УДК 629.12 + 621.69

Тетенко В.Ю. Козьміних М.А.
Національний університет «Одеська морська академія»

КОНСТРУКТИВНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСУ LNG ТАНКЕРІВ З ГАЗОПАЛИВНИМ ОБЛАДНАННЯМ

ANNOTATION

The scince article describes the innovative design and installation features of the fuel gas supply system for an LNG carrier, comprising multi-stage low temperature boil-off fuel gas compressor with driver and auxiliary systems, high-pressure piping system and safety features, controls and instrumentation. The article also extensively describes the operational control system required to provide full engine availability over the entire transport cycle.

The demand for larger and more energy efficient LNG carriers has resulted in rapidly increasing use of the diesel engine as the prime mover, replacing traditional steam turbine propulsion plants.

Two alternative propulsion solutions have established themselves to date on the market:

- low speed, heavy fuel oil burning diesel engine combined with a reliquefaction system for BOG recovery;
- medium speed, dual-fuel engines with electric propulsion.

A further low speed direct propulsion alternative, using a dual-fuel two-stroke engine, is now also available:

- high thermal efficiency, flexible fuel/gas ratio, low operational and installation costs are the major benefits of this alternative engine version;
- the engine utilises a high-pressure gas system to supply boil-off gas at pressures of 250-300 bar for injection into the cylinders.

Apart from the description of the fuel gas supply system, this paper also discusses related issues such as requirements for classification, hazardous identification procedures, main engine room safety, maintenance requirements and availability.

It will be demonstrated that the MEGI based solution has operational and economic benefits over other low speed based solutions, irrespective of vessel size, when the predicted criteria for relative energy prices prevail.

При транспортуванні зрідженого природного газу перевізник зтикається з численними технічними труднощами, зумовленими фізичними властивостями метану. Необхідність підтримувати низьку температуру вантажу(-163^{0}C) та забезпечувати можливість використання парів LNG в якості палива зумовлює встановлення на борту судна великої кількості додаткового обладнання. Стаття містить систематизований опис виробничого досвіду роботи газового обладнання різних типів LNG танкерів. Розглянуті експлуатаційні та конструктивні особливості суднових систем для обробки пари метану. Сформовані вимоги до комплекту енергетичного та допоміжного устаткування який забезпечать надійність та безпеку роботи газопаливного обладнання та СПЗГ(система повторного зрідження газу). Виконан опис оптимальних комплектів обладнання для менеджменту парів метану на борту LNG танкеру. Обозначені основні проблеми LNG флоту які доведеться вирішити у найближчому майбутньому.

Ключові слова: LNG танкер, пропульсивний комплекс, система реконденсації газу, газопаливне обладнання, ME-GI.

Функція рухливості СПГ танкерів тісно пов'язана з використанням BOG(Boil-Off Gas-самостійно утворені пари вантажу) та виробництвом електроенергії. У більшості варіантів побудови судна -силові установки можуть використовувати в якості палива як HFO(Heavy fuel oil- важкі мазути) так і BOG. Таке обладнання як багатоступінчасті низькотемпературні компресора та насоси високо тиску газопаливних систем(встановлюються на ME-GI та DFDE судах) чи СПЗГ (встановлюються на Q-Flex та Q-Max судах) споживає значну кількість енергії. Отже, доцільно вважати, що при аналізі пропульсивного комплексу LNG танкерів необхідно розглядати не лише головні рушійні двигуни але й устаткування для виробництва електроенергії та систему утилізації BOG. Таким чином, об'єктивне порівняння пропульсивних комплексів має враховувати усі три складові:

-головні двигуни;

-електричні генератори;

-система оброблення BOG.

У дослідженні "пропульсивний комплекс" означатиме систему, що включає усі ці три підсистеми.

Чинники, що впливають на вибір використовуємого обладнання

Один із способів класифікації пропульсивних комплексів LNG танкерів для подальшого виявлення недоліків та переваг полягає у тому, щоб диференціювати їх за методикою обробки BOG, як показано на малюнку 1. Скорочення на малюнку буде широко використовуватися в подальшому.

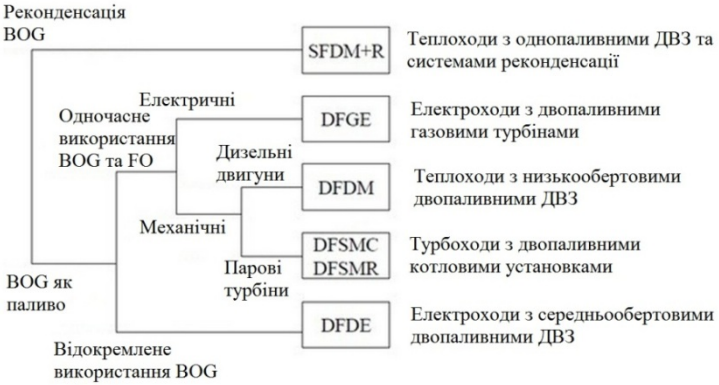

Рис. 1. Категоризація пропульсивних комплексів LNG танкерів за способом обробки BOG

Велика кількість варіантів побудови пропульсивного комплексу не гарантує прийняття швидкого та однозначно правильного рішення про те, яку концепцію слід використовувати на ЗПГ(зріджений природний газ) танкері . Є кілька чинників, що ускладнюють прийняття остаточного рішення:

- різна ефективність пропульсивних комплексів. На малюнку 2 графічно продемонстровані переваги використання ДВЗ у порівнянні з іншими типами енергетичних установок;

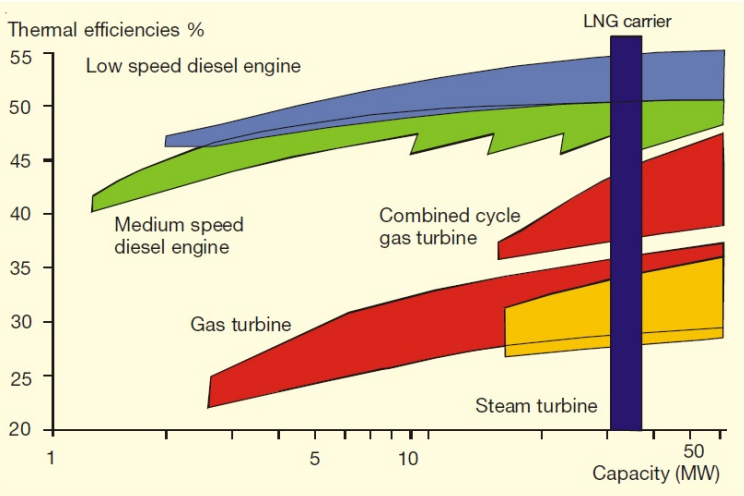

Рис. 2. Тепловий коефіцієнт корисної дії різних типів пропульсивних комплексів

- пропульсивний комплекс ЗПГ танкеру значною мірою інтегрований до інших загальносуднових та вантажних систем. Зокрема система руху судна тісно пов'язана з обробкою BOG та виробництвом електроенергії. Оптимально вибрана концепція має забезпечити ефективну роботу газового, пропульсивного та енергетичного обладнання;

- тривалість життєвого циклу та експлуатаційні витрати. Варіанти побудови судна за схемою DFSM вимагають високих капіталовкладень та низьких експлуатаційних витрат, тоді як інші варіанти вимагають більших експлуатаційних витрат але мають економічні переваги за рахунок використання додаткового обладнання для обробки вантажу (SFDM + R, DFDE, ME-GI) [9];

- різноманітні умови експлуатації. Як правило, кожен перевізник має свої особливі умови: вантажомісткість, тривалість плавання, час баластного ходу, температура морської води, температура атмосфери відрізняються від судна до судна;

- надійність системи. Гнучкість експлуатаційних режимів та надійність работи устаткування залежать від:

- конфігурації системи (особливо від наявність резервних систем);
- частоти відмов;
- часу необхідного для відновлення.

Таким чином зусилля щодо порівняння різних пропульсивних комплексів базуються на дослідженні:

-експлуатаційних показників устаткування;

-надійності та безпечності роботи обладнання ;

-капітальних та експлуатаційних витратах.

Це дослідження використовує порівняльну оцінку вартості життєвого циклу, просту, але ефективну версію повного аналізу вартості життєвого циклу. Метод виключає розрахунок вартості загальних частин, таких як загальносуднове обладнання, розрахунок витрат на людино-години та інші адміністративним тягарі. Замість цього, використаний метод зосереджується на розгляді витрат які пов'язані з різницею в конфігурації системи, надійністю, енергоефективністю та продуктивністю. Нижче запропонован метод вибору оптимального пропульсивного комплексу та розглянуте конкретне дослідження з урахуванням вимог окремо взятого перевізника.

Конструктивні особливості обладнання LNG танкерів з СПЗГ(SFDM + R)

При використанні механічної силової установки з низько оборотними ДВЗ що працює на HFO у комбінації з СПЗГ (SFDM + R Single-fuel diesel mechanical propulsion with reliquefaction (SFDM + R)), BOG зріджується в окремій системі, а не використовується як паливо. Низькообертовий дизельний двигун підключений безпосередньо до валу гвинта. Концептуально паливна система повністю відокремлена від системи обробки BOG. СПЗГ включає в себе декілька підсистем та криогенний теплообмінник. Слід зауважити, що суда з такою конструкцією повинні бути обладнані GCU(Gas Combustion Unit -установка зпалювання газу), що обробляє BOG у випадках, коли його кількість перевищує потужність СПЗГ[2].

Середня тривалість життєвого циклу торгових суден, особливо турбоходів, складає не більше 25 років. У подальшому, зазвичай, судна списуються по економічним причинам. ДВЗ можуть експлуату-

ватися десятиріччями довше ніж паротурбінні комплекси адже більшість їх елементів може бути замінена на нові впродовж строку експлуатації. Використання низькобортних двигунів на LNG танкерах може збільшити їх життєвий цикл до 40 років[1].

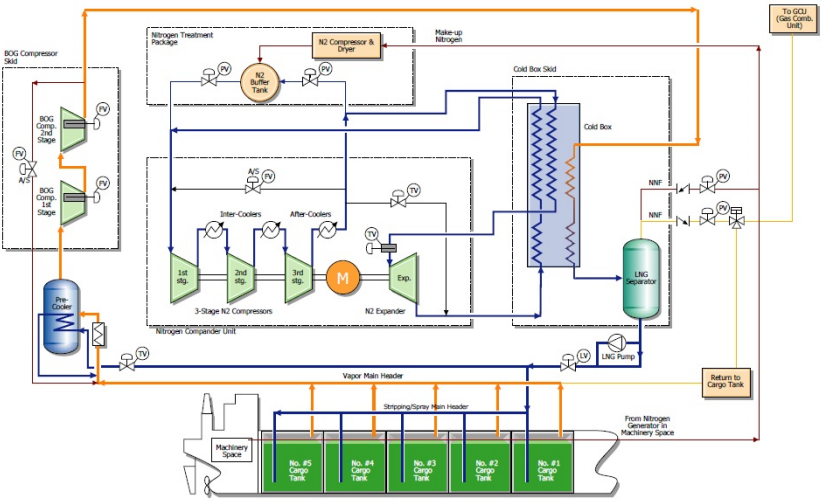

Рис. 3. СПЗГ LNG танкерів проектів Q-Flex та Q-Max

Ще однією перевагою є й те, що використовуючи СПЗГ ми можемо підвищити безпеку у машинному відділенні. Усе газове обладнання розташоване у окремому компресорному відділенні, у якості палива для енергетичної установки використовується лише HFO.

У разі виходу із строю одного із двигунів, система контролю забезпечить подальшу роботу судна з експлуатацією тільки одного двигуну без втрати маневровості та інших навігаційних властивостій а також буде гарантувати безпеку судна та обладнання.

Основним завданням системи повторного зрідження газу є підтримка тиску в вантажних танках на заданому рівні шляхом зрідження пари вантажу з метою захистити вантажні танки від надлишкового тиску. Тиск в танках повинен підтримуватися в межах від 1,03 до 1,12 бар.

Система повторного зрідження газу схематично зображена на малюнку 3 та складається з наступних компонентів: два BOG-компре-

сора, два N2 компандера, один прекулер, один пластинчастий вакуумний теплообмінник (частина колдбоксу), один LBOG сепаратор (частина колдбоксу), один LNG повертовий насос, один азотний ресивер, два N2 бустерні насоса, установка спалювання газу, допоміжні системи.

Враховуючи експлуатаційній досвід, можна зробити висновок що найбільш складним для регулювання та контролю елементом системи є сепаратор у якому відбувається відділення зрідженого метану від азоту та інших газів що не конденсуються(далі Vent Gas).

Обладнання LNG танкерів з ME-GI двигунами

Схема використання низькообертових двопаливних ДВЗ (DFDM Dual-fuel (low-speed) diesel mechanical propulsion) показана на малюнку 5. DFDM поєднує в собі переваги варіантів DFDE та SFDM + R. Для побудови цієї концепції можуть бути використані ME-GI двигуни. На відміну від DFDE, DFDM здатні одночасно використовувати як BOG, так і рідке паливо[5].

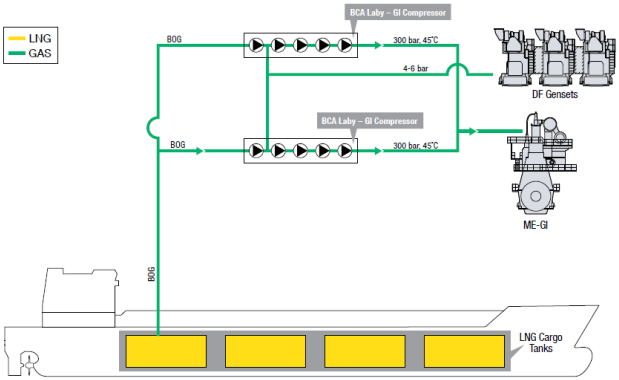

Рис. 4. Вимоги до газового палива середньо- та низькообертових двигунів

Однак ця система має свою проблему. Для використання у ME-GI паливний газ повинен бути стиснутий приблизно до 300 бар а його температура повинна складати 45^0C (Рис.4)[10].

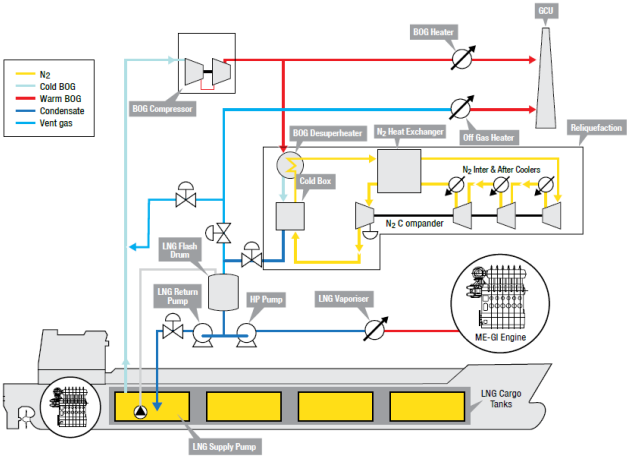

Рис. 5. Дизельний двопаливний механічний пропульсивний комплекс на базі низькообертних ДВЗ Dual-fuel (low-speed) diesel mechanical propulsion (DFDM)

Деякі джерела вважають що використання газу під таким високим тиском може спричинити серйозні труднощі в реальній експлуатації. Але ризик, пов'язаний з високим тиском газу, виявився незначним завдяки комплексу захисних систем, таких як двостінна система газопроводів, системи виявлення протічки газу .

Висновки

У LNG флоті, як і у інших галузях морського транспорту, спостерігається тенденція до зменшення використання парових турбін. Показники ефективності використання турбін не перевищують 30% у той час як ДВЗ мають КПД більше 50%. Цей фактор зумовив перехід морської індустрії до використання пропульсивних комплексів з ДВЗ.

Розробка та упровадження газопаливних систем є наступним етапом еволюцій LNG танкерів перехід до якого дасть позитивний економічний ефект. Але для реалізації концепції комплексу газопаливного обладнання з ME-GI двигунами треба вирішити проблеми нестабільності роботи двигуна на переходних режимах та забезпе-

чити надійну роботу запобіжних система що мають гарантувати безпечну роботу обладнання при критично великих значеннях тиску газу що на вході до паливної апаратури двигуна повинен складати 300 бар.

Говорячи про СПЗГ основними напрямками для подальшого дослідження доцільно розглядати технологічні процеси відокремлення азоту та неконденсуючихся газів у сепараторі та їх подальшу утилізацію у спеціальному обладнанні(GCU). Також, спираючись на систематизовані данні, можна стверджувати що великий вміст азоту у парах вантажу є причиною того , що СПЗГ працює на критичних режимах і споживає надмірну кількість електроенергії. Для зменшення енергозатрат доцільно разглянути можливість встановлення додаткового обладнання для відокремлення азоту від парів природного газу. У якості такого спеціального устаткування можна рекомендувати мембранні фільтри що будуть встановлюватися на BOG контурі перед колдбоксом.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Chang Kwang Pil, Marvin Rausand, Jorn Vatn. (2008). Reliability assessment of reliquefaction systems on LNG carriers// Science Direct, Reliability Engineering and System Safety. — P. 1345-1353.

2. Thomas N. Anderson, Mark E. Ehrhardt, Robert E. Foglesong et al. Andy Richardson Shipboard Reliquefaction for Large LNG Carriers// Elsevier. — 2009. — 8 p.

4. K.D. Gerdsmeyer, W.H. (2005). Isalski On-board reliquefaction for LNG ships// Gastech. — 14 p.

5. Barmin I.V., Kunis I.D. (2009). Liquefied natural gas 62 Технические газы, № 3, 2014 yesterday, today and tomorrow/ Ed. A.M. Arkharov. — Moscow: Publishing House of the MSTU. NE Bauman. — 256 c. (Rus.).

6. SIGGTO Guidance for the Prevention of Rollover in LNG Ships.— Edinburgh: Witherby Publishing Group, 2012. – 14 p.

7. Li Rong, Jin Wenbing, Zhang Juyong et al. Thermal Study on LNG Cargo Tank// International Journal of Automation and Control Engineering. — 2015. — Vol. 4. — No. 1. — P. 5–8.

8. World LNG Carrier Orderbook// LNG shipping news. — April 2016. — P. 10–11.

9. Juliussen L. R., Kryger M. J., Andreasen A. MAN B&W ME-GI engines. recent research and results// Proc. of International Symposium on Marine Engineering (ISME), October 17–21, 2011.

10. LABY®-GI compressors. Fully balanced reciprocating compressors with highest operational flexibility. [Электронный ресурс]: https://www.burckhardtcompres-sion. com/.