ } ^\circ\text{C}, t_{m1} = 69,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(температуры наддувочного воздуха, воды и масла за двигателем соответственно).

Расширение пределов регулирования расходов ТНК позволяет получить для этих же условий:

$$t_s = 94,2 \text{ } ^\circ\text{C}, t_{wd2} = 107,9 \text{ } ^\circ\text{C}, t_{m1} = 92,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

### Выводы и перспективы последующих работ

Таким образом, на частичных нагрузках рассматриваемая система охлаждения может обеспечить приемлемые значения температур теплоносителей только при использовании терморегулирования (использование терморегулятора и уменьшение расхода ТНК). В этом случае при температуре окружающей среды 40 °С обеспечиваются температура воды за двигателем 106,1 °С, масла 93,1 °С, наддувочного воздуха 99,4 °С за счет использования теплового потока от двигателя.

При снижении температуры окружающей среды можно обеспечить желательные значения температур применением дополнительных мер регулирования. В частности, при  $t_o = t_{ww1} = 5$  °С можно обеспечить  $t_s = 94,2$  °С,  $t_{wd2} = 107,9$  °С,  $t_{m1} = 92,7$  °С за счет снижения расхода ТНК с 5 до 4,3 кг/с и иных настройках терморегулятора. Эта возможность имеет ограничение при отрицательных температурах окружающей среды и использовании в системе охлаждения замерзающих жидкостей.

Дальнейшие работы в данном направлении связаны с определением закона рационального регулирования температуры воздуха в ресивере двигателя для частичных нагрузок и пониженных температур окружающей среды. Кроме того, должны быть дополнительно изучены возможности иных законов регулирования и разработаны конструкции регуляторов под наиболее удачные законы. Для обеспечения рациональных температур теплоносителей на частичных режимах в зимнее время представляется перспективным использование теплового потока от отходящих газов.

### Литература

1. Мошенцев, Ю.Л. Возможные тенденции развития систем охлаждения современных магистральных тепловозов [Текст] / Ю.Л. Мошенцев, А.А. Гогоренко // Локомотив-информ: междунар. информ.-техн. журн. – 2011. – № 7. – С. 20-24.
2. Мошенцев, Ю. Л. Система охлаждения для современных магистральных тепловозов [Текст] / Ю. Л. Мошенцев, А. А. Гогоренко, Д. С. Минчев // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011. – № 2. – С. 90 – 94.
3. Гольтраф, И.С. Охлаждение воздуха в судовых дизелях [Текст] / И. С. Гольтраф. – Л.: Судостроение, 1966. – 200 с.
4. Пассажирский тепловоз ТЭП70 [Текст] / В.Г. Быков, Б.Н. Морошкин, Г.Е. Серделевич, Ю.В. Хлебников, В.М. Ширяев – М.: Транспорт, 1976. – 232 с.
5. Рыжов, В.А. Перспективы развития высокофорсированных тепловозных дизелей Коломенского завода [Текст] / В.А. Рыжов // Тяжелое машиностроение: ежемесячный научно-технический и производственный журнал. – 2002. – № 2. – С. 51 – 54.
6. Алехин, С.А. Улучшение технико-экономических и экологических показателей тепловозной модификации дизеля типа 6ТД за счет применения промежуточного охлаждения наддувочного воздуха [Текст] / С.А. Алехин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2003. – № 41/6. – С. 32-35.
7. Куликов, Ю.А. Системы охлаждения силовых установок тепловозов / Ю.А. Куликов. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
8. Петриченко, Р.М. Системы жидкостного охлаждения быстроходных двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Р.М. Петриченко. – Л.: Машиностроение, 1975. – 224 с.

Поступила в редакцию 1.06.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б. Г. Тимошевский, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев.

**МОЖЛИВОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУР ТЕПЛОНОСІЇВ  
В АЛЬТЕРНАТИВНІЙ СИСТЕМІ ОХОЛОДЖЕННЯ  
ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ТЕПЛОВОЗІВ**

*Ю.Л. Мошенцев, О.А. Гогоренко, Д.С. Мінчев, А.В. Нагірний, Ю.С. Максимов*

Представлені кількісні можливості регулювання температур теплоносіїв у маловитратній системі охолодження дизельних двигунів магістральних тепловозів. Встановлена можливість підтримки в маловитратній системі охолодження раціональних температур води і масла при забезпеченні підігріву наддувного повітря на режимах часткових навантажень двигуна і в умовах низьких температур навколишнього середовища. Потенційні можливості регулювання розглянутої системи оцінюються на основі отримання максимально можливих (але не вище допустимих) температур води, масла і наддувного повітря на даних режимах роботи двигуна, які характеризуються низьким значенням ступеня підвищення тиску наддувного повітря.

**Ключові слова:** охолоджувач масла, охолоджувач наддувочного повітря, регулювання температури, малорасходная система охолодження, температура повітря за охолоджувачем.

**OPTIONS FOR COOLING LIQUIDS AND SUPERCHARGED AIR TEMPERATURES CONTROL  
FOR THE ALTERNATIVE SLOW-FLOW COOLING SYSTEM  
OF MAINLINE LOCOMOTIVE DIESEL ENGINES.**

*U.L. Moshentsev, A.A. Gogorenko, D.S. Minchev, A.V. Nagorniy, U.S. Maksimov*

Performance capabilities of cooling liquids and supercharged air temperatures control for the slow-flow cooling system of mainline locomotive diesel engines are considered. The slow-flow cooling system allows heating the cooling water, oil and the charge air on the engine's part-load as it is shown. The capabilities of temperatures control are estimated as the possibility of maintaining the optimal values of temperatures of cooling water and oil simultaneously with charge air heating due to load and speed of the engine.

**Key words:** oil cooler, supercharged air cooler, temperature control, slow-flow cooling system, air temperature at the exit of air cooler.

**Мошенцев Юрий Леонидович** – канд. техн. наук, профессор Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: urymosh@mail.ru.

**Гогоренко Алексей Анатольевич** – старший преподаватель кафедры ДВС Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: gogorenko@mail.ru.

**Минчев Дмитрий Степанович** – канд. техн. наук, доцент кафедры ДВС Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: misaidima@gmail.com.

**Нагорный Антон Викторович** – аспирант кафедры ДВС Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: Nagorniy.A.W@yandex.ru.

**Максимов Юрий Сергеевич** – инженер-конструктор, компания Zaliv Ship Design, Николаев, Украина, e-mail: temuchin1988@yandex.ru.