

УДК 621.431.3

М. Р. ТКАЧ, Б. Г. ТИМОШЕВСКИЙ, С. М. ДОЦЕНКО, Ю. Н. ГАЛЫНКИН

*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина***ЭФФЕКТИВНОСТЬ УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА МЕТАЛЛОГИДРИДНЫМИ УСТАНОВКАМИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ**

Проанализирована схема утилизации низкопотенциального тепла металлгидридной установкой непрерывного действия. Определён КПД установки в условиях ограничения по максимальному давлению 15 МПа и по минимальному – 0,5 МПа, концентрации гидрида в носителе не более 15 %. При температуре десорбции $T_d=400$ К КПД установки 8,3 %. Для достижения указанного КПД рационально использовать материал $V_0,83Ti_0,1Fe_0,07$ ($\Delta H=39,6$ кДж/(моль H_2), $T^=294$ К). Значение КПД при использовании $ZrCrFe_{1,6}$ ($\Delta H=25,2$ кДж/(моль H_2), $T^*=275$ К) составит 7,5%, однако температура десорбции при использовании данного гидридообразующего материала 450-500 К.*

Ключевые слова: КПД, эффективность, утилизация тепла, водород, металлгидрид.

Постановка проблемы. Ограниченность нефтяных запасов топлива на нашей планете сохраняет актуальность повышения эффективности малооборотных ДВС, эффективности их работы, оценивается эффективным КПД. Наибольшие значения такого КПД 46..51% у малооборотных двигателей фирм MAN Diesel & Turbo, Wartsila и Mitsubishi Heavy Industries [1 - 3]. Достигнутые значения КПД приближаются к максимально возможным на современном технологическом уровне. Рациональным путём дальнейшего совершенствования является утилизация тепла вторичных энергоресурсов: выхлопных газов, надувочного воздуха, охлаждающей воды и циркуляционного масла. При этом возможно получение различных видов энергии (тепловой, производство полезного холода, механической и электрической энергии) [4]. Получение механической или электрической мощности, как самой дорогой, является наиболее желательной.

Сложность утилизации тепла ВЭР двигателей связана с низким температурным потенциалом. Наибольшее значение – температура выхлопных газов не превышает 520 К. Поэтому применение традиционных систем утилизации, основанных на работе водяного пара по циклу Ренкина, является низкоэффективным.

Обзор публикаций. Наиболее распространёнными на сегодняшний день являются утилизационные установки, предлагаемые фирмами производителями двигателей, для MAN это *Turbocompound System*, для Wartsila – *Booster System*. Это похожие системы, которые используют избыточную энергию выхлопных газов после ДВС для привода силовой турбины. Мощность от силовой турбины может отводиться через редуктор к тому же потребителю, на который работает ДВС либо к приводу электро-

генератора. Такие утилизационные системы относительно компактны, освоены промышленностью, однако их существенным недостатком является узкий диапазон работы и низкая эффективность [1, 2, 5].

Альтернативным способом утилизации низкопотенциального тепла малооборотных двигателей является применение в утилизационных установках, работающих по циклу Ренкина, вместо водяного пара низкокипящих рабочих тел, как то хладон R245fa [6] либо органический теплоноситель, например изобутан [7]. КПД таких установок может достигать 10%, однако существенным недостатком является высокая экологическая опасность от используемых веществ.

Изложение основного материала. Одним из путей использования низкопотенциального тепла малооборотных двигателей является применение металлгидридных установок непрерывного действия. Тепло ДВС расходуется для воздействия на металлгидридное соединение в десорбере 9 и перегрев выделившегося водорода. Образовавшийся гидридообразующий материал перемещают во второй реактор – адсорбер 11. Выделившийся водород направляют в водородную расширительную машину 16, где и происходит выработка полезной мощности. Затем водород направляют в адсорбер, где, взаимодействуя с гидридообразующим материалом, он вновь образует металлгидридное соединение. Для обеспечения возможности перекачки гидридообразующего материала и металлгидрида между реакторами, гидридообразующий материал необходимо поместить в инертную к реакции адсорбции/десорбции жидкость [8]. Принципиальная схема утилизационной установки представлена на рисунке 1, а более подробное описание приведено в [9].

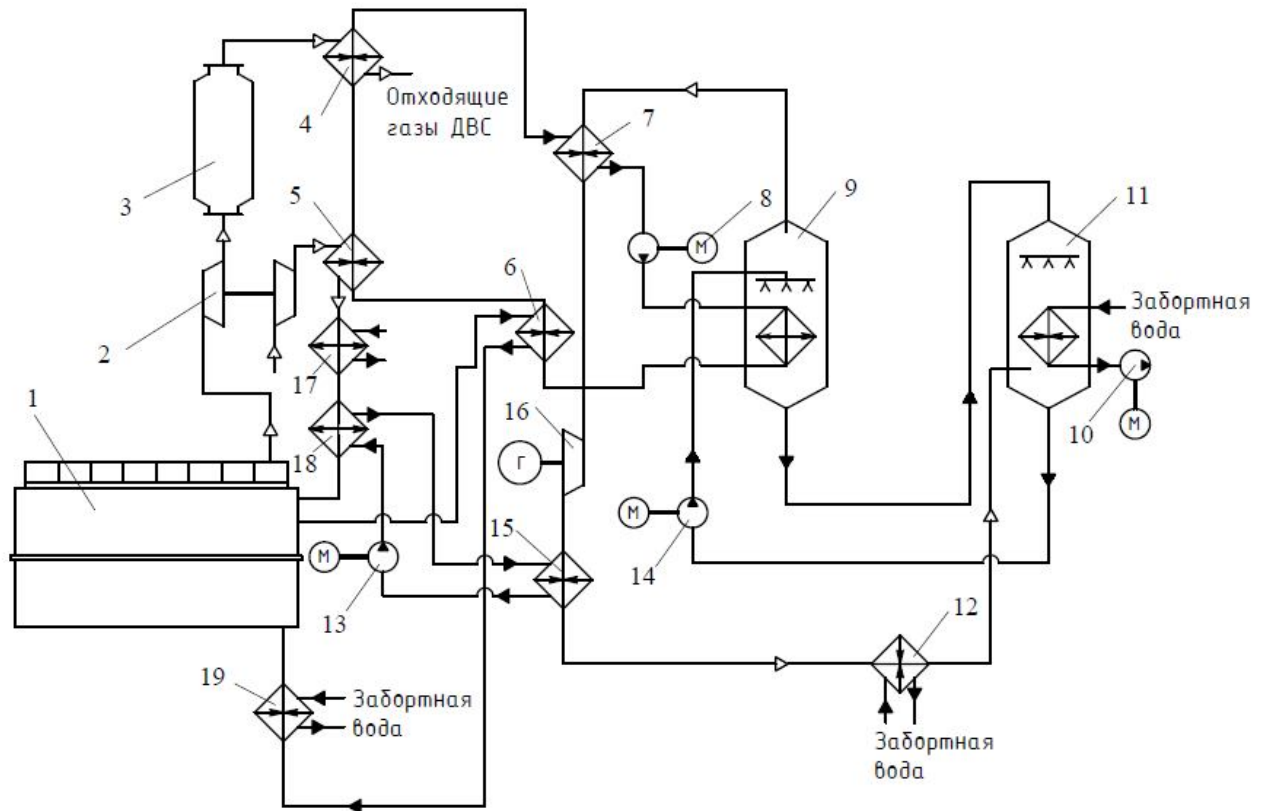


Рис. 1. Технологическая схема утилизации тепла ДВС:

1 - ДВС, 2 - турбокомпрессор, 3 – утилизационный парогенератор, 4, 5, 6 – утилизационные теплообменники отходящих газов, надувочного воздуха и охлаждающей жидкости, 7 – перегреватель водорода, 8 - циркуляционный насос промежуточного контура, 9 - десорбер, 10 - циркуляционный насос охлаждающего контура, 11 - адсорбер, 12 - концевой охладитель, 13 - циркуляционный насос холодного контура, 14 - циркуляционный насос, 15 - охладитель, 16 – водородная расширительная машина, 17 - охладитель надувочного воздуха 2-й ступени, 18 - охладитель надувочного воздуха 3-й ступени, 19 - концевой охладитель жидкости

Для отвода тепла от двигателя и подвода его к утилизационной установке рационально использовать высокотемпературные синтетические теплоносители, например Therminol. Теплоносители Therminol полностью имеют рабочий температурный диапазон от -115°C до $+400^{\circ}\text{C}$ (соответствующий температурному диапазону ВЭР малооборотного двигателя), имеют давление насыщения не более 0,5 МПа в указанном температурном диапазоне. Наиболее широким диапазоном рабочих температур обладает Therminol 66 [12].

Оценка эффективности утилизации тепла металлгидридной установкой непрерывного действия выполнена для ряда гидридообразующих материалов. В качестве исходных данных используются температурные уровни ВЭР ДВС. Известно, что для большинства гидридообразующих материалов равновесное давление рассчитывается по закону Вант-Гоффа:

$$\ln P = \frac{\Delta H}{TR} - \frac{\Delta S}{R},$$

где P – давление, ΔH – удельная энтальпия гидридообразования, T – температура, ΔS – удельная энтропия гидридообразования [10, 11]. ΔH , ΔS отнесены к одному молю молекулярного водорода. Основными характеристиками гидридообразующего материала являются удельная энтальпия гидридообразования ΔH и равновесная температура при давлении одна атмосфера T^* [13]. Характеристики металлгидридов систематизированы в базе данных, которая содержит информацию о 120 гидридообразующих материалах с $\Delta H=0..60$ кДж/(моль H_2) и $T^*=250..350$ К [14].

Эффективность утилизационной системы определена для диапазонов энтальпий гидридообразования $\Delta H = 10..40$ кДж/моль H_2 , равновесных температур от $T^*=270..320$ К. Минимальное давление водорода в системе ограничено 0,5 МПа, максимальное – 15 МПа.

Эффективность утилизационной установки оценивается КПД, который представляет собой отношение полезной механической мощности $N_{\text{мех}}$, полученной в водородной расширительной машине

16 с учетом затрат на перекачку суспензии N_{nc} насосом 14, а также на привод насосов нагревающего $N_{нг}$ 8 и охлаждающего $N_{ох}$ 10 контуров, к затраченной тепловой мощности на нагрев суспензии Q_n , реакцию десорбции Q_d в десорбере 9 и перегрев водорода Q_p в перегревателе 7 (см. рис. 1).

$$\eta_e = \frac{N_{мех}}{Q_n + Q_d + Q_p},$$

где $N_{мех}$ определяется как разность механической мощности, полученной в водородной расширительной машине $N_{рм}$ и мощности, затраченной на перекачку суспензии, а также теплоносителей горячего и холодного контуров:

$$N_{мех} = N_{рм} - N_{nc} - N_{нг} - N_{ох}.$$

Мощность $N_{рм}$, вырабатываемая в расширительной машине, определяется расходом водорода и располагаемым изоэнтروпийным теплоперепадом водорода (водород рассматривается как реальный газ) при изменении параметров от давления и температуры на входе (P_2, T_2) до давления на выходе P_3 :

$$N_t = G_H \left[H_2^H(P_2, T_2) - H_3^H(P_3, S_2(P_2, T_2)) \right] \eta_o,$$

где G_H – расход водорода, $H_2^H(P_2, T_2)$ – энтальпия водорода на входе в расширительную машину, $H_3^H(P_3, T_3, S_2(P_2, T_2))$ – энтальпия водорода на выходе из расширительной машины, η_o – внутренний КПД расширительной машины.

Энтальпия и энтропия водорода на входе определены как функции давления и температуры [15, 16]. При этом принимается, что давление на входе в водородную расширительную машину равно давлению десорбции P_d , уменьшенном на величину сопротивления перегревателя водорода и водородного тракта, а температура равна температуре перегрева водорода T_2 . Сопротивление перегревателя водорода учитывается путём введения коэффициента восстановления полного давления v_2 :

$$P_2 = P_d v_2.$$

Давление на выходе из водородной расширительной машины принимается равным давлению адсорбции P_a , увеличенном на сопротивление тракта, которое также учитывается вводом соответствующего коэффициента восстановления полного давления v_3 :

$$P_3 = \frac{P_a}{v_3}.$$

Температура за расширительной машиной определена как функция энтальпии и давления за водородной расширительной машиной.

Мощность, затрачиваемая на перекачку суспензии:

$$N_{nc} = \Delta V_{сус} (P_d - P_a),$$

где P_a – давление десорбции, P_d – давление адсорбции, $\Delta V_{сус}$ – перекачиваемый объём суспензии. Перекачиваемый объём суспензии $\Delta V_{сус}$ состоит из объёма гидридообразующего материала $V_{МГ}$ и объёма носителя $V_{нос}$. Отношение объёма гидридообразующего материала к объёму носителя $V_{МГ}/V_{нос}$ составляет 0,15 для обеспечения седиментационной устойчивости [17].

Мощность насосов горячего и холодного контуров определена исходя из расхода теплоносителей горячего и холодного контуров

$$N_{нг} = \Delta V_{ГТ} \Delta P_{ГТ},$$

где $\Delta P_{ГТ}$ – перепад давления от сопротивления теплообменников и тракта соответствующего контура, $\Delta V_{ГТ}$ – перекачиваемый объём теплоносителя. Перекачиваемый объём теплоносителя определяется исходя из массового расхода металлгидрида, который, в свою очередь, определяется из известного балансового соотношения:

$$G_{ГТ} = \frac{Q_{ГТ}}{C_P^{ГТ} (T_{2Г} - T_{1Г}) \rho_{ГТ}},$$

где $\rho_{ГТ}$ – плотность теплоносителя соответствующего контура, $Q_{ГТ}$ – тепло, подводимое либо отводимое теплоносителем, $C_P^{ГТ}$ – изобарная теплоёмкость теплоносителя, $T_{2Г}$ – наибольшая температура теплоносителя, $T_{1Г}$ – наименьшая температура теплоносителя.

Тепло, необходимое для нагрева суспензии от температуры адсорбции до температуры десорбции определено выражением

$$Q_{nc} = (G_{МГ} C_P^{МГ} + G_{НОС} C_P^{НОС}) (T_d - T_a),$$

где массовый расход металлгидрида $G_{МГ}$ зависит от расхода водорода G_H и определяется обратной сорбционной ёмкостью металлгидрида $c_{МГ}$:

$$c_{МГ} = \frac{G_H}{G_{МГ}}.$$

Теплота, необходимая для реакции десорбции

$$Q_d = G_H \Delta H.$$

Тепло перегрева водорода

$$Q_{\text{пв}} = G_{\text{H}} C_{\text{P}}^{\text{H}} (T_2 - T_{\text{д}}).$$

Расчёты проводились для температурных уровней, соответствующих температурным уровням малооборотных двигателей: максимальная температура перегрева водорода до $T_2=500$ К, температура адсорбции $T_{\text{а}}=350$ К. Гистерезис процессов адсорбции/десорбции учитывался путем увеличения равновесного давления адсорбции по отношению к равновесному давлению десорбции на 5 % [11]. Теплоёмкость гидридообразующих материалов составляет 500 Дж/кгК, плотность – 8000 кг/м³.

Для подвода тепла использовалась жидкость Терминол 66, плотность $\rho_{\text{ГТ}}=870,4$ кг/м³, $C_{\text{P}}^{\text{ГТ}}=2268$ Дж/кгК, при этом принималась максимальная температура $T_{2\text{Г}}=520$ К, минимальная – $T_{1\text{Г}}=480$ К. Для отвода тепла используется вода с $C_{\text{P}}=4200$ Дж/кгК, плотностью 1000 кг/м³, максимальная температура $T_{2\text{X}}=315$ К, минимальная температура $T_{1\text{X}}=295$ К. В качестве носителя использовалась органическая полиметилсилоксановая жидкость ПМС 20, ГОСТ 13032-77, плотность $\rho_{\text{ГТ}}=980$ кг/м³, $C_{\text{P}}^{\text{ГТ}}=1632$ Дж/кгК.

Как следует из полученных результатов, эффективность утилизации тепла утилизационной металлгидридной установкой непрерывного действия в диапазоне температур десорбции $T_{\text{д}}=350..500$ К, при максимальном значении температуры перегрева водорода после десорбера $T_2=500$ К составляет 3...8 % (рис. 2). Изолинии эффективности совмещены с линиями ограничений по минимальному (показана точками) и максимальному (показана штрихами) давлениям. Существующие металлгидридные материалы обозначены крестообразными маркерами. Область допустимых рабочих давлений выделена серым цветом. Для случая $T_{\text{д}}=350$ К линия максимальных давлений не лежит в рассматриваемой области температур T^* и энтальпий гидридообразования ΔH .

Максимальному значению КПД 8,3 % соответствует температура десорбции $T_{\text{д}}=400$ К. Для достижения указанной эффективности в этом диапазоне температур десорбции рационально использовать гидридообразующий материал с $T^*=293,93$ и $\Delta\text{H}=39,68$ МДж/(мольН₂) – $\text{V}_{0,83}\text{Ti}_{0,1}\text{Fe}_{0,07}$. Близкие по эффективности значения достигнуты при использовании материала, $\text{ZrMn}_{1,11}\text{Fe}_{1,22}$ – 4,6...8,1 %,

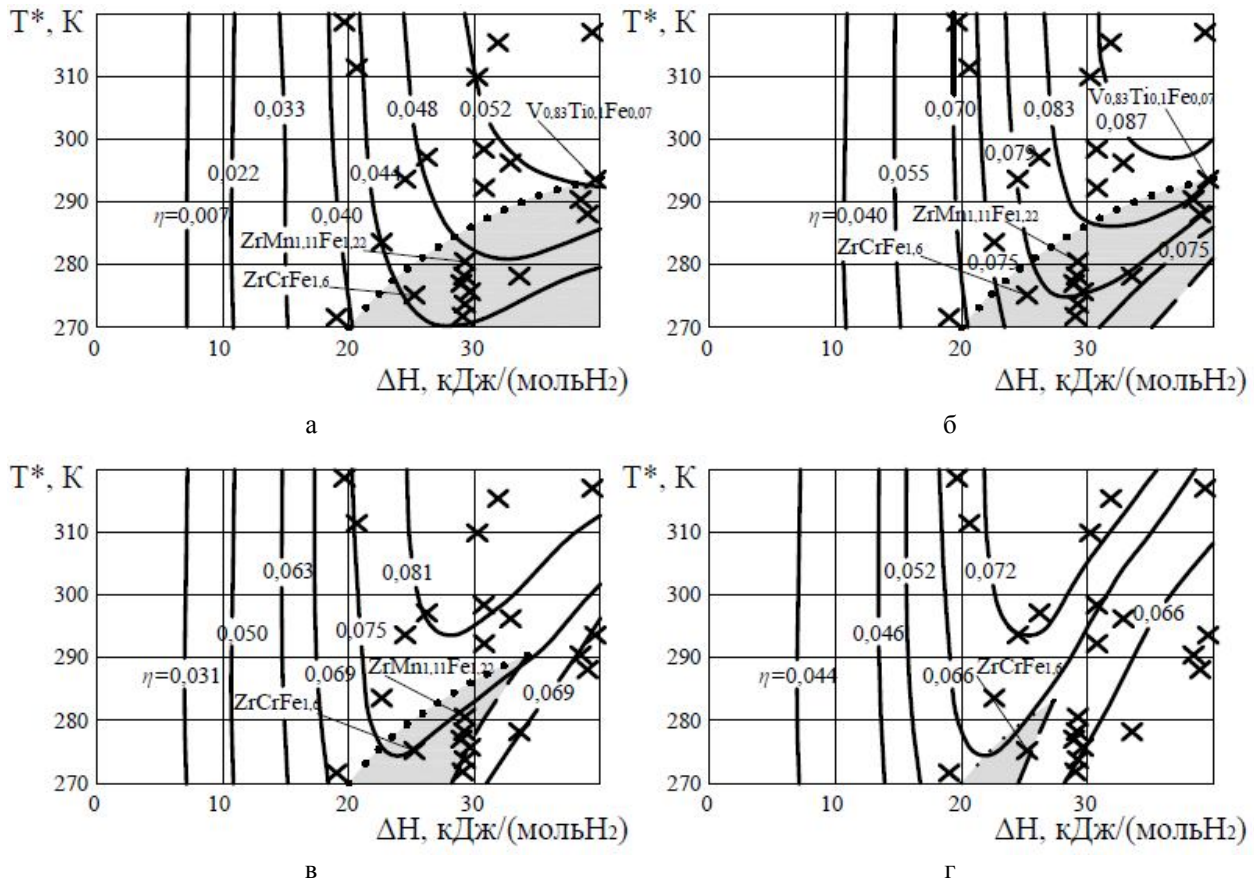


Рис. 2. Эффективность утилизационной металлгидридной установки непрерывного действия:

а - $T_{\text{д}}=350$ К, б - $T_{\text{д}}=400$ К, в - $T_{\text{д}}=450$ К, г - $T_{\text{д}}=500$ К;

х – свойства существующих металлгидридов

однако диапазон рациональных температур десорбции при этом находится в более широком интервале 350..450 К. При использовании материала $ZrCrFe_{1,6}$ в диапазоне температур десорбции 400..450 К КПД

утилизационной установки достигает 7,5..6,4 %. Максимально достижимое значение КПД для различных материалов показано штриховой линией.

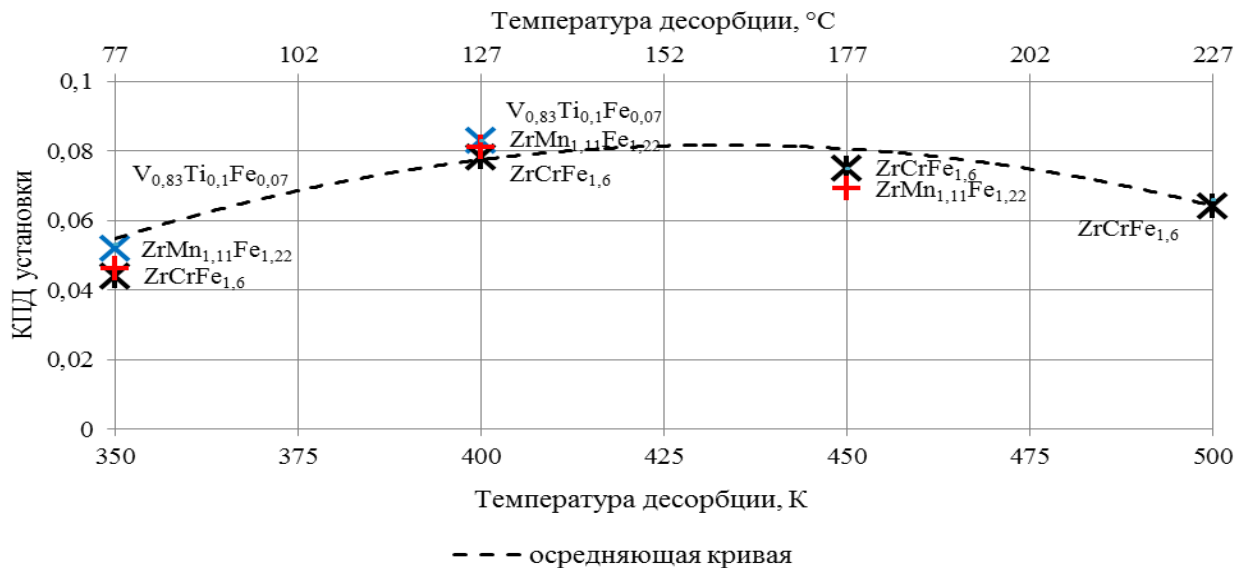


Рис. 3. Влияние температуры десорбции на КПД утилизационной металлогидридной установки непрерывного действия для конкретных металлогидридных материалов

Выводы

1. Максимальное значение КПД утилизационной металлогидридной установки непрерывного действия достигает 8,5 % для металлогидридных материалов с температурой гидридообразования $T^*=280...290$ К и удельной энтальпией гидридообразования $\Delta H=30...40$ кДж/(моль H_2).

2. При использовании гидридообразующего материала $V_{0,83}Ti_{0,1}Fe_{0,07}$ максимально достижимый КПД утилизационной металлогидридной установки непрерывного действия составляет 8,3 %, при использовании $ZrCrFe_{1,6}$ – 7,5%.

3. Для материала $V_{0,83}Ti_{0,1}Fe_{0,07}$ рациональное значение температуры десорбции составляет 350..400 К, а для материала $ZrCrFe_{1,6}$ – 400..450 К.

4. Экономия топлива при утилизации тепла малооборотного ДВС современными системами и утилизационной металлогидридной установки непрерывного действия сопоставимы, при этом металлогидридная система обладает существенными внутренними резервами повышения эффективности.

Литература

1. MAN Diesel & Turbo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://apps.mandieselturbo.com/ceas/client/erd.aspx>. – 10.06.2014.

2. Wärtsilä [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.wartsila.com/en/marine-solutions/products/netGTD>. – 10.06.2014.

3. Mitsubishi heavy industries marine machinery & engine co. LTD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mhi-mme.com/products/engine.html>. – 10.06.2014.

4. Селиверстов, В. М. Утилизация тепла в судовых дизельных установках [Текст] / В. М. Селиверстов. – Л. : Судостроение, 1973. – 256 с.

5. Маслов, В. В. Утилизация теплоты судовых дизелей [Текст] / В. В. Маслов. – М. : Транспорт, 1990. – 144 с.

6. Quoilin, S. Experimental Study and Modeling of a Low Temperature Rankine Cycle for SmallScale Cogeneration [Text] / Sylvain Quoilin // Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Electro Mechanical Engineer, (Energetic engineering)/ University of Liege / Faculty of Applied sciences aerospace and Mechanical engineering/ Department thermodynamics laboratory. – 2007. – P. 125.

7. Сергиенко, Р. В. Пути повышения эффективности рабочего цикла энергетических теплоутилизующих установок с низкокипящими рабочими телами [Текст] / Р. В. Сергиенко, Б. Д. Билека, В. Я. Кабков // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 8 (95). – С. 38-42.

8. Пат. України 96083354. Металогідрідна енергетична установка [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач. – № 28033 ; заявл. 27.08.1996 ; опубл. 16.10.2000, Бюл. № 5. – 5 с.

9. Утилизация низкопотенциального тепла малооборотных ДВС на базе гидридной технологии [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С. М. Доценко, Ю. Н. Галынкин // Авиационно-космическая техника и технологии. – 2013. – № 8 (105). – С. 61-67.

10. Колачёв, Б. А. Сплавы-накопители водорода

[Текст]: справ. / Б. А. Колачёв, Р. Е. Шалин, А. А. Ильин. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.

11. Daren, P. *Hydrogen Storage Materials* [Text] / P. Darren. – Springer-Verlag London Limited, 2011. – 258 p.

12. Инженерная компания Энергетика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ikenergetica.ru/teplonositeli>. – 10.06.2014.

13. Методы хранения водорода и возможности использования металлогидридов [Текст] / Б. П. Тарасов, В. В. Бурнашева, М. В. Лотоцкий и др. // Альтернативная энергетика и экология. Междунар. науч. журн. – 2005. – № 12. – С. 17-21.

14. Timoshevsky, B. G. *Hydrogen Materials science and Chemistry of Metal hydrides* [Text] / B. G. Timoshevsky, M. R. Tkach // 5th International conference, Katsiveli. – 1997. – 38 p.

15. Александров, А. А. Свойства и процессы рабочих тел и материалов атомной энергетики

[Электронный ресурс] / А. А. Александров, К. А. Орлов, В. Ф. Очков. – Режим доступа: http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/NPP/tab1_3_1_pt.xmcd.

– 10.06.2014.

16. *Fundamental Equations State for Parahydrogen, Normal Hydrogen, and Orthohydrogen* [Text] / J. W. Leachem, R. T. Jacobsen, S. G. Penoncello, E. W. Lemmon // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. – 2009. – Vol. 38, № 3. – P. 721-748.

17. Lasher, S. *Technical Analysis of Hydrogen Production: Evaluation of H2 Mini-Grids* [Text] / Stephen Lasher, Jayanti Sinha // *Final Technical Report*. – U.S. Department of Energy, 2005 May 3. – 8 p.

18. MAN Diesel & Turbo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mandieselturbo.com/files/news/files/19391/VTA%20VariableTurbine%20Area.pdf>. – 10.06.2014.

Поступила в редакцию 10.06.2014, рассмотрена на редколлегии 16.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкции авиационных двигателей и энергоустановок С. В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

ЕФЕКТИВНІСТЬ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА МЕТАЛОГІДРИДНОЇ УСТАНОВКИ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, С. М. Доценко, Ю. Н. Галинкін

Проаналізовано схему утилізації низькопотенційного тепла металогідридною установкою безперервної дії. Визначено ККД установки в умовах обмеження по максимальному тиску 15 МПа, по мінімальному - 0,5 МПа, концентрації гідриду в носії не більше 15% при температурі десорбції $T_d = 400$ К ККД установки 8,3%. Для досягнення зазначеного ККД раціонально використовувати матеріал $V_{0,83}Ti_{0,1}Fe_{0,07}$ ($\Delta H=39,6$ кДж/(моль H_2), $T^*=294$ К). Значення ККД при використанні $ZrCrFe_{1,6}$ ($\Delta H=25,2$ кДж/(моль H_2), $T^*=275$ К) складе 7,5%, проте температура десорбції при використанні даного гідридоутворюючого матеріалу при цьому 450-500 К.

Ключові слова: ККД, ефективність, утилізація тепла, водень, металогідрид.

EFFICIENCY OF HEAT RECOVERY BY METAL-HYDRIDE INSTALLATION OF CONTINUOUS OPERATION

M. R. Tkach, B. G. Tymoshevskyy, S. M. Dotsenko, J. N. Halynkin

It was analyzed the scheme diagram of the low-grade heat metal-hydride installation of continuous operation. The efficiency of the installations is defined as 8.3%: under the following conditions: maximum pressure limitation of 15 MPa; its minimum - 0.5 MPa; hydride concentrations in the organic liquid carrier is not more than 15%; desorption temperature range $T_d = 400$ K. To achieve the specified performance it is rationally to use the hydride-forming material $V_{0,83}Ti_{0,1}Fe_{0,07}$ ($\Delta H=39.6$ kJ/(mol H_2), $T^* = 294$ K). Efficiency value is 7.5% if material $ZrCrFe_{1,6}$ ($\Delta H=25.2$ kJ/(mol H_2), $T^* = 275$ K) is using, but the desorption temperature range in this case is 450-500 K.

Keywords: coefficient of efficiency, efficiency, heat recovery, hydrogen, metal-hydride.

Ткач Михаил Романович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедры теоретической механики, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: mykhaylo.tkach@gmail.com.

Тимошевский Борис Георгиевич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедры двигателей внутреннего сгорания, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: btym@mksat.net.

Доценко Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, директор, Первомайский политехнический институт Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Первомайск, e-mail: sergey.dotsenko@nuos.edu.ua.

Галинкин Юрий Николаевич – аспирант кафедры Двигателей внутреннего сгорания, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: MerchikDVS@yandex.ru.