

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ СУДНОВОЇ ТЕРМОАКУСТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГАЗИФІКАЦІЇ LNG ПАЛИВ

Коробко В.В., Московко О.О., Тимошенко Д.О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала С.О. Макарова, м. Миколаїв

На судах, енергетичні установки яких споживають метан, застосовуються спеціальні системи регазифікації. В більшості LNG систем для регазифікації скрапленого газу використовують теплоту забортної води, або теплоносіїв систем СЕУ. Скраплений природний газ є носієм «кріогенної енергії». Частіше за все цей «кріогенний» потенціал LNG палива не використовується. Існує принципова можливість утилізувати цей енергетичний потенціал з допомогою термоакустичних теплових машин. Термоакустичні технології потенційно здатні забезпечити можливість для вдосконалення енергетичної ефективності СЕУ завдяки утилізації низькотемпературних скидних теплових ресурсів. Для СЕУ LNG танкеру розроблена принципова схема термоакустичної енергогенеруючої системи регазифікації кріогенного палива. З допомогою програми DELTA ЕС проведені варіантні розрахунки кріогенних ТАД різних потужностей, наведені результати чисельного моделювання. В результаті були визначені найбільш раціональні конструкції кріогенних ТАД і задачі для подальших досліджень.

Ключові слова: СЕУ, LNG палива, скидні енергетичні ресурси, термоакустика, регазифікація, теплові машини.

Постановка проблеми. Судноплавство завжди було важливою складовою світової економіки, тому загальні тенденції неодмінно знаходять відображення в судновій техніці. Характерними рисами сьогодення є наявність комплексу жорстких умов відносно економічності, енергоефективності й екологічної безпеки енергетичного обладнання. У складі ЕУ сучасних суден використовуються новітні високоефективні двигуни, характеристики яких задовольняють вимогам TIER II і TIER III, стрімко зростає чисельність суден, які використовують газове паливо. Суттєвих змін зазнали складові теплового балансу СЕУ, з'явилися джерела енергії з кріогенною температурою (LNG палива), зменшилась температура відходячих газів ГД, зросла температура повітря після турбонагнітачів.

Ці обставини вимагають розробки нових інноваційних заходів енергозбереження в судновій енергетиці. Можливим варіантом може стати використання термоакустичних технологій.

Наявні дослідження виконувались з метою вивчення можливостей використання термоакустичних теплових машин у складі СЕУ шляхом створення енергогенеруючих систем регазифікації LNG палива.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі чисельні приклади використання термоакустичних теплових машин (ТАТМ) у кріогенних технологіях. Існують проекти та створені діючі установки скраплення природного газу, які планувалось використовувати на судах FPSO [1]. ТАТМ здатні ефективно працювати у складі кріогенних систем, оскільки для їх роботи потрібна лише наявність повздовжнього градієнту температури в стеку, при цьому абсолютні значення температур неважливі.

Можливість роботи «кріогенного» термоакустичного двигуна була підтверджена експериментально в роботі [2]. Раніше в роботах [3, 4] було запропоновано створити енергогенеруючі системи регазифікації LNG палива з використанням ТАТМ. Такі системи у змозі забезпечити генерацію електричної енергії або роботу термоакустичного теплового насоса (рефрижератору) за рахунок утилізації низькотемпературних складових ВЕР, в тому разі і кріогенних.

Ціль роботи – за допомогою чисельного моделювання установити можливу ефективність суднової енергогенеруючої системи регазифікації LNG палива на базі термоакустичних теплових машин і визначити оптимальні конструктивні співвідношення.

Викладення основного матеріалу. В якості базового об'єкту для досліджень була обрана ЕУ LNG танкеру «Coral Energy» з двопаливний ГД Wartsila 8L50DF, який працює на рідинному паливі і на природному газі – метані. ГД може споживати як випар вантажу, так і газ з окремої системи регазифікації. На початку даної роботи були визначені складові ВЕР ГД на ходовому режимі (табл. 1) [5].

Таблиця 1 – ВЕР головного двигуна Wartsila 8L50DF при роботі на LNG паливі

Теплоносій або джерело ВЕР		Кількість теплоти ВЕР, кВт	Температура	
			°C	K
Відхідні гази ГД		1775	385	448
Теплообмінник надувного повітря (HT)		1147	91	364
Теплообмінник надувного повітря (LT)		667	38	311
Система охолодження двигуна		671	91	364
Маслоохолоджувач ГД		627	78	351
Кріогенна енергія LNG палива		300	-162	111
В тому разі	Скраплений LNG, (тиск 0,5 МПа)	30	-(162 – 141)	111 – 132
	Теплота випаровування LNG	270	-141	111

Наведена інформація, показує наявний потенціал ВЕР ЕУ обраного судна. Частина ВЕР, з температурою вищою за довкілля, утилізується у традиційний спосіб за допомогою утилізаційного котла та опріснювальної установки. Зрозуміло, що велика кількість низькотемпературних ВЕР не використовується, формуючи теплове забруднення довкілля.

Основна ідея розробки полягає в тому, що замість нагрівачів скрапленого газу пропонується використати блок з декількох низькотемпературних ТАД з циклом Брайтона (стояча хвиля). Модуль термоакустичних перетворень (МТП) ТАД, завдяки термодинамічній незворотності робочого циклу, має забезпечити підвищення температури скрапленого метану майже до рівня кипіння, одночасно виробляючи електричну енергію для загальносуднових потреб. Таким чином, система регазифікації буде спроможна утилізувати наявну енергію джерел низькопотенційних ВЕР СЕУ – скидну теплоту системи охолодження ГД і кріогенний потенціал LNG.

Гradient температур в матриці, потрібний для роботи «кріогенного» ТАД [4], забезпечується за рахунок різниці в температурах теплоносіїв, які прокачуються скрізь теплообмінники МТП, а саме між рідиною системи охолодження ГД (91 °C) та температурою LNG палива – (162 – 141) °C. Оскільки ТАТМ в якості робочого тіла використовується чистий гелій повністю виключаються можливі проблеми, пов'язані з намерзанням льоду на зовнішніх поверхнях теплообмінників.

У даній роботі було проведено числове дослідження характеристик низки «кріогенних» ТАД, які відрізнялися діаметром робочої частини МТП, характеристики ТАД показані в табл. 2.

Таблиця 2 – Характеристики модельованих ТАД

Діаметр ТАД	мм	130	250	380
Довжина	мм	4900	4900	4900
Потужність ВЕР	кВт	1–4	5–20	25–40
Робоча частота	Гц	50–60	50–60	50–60
Розмір каналу в стеку	мм	0,9*0,9	0,9*0,9	0,9*0,9

У практиці термоакустики прийнято, що коли в якості стоку теплової енергії розглядається оточуюче середовище, то маємо «heat-source driven thermoacoustic engine – НТЕ», та коли температура стоку значно нижча за температуру довкілля – відповідно маємо «cold-source-driven thermoacoustic engine – СТЕ».

Конструктивно «криогенний» ТАД системи регазифікації являє собою напівхвильовий резонатор з приєднаним до нього блоком лінійного електрогенератора (рис. 1).

У порожнині резонатору розташований модуль термоакустичного перетворювача, який складається з пористої керамічної матриці та двох теплообмінників трубчасто-ребристих теплообмінників – нагрівача й охолоджувача, робоча рідина в резонаторі – гелій з тиском 0.1 мПа. Конструкція ТАТМ дозволяє компанувати блоки різної потужності, відповідно до наявних ресурсів.

У розрахунках «криогенна» потужність ТАД була обмежена потенціалом рідинної фази скрапленого LNG, тобто в охолоджувачі LNG залишається рідиною і випаровування не відбувається. Конструкція випарних теплообмінників потребує додаткового опрацювання, що не передбачалось планом досліджень.

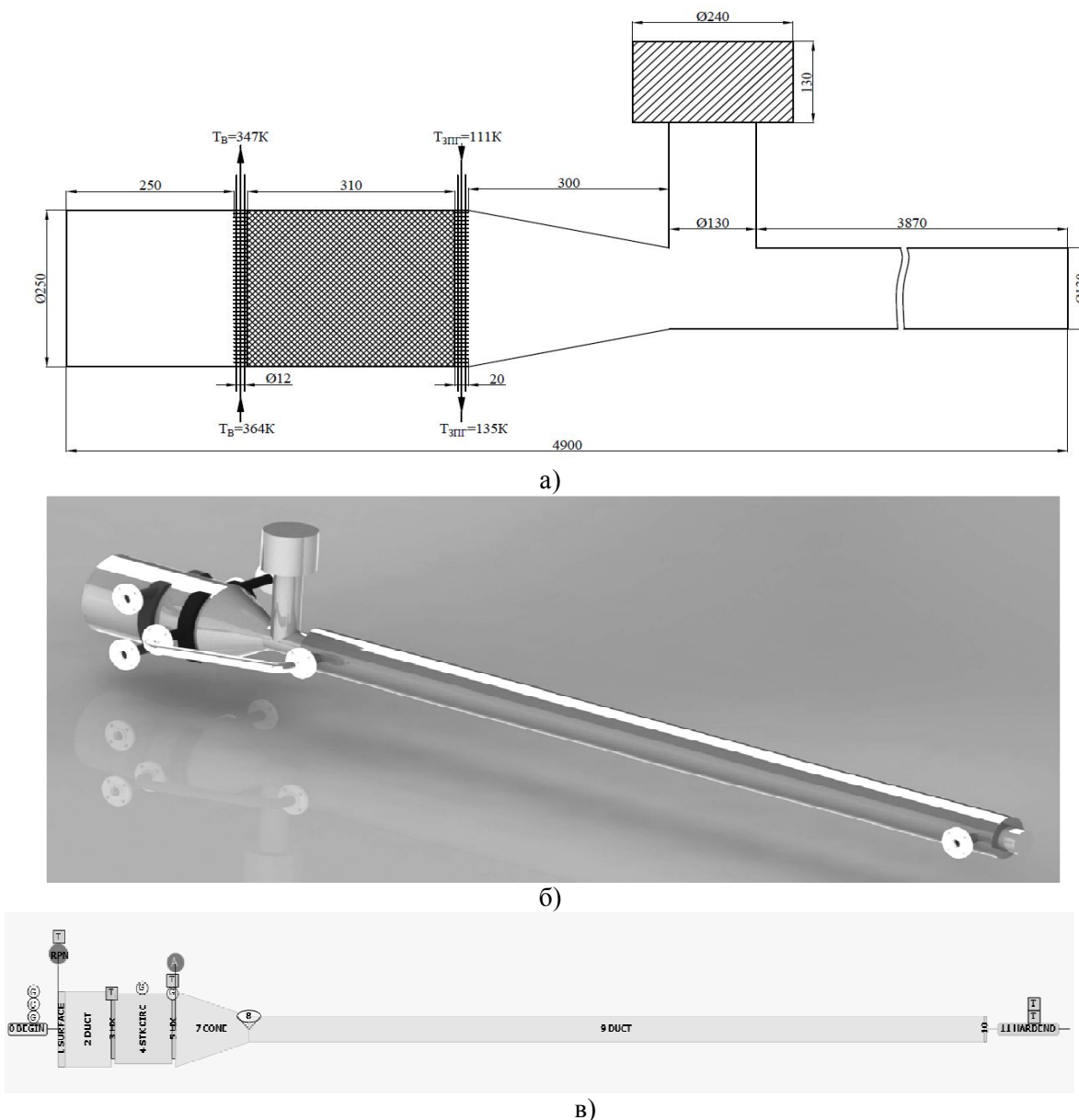


Рисунок 1 – «Криогенний» ТАД: а) поперечний переріз, б) ескіз, в) розрахункова схема в програмі Delta EC

Розрахунки виконувались за допомогою програмного пакету Delta EC [5], який призначений для моделювання термоакустичних систем та комплексу теплофізичних параметрів, пов'язаних з цим. Програма DELTA EC дозволяє розрахувати потужності ТАД та лінійного електричного генератора в залежності від конструкції ТАД, температури ВЕР, оптимізувати конструкцію вузлів ТАД.

У цьому програмному середовищі здійснюється чисельне інтегрування хвильового рівняння в формі, що запровадив Ротт (1), з урахуванням комплексу теплофізичних процесів, які мають місце при взаємодії акустичної хвилі з твердою поверхнюю.

Інтегрування виконується з допомогою «multi-parameter shooting method». Рішення $p_1(x)$ і $U_1(x)$ будуть однозначно визначені тільки за умов завдання відповідних граничних умов.

$$\left[1 + \frac{(\gamma - 1)}{(1 + \varepsilon_s)} f_k \right] p_1 + \frac{a^2}{\omega^2} \rho_m \frac{d}{dx} \left[\frac{(1 - f_v)}{\rho_m} \times \frac{dp_1}{dx} \right] + \frac{a^2}{\omega^2} \frac{(f_k - f_v)}{(\sigma - 1)(1 + \varepsilon_s)} \times \beta \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} = 0, \quad (1)$$

Це рівняння може бути показано у вигляді системи з двох рівнянь першого порядку:

$$\begin{aligned} \frac{dp_1}{dx} &= -\frac{i\omega\rho_m}{A(1-f_v)} U_1 \\ \frac{dU_1}{dx} &= -\frac{i\omega A}{\rho_m a^2} \left(1 + \frac{(\gamma - 1)f_k}{1 + \varepsilon_s} \right) p_1 + \frac{(f_k - f_v)}{(1 - Pr)(1 + \varepsilon_s)} \beta \frac{dT_m}{dx} U_1 \end{aligned} \quad (2)$$

які являють собою модифіковані термоакустичні форми рівнянь моменту та щільності:

$$\frac{dp_1}{dx} = F_{\text{щільності}}(p_1, U_1, T_m, \rho_m, \omega, \text{геометрія, параметри газу...}) \quad (3)$$

$$\frac{dU_1}{dx} = F_{\text{кількість руху}}(p_1, U_1, T_m, \rho_m, \omega, \text{геометрія, параметри газу...}) \quad (4)$$

Детальна інформація, що до складових рівнянь (1–4) та особливостей алгоритму розрахунків, наведена в роботі [6].

Таблиця 3 – Зовнішні характеристики комплексу ТАД – генератор

ТАД 130 мм			ТАД 250 мм			ТАД 380 мм		
Q_{in} , кВт	W , Вт	η , %	Q_{in} , кВт	W , Вт	η , %	Q_{in} , кВт	W , Вт	η , %
1	111	10	5	0,504	11	25	3,47	14
2	221	10	10	0,997	11	30	4,17	14
3	329	10	15	1,517	11	35	4,87	14
4	437	8	20	2,05	10	40	5,59	11

Розрахунки показали, що за заданих умов термоакустична енергогенеруюча система здатна продукувати електричну енергію з допомогою лінійного генератора.

На рис. 2 і рис. 3 показані результати розрахунків параметрів ТАД з МТП діаметром 0,38 м. Це найбільший з модельованих ТАД, тепла потужність якого за «кріогенним» потенціалом могла сягати 40 кВт.

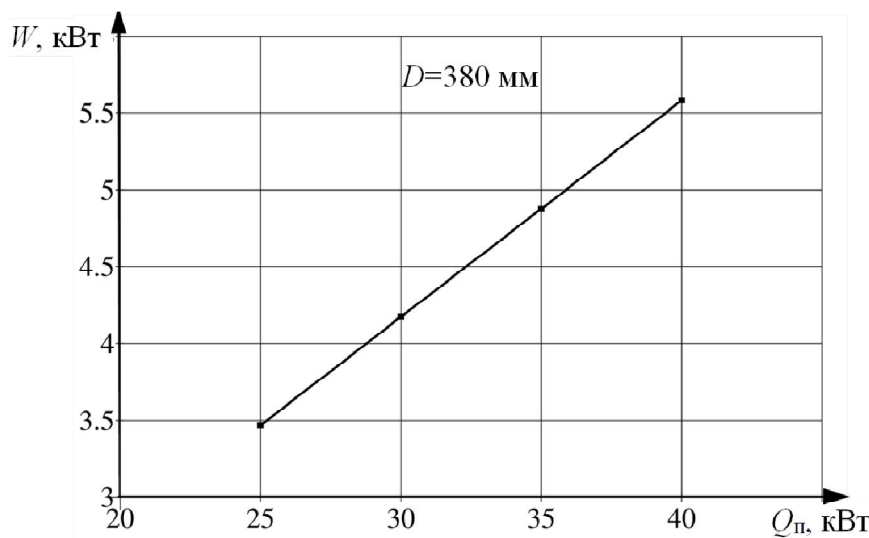


Рисунок 2 – Залежності електричної потужності від кількості підведеної теплоти $P = 0,1$ МПа

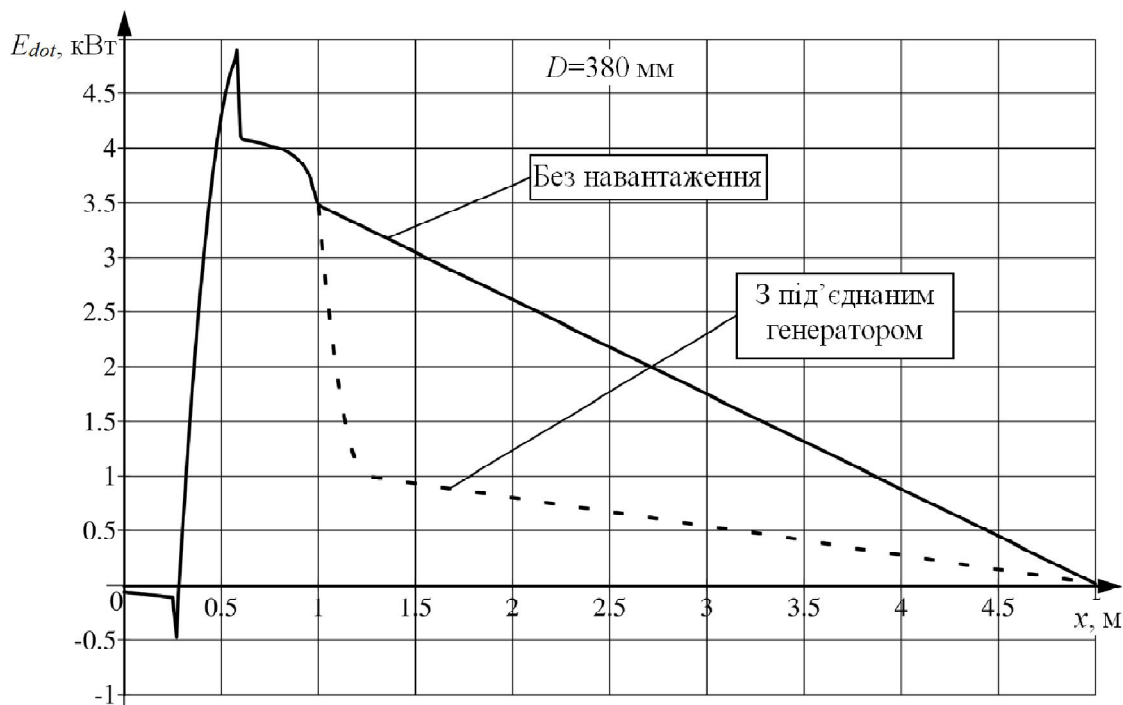


Рисунок 3 – Розподіл акустичної енергії по довжині ТАД

Можна бачити, що потужність електричного генератору має лінійну залежність від кількості підведеної теплоти. Корисне навантаження ТАД – генератор доцільно підключити в зоні з максимальною щільністю акустичної енергії – безпосередньо після блоку термоакустичного перетворювача.

Висновки. У результаті чисельного моделювання робочих процесів у «криогенному» ТАД системи регазифікації LNG палива були отримані такі результати:

- показана можливість утилізувати криогенний потенціал LNG палива за рахунок скидних теплових ресурсів СЕУ;
- розрахована можлива максимальна електрична потужність ТАД у залежності від розмірів ТАД і кількості теплової енергії;
- визначені напрями подальших досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. G. W. Swift. Thermoacoustics for liquefaction of natural gas / G. W. Swift and J. J. Wollan // GasTIPS. –Volume 8, Number 4. – pp. 21-26.
2. QIU LiMin Characteristics of onset and damping in a standing-wave thermoacoustic engine driven by liquid nitrogen / QIU LiMin, LOU Ping, WANG Kai, WANG Bo, SUN DaMing, RAO JunFeng, ZHANG XueJun // Chinese Science Bulletin – 2013., 58 (11). – p. 1325-1330.
3. Коробко В. В. Перспективи застосування термоакустичних технологій в системах ре газифікації / В. В. Коробко, О. О. Московко // VI міжнародна науково-технічна конференція «Суднова енергетика: стан та проблеми». – Миколаїв : НУК. 2013.
4. Коробко В. В. Можливі шляхи використання термоакустичних теплових машин в системах СЕУ // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – Херсон : Видавництво ХДМА, 2014. – № 2 (11). – С. 69-76.
5. Wärtsilä 50df product guide / wärtsilä. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.wartsila.com>
6. Ward B. Design Environment for Low-amplitude Thermoacoustic Energy Conversion / B. Ward, J. Clark, G. Swift // Los Alamos National Laboratory. – 2008. – 282 p.

REFERENCES

1. G. W. Swift. Thermoacoustics for liquefaction of natural gas / G. W. Swift and J. J. Wollan // GasTIPS. –Volume 8, Number 4. – pp. 21-26.
2. QIU LiMin Characteristics of onset and damping in a standing-wave thermoacoustic engine driven by liquid nitrogen / QIU LiMin, LOU Ping, WANG Kai, WANG Bo, SUN DaMing, RAO JunFeng, ZHANG XueJun // Chinese Science Bulletin – 2013., 58 (11). – p. 1325-1330.
3. Korobko V. V. Perspektivi zastosuvannya termoakustichnikh tekhnologiy v sistemakh re gazifikacii / V. V. Korobko, O. O. Moskovko // VI mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferenciya «Sudnova energetika: stan ta problemi». – Mikolaiv : NUK. 2013.
4. 4. Korobko V. V. Mozhliivi shlyakhi vikoristannya termoakustichnikh teplovikh mashin v sistemakh SEU // Naukoviyj visnik Khersons'jkoї derzhavnoї mors'jkoї akademii. – Kherson : Vidavnictvo KhDMA, 2014. – № 2 (11). – S. 69-76.
5. Wärtsilä 50df product guide / wärtsilä. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.wartsila.com>
6. Ward B. Design Environment for Low-amplitude Thermoacoustic Energy Conversion / B. Ward, J. Clark, G. Swift // Los Alamos National Laboratory. – 2008. – 282 p.

Коробко В.В., Московко А.А., Тимошенко Д.А. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДОВОЙ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГАЗИФИКАЦИИ LNG ТОПЛИВА

На судах, энергетические установки которых потребляют LNG, применяются специальные системы регазификации. В большинстве LNG систем для регазификации сжиженного газа используют теплоту забортной воды или теплоносителей систем СЭУ. Сжиженный природный газ – метан – является носителем «криогенной энергии». Чаще всего этот «криогенный» температурный потенциал LNG топлива не используется. Существует принципиальная возможность утилизировать этот энергетический потенциал с помощью термоакустических тепловых машин. Термоакустические технологии потенциально способны обеспечить возможности для совершенствования энергетической эффективности СЭУ благодаря утилизации низкотемпературных сбросных тепловых ресурсов. Для СЭУ LNG танкера разработана принципиальная схема термоакустической энергогенерирующей системы регазификации криогенного топлива.

С помощью программы DELTA ЕС проведены вариантыные расчеты криогенных ТАД различных мощностей, приведены результаты численного моделирования. В результате были определены наиболее рациональные конструкции криогенных ТАД и задачи для дальнейших исследований.

Ключевые слова: СЭУ, LNG топлива, сбросные энергетические ресурсы, термоакустика, регазификация, тепловые машины.

Korobko V.V., Moskovko O.O., Tymoshenko D.O. NUMERICAL MODELING OF SHIP THERMOACOUSTIC LNG REGASIFICATION SYSTEM

On the ships with power plants that consume LNG the special systems of regasification are used. In common, the LNG systems for regasification of LNG uses the warmth of outboard water, or coolant of the ships power plants. Liquid natural gas – methane is the source of «cryogenic energy». More often, that «cryogenic» temperature potential of LNG of fuel is not used. There is vital possibility to utilize this potential power with the help of thermoacoustic thermal machines. Thermoacoustic technology can potentially provide opportunities to improve the energy efficiency of EMS through utilization of low-temperature waste heat resources. In this article the thermoacoustic energy generating system for regasification of cryogenic fuel of EMS LNG tanker was developed.

With the help of the program DELTA EC the variant calculations of cryogenic TAE of different powers were conducted. The results of calculations for numeral designs are presented. As a result, the most rational constructions of cryogenic TAE and the tasks for further researches were determined.

Keywords: ship power plants, LNG fuel, waste heat energy, thermoacoustic, regasification, heat machine.

© Коробко В.В., Московко О.О., Тимошенко Д.О.

Статтю прийнято
до редакції 29.04.15