

УДК 621.431.3

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

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛА ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ МАЛОБОРОТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ МЕТАЛЛОГИДРИДНЫМИ УСТАНОВКАМИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Проиллюстрирована диаграмма теплового баланса малооборотного двигателя MAN 12K98MC стационарной электростанции. Установлено, что применение в качестве компонента рабочего тела металлгидридного материала $ZrCrFe_{1,2}$ позволяет достичь КПД установки 21%. Выявлено, что максимальному значению КПД соответствует температура десорбции 380...420 К. Приведено влияние регенерации тепловой и механической энергии на КПД установки, а также установлено, что увеличение объемной концентрации металлгидридного материала в жидкости-носителе с 0,1 до 0,3 приведет к увеличению КПД металлгидридной установки с 0,05 до 0,13.

Ключевые слова: *утилизационная установка, малооборотный двигатель, стационарная электростанция, рабочее тело, металлгидридная суспензия, водород.*

Обзор публикаций. В последние годы на рынке стационарных дизельных двигателей наблюдается растущий спрос на надежные и эффективные машины в диапазоне 30...250 МВт, способные использовать низкокачественные сорта топлив. Для крупных потребителей спрос удовлетворяется за счет современных двухтактных малооборотных дизелей (МОД) [2].

Основные преимущества стационарных электростанций, использующих для привода генератора малооборотные двухтактные дизели:

- высокое значение агрегатной мощности (превышает 80 МВт);
- соответствие фактическим условиям климатической зоны применения, с должным учетом сезонных колебаний;
- эффективность двухтактных малооборотных дизельных двигателей практически не зависит от нагрузки в широком диапазоне значений, кроме того, работоспособность обеспечивается без каких-либо ограничений вплоть до 10% указанной максимальной непрерывной мощности (MCR);
- способность работать практически на любом виде коммерчески доступного жидкого или газообразного топлива, в том числе на различных видах биотоплива животного или растительного происхождения;
- расчетная температура предварительного нагрева топлива 250 °С, что соответствует удельной вязкости топлива около 70000 сСт при 50 °С (в 100 раз выше допустимой вязкости топлива среднеоборотных двигателей) [2, 3].

Несмотря на высокую энергетическую эффективность современных малооборотных двигателей, около половины энергии топлива не используется для производства полезной мощности, а отводится в окружающую среду вместе с теплом вторичных энергоресурсов (ВЭР): теплом отработавших газов, надувочного воздуха, охлаждающей воды и масла. Поэтому рациональным путем дальнейшего повышения эффективности стационарных электростанций с МОД является утилизация тепла ВЭР. На сегодняшний день известен ряд способов преобразования такого тепла в полезную работу, среди которых турбокомпаундные установки [4], паротурбинные установки [4], установки с низкокипящим рабочим телом [5], установки, работающие по сверхкритическому циклу [6], водоаммиачные установки (цикл Калины) [7], термоэлектрические установки [8] и другие. На сегодняшний день серийно применяются только турбокомпаундные и паротурбинные установки, остальные находятся на уровне экспериментальных разработок.

Изложение основного материала. Альтернативой указанным способам утилизации являются металлгидридные установки непрерывного действия, рабочими телами которых являются водород и гидридная суспензия (металлогидридный материал, помещенный в инертную к процессам поглощения-выделения водорода жидкость). Технологическая схема такой установки состоит из теплообменников отвода тепла ВЭР, десорбера, перегревателя водорода, расширительной машины, насоса перекачки суспензии, насосов теплоносителей горячего

и холодного контуров, адсорбера, регенерационного теплообменника, регенерационного турбонасосного агрегата [9].

Проведенные предварительные исследования показали принципиальную работоспособность таких установок [10,11], а также позволили определить виды металлгидридных материалов, которые рационально применять в качестве компонента рабочего тела [9]. Одним из таких материалов является $ZrCrFe_{1,2}$. Свойства указанного материала приведены в [12].

В данной работе представлены результаты исследования металлгидридной установки непрерывного действия применительно к двигателю MAN 12K90MC-S, электростанции The GMR Vasavi Group, Ченнаи, Индия. Для определения потенциала вторичных энергоресурсов указанного двигателя составлена диаграмма теплового баланса, характерная для короткоходовых двигателей MAN Diesel (К-серия) [13], рис. 1 из которой видно, что около 52% энергии топлива отводится в окружающую среду.

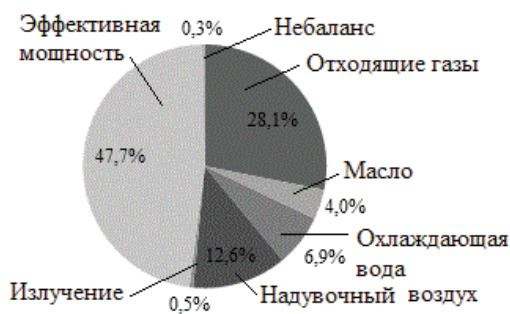


Рис. 1. Диаграмма теплового баланса двигателя MAN 12K98MC-S

Цель. Определение эффективных энергетических показателей утилизационной металлгидридной установки применительно к двигателю MAN 12K90MC-S, использующей в качестве компонента рабочего тела металлгидридный материал $ZrCrFe_{1,2}$.

Определение эффективных энергетических показателей проведено путем математического моделирования, для чего использована математическая модель металлгидридной установки непрерывного действия, схема, алгоритм и основные уравнения которой приведены в [9].

Эффективность утилизационной установки оценивается КПД, который представляет собой отношение полезной механической мощности $N_{\text{мех}}$, полученной в водородной расширительной машине с учетом затрат на перекачку суспензии $N_{\text{пс}}$, а также на привод насосов нагревающего $N_{\text{нг}}$ и охлаждающего $N_{\text{нх}}$ контуров, к затраченной тепловой мощности на нагрев суспензии $Q_{\text{н}}$, реакцию десорбции $Q_{\text{д}}$ и нагрев водорода $Q_{\text{п}}$ в перегревателе.

$$\eta_e = \frac{N_{\text{мех}}}{Q_{\text{н}} + Q_{\text{д}} + Q_{\text{п}}},$$

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

$$N_{\text{мех}} = N_{\text{рм}} - N_{\text{пс}} - N_{\text{нг}} - N_{\text{нх}}$$

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

$$N_{\text{рм}} = G_{\text{H}} \left[H_2^{\text{H}}(P_2, T_2) - H_3^{\text{H}}(P_3, S_2(P_2, T_2)) \right] \eta_0$$

где G_{H} – расход водорода, $H_2^{\text{H}}(P_2, T_2)$ – энтальпия водорода на входе в расширительную машину, $H_3^{\text{H}}(P_3, T_3, S_2(P_2, T_2))$ – энтальпия водорода на выходе из расширительной машины, η_0 – внутренний КПД расширительной машины.

Степень расширения в водородной РМ определяется по формуле

$$\Pi_t = \frac{P_2}{P_3}$$

Мощность, затрачиваемая на перекачку суспензии между аппаратами установки

$$N_{\text{пс}} = \frac{Q_{\text{C}}(P_{\text{д}} - P_{\text{а}})}{\eta_{\text{п}}}$$

где Q_{C} – объемный расход перекачиваемой суспензии, $\text{м}^3/\text{с}$, который состоит из объемных расходов носителя и гидридообразующего материала

$$Q_{\text{C}} = Q_{\text{HC}} + Q_{\text{MG}} = \frac{Q_{\text{MG}}}{c_{\text{MG}}} + Q_{\text{MG}} = \left(\frac{1}{c_{\text{MG}}} + 1 \right) Q_{\text{MG}}$$

$$Q_{\text{MG}} = \frac{G_{\text{MG}}}{\rho_{\text{MG}}}$$

где c_{MG} – концентрация металлгидридного материала в суспензии, Q_{MG} – объемный рас-

ход гидридообразующего материала. Объемный расход гидридообразующего материала, G_{MG} зависит от обратимой сорбционной емкости гидридообразующего материала c_{H_2} и массового расхода водорода G_H :

$$G_{MG} = \frac{G_H}{c_{H_2}}$$

Результаты. Установлено, что применение материала $ZrCrFe_{1,2}$ в качестве компонента рабочего тела, позволяет получить КПД установки 0,02...0,12, большим значениям соответствует температура десорбции 380...420 К, рис. 2. Влияние температуры десорбции на степень расширения водородной расширительной машины, и как следствие – на мощность водородной расширительной машины представлены на рис. 3. Увеличение температуры десорбции позволяет получить большую мощность водородной расширительной машины, однако, при этом увеличиваются затраты на перекачку и нагрев рабочего тела. Этим и объясняется наличие экстремума при определении КПД установки, см. рис. 2.

Очевидно, что большие значения КПД установки получены при использовании большего значения объемной концентрации металлгидридного материала в носителе, так как, при прочих равных условиях, уменьшается масса рабочего тела (гидридной суспензии), и как следствие – затраты энергии на нагрев и перекачку рабочего тела. Диапазон объемной концентрации ограничен значением 0,3, так как при использовании больших значений резко растет гидравлическое сопротивление [14], Согласно данным приведенным в [15], рекомендуется использовать значение объемной концентрации металлгидридного материала в носителе не более 0,017 для обеспечения седиментационной устойчивости.

Зафиксировав значения температуры десорбции $T_d = 400$ К и значение объемной концентрации металлгидридного материала в носителе $c_{MG} = 0,017$, определено влияние внутренней регенерации тепловой и механической энергии на КПД металлгидридной утилизационной установки, работающей применительно к малооборотному двигателю стационарной электростанции MAN 12K90MC-S, рис. 4.

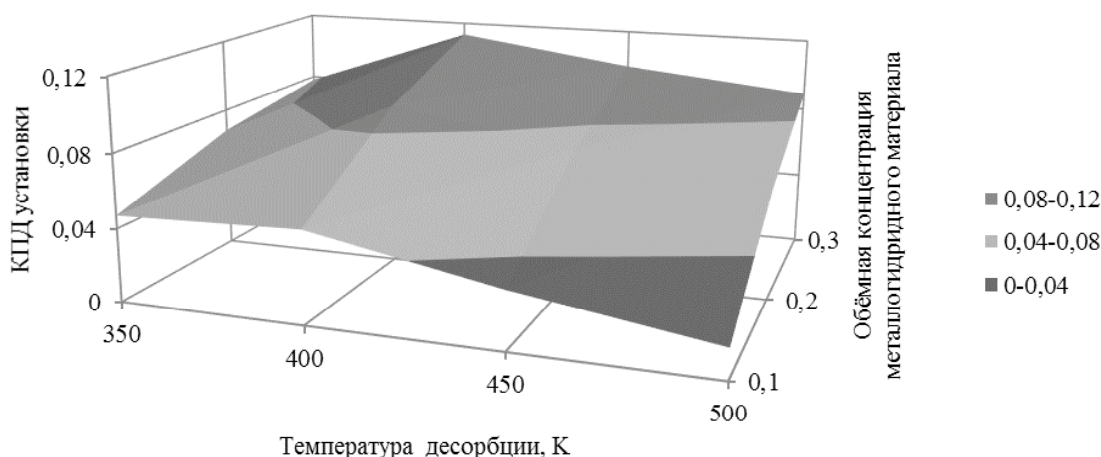


Рис. 2. Влияние температуры десорбции и объемной концентрации металлгидридного материала в носителе на КПД установки

Из приведенных результатов видно, что регенерация механической энергии позволяет повысить КПД утилизационной установки на 2...5 %, регенерация механической энергии – на 8...14 %. Совместное применение регенерации тепловой и механической энергии позволяет достичь КПД установки 21,4%.

Необходимо отметить, что полученные данные в целом согласуются с данными, приведенными в [9]. Имеющиеся расхождения объясняются уточнением свойств конкретного металлгидридного материала.

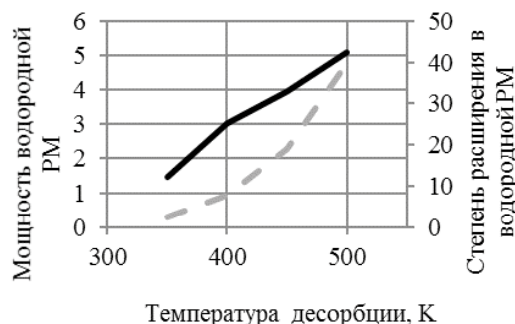


Рис. 3. Влияние температуры десорбции на мощность расширительной машины

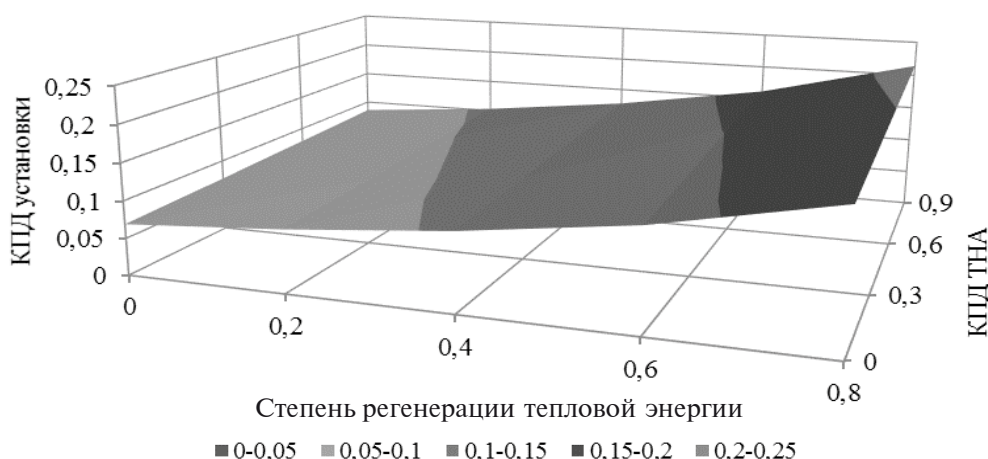


Рис. 4. Влияние внутренней регенерации тепловой и механической энергии на КПД установки

Выводы

1. Утилизация тепла ВЭР малооборотного двигателя 12К90МС-S (54,84 МВт, 104 об/мин) металлгидридной утилизационной установкой непрерывного действия обеспечивает выработку дополнительной механической мощности 1,4...5,2 МВт, что составляет 2,5...9,6% мощности ДВС.

2. Рациональный диапазон температуры десорбции применительно к рабочему телу на основе металлгидридного материала $ZrCrFe_{1,2}$ и параметров ДВС – $T_d = 380...420$ К.

3. Регенерация тепловой и механической энергии позволяет существенно повысить эффективность утилизационной установки. Повышение КПД регенеративного турбонасосного агрегата с 0,3 до 0,9 приводит к увеличению КПД утилизационной установки от 0,18 до 0,21.

4. Большие значения КПД установки получены при использовании большего значения объемной концентрации металлгидридного материала в носителе, так как, при прочих равных условиях, уменьшается масса рабочего тела (гидридной суспензии), и как следствие – затраты энергии на нагрев и перекачку.

Литература

1. Stationary MAN B&W ME-GI-S Engines for Dual Fuel Applications [Text]. – Copenhagen : MAN Diesel, 2015.

2. Two-stroke Low Speed Diesel Engines for Independent Power Producers and Captive Power Plants [Text]. – Copenhagen : MAN Diesel, 2015.

3. Stationary MAN B&W MC-S Engines For Biofuel Applications [Text]. – Copenhagen : MAN Diesel, 2015.

4. Thermo Efficiency System for Reduction of Fuel Consumption and CO₂ Emission [Text]. – Copenhagen: MAN Diesel, 2014.

5. Saadatfar, B. Waste heat recovery Organic Rankine cycles in sustainable energy conversion: A state-of-the-art review [Text] / Bahram Saadatfar, Reza Fakhrai, Torsten Fransson // The Journal of MacroTrends in Energy and Sustainability. – Vol. 1, Issue 1. – 2013. – P. 167-188.

6. Analysis of Combined Power and Refrigeration Generation Using the Carbon Dioxide Thermodynamic Cycle to Recover the Waste Heat of an Internal Combustion Engine [Text] / S.Wang, K. Bai, Y. Xie [at al] // Mathematical Problems in Engineering.

7. Jonsson, M. Ammonia–water bottoming cycles: a comparison between gas engines and gas diesel engines as prime movers / M. Jonsson, J. Yan // Energy 26, 2001. – P. 31–44.

8. Rowe, D. M. Evaluation of thermoelectric modules for power generation [Text] / D. M. Rowe, Gao Min // Journal of Power Sources. – 1998. – Vol. 73. – P. 193-198.

9. Эффективность утилизации низкопотенциального тепла металлгидридными установками непрерывного действия [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С.М. Доценко [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология – 2014. – № 9(116). – С. 39–44

10. 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.

11. Характеристики рабочего тела металлгидридной утилизационной установки непрерывного действия [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С. М. До-

ценко [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 9 (126). – С. 123–126.

12. Ivanov T. V. Calorimetric investigation of the hydrogen interaction with $ZrCrFe_{1,2}$ [Text] / T. V. Ivanova, V. N. Verbetsky // Journal of Alloys and Compounds. – 1999. – P. 34–37.

13. Kuiken K. Diesel engines I [Text] / K. Kuiken. – Onnen: Target Global Energy Training, 2008.

14. Мартыненко, О. Г. Справочник по теплообменникам [Текст] : В 2 Т. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – Т.1. – 912 с.

15. Lasher S. Technical Analysis of Hydrogen Production : Evaluation of H₂ Mini-Grids [Text] : final technical report / S. Lasher, J. Sinha // U.S. Department of Energy. – 2005. – 8 p.

Поступила в редакцию 12.07.2016

М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевський, С. М. Доценко, Ю.М. Галинкін. Утилізація тепла вторинних енергоресурсів малообертового двигуна стаціонарних електростанцій металогідридними установками безперервної дії

Складена діаграма теплового балансу малообертового двигуна MAN 12K98MC стаціонарної електростанції. Встановлено, що використання в якості компонента робочого тіла металогідридного матеріалу $ZrCrFe_{1,2}$ дозволяє досягти ККД установки 21%. Встановлено, що максимальному значенню ККД відповідає температура десорпції 380 ... 420 К. Наведено вплив регенерації теплової та механічної енергії на ККД установки, а також встановлено, що збільшення об'ємної концентрації металогідридного матеріалу в рідині-носії з 0,1 до 0,3 призведе до збільшення ККД металогідридної установки з 0,05 до 0,13.

Ключові слова: Утилізаційна установка, малообертовий двигун, стаціонарна електростанція, робоче тіло, металогідридна суспензія, водень.

M.R. Tkach, B.G. Timochevskiy, S.M. Docenko, Y.N. Halynkin. Heat recovery from waste energy low-speed engines stationary power plant metal hydride continuous plant

Compiled by the heat balance diagram of low-speed engines MAN 12K90MC-S stationary power plants. It was found that the use as a working body of the component metal hydride material $ZrCrFe_{1,2}$ achieves efficiency of the plant by 21%. It is found that the maximum value corresponds to the efficiency of desorption temperature of 380 ... 420 K. Regeneration Powered influence of heat and mechanical energy to the efficiency of the installation, and also found that increasing the concentration of the metal hydride bulk material in the carrier liquid with 0.1 to 0.3 would increase the efficiency of metal hydride units with 0.05 to 0.13.

Keywords: Utilization plant, low-speed engine, stationary power plant, the working fluid, metal hydride slurry, hydrogen.