

УДК 621.431

DOI: 10.20998/0419-8719.2017.2.02

М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевский, С.М. Доценко, Ю.Н. Галынкин, Д.О. Шалапко

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ СУДОВЫХ МАЛОБОРОТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ НА АЛЬТЕРНАТИВНОМ ТОПЛИВЕ

Рассмотрена утилизация теплоты отходящих газов и наддувочного воздуха современного малооборотного двигателя 7S50ME-LGIM (12,46МВт 117, мин⁻¹) фирмы MAN Diesel & Turbo, способного работать на метаноле, газовом топливе (MGO) и нефтяном топливе (MDO и HFO), металлургидными установками непрерывного действия. Установлено, что применение таких установок позволит дополнительно получать 0,78...0,87 МВт эффективной мощности, при этом температуры сорбции $T_a = 315...325$ К, десорбции $T_d = 360...400$ К, степень регенерации тепловой энергии $r_t = 0,4...0,8$, металлургид с $\Delta H = 25,52$ МДж/(мольК), $T^ = 275$ К.*

Введение

Судовые малооборотные дизели, работающие

на газовом топливе, характеризуются высокой

надежностью и топливной экономичностью. Так

фирмой MAN Diesel & Turbo разработаны и внедрены в эксплуатацию двигатели типа ME-GI и ME-LGI. Первый тип двигателей позволяет использовать в качестве топлива сжиженный природный газ (LNG), второй – сжиженный нефтяной газ (LPG). Такие двигатели устанавливаются, как правило, в судах-газовозах и используют часть перевозимого груза, а также возникающие технологические испарения (VOCs выпарки) [1].

Дальнейшим развитием указанных моделей ДВС является адаптация машин ME-LGI для работы на метаноле [2, 3]. Примером внедрения таких технологий является постройка в 2016 году танкера-химовоза для перевозки метанола Manchac Sun (IMO 9724013), дедевитом 50 тыс. тонн, оснащенного малооборотным двигателем MAN 7S50ME-LGIM (12,46 МВт, 117 мин⁻¹), который может работать как на дизельном топливе, так и на перевозимом метаноле. Manchac Sun на правах долгосрочной аренды фрахтуется компанией Waterfront Shipping Company, которая является дочерней компанией Metanex Corporation и управляет крупнейшим в мире флотом океанских танкеров-перевозчиков метанола [4]. Также компанией планируется закупка ещё минимум двух судов такого типа.

Зависимости среднего удельного эффективного расхода топлива от мощности указанного двигателя, приведены (рис. 1) [5], а тепловой баланс, со-

ставленный на основе данных фирмы-производителя двигателя, представлен в виде диаграммы (рис. 2) [5].

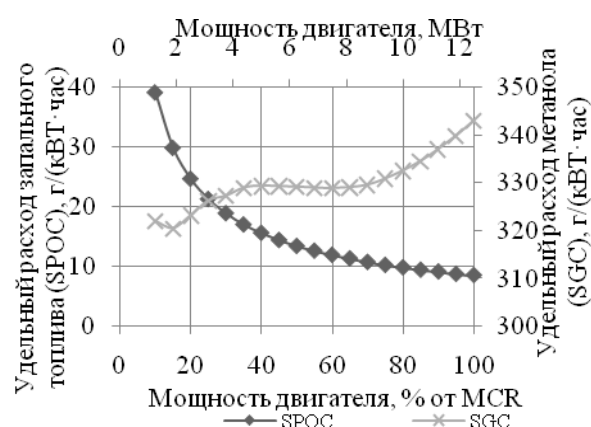


Рис. 1. Зависимость удельного расхода топлива двигателя MAN7S50ME-LGIM от мощности

Изложение основного материала

Как следует из приведенных выше данных, около половины энергии сгоревшего топлива не используется, а отводится в окружающую среду вместе с теплотой вторичных энергоресурсов (ВЭР). Указанную энергию можно преобразовать в полезную работу в утилизационных металлургических установках непрерывного действия [6].

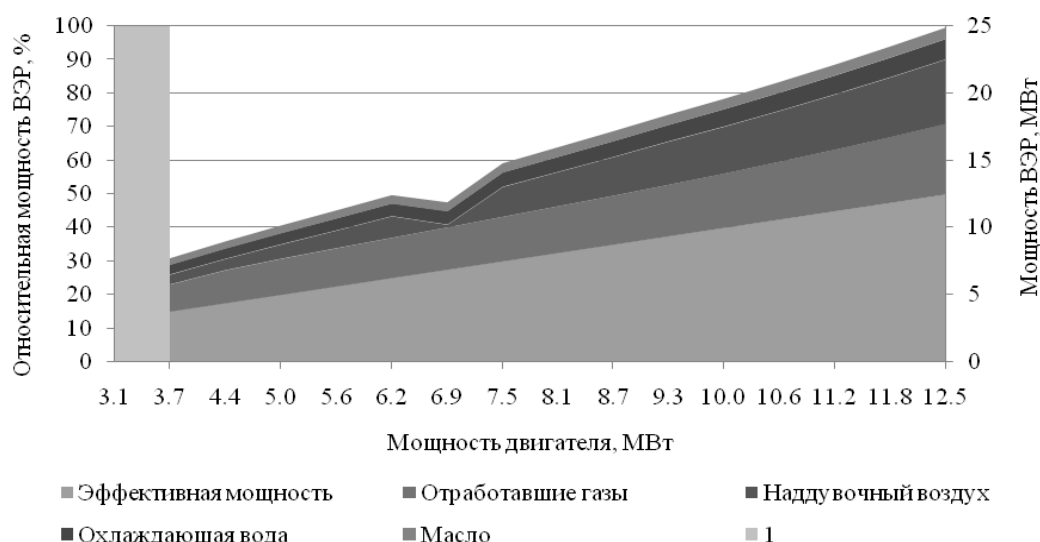


Рис. 2. Диаграмма теплового баланса двигателя MAN 7S50ME-LGIM (12,4 МВт, 117 мин⁻¹)

Целью работы является определение параметров утилизационной металлургической установки непрерывного действия, использующей теплоту малооборотного двигателя, работающего на метаноле.

Схема указанной утилизационной установки приведена на рис. 3, основные ее элементы описаны в работе [6], особенностью схемы являются наличие в контуре нагрева смесителя 7 и разделителя потоков теплоносителя 5. Это позволяет ис-

пользовать высокотемпературную составляющую тепловой мощности ВЭР ДВС, отведенную от отходящих газов (ОГ), для перегрева водорода.

Пройдя через перегреватель водорода, теплоноситель нагревающего контура смешивают с теплоносителем нагревающего контура, прошедшим охладитель надувочного воздуха (ОНВ). Смешанный поток с температурой T_{mix} направляют в де-

сорбер. В десорбере тепловая мощность используется для нагрева суспензии металлгирида до температуры десорбции T_d и выделения водорода. Выделившийся водород направляют в перегреватель водорода, затем в водородную расширительную машину, в которой происходит выработка полезной механической работы, которая сопровождается падением давления и температуры водорода.

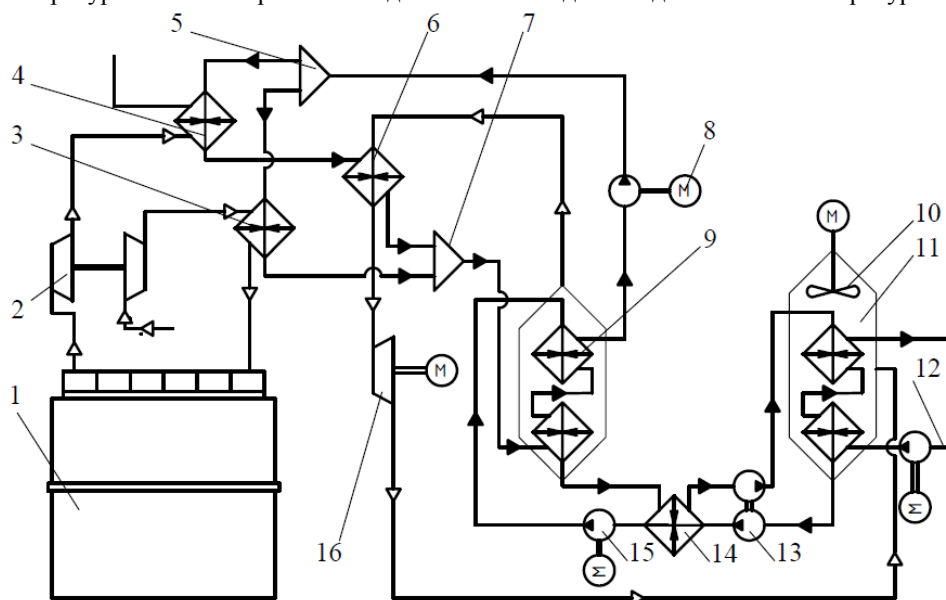


Рис. 3. Схема металлогидридной утилизационной установки непрерывного действия:

1 – малооборотный ДВС, 2 – турбокомпрессор, 3 – охладитель надувочного воздуха, 4 – утилизационный котёл, 5 – разделитель потоков теплоносителя контура нагрева, 6 – перегреватель водорода, 7 – смеситель потоков теплоносителя контура нагрева, 8 – циркуляционный насос контура нагрева, 9 – десорбер, 10 – вымешивающее устройство, 11 – сорбер, 12 – циркуляционный насос охлаждающего контура, 13 – турбонасосный агрегат, 14 – регенерационный теплообменный аппарат (РТО), 15 – питательный насос, 16 – водородная расширительная машина

После расширительной машины водород направляют в сорбер. В сорбере водород поглощается суспензией металлгирида. Выделяющаяся при этом теплота реакции поглощения отводится теплоносителем охлаждающего контура (заборной водой). Суспензия металлгирида, насыщенная водородом, перекачивается питательным насосом в десорбер, где происходит выделение водорода. Таким образом, цикл работы утилизационной металлогидридной установки замыкается.

Суспензию металлгирида, нагретую до температуры десорбции, направляют в сорбер, где она снова обогащается водородом. В контуре циркуляции суспензии установлен регенерационный теплообменный аппарат (РТО), который позволяет часть тепловой мощности от нагретой части контура передавать к охлажденной части контура [7]. Также в контуре циркуляции суспензии металлгирида используется регенерация механической энергии.

На основе описанной схемы металлогидридной утилизационной установки непрерывного действия разработана математическая модель, в которой малооборотный двигатель рассматривается как источник тепловой энергии, зависящий от тепловой мощности отработавших газов Q_{OG} , надувочного воздуха $Q_{ОНВ}$ и их температур, соответственно T_{OG} и $T_{ОНВ}$. Тепловая мощность отработавших газов и надувочного воздуха определяется на основе данных, приведенных фирмой-производителем:

$$Q_{OG} = G_{OG} c_p^{OG} (T_{OG} - T_{OG}^{BЫX});$$

$$Q_{ОНВ} = G_{ОНВ} c_p^{ОНВ} (T_{ОНВ} - T_{ОНВ}^{BЫX}),$$

где G_{OG} – массовый расход отработавших газов и надувочного воздуха; T_{OG} , $T_{ОНВ}$ – температура отработавших газов на входе в утилизационный котёл и температура надувочного воздуха на входе в охладитель надувочного воздуха, значения которых приведено фирмой-производителем; c_p^{OG} , $c_p^{ОНВ}$ –

изобарная теплоёмкость отработавших газов и наддувочного воздуха, соответственно; T_{OG}^{BbIX} , T_{OHb}^{BbIX} – температура отработавших газов и наддувочного воздуха на выходе из утилизационного котла и ОНВ:

$$T_{OG}^{BbIX} = T_d + \Delta T_9 + \Delta T_{YK}^{BbIX};$$

$$T_{OHb}^{BbIX} = T_d + \Delta T_9 + \Delta T_{OHb}^{BbIX},$$

где T_d – температура десорбции; ΔT_9 – температурный напор на выходе из десорбера; ΔT_{YK}^{BbIX} , ΔT_{OHb}^{BbIX} – температурный напор на выходе из утилизационного котла и ОНВ.

Располагаемая тепловая мощность отработавших газов соответствует тепловой мощности, потребляемой утилизационной металлгидридной установкой непрерывного действия и определяет расход теплоносителя контура нагрева, который разделён на две составляющие: расход теплоносителя контура нагрева через утилизационный котёл G_{T1} , и расход теплоносителя контура нагрева через ОНВ G_{T2} :

$$G_{T1} = \frac{G_{OG} c_p^{OG} (T_{OG}^{BX} - T_{OG}^{BbIX})}{c_p^T (T_{T1}^{BbIX} - \Delta T_{YK}^{BX} - T_{T1}^{BbIX} + \Delta T_{YK}^{BbIX})},$$

где ΔT_{YK}^{BX} – температурный напор на входе в утилизационный котёл; ΔT_{YK}^{BbIX} – температурный напор на выходе из утилизационного котла, принято $T_{YK}^{BX} = 7$ К; $\Delta T_{YK}^{BbIX} = 7$ К. Аналогично для охладителя наддувочного воздуха

$$G_{T2} = \frac{G_{OHb} c_p^{OHb} (T_{OHb}^{BX} - T_{OHb}^{BbIX})}{c_p^T (T_{T2}^{BbIX} - \Delta T_{OHb}^{BX} - T_{T2}^{BbIX} + \Delta T_{OHb}^{BbIX})},$$

здесь ΔT_{OHb}^{BX} – температурный напор на входе в охладитель наддувочного воздуха; ΔT_{OHb}^{BbIX} – температурный напор на выходе из охладителя наддувочного воздуха, принято $\Delta T_{OHb}^{BX} = 9$ К, $\Delta T_{OHb}^{BbIX} = 9$ К.

В представленной схеме часть тепловой мощности, затраченная на перегрев водорода от температуры десорбции T_d до температуры перегрева T_2 :

$$Q_{H_2}^{ПЕР} = G_{H_2} c_p^{H_2} (T_2 - T_d + \Delta T_{ПЕР}^{BbIX});$$

$$T_2 = T_T^{BbIX} - \Delta T_{YK}^{BX} - \Delta T_{ПЕР}^{BX},$$

где $\Delta T_{ПЕР}^{BX}$ – температурный напор на входе в перегреватель водорода; $\Delta T_{ПЕР}^{BbIX}$ – температурный напор на выходе из перегревателя водорода; $c_p^{H_2}$ – теплоёмкость водорода; G_{H_2} – расход водорода.

Расход водорода определяется термодинамическими свойствами металлгидрида, концентрацией металлгидрида в жидкости-носителе c_{MG} , и тепловой мощностью ОГ (за вычетом тепловой мощности, потраченной на перегрев водорода) и тепловой мощностью наддувочного воздуха:

$$A_{H_2} = T^{OG} - \Delta T_{OG}^{BX};$$

$$B_{H_2} = \frac{c_p^{H_2} (T^{OG} - \Delta T_{OG}^{BX} - \Delta T_{H_2}^{BX} - T_d)}{c_p^{тер}};$$

$$C_{H_2} = T_{OHb} - \Delta T_{OHb}^{BbIX};$$

$$D_{H_2} = \frac{A_{H_2} G_{T1} - C_{H_2} G_{T2}}{G_{T1} + G_{T2}};$$

$$E_{H_2} = \frac{B_{H_2}}{G_{T1} + G_{T2}};$$

$$F_{H_2} = \frac{c_{MG} c_p^{sus} (T_d - T_d^{BbIX}) + \Delta H}{c_p^{тер}};$$

$$G_{H_2} = \frac{(G_{T1} + G_{T2}) c_p^{тер} (D_{H_2} - (T_d - \Delta T_d^{BbIX}))}{F_{H_2} + E_{H_2} (G_{T1} + G_{T2}) c_p^{тер}},$$

где $c_p^{тер}$ – теплоёмкость теплоносителя нагревательного контура; ΔT_d^{BbIX} – температурный напор на выходе из десорбера.

Температура теплоносителя контура нагрева после смешивания потоков теплоносителя T_{mix} в смесителе 7, (см. рис. 3):

$$T_{mix} = \frac{T_{ПЕР}^{BbIX} G_{T1} - T_T^{BbIX} G_{T2}}{T_{ПЕР}^{BbIX} - T_T^{BbIX}};$$

$$T_{ПЕР}^{BbIX} = T_T^{BbIX} - \frac{Q_{ПЕР}}{G_{H_2} c_p^{H_2}}.$$

Параметры водородного контура, контура суспензии металлгидрида и контура охлаждения определяются по зависимостям, приведенным в [6].

В результате математического моделирования определено значение эффективной мощности, вырабатываемое утилизационной металлгидридной установкой непрерывного действия (металлогидрид $ZrCrFe_{1,6}$ $\Delta H = 25,52$ МДж/(моль К), $T^* = 275$ К), работающей совместно с малооборотным двигателем 7S50ME-LGIM, (рис.4).

Для температуры десорбции $T_d = 360 \dots 390$ К, степени регенерации тепловой энергии $r_t = 0,4 \dots 0,8$, температуры сорбции $T_a = 315$ К, температуре охлаждающего контура на входе в сорбер (температуре заборной воды) $T^{BX} cool = 393$ К эффективная мощность утилизационной установки составляет 0,78...0,87 МВт. При увеличении температуры сорбции до 320...325 К и сохранении прочих параметров неизменными, значение эффективной мощности уменьшится от 0,71...0,81 МВт до 0,61...0,74 МВт, соответственно.

Отношение эффективной мощности утилизационной металлгидридной установки непрерывного действия к площади теплообменных аппаратов N_F , при температуре сорбции $T_a = 315$ К, составляет 80...105 Вт/м². При увеличении температуры сорбции до 320...325 К значение указанного параметра N_F уменьшится до 92...100 Вт/м² и 78...94 Вт/м², соответственно (см. рис. 4 б).

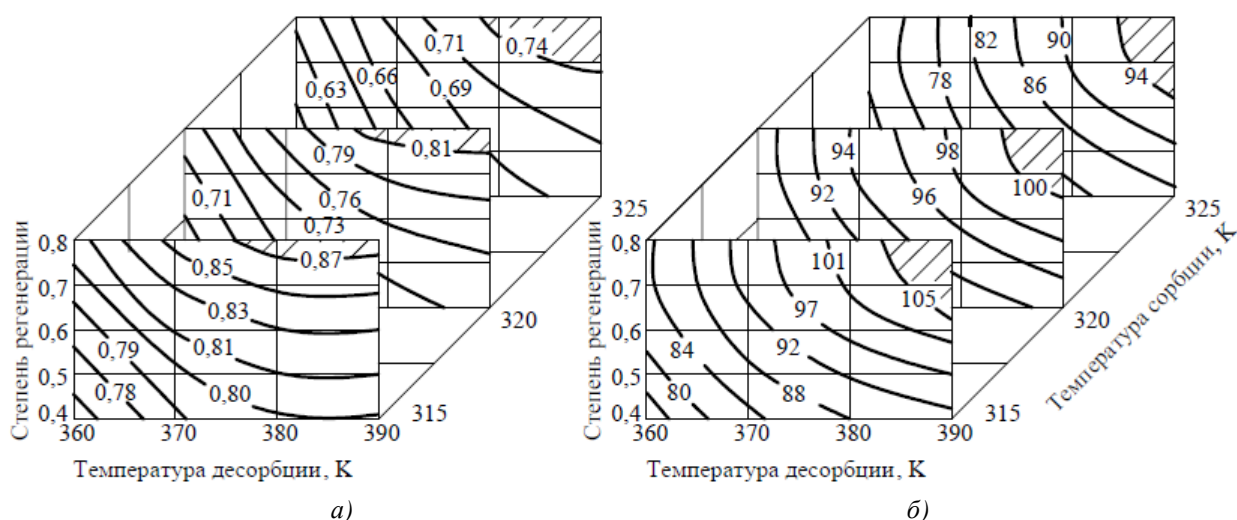


Рис. 4. Эффективная мощность, МВт (а) и отношение эффективной мощности к площади теплообменных аппаратов, Вт/м² (б) утилизационной металлгидридной установки непрерывного действия ДВС 7S50ME-LGIM

Температурно-тепловая диаграмма утилизационной металлгидридной установки непрерывного действия, при $T_D = 380\text{K}$, $T_a = 315\text{K}$ приведена (рис. 5).

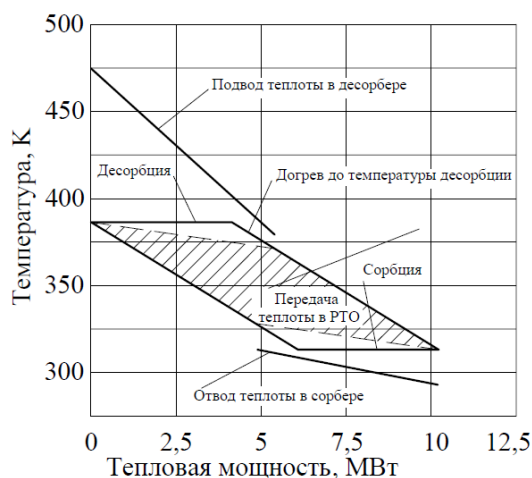


Рис. 5. Температурно-тепловая диаграмма утилизационной металлгидридной установки непрерывного действия ($T_D=380\text{K}$, $r_i = 0,7$) ДВС 7S50ME-LGIM

При использовании металлгидрида с $\Delta H = 25,52\text{ МДж}/(\text{моль К})$, $T^* = 275\text{ К}$, при температуре десорбции $T_D = 390\text{ К}$, давление десорбции составляет 2,6 МПа.

Заключение

1. Применение утилизационной металлгидридной установки непрерывного действия для утилизации теплоты отходящих газов и наддувочного воздуха двигателя 7S50ME-LGIM позволит допол-

нительно получить 0,78...0,87 МВт механической мощности.

2. Для степени регенерации тепловой энергии $r_i = 0,4...0,8$, температуры десорбции $T_D = 360...390\text{K}$, при использовании металлгидрида с $\Delta H = 25,52\text{ МДж}/(\text{моль К})$, $T^* = 275\text{ К}$, при температуре сорбции $T_a = 315\text{ К}$ Котношение эффективной мощности утилизационной металлгидридной установки непрерывного действия к площади теплообменных аппаратов N_F составляет 80...105 Вт/м², для температуры сорбции $T_a = 320\text{ К} - 92...100\text{ Вт}/\text{м}^2$, для температуры сорбции $T_a = 325\text{ К} - 78...94\text{ Вт}/\text{м}^2$.

Список литературы:

1. Dual-Fuel ME-GIE Successfully Runs on Ethane [Электронный ресурс] /<http://powerplants.man.eu/media-download/press-releases/news-detail/2017/05/16/dual-fuel-me-gie-successfully-runs-on-ethane>. Режим доступу на 29.05.2017.
2. Fuel Flexibility Done Right MAN B&W ME-GI-S and MAN B&W ME-LGI-S for stationary applications [Электронный ресурс] /http://powerplants.man.eu/docs/librariesprovider7/technical-papers/5510-0169-00ppr_low.pdf?sfvrsn=28. Режим доступу на 22.06.2017.
3. Using Methanol Fuel in the MAN B&W ME-LGI Series [Электронный ресурс] /http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/5510-0172-00ppr_using-methanol-fuel-in-the_low.pdf?sfvrsn=18. Режим доступу на 22.06.2017.
4. MANCHAC SUN: Methanol-fuelled methanol carrier [Text] // Significant ships of 2016. — Stephen and George, Gost Mill Road, Dowlais, Merthyr Tydfil, CF48 3TD, Wales. — 2017.
5. CEAS Engine Data report 7S50ME-LGIM (methanol) with high load tuning [Электронный ресурс] /<http://marine.man.eu/two-stroke/ceas>. Режим доступу на 22.06.2017.
6. Ткач, М. Р. Эффективность утилизации низкпотенциального тепла металлгидридными установками непрерывного действия / М. Р. Ткач, Б. Г. Ту-

мошевский, С.М. Доценко, Ю. Н. Галынкин // *Авиационно-космическая техника и технология* – 2014. – № 9(116). – С. 39–44. 7. Влияние регенерации энергии на эффективность утилизации низкопотенциального тепла металлогидридной установкой непрерывного действия / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С.М. Доценко, Ю. Н. Галынкин // *Двигатели внутреннего сгорания* – 2014. – № 2. – С. 57–62.

Bibliography (transliterated):

1. "Dual-Fuel ME-GIE Successfully Runs on Ethane", available at: <http://powerplants.man.eu/media-download/press-releases/news-detail/2017/05/16/dual-fuel-me-gie-successfully-runs-on-ethane>. 2. "Fuel Flexibility Done Right MAN B&W ME-GI-S and MAN B&W ME-LGI-S for stationary applications", available at: http://powerplants.man.eu/docs/librariesprovider7/technical-papers/5510-0169-00ppr_low.pdf?sfvrsn=28. 3. "Using Methanol Fuel in the MAN B&W ME-LGI Series Ethane", available at:

http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/5510-0172-00ppr_using-methanol-fuel-in-the_low.pdf?sfvrsn=18. 4. (2017) "MANCHAC SUN: Methanol-fuelled methanol carrier", Significant ships of 2016, Gost Mill Road, Dowlais, Merthyr Tydfil, pp 44-45. 5. "CEAS Engine Data report 7S50ME-C9.5-LGIM (methanol) with high load tuning", available at: <http://marine.man.eu/two-stroke/ceas>. 6. Tkach, M. R., Timoshevskiy, B. G. Dotsenko S.M., Galyinkin, Yu. N. (2014) Efficiency of heat recovery by metal-hydride installation of continuous operation, Aerospace engineering and technology [Effektivnost' utilizatsii nizkopotentzialnogo tepla metallogidridnymi ustanovkami nepreryvnogo deystviya], Aviatcionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya], № 9 (116). – pp. 39–44. 7. Tkach, M. R., Timoshevskiy, B. G. Dotsenko S.M., Galyinkin, Yu. N. (2014) "Influence of the energy recuperation on low-grade heat recovery in the metal-hydride installation of continuous operation", Internal combustion engines [Vliyanie regeneratsii energii na effektivnost' utilizatsii nizkopotentzialnogo tepla metallogidridnoy ustanovkoy nepreryvnogo deystviya], Dvigateli vnutrennego sgoraniya], №2. – pp. 57–62.

Поступила в редакцию 04.07.2017 г.

Ткач Михаил Романович, д.т.н., проф., зав. кафедры инженерной механики и технологии машиностроения Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: mykhaylo.tkach@gmail.com. ORCID 0000-0003-4944-7113.

Тимошевский Борис Георгиевич, д.т.н., проф., зав. кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: bogys.timoshevskyy@gmail.com.

Доценко Сергей Михайлович, к.т.н., доцент, директор Первомайского политехнического института Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Первомайск, e-mail: sergey.dotsenko@nuos.edu.ua.

Галынкин Юрий Николаевич, к.т.н., научный сотрудник Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: merchikdvs@gmail.com.

Шалапко Денис Олегович, преподаватель кафедры судового машиностроения и энергетики Херсонского филиала Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Херсон, Украина, e-mail: shalapko.densy@gmail.com.

УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОТИ ВТОРИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДВИГУНІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ НА АЛЬТЕРНАТИВНОМУ ПАЛИВІ

М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевський, С. М. Доценко, Ю.М. Галінкін, Д.О. Шалапко

Розглянуто утилізацію теплоти відхідних газів і надувного повітря сучасного малооборотного двигуна 7S50ME-LGIM (12,46 МВт 117, хв⁻¹), фірми MAN Diesel & Turbo, здатного працювати на метанолі, газовому паливі (MGO) і нафтовому паливі (MDO та HFO), металогідридними установками безперервної дії. Встановлено, що застосування таких установок дозволить додатково отримувати 0,78...0,87 МВт ефективної потужності, при цьому температури сорбції $T_a = 315 \dots 325$ К, десорбції $T_d = 360 \dots 400$ К, ступінь регенерації теплової енергії $r_t = 0,4 \dots 0,8$, металогідрид з $\Delta H = 25,52$ МДж/(мольК), $T^* = 275$ К.

UTILIZATION OF SECONDARY HEAT ENERGY OF MARINE LOW SPEED ENGINE WHICH USES ALTERNATIVE FUEL

M.R. Tkach, B.G. Timochevskiy, S.M. Docenko, Y.N. Galinkin, D.O. Shalapko

The utilization of the exhaust gases and inflatable air heat of the modern low-speed engine 7S50ME-LGIM (12.4 MW 117, min-1), the company MAN Diesel & Turbo, capable work on methanol, liquid petroleum gas (LPG) and fuel oil (MDO and HFO), of metal-hydride plant of continuous operation have been described. It has been established that the use of such plants will additionally produce 0,78 ... 0,87 MW of effective power, with the sorption temperature $T_a = 315 \dots 325$ K, the desorption temperature $T_d = 360 \dots 400$ K, and the degree of heat energy recovery $r_t = 0.4 \dots 0.8$.