

УДК 621.431.3

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

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Украина

УТИЛИЗАЦИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА МАЛООБОРОТНЫХ ДВС НА БАЗЕ ГИДРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Даны особенности утилизации низкопотенциального тепла малооборотных ДВС, при использовании воды и хладона R245fa в качестве рабочих жидкостей. Обоснована необходимость использования металлогидридной технологии для утилизации тепла вторичных энергоресурсов малооборотных ДВС. Приведена технологическая схема теплоутилизационной установки малооборотного ДВС. Проиллюстрировано изменение параметров металлогидридных циклов. КПД утилизационного контура применительно к двигателю 14S90ME-C9.2-ТII (MAN B & W): при работе по циклу Ренкина на воде составляет 4...7 %, на хладоне R245fa – 13...14 %, а по гидридной технологии превышает 19 %.

Ключевые слова: ДВС, утилизация тепла, термодинамический цикл, водород, металлогидрид.

Постановка проблемы

Малооборотные двигатели являются основой судовой энергетики и достаточно распространены в стационарной. К ним относятся мощные двухтактные дизели с числом оборотов до 300 в минуту. В настоящее время малооборотные двигатели производят такие фирмы: *SULZER*, *MAN B & W*, *MITSUBISHI* и их лицензиаты. Для фирмы *MAN B & W* это серия *MC*, *ME*, для *SULZER* – серия *RTA*, *RTflex*, для *MITSUBISHI* – *UEC*, *LCE* [1].

КПД современных малооборотных ДВС находится на уровне 51-54% и дальнейшее повышение

их эффективности рационально проводить путём утилизации тепла вторичных энергоресурсов (ВЭР): выхлопных газов, наддувочного воздуха, охлаждающих воды и масла. Их особенностью является низкий температурный потенциал: выхлопные газы – 220...260 °C при *MCR*, наддувочный воздух – 150...170 C, охлаждающая вода – 75...80 °C, масло охлаждения поршней порядка 55 °C. Изменение располагаемой тепловой мощности ВЭР двигателя 14S90ME-C9.2-ТII фирмы *MAN B & W* (по данным *Project guide*) показывает, что максимальная располагаемая тепловая мощность ВЭР достигается при температурах потребителя тепла порядка 70 °C.

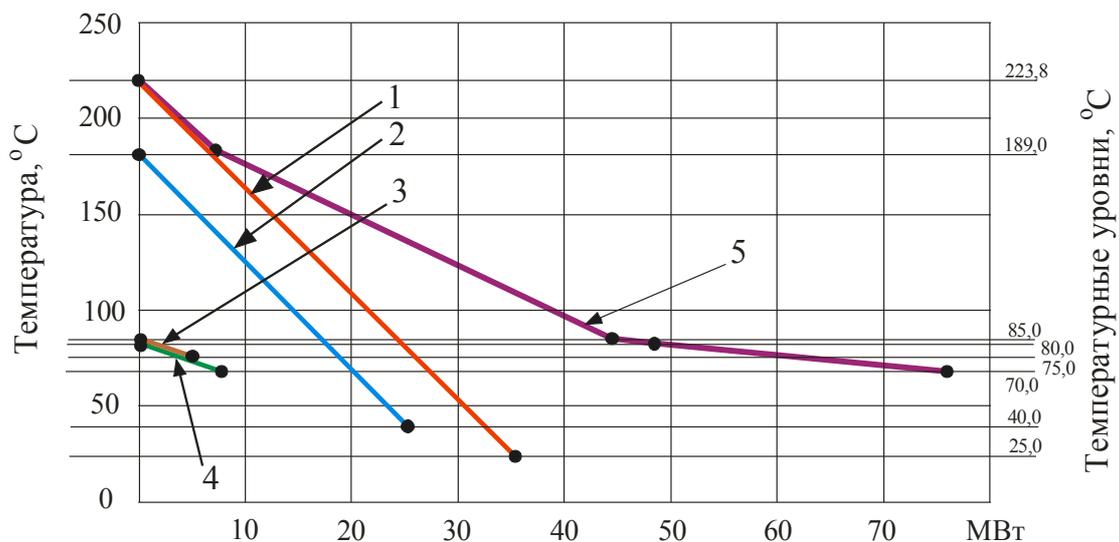


Рис. 1. Температурно-энтальпийная диаграмма вторичных ресурсов двигателя 14S90ME-C9.2-ТII: 1 – выпускные газы; 2 – наддувочный воздух; 3 – циркуляционное масло; 4 – охлаждающая вода; 5 – суммарная располагаемая тепловая мощность

Обзор публикаций

В настоящее время, чаще всего, утилизируют тепло наиболее высокотемпературной составляющей ВЭР ДВС – отходящих газов. Здесь используют паровые утилизационные установки, работающие по циклу Ренкина на воде, но КПД их не превышает 7%. Применение неводных рабочих тел даёт возможность достигнуть значения КПД 9...14%. Рабочие тела таких установок – хладоны (по классификации *ASHRAE*) *R123*, *R245fa*, *R134a*, изопентан, и *n* – пентан. Однако, их использование ограничено как экологическими требованиями, так и недостаточной термической стабильностью [2].

Для утилизации тепла отходящих газов ДВС применяют *Sulzer Efficiency - Booster System*. Здесь выхлопные газы из коллектора направляются параллельно и к турбокомпрессору, и к силовой турбине, которая присоединена через гидравлическую муфту к валу двигателя [1].

В утилизационной установке *TES — Thermo Efficiency System* отходящие газы также направляются параллельно и к турбокомпрессору, и к силовой турбине. Затем они попадают в утилизационный котёл, где вырабатывается пар для силовой паровой турбины. Силовая газовая и паровая турбины находятся на одном валу с генератором переменного тока [1].

Утилизацию низкопотенциального тепла ДВС осуществляют также, используя термоэлектрический генератор, вырабатывающий термо-ЭДС за счёт разности температур горячего и холодного теплоносителей. Такой метод характеризуется более низким КПД, по сравнению с циклом Ренкина, но имеет высокий потенциал модернизации [2].

Использование температурно-энтальпийной (*H-T*) диаграммы позволяет проиллюстрировать процессы утилизации тепла (рис 2.). Изменение максимальной располагаемой тепловой мощности ВЭР ДВС *14S90ME-C9.2-III (MAN B & W)* в зависимости от температуры потребителя соответствует данным рис. 1 и показано верхней линией.

Высшая температура рабочего тела утилизационного цикла ограничена температурным уровнем ВЭР и величиной необходимого минимального температурного напора (20 °C). Низшая его температура – температурой холодного теплоносителя (32 °C), с учетом температурного напора.

При использовании воды в качестве рабочего тела цикла Ренкина, параметры пара далеки от критических значений, и процессы подогрева и, испарения воды, а также перегрева водяного пара явно выражены. Для хладона *R245fa* вследствие выбора цикла на сверхкритических параметрах эти процессы выражены менее явно. Как следует из приведенных данных, свойства рабочего тела во многом определяют утилизируемое количество тепла. Эффективная механическая мощность утилизационной системы (произведение КПД цикла на количество утилизируемого тепла) условно показана в виде прямоугольников.

Как следует из приведенных данных, повышение эффективности утилизации тепла во многом связано, с увеличением номенклатуры используемых ВЭР (см. рис. 1). Наибольшее количество утилизируемого тепла достигается в термодинамическом процессе, происходящем в *H-T* координатах эквидистантно линии максимального располагаемого тепла, с учётом необходимого минимального температурного напора.

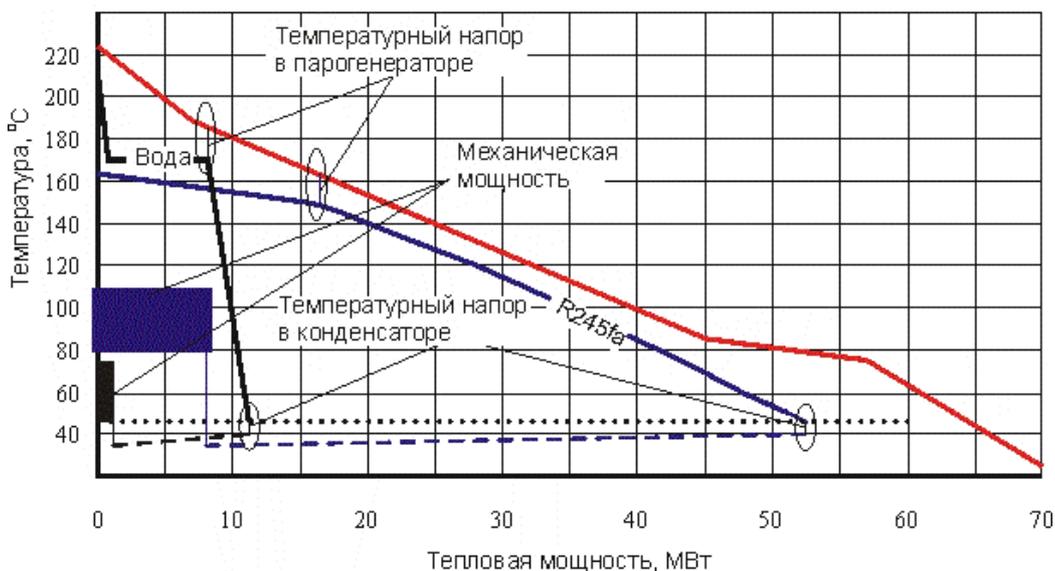


Рис. 2. Процессы утилизации ВЭР ДВС MAN B&W 14S90ME-C9.2-III в цикле Ренкина

Изложение основного материала

С целью выявления потенциала эффективности утилизационных установок малооборотных ДВС выполнены оценочные расчёты эффективности утилизации вторичных энергоресурсов двигателя *MAN B & W 14S90ME-C9.2-TP* при работе утилизационной установки по циклу Ренкина. Затраты энергии на питательный насос определены при КПД насоса равном 0,8, а мощность паровой турбины – при КПД турбины – 0,9 [3].

При использовании воды в качестве рабочего тела, эффективность утилизации тепла составит 4...7%. Снижение удельного эффективного расхода топлива при условии сохранения мощности энергетической установки составит не более 2%.

При использовании в качестве рабочего тела хладона *R245fa* [4] КПД утилизационной установки составит 13...14 %. За счет этого, и более глубокого использования ВЭР, суммарное снижение расхода топлива на дизельную энергетическую установку составляет 9,1%.

Альтернативой могут служить металлгидридные установки, которые, как известно, используют для компримирования водорода, в качестве теплоиспользующих холодильных машин и тепловых насосов [5, 6]. Принцип действия таких устройств основан на поглощении водорода при низком давлении, повышении его давления за счёт подвода тепла и выделении водорода при высоком давлении. Потенциальная энергия водорода превращается в механическую энергию в расширительной машине.

К основным характеристикам металлгидридов относятся водородоёмкость (массовый процент водорода), термодинамические и теплофизические свойства. Они определяют условия, при которых могут быть реализованы процессы поглощения/выделения водорода [7]. Процессы изменения давления водорода традиционно изображают в координатах (lgP , - $1000/T$) (рис. 3), а изменение параметров суспензии – в координатах, учитывающих ее концентрацию (c) (lgP , c) [8].

Существующие схемы металлгидридных устройств реализуют циклическую работу аппаратов, что усложняет конструкцию, увеличивает массогабаритные показатели, снижает термодинамическую эффективность. Характерным для них является использование металлгидрида в виде мелкодисперсного (2...50 мкм) порошка. Это приводит к известным технологическим и конструкционным ограничениям схем этих систем, связанным с переносом тепла и разделением газовой и твёрдой фаз.

Применение в качестве рабочего тела суспензии металлгидрида в химически инертной жидкости [9] позволяет существенно уменьшить (возмож-

но, устранить) отмеченные проблемы и создать металлгидридные машины, системы хранения и транспортировки, работающие по непрерывному циклу [10, 11].

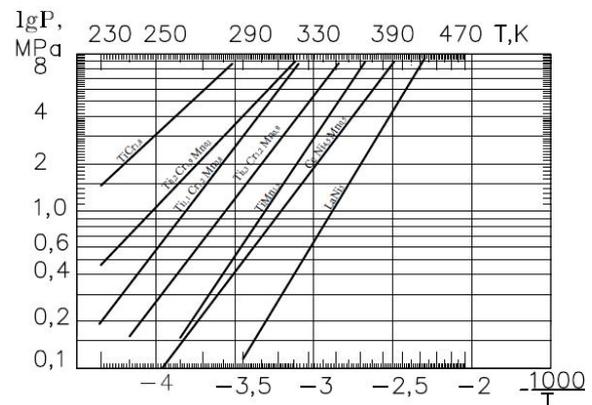


Рис. 3. Зависимость давления десорбции от температуры (кривые Вант Гоффа)

При утилизации ВЭР ДВС источником тепла утилизационной металлгидридной установки (рис. 4) служит промежуточный теплоноситель, циркуляция которого обеспечивается циркуляционным насосом 8 последовательно через десорбер 9, утилизационные теплообменники отходящих газов 4 после утилизационного парогенератора 3, надувочного воздуха 5 за турбокомпрессором 2 и охлаждающей жидкости 6 ДВС 1. В металлгидридной установке выделяют контуры циркуляции водорода и суспензии металлгидрида. Водород высокого давления, генерируется в десорбере 9, нагревается в перегревателе водорода 7, и поступает в турбогенератор 16, где происходит преобразование его потенциальной энергии в механическую энергию. Это сопровождается снижением давления и температуры потока водорода. Поток водорода низкого давления последовательно подогревается (в рассматриваемом варианте схемы) в охладителе надувочного воздуха 3-й ступени – 15, концом охладителя 12 и поступает в сорбер 11. Здесь происходит поглощение водорода суспензией металлгидрида с низкой водородоёмкостью, сопровождаемое повышением водородоёмкости суспензии и выделением теплоты сорбции.

Суспензия металлгидрида, насыщенная водородом в сорбере 11, прокачивается насосной секцией турбонасосного агрегата 10, через холодную сторону регенеративного теплообменника 13 и питательным насосом 14 подаётся в десорбер 9. Здесь, за счет подвода теплоты десорбции, происходит выделение водорода из металлгидрида и снижение водородоёмкости суспензии, которая затем направляется через горячую сторону регенеративного теплообменника 13 и турбинную часть турбонасосного агрегата 10 в сорбер 11.

Достижение необходимой температуры охлаждающей жидкости ДВС осуществляется (при необ-

ходимости) в конечном охладителе жидкости 19.

Рабочий процесс в утилизационной металлгидридной установке на базе интерметаллида $\text{LaNi}_{4,5}\text{Al}_{0,5}$ для главного судового двигателя

14S90ME-C9.2-ГП представлен на рис. 5. Линии S_{max} и S_{min} представляют собой прямые Вант-Гоффа для процессов адсорбции и десорбции, соответственно.

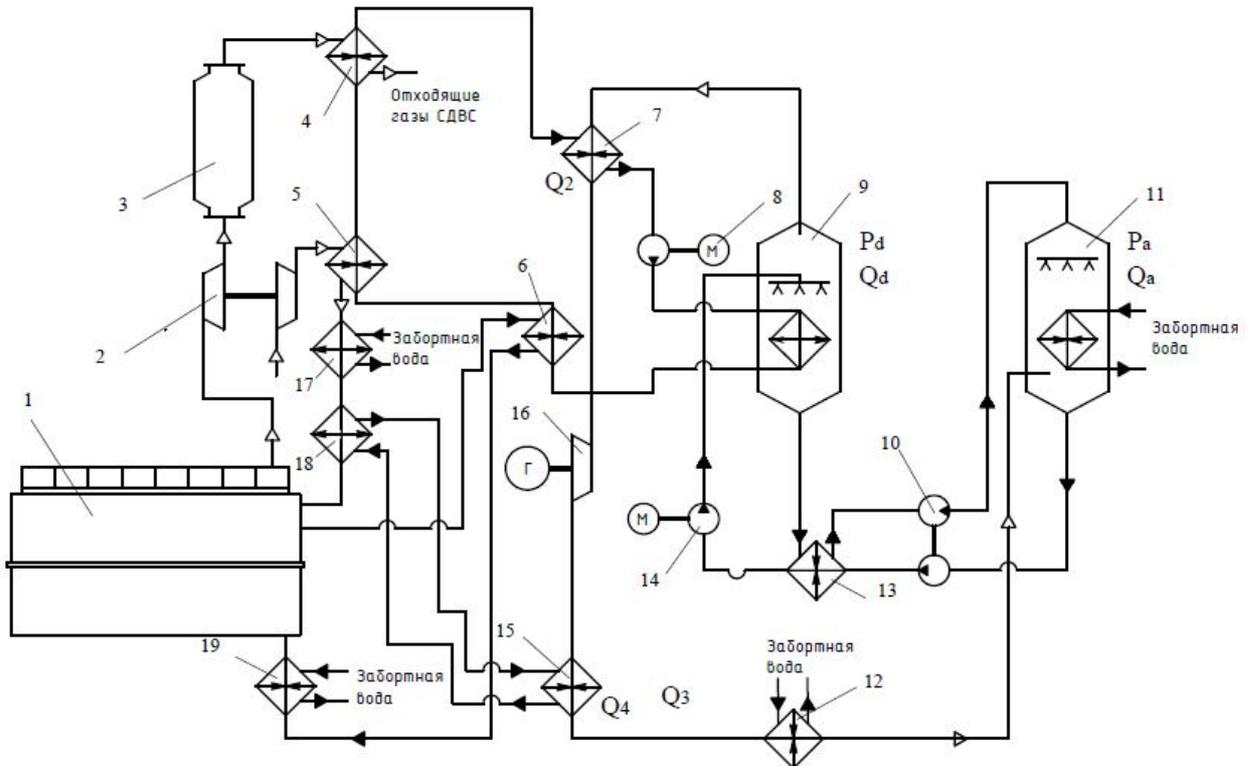


Рис. 4. Технологическая схема утилизации тепла ДВС:

1 – ДВС, 2 – турбокомпрессор водорода, 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 – турбонасосный агрегат, 11 – сорбер, 12 – конечной охладитель, 13 – регенеративный теплообменник, 14 – питательный насос, 15 – охладитель, 16 – турбогенератор, 17 – охладитель надувочного воздуха 2-й ступени, 18 – охладитель надувочного воздуха 3-й ступени, 19 – конечной охладитель жидкости

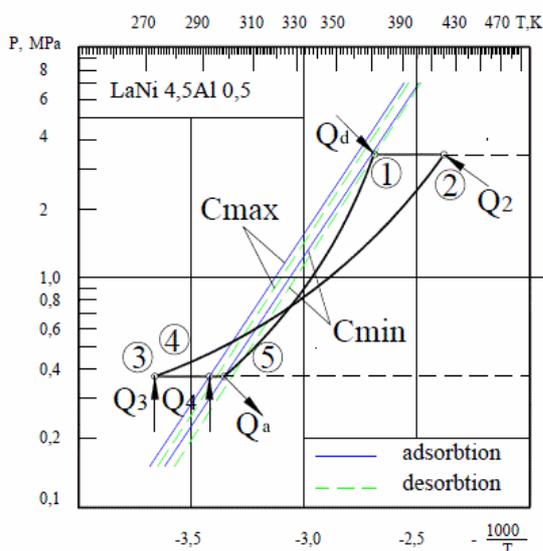


Рис. 5. Изменение параметров системы утилизации тепла в координатах $(\lg P - 1000/T)$

Теплота десорбции Q_d подводится в десорбере (точка 1), где происходит выделение водорода из суспензии металлгидрида при давлении порядка 3,5 МПа. Далее водород перегревается в перегревателе 7 теплом Q_2 по изобаре 1-2 и поступает в турбогенератор, где совершает работу, условно изображаемую политропой 2-3. В конце процесса расширения давление водорода составляет 0,39 МПа, а температура – 273 К. Такая температура конца процесса является следствием высокой степени расширения водорода (порядка 9). Далее водород подогревается и к нему подводится тепло Q_3 и Q_4 по изобаре 3-4-5 и он поступает в сорбер, где поглощается суспензией гидридообразующего материала, а теплота реакции Q_a отводится забортной водой. Далее суспензия гидрида, с помощью турбонасосного агрегата 10 и питательного насоса 14 поступает в десорбер 9. Этому соответствует политропа 5-1. Процесс идёт с одновременным повышением давления и

температуры до значений, определяемых точкой 1, и цикл замыкается.

Часто, для выполнения термодинамического анализа цикла, необходимо представить рассматриваемый процесс в координатах давление-концентрация водорода (c) (рис. 6). Здесь верхние сплошные линии соответствует изотермам десорбции, а нижние штриховые – сорбции. Подача суспензии гидрида в десорбер осуществляется насосом по изостере (линии постоянной концентрации водорода ($b - c$)). Десорбция водорода происходит по изобаре $c - d$. Давление десорбирующего водорода при этом определяется точкой d и равно P_d . Снижение давления водорода в турбогенераторе до величины P_a соответствует изостере $d - a$. Затем водород поступает в абсорбер с давлением P_a , где происходит его поглощение суспензией гидридообразующего материала. Этот процесс характеризуется изобарой $a - b$. После чего, суспензия металлгидрида поступает в насос и цикл замыкается.

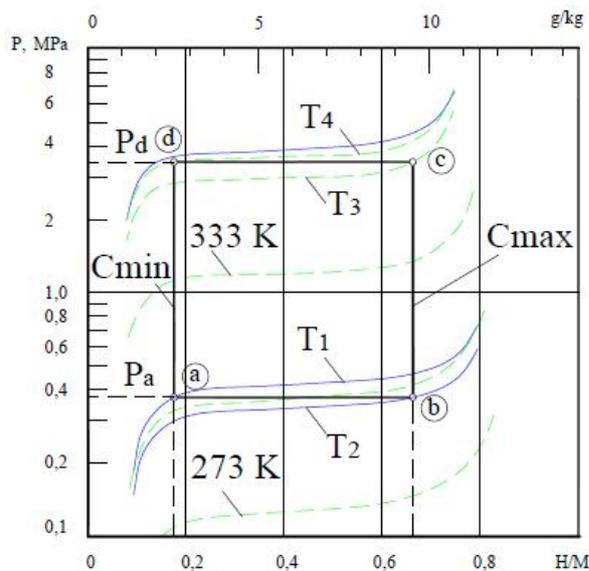


Рис. 6. Изменение параметров системы утилизации тепла в координатах ($P - c$)

В условиях, соответствующих циклу Ренкина, КПД металлгидридной утилизационной системы превышает 19 %. Снижение удельного расхода топлива на установку в целом составит не менее 12 %, При учете хладоресурса водорода КПД установки оценивается уже величиной 22 %, а снижение удельного расхода топлива превышает 14 %.

Реализация металлгидридной технологии утилизации тепла связана с определением рационального состава суспензии гидридообразующего материала и ее свойств; подбором соотношений параметров рабочих тел; определением теплотехнических и массогабаритных показателей системы; вы-

полнением комплексной проверки принципиальной возможности ее практической реализации.

Заключение

При использовании термохимических циклов на основе обратимых гидридообразующих материалов в качестве преобразователей энергии и водорода в качестве рабочего тела утилизационных установок, появляется возможность повысить глубину утилизации низкопотенциального тепла малооборотных ДВС.

Системы глубокой комплексной утилизации низкопотенциального тепла современных турбопоршневых ДВС на основе термохимических циклов с использованием реверсивных гидридообразующих интерметаллических соединений, как преобразователей энергии и водорода, как рабочего тела, представляются перспективными и требуют дальнейших комплексных теоретических и экспериментальных исследований.

Литература

1. *Pounder, C.C. Ponder's Marine Diesel Engines and Gas Turbine [Text] / C.C. Ponder. – Elsevier Buttersworth, 2004. – 576 p.*
2. *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. – 28 p.*
3. *Техническая термодинамика компьютерный учебник [Электронный ресурс] / А.А. Александров, В.Е. Знаменский, Г.Ю. Кондакова и др. – Режим доступа: <http://twf.mpei.ac.ru/TTHB/2/KiSyShe/rus/index.html>. – 12.05.2013.*
4. *The NIST Chemistry WebBook [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://webbook.nist.gov>. – 12.05.2013.*
5. *Тимошевский, Б.Г. Эффективность гидридных систем в составе судовых энергетических установок [Текст]: дис... д-ра техн. наук: 05.08.05 / Тимошевский Борис Георгиевич. - Николаев, 1991. - 428 с.*
6. *Srinivasa Murthy, S. Metal hydride based cooling systems with hydrogen as working fluid [Text] / S. Srinivasa Murthy // 1st European Conference on Polygeneration. – Tarragona (Spain). – October 2007. – P. 199-215.*
7. *Левенберг, В.Д. Аккумуляция тепла [Текст] / В.Д. Левенберг, М.Р. Ткач, В.А. Гольстрем. – К.: Техника, 1991. – 290 с.*
8. *Методы хранения водорода и возможности использования металлгидридов [Текст] / Б.П. Та-*

расов, В.В. Бурнашева, М.В. Лотоцкий, В.А. Яртысь // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2005. – № 12. – С. 14-37.

9. Reylly, J.J. Kinetics of the absorption of hydrogen by $LaNi_5H_x$ – n-undecane suspensions [Text] / J.J. Reylly, J.R. Johnson // *Journal of the Less-Common metals*. – 1984. – № 104. – P. 175-190.

10. Пат. 28033 Україна, МПК (2006) F01K 25/00. Металогідридна енергетична установка [Текст] / Тимошевський Б.Г., Ткач М.Р.; Заявник

та патентовласник Український державний морський технічний університет (UA) — № 96083354; заявл. 27.08.1996; опубл. 16.10.2000, Бюл. №5. – 2 с.

11. Hydrogen transmission/storage with metal hydride-organic slurry and advanced chemical hydride/hydrogen for pemfc vehicles [Text] / Andrew W. McClaine, Dr. Ronald W. Breault, Christopher Larsen, Dr. Ravi Konduri, Jonathan Rolfe, Fred Becker, Gabor Miskolczy // *Proceedings of the 2000 U.S. DOE Hydrogen Program Review NREL/CP-570-28890*.

Поступила в редакцію 27.05.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. проектирования авиационных двигателей С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.

УТИЛІЗАЦІЯ НИЗКОПОТЕНЦІЙНОГО ТЕПЛА МАЛООБОРОТНИХ ДВЗ НА БАЗІ ГІДРИДНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

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

Дано особливості утилізації низькопотенційного тепла малооборотних ДВЗ, при використанні води і хладону R245fa в якості робочих рідин. Обґрунтовано необхідність використання металогідридної технології для утилізації тепла вторинних енергоресурсів малооборотних ДВЗ. Приведена технологічна схема теплоутилізаційні установки малооборотних ДВЗ. Проілюстровано зміна параметрів металогідридних циклів. ККД утилізаційного контуру стосовно до двигуну 14S90ME-C9.2-ТІІ (MAN B & W): при роботі по циклу Ренкіна на воді складає 4 ... 7%, з використанням хладону – R245fa -13 ... 14%, а по гідридної технології перевищує 19%

Ключові слова: ДВЗ, термодинамічний цикл, утилізація тепла, водень, металогідрид.

UTILIZATION OF LOW POTENTIAL HEAT THE LOW SPEED ICE FROM HYDRIDE TECHNOLOGY

M.R. Tkach, B.G. Timochevskiy, S.M. Docenko, J.N. Galinkin

Features of low-grade waste heat of slow-combustion engine, using water and Freon R245fa as working fluid.. The necessity of using metal hydride technology for heat utilization of secondary energy resources slow-combustion engine was asserted. The technological scheme of the installation was illustrated. Changing of parameters-metal-hydride cycles was shown. Efficiency of the recycling loop in relation to the engine 14S90ME-C9.2-TII (MAN B & W) using the Rankine cycle with water is about 4 ... 7%, refrigerant R245fa -13 ... 14%, and using hydride technology – more than 19%.

Keywords: ICE, thermodynamic cycle, utilization of the heat, hydrogen, metal hydride.

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

Тимошевський Борис Георгієвич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедри двигателів внутрішнього згорання Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: btym@mksat.net.

Доценко Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, директор Первомайского политехнического института Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Первомайск, Украина, e-mail: admin@ppi.net.ua.

Галинкін Юрій Николаєвич – аспірант кафедри Двигателів внутрішнього згорання Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: MerchikDVS@yandex.ru.