

**А. К. ЧЕРЕДНИЧЕНКО, М. Р. ТКАЧ**

**ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
УТИЛИЗАЦИОННОЙ МЕТАЛЛОГИДРИДНОЙ УСТАНОВКИ  
ДВУХТОПЛИВНОГО МАЛОБОРОТНОГО ДВС ГАЗОВОЗА**

**АННОТАЦИЯ** Проанализирована возможность применения сжиженного природного газа в судовой энергетике. Выявлена перспективность утилизации сбросного тепла малооборотных дизельных двигателей применением металлгидридных установок непрерывного действия. Представлена расчетная схема установки и параметры рабочих сред. Приведены результаты математического моделирования процессов в утилизационной металлгидридной установке. Выявлена устойчивость работы утилизационной металлгидридной установки в различных климатических условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** LNG-газовоз, утилизационная установка, малооборотный двигатель, металлгидридная суспензия, водород.

**О. CHEREDNICHENKO, M. TKACH**

**INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS ON THE EFFICIENCY OF DISPOSAL METAL-HYDRIDE UNIT FOR THE DOUBLE-FUEL LOW-SPEED INTERNAL COMBUSTION ENGINE OF GAS TANKERS**

**ABSTRACT** Contemporary tendencies in the development of ship power engineering have been analyzed. Consideration was given to the specific features of the transportation of liquefied natural gas by gas tankers. The prospects of utilization of the secondary energy resources of marine double-fuel low-speed diesel engines were defined. The metal hydride units of a continuous action were offered for this purpose. The need for the estimation of the influence of climatic factors on the efficiency of disposal metal-hydride unit has been defined. We proposed to carry out the investigation using the methods of mathematical simulation. The model takes into consideration the main physical relations, in particular material and thermal balances, the phase equilibrium, and heat-mass transfer processes. A relative power of disposal metal-hydride unit was taken as the efficiency criterion. The investigation was carried out with the regard to the propulsive unit of gas tanker of a Q-max type with the propulsion engine 9G80ME. The design diagram of the unit and the parameters of working media have been presented. The data of mathematical simulation of processes have been given. The disposal metal-hydride unit showed a reliable operation in different climatic operation conditions. A specific power of the disposal unit ranged from 5.7 to 6.2 %. The mechanical power of disposal unit was equal to 2.5 MW that enables the drive of the fuel gas compressor of propulsion engine and attached electric generator.

**Key words:** LNG-gas tanker, disposal unit, low-speed engine, metal-hydride suspension, and hydrogen.

**Введение**

Анализ тенденций развития судовой энергетики позволяет выявить два основных тренда – жесткая регламентация выбросов и дальнейшее повышение энергетической эффективности. Это связано с приоритетностью вопросов борьбы с загрязнением окружающей среды. ИМО в своих резолюциях указывает на необходимость для каждого нового судна валовой вместимостью 400 и более тонн определять требуемый (*Required*) и достижимый (*Attained*) конструктивный индекс энергетической эффективности судна *EEDI* (*Energy Efficiency Design Index*), а также операционный индекс *EEOI* (*Energy Efficiency Operational Index*) при проектировании, постройке и эксплуатации судна [1]. Физический смысл индексов идентичен и представляет собой отношение массы произведенного энергетической установкой судна парникового газа CO<sub>2</sub> к величине транспортной работы судна за определенный период времени, регламентируемое при проектировании новых судов (*EEDI*) и в процессе эксплуатации (*EEOI*)

$$EEDI = \frac{CO_2 \text{ emission}}{\text{Transport work}}$$

Сокращение CO<sub>2</sub> образующегося при работе энергетической установки, может быть достигнуто как уменьшением расхода топлива, так и применением топлива с низким содержанием углерода. Таким топливом является природный газ.

К 2035 году почти половина природного газа будет транспортироваться судами газовозами *LNG* (*Liquid Natural Gas*) [2]. Мировой спрос на *LNG* удвоился за последние 10 лет и составляет более 200 миллионов тонн ежегодно. Согласно данным *World LNG Market Forecast 2016–2020* капитальные вложения в рынок *LNG* составят \$241 млрд в период между 2016 и 2020 гг. Флот газовозов, которые еще называют «плавающими трубопроводами» составляет 444 судна, кроме того еще 119 судов составляют «портфель заказов» (*Lloyd's List Intelligence*, 2016).

Сжиженный природный газ транспортируется при атмосферном давлении и при температурах ниже точки кипения метана (-161,5 °C). Это

позволяет уменьшить объем перевозимого груза примерно в 600 раз.

В качестве критерия оценки потерь испарившегося в процессе перевозки газа (*BOG – Boil-Off Gas*) принята величина скорости испарения груза (*BOR – Boil Of Rate*), которая определяется как процентное отношение потерь за сутки  $V_{BOG}$  к общему объему перевозимого груза  $V_{LNG}$

$$BOR = \frac{V_{BOG}}{V_{LNG}},$$

где *BOR* – %/сут.

По данным [3] для современных газозовозов в грузовом рейсе *BOR* = 0,1–0,15 %, в балластном рейсе 0,06–0,1 %, в зависимости от конструктивной схемы и поколения судна. Испарившийся газ может быть использован в качестве топлива в энергетической установке или обработан в установке повторного сжижения.

Современные малооборотные дизельные двигатели (МОД) являются основой судовой энергетики. Они имеют высокий КПД, превышающий 50 % и большую агрегатную мощность, что обеспечило возможность применения таких двигателей на большинстве типов морских транспортных судов.

Ведущие производители судовых малооборотных дизельных двигателей адаптировали свою продукцию для работы на метане и других альтернативных видах топлива. При работе двухтопливных МОД, около 3–5 % приходится на запальную дозу жидкого топлива («пилотное» топливо), которым является дизельное топливо. Газообразное топливо (метан) подается в двигатель под давлением 25...30 МПа [4], при этом затраты мощности на привод компрессорной установки газообразного топлива составляют 2,8–3 % мощности двигателя [5]. Такие двигатели применяются на газозовозах *LNG*, где в качестве топлива используется *BOG* (рис. 1).

Резервом повышения энергоэффективности судна с малооборотной дизельной пропульсивной установкой является утилизация энергии вторичных энергоресурсов. Для установки с МОД это выхлопные газы, надувочный воздух, охлаждающая вода и циркуляционное масло, которые обладая достаточно существенным энергетическим потенциалом, являются низкотемпературными, что затрудняет их утилизацию.

В научно-исследовательском институте «Энергетики и машиностроения» Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова проведен ряд исследований, посвященных проблемам утилизации вторичных энергоресурсов тепловых двигателей. Выявлена перспективность утилизации сбросного тепла малооборотных дизельных двигателей применением металлургических установок непрерывного действия [6–8]. Технологическая схема такой установки подробно описана в работах [9] и включает в себя:

теплообменные аппараты отвода тепла сбросных энергоресурсов, десорбера, перегревателя водорода, расширительной машины, насоса перекачки металлургической суспензии, насосов теплоносителей горячего и холодного контуров, адсорбера, регенератора и регенерационного турбнасосного агрегата. Эффективность такой установки в значительной мере определяется параметрами окружающей среды, которые для транспортного судна могут изменяться в достаточно широких пределах.

Представляет интерес анализ влияния климатических факторов на эффективность утилизационных металлургических установок в составе энергокомплексов с малооборотной пропульсивной установкой газозовозов *LNG*.

### Цель работы

Оценка методами математического моделирования влияния климатических факторов на эффективность утилизационной металлургической установки, работающей в составе судового пропульсивного комплекса на базе малооборотного двухтопливного дизельного двигателя.

### Изложение основного материала

Эффективность судовой утилизационной металлургической установки может быть исследована методами математического моделирования, при этом многовариантность схемных решений требует выявления взаимосвязей ее элементов методами системного анализа.

При исследовании энергетической установки газозовоза целесообразно рассматривать ее как три основных взаимосвязанных компонента: главные двигатели, электроэнергетическое оборудование и системы обработки испаряющегося в процессе транспортировки газа.

Современные объектно-ориентированные подходы к проектированию сложных технических систем [10, 11] предполагают совмещение принципов стратегии функциональной декомпозиции с инкапсуляцией подсистем. Исходя из этого, при моделировании процессов в энергокомплексе на базе главного МОД с утилизационной металлургической установкой структурная схема может быть представлена в виде системы из трех функционально взаимосвязанных подсистем (рис. 1):

- энергетической подсистемы, в которой химическая энергия топлива преобразуется в механическую, электрическую и тепловую энергию;
- подсистемы утилизации тепла, предназначенной для преобразования сбросной теплоты энергетической подсистемы в механическую, электрическую и тепловую виды энергии;
- подсистемы обработки испаряющегося в процессе транспортировки груза.

Связь между элементами подсистем осуществляется потоками энергоносителей (теплоносителей и рабочих тел циклов), посредством которых осуществляются процессы энергетического взаимодействия между подсистемами и в целом, в энергетической установке.

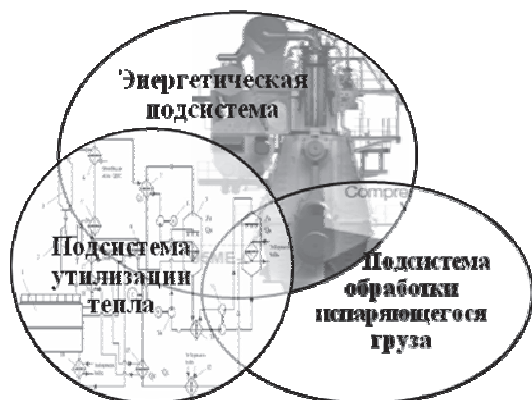


Рис. 1 – Общая структура модели энергетической установки газовоза

При математическом моделировании процессов в энергетической подсистеме основными параметрами являются параметры (давление, температура, расход) рабочих сред и вторичных энергоресурсов.

Для определения этих параметров возможно использование специальных программных продуктов, размещаемых производителями двигателей на официальных сайтах. При дальнейшем исследовании для двигателей *MAN Diesel & Turbo SE* использовалась *on-line* программа *CEAS Engine Calculations*, размещенная на официальном сайте [marine.man.eu](http://marine.man.eu). Программа позволяет определить удельный расход топлива, количество и температуру отходящих газов за двигателем, а также тепловой баланс двигателя в зависимости от степени его нагружения и параметров окружающей среды.

При моделировании процессов испарения перевозимого груза применялись методики и алгоритмы сформулированные в [12, 13]. Согласно [13, 14] основными компонентами испаряющегося в процессе транспортировки груза являются метан (92...98 %) и азот (2...8 %). Азот является балластной составляющей.

В качестве критерия эффективности утилизационной металлгидридной установки принята относительная мощность установки  $\bar{N}$ , представляющая собой отношение механической мощности утилизационной установки  $N_{\text{мехУУ}}$  к мощности главного двигателя  $N_{\text{ГД}}$ . Согласно подходам, сформированным в [7], механическая мощность утилизационной установки определяется с учетом затрат мощности на перекачку суспензии  $N_{\text{сп}}$ , а также на привод насосов циркуляции горячего  $N_{\text{нг}}$  и холодного теплоносителя  $N_{\text{хх}}$

$$N_{\text{мехУУ}} = N_{\text{пс}} - N_{\text{сп}} - N_{\text{нг}} - N_{\text{хх}},$$

где  $N_{\text{пс}}$  – мощность, полученная в водородной расширительной машине.

В дальнейшем исследовании рассмотрена утилизационная металлгидридная установка, источником тепла в которой служит промежуточный теплоноситель, циркуляцию которого обеспечивает циркуляционный насос параллельно через утилизационные теплообменники отходящих газов и наддувочного воздуха за турбокомпрессором. Схема установки предусматривает регенерацию тепловой энергии в регенерационном теплообменнике, и регенерацию механической энергии в гидродвигателе, приводящем подкачивающий насос металлгидридного контура. Благодаря этому уменьшаются затраты мощности на перекачку гидридной суспензии.

Исследование проводилось применительно к пропульсивной установке газовоза типа *Q-max* грузоподъемностью 265 тыс. м<sup>3</sup> сжиженного природного газа. В качестве главного двигателя (ГД) рассмотрен современный двухтопливный малооборотный дизельный двигатель *9G80ME-C9.5-GI* фирмы *MAN Diesel & Turbo*, основные характеристики которого приведены в табл. 1.

Характеристики двигателя приняты в соответствии с **ограничениями IMO Tier II**. Доля пилотного топлива (*MDO* по *ISO 8217*) составляет 3 %. Базовый расчет был проведен на условия *ISO*: температура воздуха  $T_a = 298$  К; температура охлаждающей забортной воды  $T_{\text{sw}} = 298$  К.

Расчетная схема установки, созданная с помощью системы моделирования химико-физических процессов *Aspen Plus* представлена на рис. 2.

Модель учитывает основные физические соотношения: материальный и тепловой балансы; фазовое равновесие; процессы тепло- и массопередачи.

Таблица 1 – Характеристики двигателя *9G80ME-C9.5-GI* по *ISO 3046/1-2002* при 100 % нагружении

Параметр	Размерность	Величина
Спецификационная длительная мощность	кВт	42390
Частота вращения	мин <sup>-1</sup>	72
Среднее эффективное давление	бар	21
Давление наддува		4,2
Удельный расход: газа	г/(кВт·ч)	136,7
пилотного топлива		5
Отходящие газы: расход	кг/с	91,2
температура*		К

\*За турбокомпрессором.

Определение затрат мощности на перекачивание рабочих сред, потребовало моделирования процессов в теплообменных аппаратах. В результате рассчитаны геометрические характеристики теплообменных поверхностей и гидравлические сопротивления типовых кожухотрубных (стандарт ТЕМА) теплообменников при заданных в расчетной схеме параметрах. Гидравлические сопротивления составили 20 и 30 кПа по холодной и горячей сторонам, соответственно.

В качестве промежуточного теплоносителя был принят *Therminol*® 66 – синтетическая органическая жидкость с максимальной рабочей температурой 345 °С. Рабочим телом в металлгидридном контуре принята суспензия  $MmNi_{4,5}Al_{0,5}$  в *Therminol*® 66.

Основные параметры сред в цикле представлены в табл. 2 (условия ISO).

Относительная мощность утилизационной металлгидридной установки составила  $\bar{N} = 0,06$ . Регенерация механической энергии в гидродвигателе, приводящем подкачивающий насос металлгидридного контура, позволила увеличить мощность установки на 13 % (рис. 3).

Согласно данным фирмы *MAN Diesel & Turbo* затраты мощности в установке подачи *BOG* в ГД *9G80ME* составляют 1,2 МВт. Механическая

мощность утилизационной установки около 2,5 МВт, что позволяет сделать вывод о возможности привода компрессора подачи газа от водородной расширительной машины, при этом, избыток мощности может быть использован для привода генератора электрического тока.

При моделировании влияния климатических условий учитывалась география основных маршрутов эксплуатации газозовов *LNG* (рис. 4).

Для двух климатических режимов (тропические условия и умеренный режим) посредством *on-line* программы *CEAS Engine Calculations* ([marine.man.eu](http://marine.man.eu)) определены параметры вторичных энергоресурсов двигателя (табл. 3).

### Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что мощность утилизационной металлгидридной установки незначительно зависит от климатических условий эксплуатации.

Изменение мощности для климатических условий отличных от *ISO* составило 3–5 %. Повышение температуры окружающей среды (тропические условия) приводит к некоторому росту эффективности утилизационной металлгидридной установки (рис. 5).

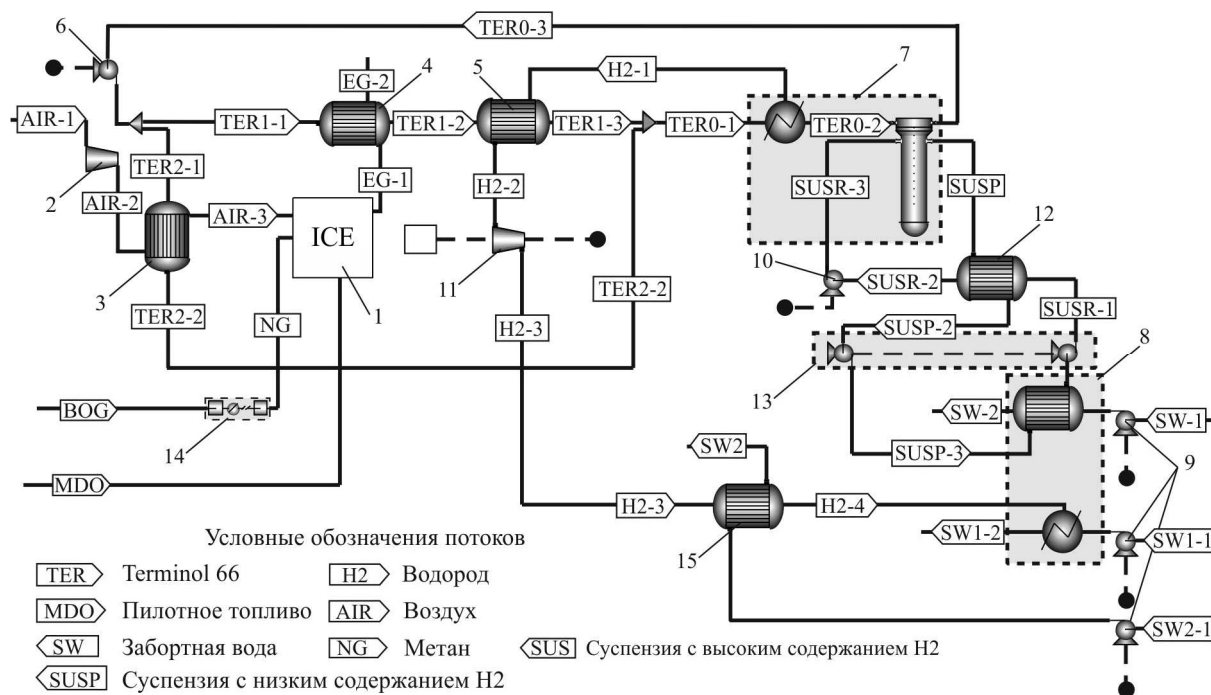


Рис. 2 – Упрощенная расчетная схема утилизационной металлгидридной установки:  
 1 – МОД; 2 – турбокомпрессор; 3, 4 – утилизационные теплообменники охладителя надвучного воздуха и отходящих газов; 5 – перегреватель водорода; 6 – циркуляционный насос контура нагрева; 7 – десорбер; 8 – сорбер; 9 – насосы контура охлаждения; 10 – питательный насос; 11 – водородная расширительная машина; 12 – регенерационный теплообменник; 13 – турбонасосный агрегат; 14 – компрессор топливного газа; 15 – охладитель водорода

Таблица 2 – Параметры рабочих сред

Поток	Температура среды, К	Давление среды, МПа	Массовый расход, кг/с
Воздух			
AIR-1	298	0,10	89,50
AIR-2	471	0,42	89,50
AIR-3	353	0,39	89,50
Отходящие газы			
EG-1	509	0,12	91,20
EG-2	354	0,10	91,20
Топливо			
BOG	173	0,10	1,61
NG	318	30,00	1,61
MDO	298	0,3	0,06
Контур промежуточного теплоносителя			
TER1-1	341	4,00	45,00
TER1-2	502	3,98	45,00
TER1-3	480	3,95	45,00
TER2-1	341	4,00	45,00
TER2-2	462	3,98	45,00
TER0-1	471	3,95	90,00
TER0-2	384	3,93	90,00
TER0-3	341	3,90	90,00
Контур металлгидрида			
SUSP-1	364	3,75	214,30
SUSP-2	341	3,72	214,30
SUSP-3	341	0,81	214,30
SUSR-1	308	3,19	214,0
SUSR-2	333	3,17	214,30
SUSR-3	333	3,77	214,30
Контур водорода			
H2-1	364	3,77	1,150
H2-2	495	3,75	1,150
H2-3	339	0,81	1,150
H2-4	308	0,79	1,150
Контур охлаждающей воды			
SW-1	298	0,1	100
SW-2	314	0,2	100
SW1-1	298	0,1	30
SW1-2	308	0,2	30
SW2-1	298	0,1	400
SW2-2	302	0,2	400

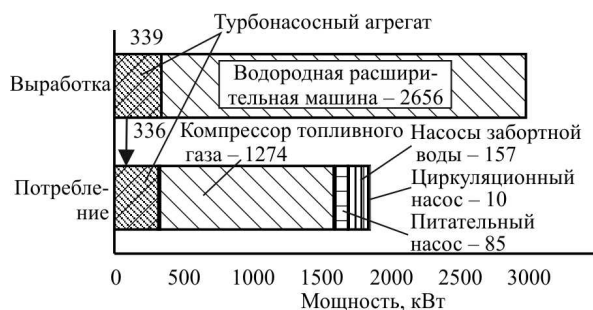


Рис. 3 – Составляющие механической мощности утилизационной металлгидридной установки

LNG Trade Flows—2013

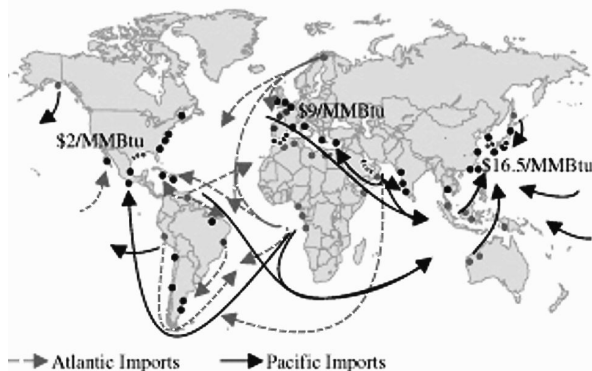


Рис. 4 – Основные маршруты газозовов LNG [15]

Таблица 3 – Характеристики климатических режимов

Параметр	Размерность	Величина
Тропические условия: $T_a = 318\text{K}$ ; $T_{sw} = 309\text{K}$		
Удельный расход топливного газа	г/(кВт·ч)	138,2
Отходящие газы : расход температура **	кг/с К	84,4 542
Расход надувочного воздуха	кг/с	82,7
Умеренный режим: $T_a = 283\text{K}$ ; $T_{sw} = 283\text{K}$		
Удельный расход топливного газа	г/(кВт·ч)	135,0
Отходящие газы : расход температура **	кг/с К	94,8 483
Расход надувочного воздуха	кг/с	93,2

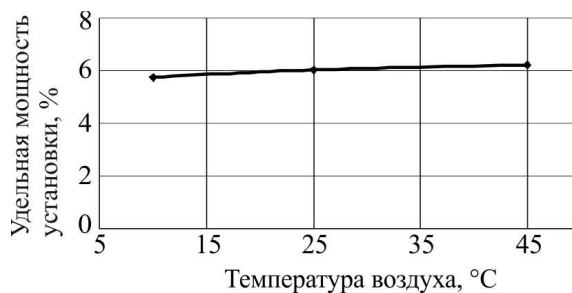


Рис. 5 – Зависимость  $\bar{N}$  от температуры окружающей среды

Для принятых параметров металлгидридного контура и располагаемого диапазона температур вторичных энергоресурсов удельная мощность утилизационной установки составила 5,7...6,2 %.

Повышение мощности утилизационной металлгидридной установки может быть достигнуто за счет повышения температуры водорода перед расширительной машиной. При этом часть BOG может быть использована в качестве топлива в дожигающем устройстве для повышения потенциала контура промежуточного теплоносителя.

**Выводы**

1 Удельная мощность утилизационной металлгидридной установки 5,7...6,2 % позволяет осуществить привод компрессора топливного газа ГД и навесного электрогенератора от водородной расширительной машины.

2 Выявлена устойчивость работы утилизационной металлгидридной установки в различных климатических условиях эксплуатации.

3 Перспективным направлением повышения эффективности утилизационной металлгидридной установки является повышение температуры водорода перед расширительной машиной за счет сжигания избытка *BOG* в дожигающем устройстве.

**Список литературы**

- 1 IMO Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation. Module 2 – Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines. [Электронный ресурс]. – 2016 – Режим доступа: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20pollution/M2%20EE%20regulations%20and%20guidelines%20final.pdf>. – 06.02.2017.
- 2 BP Energy Outlook 2035 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2016/bp-energy-outlook-2016.pdf>. – 06.02.2017.
- 3 **Glomski, P.** Problems with Determination of Evaporation Rate and Properties of Boil-off Gas on Board LNG Carriers / **P. Glomski** and **R. Michalski** // *Journal of Polish Cimac, Energetic aspects*. – Gdańsk, 2011. – Vol. 6, No. 1. – P. 133–140.
- 4 ME-GI Dual Fuel MAN B&W Engines. MAN Diesel & Turbo. 5510-0063-06ppr Aug. 2014. – Режим доступа: <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/me-gi-dual-fuel-man-b-amp-w-engines433833f0bf5969569b45ff0400499204.pdf?sfvrsn=34>. – 16.01.2017.
- 5 LNG Carriers with ME-GI Engine and – High Pressure Gas Supply System. MAN Diesel & Turbo. 5510-0026-04ppr Sep 2014. – Режим доступа: <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/lng-carriers-with-high-pressure-gas-supply-system.pdf?sfvrsn=16>. – 16.01.2017.
- 6 **Ткач, М. Р.** Удельная мощность металлгидридных утилизационных установок непрерывного действия / **М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С. М. Доценко, Ю. Н. Галынкин** // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 10(127) – С. 106–110. – ISSN 1727-7337.
- 7 **Ткач, М. Р.** Утилизация тепла вторичных энергоресурсов малооборотных двигателей стационарных электростанций металлгидридными установками непрерывного действия / **М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С. М. Доценко, Ю. Н. Галынкин** // *Вестник двигателестроения*. – 2016. – № 2. – С. 31–35. – ISSN 1727-0219.
- 8 **Ткач, М. Р.** Влияние регенерации энергии на эффективность утилизации низкопотенциального тепла металлгидридной установкой непрерывного действия / **М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С. М. Доценко, Ю. Н. Галынкин** // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2014. – № 2. – С. 57–62. – ISSN 0419-8719.

- 9 **Ткач, М. Р.** Утилизация низкопотенциального тепла ДВС 9G80ME металлгидридной установкой непрерывного действия / **М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С. М. Доценко, Ю. Н. Галынкин** // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2014. – № 1. – С. 35–41. – ISSN 0419-8719.
- 10 **Gaspar, H. M.** Handling Complexity Aspects in Conceptual Ship Design / **H. M. Gaspar, A. Ross, D.H. Rhodes, S. Erikstad** // *Int'l Maritime Design Conference*. – Glasgow, UK, June 2012 – P. 150–160. – doi: 10.3940/rina.ijme.2012.a3.230.
- 11 **Erikstad, S. O.** A Ship Design and Deployment Model for Non-Transport Vessels / **S. O. Erikstad, S. Solem, K. Fagerholt** // *Ship Technology Research*. – September 2011. – Vol. 58, No 3. – P. 132–141.
- 12 **Dimopoulos, G. G.** Thermoeconomic Simulation of Marine Energy Systems for a Liquefied Natural Gas Carrier / **George G. Dimopoulos, Christos A. Frangopoulos** // *Int. J. of Thermodynamics*. December 2008. – Vol. 11, No. 4. – P. 195–201. – doi: 10.5541/ijot.228.
- 13 **Dimopoulos, G. G.** A Dynamic Model for Liquefied Natural Gas Evaporation During Marine Transportation / **George G. Dimopoulos, Christos A. Frangopoulos** // *Int. J. of Thermodynamics*. – September 2008. – Vol. 11, No. 3. – P. 123–131. – doi: 10.5541/ijot.220.
- 14 **Dobrota, D.** Problem of Boil – off in LNG Supply Chain / **D. Dobrota, B. Lalik, V. Komar** // *Transactions ON Maritime Science*. – 2013. – No 02. – P. 91–100. – doi: 10.7225/toms.v02.n02.001.
- 15 Høegh LNG Partners LP, September 1, 2014 – Режим доступа: <https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1603016/000119312514302189/d701161d424b4.htm>. – 06.02.2017.

**Bibliography (transliterated)**

- 1 (2016), *IMO Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation. Module 2 – Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines*, available at: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20pollution/M2%20EE%20regulations%20and%20guidelines%20final.pdf> (accessed 6 February 2017).
- 2 (2016), *BP Energy Outlook 2035*, available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2016/bp-energy-outlook-2016.pdf> (accessed 6 February 2017)
- 3 **Glomski, P. and Michalski, R.** (2011), "Problems with Determination of Evaporation Rate and Properties of Boil-off Gas on Board LNG Carriers", *Journal of Polish Cimac, Energetic aspects*, Vol. 6, No. 1, pp. 133–140.
- 4 (2014), ME-GI Dual Fuel MAN B&W Engines. MAN Diesel & Turbo. 5510-0063-06ppr Aug 2014, available at: <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/me-gi-dual-fuel-man-b-amp-w-engines433833f0bf5969569b45ff0400499204.pdf?sfvrsn=34> (accessed 16 January 2017).
- 5 (2014), LNG Carriers with ME-GI Engine and – High Pressure Gas Supply System. MAN Diesel & Turbo. 5510-0026-04ppr Sep 2014, available at: <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/lng-carriers-with-high-pressure-gas-supply-system.pdf?sfvrsn=16> (accessed 16 January 2017).
- 6 **Tkach, M. P., Timoshevskij, B. G., Docenko, S. M. and Galynkin, J. N.** (2015), "Udel'naja moshnost' metallogidridnyh uutilizacionnyh ustanovok nepreryvnogo dejstvija [Specific power the metal hy-

- drude utilization continuous power plants]", *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija [Aerospace technic and technology]*, No. 10(127), pp. 106–110, ISSN 1727-7337.
- 7 Tkach, M. P., Timoshevskij, B. G., Docenko, S. M. and Galynkin, J. N. (2016), "Utilizacija tepla vtorychnyh jenergoresursov malooborotnyh dvigatelej stacionarnykh jelektrostantsij metallogidridnymi ustanovkami nepreryvnogo dejstvija [Heat recovery from waste energy low-speed engines stationary power plant metal hydride continuous plant]", *Vestnik dvigatelestronij [Herald of Air-engine Building]*, No. 2, pp. 31–35, ISSN 1727-0219.
  - 8 Tkach, M. P., Timoshevskij, B. G., Docenko, S. M. and Galynkin, J. N. (2014), "Vlijanie regeneracii jenerгии na jeffektivnost' utilizacii nizkopotencial'nogo tepla metallogidridnoj ustanovkoj nepreryvnogo dejstvija [Influence of the energy recuperation on low-grade heat recovery in the metalhydride installation of continuous operation]", *Dvigateli vnutrennego sgoranija [Internal Combustion Engines]*, No. 2, pp. 57–62, ISSN 0419-8719.
  - 9 Tkach, M. P., Timoshevskij, B. G., Docenko, S. M. and Galynkin, J. N. (2014), "Utilizacija nizkopotencial'nogo tepla DVS 9G80 ME metallogidridnoj ustanovkoj nepreryvnogo dejstvija [Low grade heat recovery from ice 9G80 ME by the metal-hydride installation of continuous operation]", *Dvigateli vnutrennego sgoranija [Internal Combustion Engines]*, No. 1, pp. 35–41, ISSN 0419-8719.
  - 10 Gaspar, H. M., Ross, A., Rhodes, D. H. and Erikstad, A. S. (2012), "Handling Complexity Aspects in Conceptual Ship Design", *Int'l Maritime Design Conference*, Glasgow, UK, pp. 150–160, doi: 10.3940/rina.ijme.2012.a3.230.
  - 11 Erikstad, S.O., Solem, S. and Fagerholt, A. (2011), "A Ship Design and Deployment Model for Non-Transport Vessels", *Ship Technology Research*, Vol. 58 No. 3, pp. 132–141
  - 12 Dimopoulos, G. G., Christos, A. and Frangopoulos, A. (2008), "Thermoeconomic Simulation of Marine Energy Systems for a Liquefied Natural Gas Carrier", *Int. J. of Thermodynamics*, Vol. 11 No. 4, pp. 195–201, doi: 10.5541/ijot.228.
  - 13 Dimopoulos, G. G., Christos, A. and Frangopoulos, A. (2008), "A Dynamic Model for Liquefied Natural Gas Evaporation During Marine Transportation", *Int. J. of Thermodynamics*, Vol. 11 No. 3, pp. 123–131, doi: 10.5541/ijot.220.
  - 14 Dobrota, D., Lalik, B. and Komar, B. (2013), "Problem of Boil – off in LNG Supply Chain", *Transactions on Maritime Science*, No. 02, pp. 91–100, doi: 10.7225/toms.v02.n02.001.
  - 15 (2014), *Höegh LNG Partners LP*, September 1, available at: <https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1603016/000119312514302189/d701161d424b4.htm> (accessed 6 February 2017).

## Сведения об авторах (About authors)

**Чередниченко Александр Константинович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, доцент кафедры судовых и стационарных энергетических установок; г. Николаев, Украина; e-mail: [cherednichenko.aleksandr65@gmail.com](mailto:cherednichenko.aleksandr65@gmail.com), ORCID 0000-0003-5745-8117.

**Cherednichenko Oleksandr Costyntunovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Ship and Stationary Power Plants, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine.

**Ткач Михаил Романович** – доктор технических наук, профессор, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, заведующий кафедрой инженерной механики и технологии машиностроения; г. Николаев, Украина; e-mail: [mykhaylo.tkach@gmail.com](mailto:mykhaylo.tkach@gmail.com), ORCID 0000-0003-4944-7113.

**Tkach Mykhaylo Romanovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, head Department of Engineering Mechanics and Mechanical Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine.

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Чередниченко, А. К.** Влияние климатических факторов на эффективность утилизационной металлогидридной установки двухтопливного малооборотного ДВС газовоза / **А. К. Чередниченко, М. Р. Ткач** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 10(1232). – С. 85–91. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.12.

*Please cite this article as:*

**Cherednichenko, O. and Tkach, M.** (2017), "Influence of Climatic Factors on the Efficiency of Disposal Metal-Hydride Unit for the Double-Fuel Low-Speed Internal Combustion Engine of Gas Tankers", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1232), pp. 85–91, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.12.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Чередніченко, О. К.** Вплив кліматичних факторів на ефективність утилізаційної металогідридної установки двопаливного малооборотного ДВЗ газовозу / **О. К. Чередніченко, М. Р. Ткач** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 10(1232). – С. 85–91. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.12.

**АНОТАЦІЯ** Проаналізована можливість застосування зрідженого природного газу в судовій енергетиці. Виявлено перспективність утилізації скидного тепла малооборотних дизельних двигунів застосуванням металогідридних установок безперервної дії. Представлена розрахункова схема установки і параметри робочих середовищ. Наведено результати математичного моделювання процесів в утилізаційній металогідридної установці. Виявлено стійкість роботи утилізаційної металогідридної установки в різних кліматичних умовах експлуатації.

**Ключові слова:** LNG-газовіз, утилізаційна установка, малооборотний двигун, металогідридна суспензія, водень.

*Поступила (received) 17.02.2017*