

10.31653/smf45.2022. 93-102

Аболешкін С.Є., Кардашев Д.Л.

Національний університет «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ПОДАЧІ ГАЗУ НИЗЬКОГО ТА ВИСОКОГО ТИСКУ НА СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДВИГУНАХ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Посилення вимог, пов'язаних з екологічними показниками суднових двигунів, змушують суднобудівників шукати альтернативні рішення, пов'язані як з пошуком нових палив, так і способів їх використання в суднових дизелях.

Найбільш перспективними паливами, що дозволяють одночасно знизити і вартість перевезень і кількість шкідливих викидів, є газові палива (ГП) різного походження.

Застосування природного газу дозволяє істотно скоротити кількість шкідливих викидів в порівнянні з паливами нафтового походження - повністю виключити викиди сірки, кардинально (на 90%) знизити викиди оксидів азоту (NO_x) і істотно (на 30%) знизити викиди твердих частинок і діоксиду вуглецю (CO_2). Відсутність зольності призводить до поліпшення умов змащення і підвищенню терміну служби циркуляційного масла. В результаті ресурс двигунів, що працюють на газі, може бути збільшений в 1,3...1,5 рази, та у стільки ж разів знижені витрати на обслуговування і ремонт.

Основна маса суднових двигунів створюється сьогодні двопаливними (dual-fuel (DF)), тобто здатними працювати на газовому, рідкому паливі або на обох паливах відразу в різних пропорціях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В сучасних двотактних двигунах використовується внутрішнє сумішоутворення, при якому газове паливо подається в робочий циліндр після закриття газорозподільних органів [1].

До внутрішнього сумішоутворення існують два основних підходи:

- газ подається в робочий циліндр відразу після закриття випускного клапана в початковій стадії такту стиснення під відносно невеликим тиском, завдяки чому такі системи отримали назву систем низького тиску;

- газ подається в камеру згоряння разом з запальним паливом в кінці такту стиснення під високим тиском, тому такі системи отримали назву систем високого тиску або прямого впорскування газу (Direct Injected Gas (GD)).

В даний час, до дослідної експлуатації двотактних малооберткових двигунів з системами низького тиску приступила фірма Wärtsilä, яка створила для просування даних технологій дочірню компанію Winterthur Gas and Diesel Ltd.

Системами високого тиску обладнуються малооберткові газодизельні двигуни фірми MAN, які використовуються в якості головних, не тільки на газовозах, але і на інших типах судів. У цьому ж напрямку веде розробки японська фірма Mitsubishi, яка на базі дизелів серії UEC створює власний варіант малооберткового DF-двигуна з індексом UEC-LSGi.

Постановка завдання. Завданням дослідження було вивчення конструктивних особливостей, визначення ефективності використання систем подачі газу низького та високого тиску на суднових малооберткових двигунах.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розроблена фірмою Wärtsilä [2,3] для двопаливного МОД технологія подачі газу під низьким тиском розрахована на спалювання збідненої паливоповітряної суміші. Газ подається в циліндр після того як всі органи газообміну виявляються закритими але тиск залишається ще порівняно низьким. На практиці клапана для подачі газу встановлюються на деякій висоті від продувних вікон, щоб забезпечити необхідний час на заповнення циліндра газом.

Надходження газового палива на такті стиснення дозволяє подавати його в циліндри під відносно низьким тиском 1,0...1,6 МПа. Величина запальної порції палива у всьому діапазоні навантажень не перевищує 1% від циклової подачі на номінальному режимі. Використання даної технології дозволяє знизити утворення NO_x на 90%, що пояснюється більш рівномірним розподілом температур по камері згоряння. Це, в свою чергу, дозволяє виконувати вимоги Міжнародної морської організації (International Maritime Organization) IMO Tier-III щодо викидів NO_x без будь-якої подальшої обробки відпрацьованих газів.

Для подачі резервного рідкого палива використовується штатна паливна система акумуляторного типу, характерна для всіх двигунів серії RT-flex [4,5]. Подача запального палива здійснюється окремою акумуляторною системою малої продуктивності (рис. 1). При цьому двигун зберігає здатність працювати на важких сортах палива в усьому діапазоні навантажено-швидкісних режимів.

Для покращення умов займання збідненої газоповітряної суміші на кожному циліндрі встановлюються два запальних модуля, що складаються з вихорекамери з встановленою в ній форсункою подачі запального палива (рис. 2).

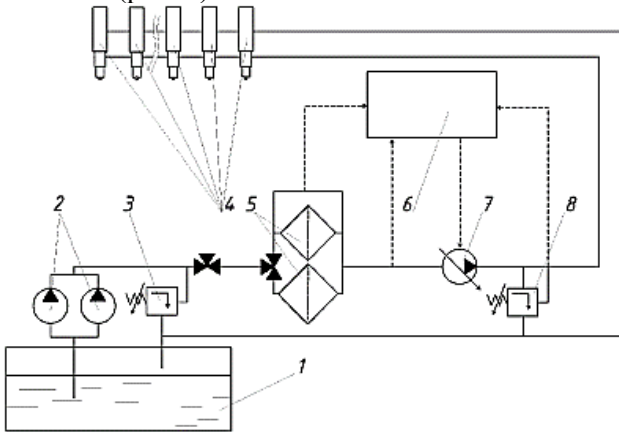


Рис. 1 Схема акумуляторної системи запального запалювання газодизельного двигуна RT-Flex DF

1 - цистерна запального палива; 2 - підкачувальні насоси; 3 - перепускний клапан лінії низького тиску; 4 - форсунки; 5 - фільтри тонкого очищення; 6 - електронний блок управління; 7 - паливний насос високого тиску; 8 - перепускний клапан лінії високого тиску; - - гідравлічні лінії; - - - лінії управління

В якості запального використовується легке дизельне паливо, але розглядається можливість застосування важкого палива ISO 8217 на якому двигун працює як на резервному.

Подача ГП в циліндри двигуна здійснюється за допомогою двох газових клапанів, які встановлюються навпроти один одного на висоті приблизно 1/3 ходу поршня. Кріпляться клапана до сорочки блоку циліндрів і через отвори у втулці подають газ в робочий циліндр (рис.3).

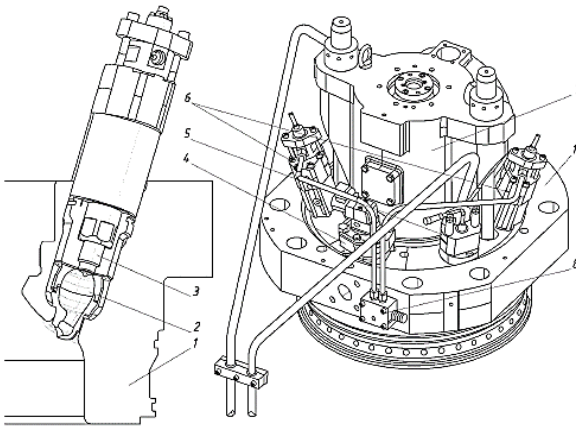


Рис. 2 Модуль запального запалювання газоповітряної суміші газодизельного двигуна RT-FlexDF і його установка на кришці циліндра

1 - кришка циліндра; 2 - віхрекамера; 3 - форсунка подачі ЗП; 4 - повітряний клапан; 5 - форсунка подачі резервного рідкого палива; 6 - запальний модуль; 7 - корпус випускного клапана; 8 - колектор підведення запального палива

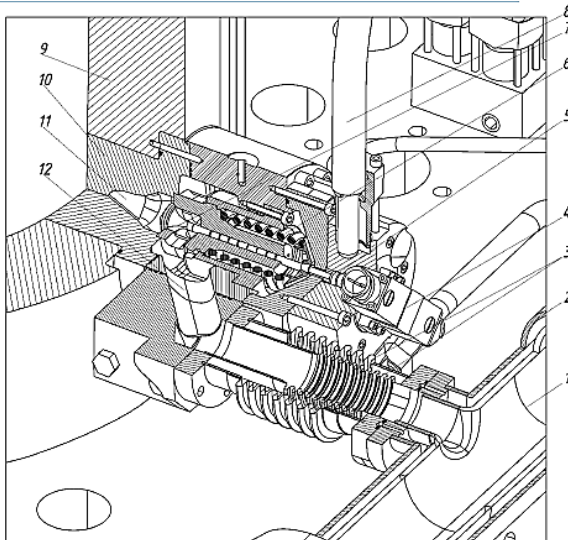


Рис. 3 Установка газового клапана на втулці циліндра двигуна RT-Flex50DF

1 - газова магістраль; 2 - зовнішня оболонка; 3 - зовнішній і внутрішній сифон; 4 - електромагнітний клапан управління; 5 - гідравлічний поршень приводу клапана; 6 - пружина закриття клапана; 7 - газовий клапан; 8 - гідравлічна магістраль приводу клапана; 9 - втулка циліндра; 10 - корпус

газового клапана; 11 - канал підведення ГП в робочий циліндр; 12 - канал підведення ГП до газового клапана

Робота двигуна на газі дозволяє отримати на вихідному фланці потужність на рівні 80% від номінальної потужності базового дизеля (рис.4).

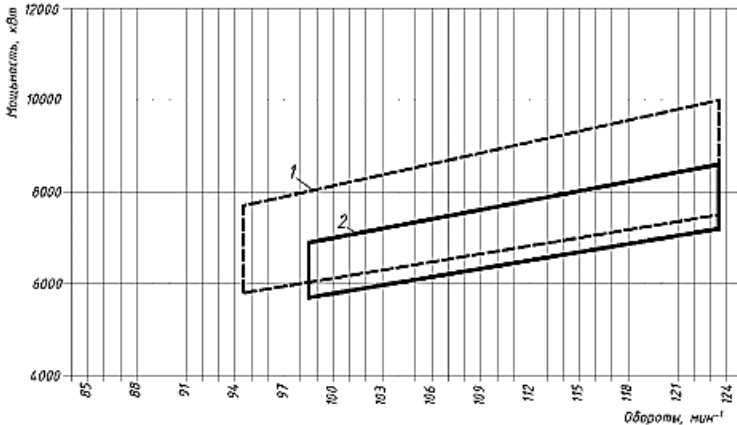


Рис. 4 Области рекомендованих режимів роботи двигунів RT-Flex50B на рідкому паливі (1) і RT-flex50DF на газовому (2)

Перехід з одного виду палива на інший може здійснюватися без зупинки двигуна на потужностях до 80% від номінальної.

Фірма Wärtsilä налагодила випуск нового покоління двопаливних малооборотних двотактних двигунів на базі дизелів серії X. До таких двигунів відносяться W-X62DF, W-X72DF, W-X82 і W-X92 [6]. В цілому розроблена технологія орієнтована як на створення нових двигунів, так і на модернізацію вже тих, що знаходяться в експлуатації. За оцінками фірми вартість переобладнання складе 20...25% від початкової вартості двигуна.

В якості базових моделей для газодизельних двигунів використовуються двотактні малооборотні дизелі серій MC і ME. Модернізовані під газодизельний процес, двигуни отримали індекс GI (Gas Injector). При цьому на двигуни з механічним управлінням (MC) встановлюється додатково електронна система управління процесом подачі газу, а на двигунах з електронним управлінням (ME) функції регулювання покладаються на штатну систему управління.

Для роботи на рідкому паливі та для запального впорскування використовується штатна паливна система.

Для даного типу газодизельних ДВЗ розглядається два режими:

- при постійній подачі запального палива, коли на режимі пуску і малих навантажень двигун працює на рідкому паливі ISO 8217. Починаючи з 25%-го навантаження встановлюється постійна запальна подача, а необхідна потужність регулюється шляхом зміни кількості газу, що подається в циліндр;

- при використанні всього наявного газу, коли на малих і середніх навантаженнях двигун працює на рідкому паливі. На високих навантаженнях весь газ надходить в циліндри, а необхідна потужність регулюється шляхом зміни циклової подачі рідкого палива.

Перехід з одного виду палива на інший, як і перехід з режиму на режим, здійснюється автоматично без зниження потужності у всьому діапазоні навантажень двигуна. Устаткування для подачі ГП під високим тиском включає в себе компресори, теплообмінні апарати, систему підведення ГП до робочих циліндрах, модулі управління подачею газу і газові форсунки.

Подача газу в камеру згоряння здійснюється відразу після того, як в циліндр подана і запалала запальна порція ЗП.

Всі елементи управління подачею газу скомпоновані в одному модулі, який включає: газовий акумулятор, головний відсічний клапан з гідравлічним приводом, клапана продувки системи інертним газом, клапана управління гідроприводом форсунок (рис. 5).

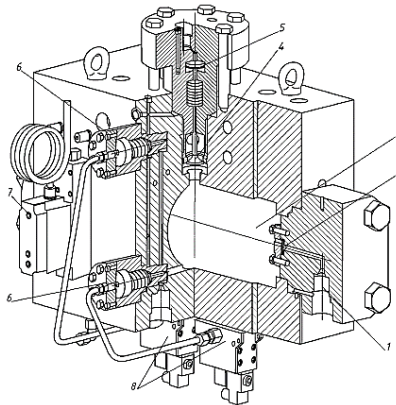


Рис. 5. Модуль управління подачею газу двигуна серії ME-GI

1 - вузол введення ГТ; 2 - зворотний клапан; 3 - порожнина акумулятора тиску; 4 - головний відсічний клапан; 5 - поршень приводу головного відсічного клапана; 6 - клапан продувки інертним газом; 7 - блок управління

головним відсічним клапаном; 8 - блок управління клапаном продувки інертним газом

Загальна конструкція газової форсунки представлена на рис.6. Встановлюються газові форсунки по дві на циліндр в спеціальних колодязях в кришці циліндра, розташованих в безпосередній близькості від форсунок рідкого палива.

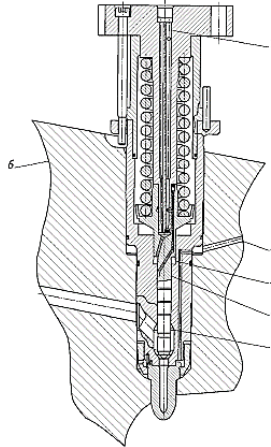


Рис. 6 Газова форсунка двигунів ME-GI:

1 - канал підведення керуючого масла; 2 - вентиляційний канал; 3 - порожнина гідравлічного управління голчастим клапаном; 4 - голчастий клапан; 5 - газова порожнина; 6 - кришка циліндра

У таблиці 1 порівняні основні особливості, пов'язані з конструкцією, організацією робочого процесу і експлуатацією газодизельних двигунів, обладнаних системами низького і високого тиску.

Таблиця 1. Порівняння систем низького і високого тиску

Особливості конструкції і організації робочого процесу	Низького тиску	Високого тиску
Потужність на газовому паливі	80% от $N_e^{жт}$	100% от $N_e^{жт}$
Чутливість до якості газу (метанове число)	не нижче 80	ні
Чутливість до температури повітря на вході	Є	ні
Частка запального палива	= 1%	3...5%
Наявність окремої системи запального вприскування	Так	ні

Можливість використання НФО як запального	У перспективі	Так
Можливість використання НФО як резервного	Так	Так
Можливість роботи на двох паливах одночасно (крім запального)	Немає в перспективі	Так
Тиск підводиться газового палива	З перемішуванням	Без перемішування
Максимальний тиск циклу	1,6 мПа	30.0 мПа
Виникнення детонації при зміні навантаження	Зростає	Без змін
Імовірність пропуску займання	Можливо	ні
Імовірність вибуху в підпоршневому просторі	Є	ні
Імовірність вибуху в випускному ресівері	Є	ні
Імовірність витоків газу в машинне відділення	Є	ні
Ефективний ККД на газовому паливі	Низка	Висока
Ефективний ККД на рідкому паливі	Без змін	Зростає
Відповідність нормам викидів ІМО по NO_x	Знижується	Без змін
Викиди CO_2 : з відпрацьованими газами, г/кВт·г	Tier III	Tier II
Викиди метану з відпрацьованими газами, г/кВт·г	485,7	452,4
GWP (потенціал глобального потепління в еквіваленті CO_2) від ЗП	3...6	= 0.5
Можливість переходу з одного палива на інше під навантаженням	не нижче 10%	не нижче 23%
Реакція двигуна на зміну навантаження	До 80% от $N_{e\text{жт}}$	Без обмежень
Тиск підводу газового палива	Зменшений	Без змін

Висновки та перспективи подальших досліджень. Два принципово різних підходи до організації роботи МОД на ГП мають свої переваги і недоліки [7].

Переваги систем низького тиску:

- добре перемішування газоповітряної суміші в ході процесу стиснення;
- використання мінімальної порції запального палива для підпалу газоповітряної суміші;
- подача газу в робочий циліндр під відносно низьким тиском, що дозволяє знизити ймовірність витоків, спростити паливну систему, підвищити безпеку її використання;
- для подачі ГП можна використовувати дешевші і надійні гвинтові або відцентрові компресори.

Недоліки систем низького тиску:

- можливість виникнення детонації і, як наслідок, більш високі вимоги до якості ГП;
- неминуче просочування газоповітряної суміші через поршневі кільця в підпоршневий простір на такті стиснення, а так само імовірність попадання газу в підпоршневий простір в разі пошкодження газового клапана;
- обмеження по потужності двигуна при роботі на ГП на рівні 80% від номіналу, уповільнена реакція на зміну навантаження.

Перевага систем прямого впорскування:

- при подачі ГП безпосередньо в камеру згоряння можна повністю виключити виникнення детонації, тому, відсутні будь-які обмеження по потужності двигуна при роботі на ГП, та й вимоги до якості ГП менш жорсткі;
- виключено попадання ГП в підпоршневий простір.

Недоліки систем прямого впорскування:

- використання газу під високим тиском ускладнює паливну систему, підвищує вимоги до її безпеки;
- велика витрата рідкого палива на запалювання газоповітряної суміші;
- для стиснення природного газу необхідно використання багатоступеневих компресорів, що підвищує енергетичні витрати установки.

Очевидно, що обидва підходи до організації робочого процесу в газодизельних двигунах мають свої переваги, які для певного типу установок можуть виявитися вирішальними, а розвиток конструкцій дозволить позбутися від більшості притаманних їм на сьогодні недоліків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rolsted H. MAN B&W 2-stroke Marine Engine Leading today's Environmental challenges [Текст]./ Rolsted H. // Korea: MAN Diesel & Turbo SE, 2010. – 86 p.

2. ME-GI – Dual Fuel Done Right [Текст]. MAN Diesel, ME-GI, SNAME NY, 2013. – 73 p.

3. ME-GI Dual Fuel MAN B&W Engines A Technical, Operational and Cost-effective Solution for Ships Fuelled by Gas [Текст]. Denmark, Copenhagen: MAN Diesel & Turbo. 2012. – 36 p.

4. Wettstein R. The Wärtsilä low-speed, low-pressure dual-fuel engine [Текст]. / Wettstein R. // AJOUR Conference, Odense, 27/28 Nov 2014. – 31 p.

5. Wärtsilä 2-stroke dual fuel technology [Текст]. CIMAC NMA norge annual meeting 22.01.2014. – 32 p.

6. Ott M. X-DF low-pressure dual-fuel engine technology [Текст]. WinGD low-speed engines Licensees, Conference 2015. – 7 p.

7. Nylund I., Low pressure at low speed. Marine / In Detail. Dual-Fuel Technology [Текст]. / Nylund I.// Wärtsilä. 2014. – 6 p.