

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПГ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА ДЛЯ СУДОВЫХ ДВС

Д.С. Ватолин, аспирант

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Рассматривается актуальность применения сжиженного природного газа в качестве топлива для судовых энергетических установок. Показаны экономические и экологические преимущества сжиженного природного газа (СПГ) в сравнении с жидким углеводородным топливом. Выполнен краткий обзор конструкции современных судовых двухтопливных двигателей, сформулированы требования к ним Российского Морского Регистра Судоходства. Приводятся основные химико-физические характеристики природного газа, добываемого на различных месторождениях, дана оценка влияния состава композиции СПГ на метановое число и устойчивость двигателя к возникновению детонации.

### Введение

В последние годы все больше судов проектируется и строится с возможностью использования сжиженного природного газа (СПГ или LNG — Liquefied Natural Gas) в качестве основного топлива. Руководствуясь этой тенденцией Международная морская организация (International Maritime Organization— IMO) разработала специальный кодекс с правилами постройки и эксплуатации судов, использующих топливо с низкой температурой вспышки — IGF Code (International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels) [1]. Переход на газовое топливо обусловлен тремя факторами.

➤ Во-первых, развитие научно-технического прогресса в области криогенных технологий достигло результатов, позволяющих компактно и безопасно хранить запас СПГ на борту судна с возможностью его эффективного использования в энергетической установке. (например технология LNGPac компании «Wartsila»). Концепция системы LNGPac состоит в том, что СПГ хранится в криогенной емкости напорного типа с рабочим давлением 6–9 бар при температуре СПГ, соответствующей рабочему давлению. Установка оснащена испарителем и подогревателем в целях возможности регулирования количества и температуры газа подаваемого в

двигатель. Примером судна, использующего систему LNGPac, является танкер-афрамекс «Gagarin Prospect» (рис. 1) принадлежащий ПАО «Совкомфлот», с запасом хода на СПГ 14 суток [2].

Известны также системы хранения LNG для транспортных судов, которые предлагает компания Gaztransport & Technigaz (GTT), созданные на основе мембранной грузовой системы Mark III (рис. 2). Предлагаемый объем системы хранения газа может варьироваться от 1000 до 20 000 м<sup>3</sup> [3]. Избыточное давление в бункерной емкости превышает атмосферное не более чем на 250 мбар при температуре СПГ, равной –160 °С.

➤ Во-вторых, цена на СПГ значительно ниже, чем на тяжелые сорта топлива (Heavy Fuel Oil — HFO) и на дизельное топливо (Marine Diesel

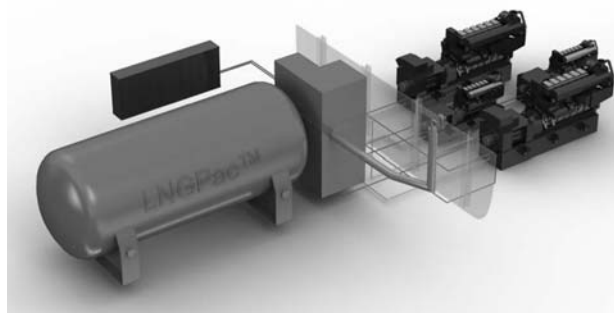


Рис. 1. Общий вид установки LNGPac и судно «Gagarin Prospect», на котором установлена установка LNGPac

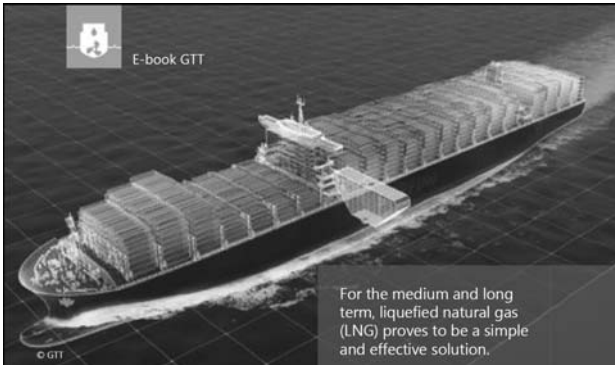
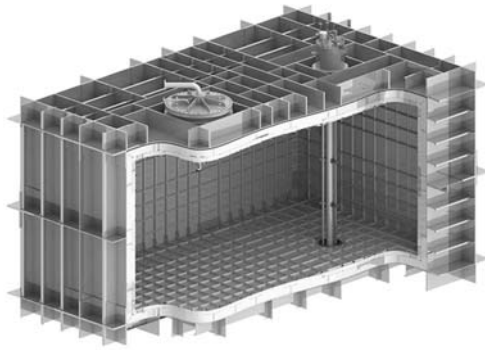


Рис. 2. Мембранный танк для хранения LNG, разработанный компанией GTT (сверху) и предлагаемый вариант его размещения на судне (снизу)

Oil — MDO). Согласно статистике Det Norske Veritas & Germanischer Lloyd (DNV GL) за последние несколько лет [3], количество тепловой энергии, полученной от СПГ, обойдется почти в 2 раза дешевле, чем аналогичное количество тепловой энергии, полученное от MGO.

➤ В-третьих, ужесточаются экологические требования к судовым двигателям внутреннего сгорания. С 1 января 2020 г. содержание серы в топливе не должно превышать 0,5 % во всем мировом океане, кроме зон контролируемых выбросов (Emission Control Area — ECA), что означает необходимость либо перехода на низкосернистые виды топлива, либо установки систем очистки отработавших газов (ОГ) от оксидов серы. В зонах ECA действуют требования IMO Tier-III, которые регламентируют значительное снижение эмиссии оксидов азота (рис. 3).

Выполнение столь жестких требований возможно лишь за счет установки дорогостоящих крупногабаритных систем очистки отработавших газов, способных восстановить оксиды азота до элементарного азота, например систем каталитической очистки (Selective Catalyst Reactor — SCR), либо за счет применения альтернативных видов топлива, таких как СПГ.

Как показывает практика, установка систем очистки ОГ от оксидов серы (типа open-loop [5])

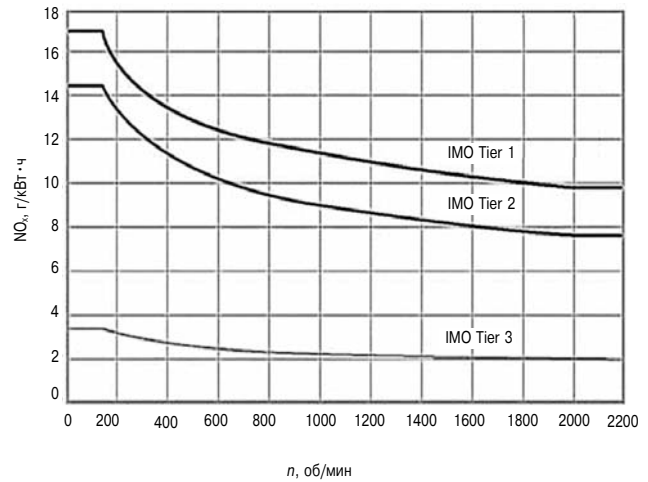


Рис. 3. Предельные значения выбросов NO<sub>x</sub> по требованиям IMO

является экономически оправданной только для крупных судов типа VLCC (Very Large Crude Carrier), которые не будут работать в зонах ECA. Торговые суда, которые планируется эксплуатировать с заходами в ECA-зоны, в любом случае придется оборудовать установками снижения выбросов оксидов азота. Поскольку SCR-системы являются крупногабаритными (сопоставимы по размерам с двигателем), их технологически сложно устанавливать совместно с системами open-loop, не говоря о значительных затратах на модернизацию.

Использование низкосернистых сортов топлива совместно с системой очистки ОГ от оксидов азота повлечет за собой высокие эксплуатационные расходы, во-первых, из-за высокой стоимости «чистых» видов дизельного топлива, во-вторых, из-за дополнительных расходов на закупку технологических жидкостей (раствора мочевины) [6] и выдачу отработавших растворов на береговой терминал. При этом возможные дополнительные расходы на преждевременную замену катализатора. Более подробный анализ этой проблемы выполнен в работах [7, 8].

Конвертация двигателя для работы на природном газе и установка SCR-системы для выполнения требований IMO Tier-III даже при отсутствии запаса LNG на борту судна потребуют значительных финансовых вложений. Но относительно низкая стоимость СПГ и низкие операционные затраты на систему SCR ввиду очень низкого уровня выбросов оксидов азота в ОГ позволят окупить понесенные затраты в течение первых 10 лет после модернизации [9].

Как видно из вышперечисленного, применение СПГ в качестве топлива является экономически и технически оправданным. Наиболее показателен факт значительного увеличения

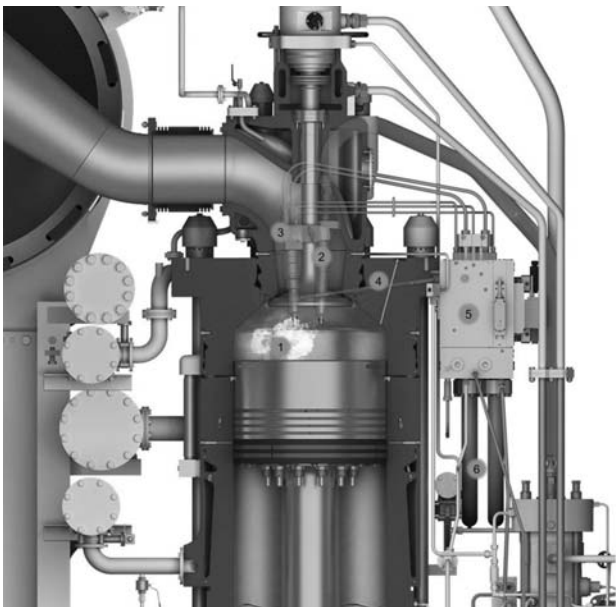
флота, работающего на СПГ (на 2020 г. свыше 200 судов) [10]. В связи с тем что тенденция дальнейшего увеличения количества судов, которые будут использовать СПГ в качестве топлива сохранится, требуется оценить эффективность как самих двухтопливных дизелей, так и систем подготовки газа в целях определения перспектив их развития.

### 1. Особенности конструкции ДВС

В соответствии с требованиями Регистра [11], двухтопливные дизельные двигатели при работе на топливе двух видов должны оборудоваться устройствами подачи запального топлива. Реализация данного требования осуществляется производителями судовых ДВС по-разному.

Компания «MAN Diesel & Turbo SE» производит двухтактные двигатели, работающие на винт фиксированного шага (ВФШ) серии ME-GI, в которых запальное топливо подается основной форсункой. Цикловая подача топлива задается электронной системой управления. Газовое топливо подается в цилиндр под высоким давлением (~300 бар) [12] через специальную газовую форсунку (рис. 4).

Данная конструкция имеет ряд недостатков. Во-первых, газ подается в машинное отделение под высоким давлением, что увеличивает вероятность утечки газа. Во-вторых, доля запального топлива не может быть меньше 3 % от общего объема тепловыделения, что исключает возможность работы судна в зонах ЕСА. Однако стоит отметить, что при такой организации топли-



**Рис. 4. Конструкция двигателя серии ME-GI:**

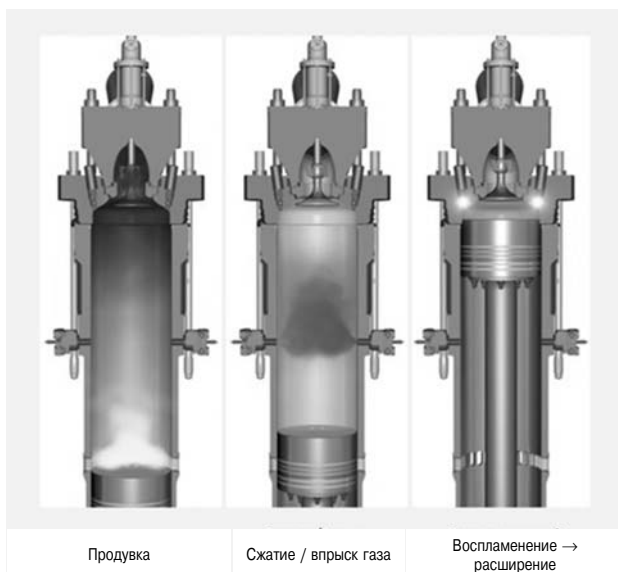
1 — воспламенение газа от топлива; 2 — газовая форсунка; 3 — топливная форсунка; 4 — канал подачи газа; 5 — газораспределительный блок; 6 — линия подачи газа типа «труба в трубе»

воподачи двигатель устойчиво работает на газе во всем диапазоне нагрузок.

Компания «Winterthur Gas & Diesel Ltd.» производит двухтактные двигатели, работающие на ВФШ серии X-DF с системой подачи газа низкого давления (~10–13 бар). В этих двигателях клапаны подачи газа в цилиндр находятся чуть выше продувочных окон, и метан подается в цилиндр в процессе сжатия, что делает смесь более гомогенизированной (рис. 5). Воспламенение газа происходит от запальных форсунок, цикловая подача которых составляет 1 % от общего тепловыделения. И хотя, согласно заявлениям производителя, двигатель способен устойчиво работать на газе в диапазоне нагрузок от 20 до 100 % [13], Регистр ограничивает мощность перехода на газ на уровне 50 % от номинальной.

Широкое распространение на флоте получили четырехтактные двигатели, работающие на генератор переменного тока в составе системы электродвижения. Они работают при постоянной частоте вращения в широком диапазоне нагрузок, что способствует устойчивому сгоранию газа в рабочих цилиндрах. При этом имеется возможность варьировать количество дизель-генераторов, работающих параллельно.

Однако стоит учитывать значительное снижение эффективности установки ввиду потерь при передаче электроэнергии. Двигатели оборудованы системой подачи газа низкого давления (~5 бар). Метан подается в цилиндр вместе с продувочным воздухом через впускной клапан и воспламеняется от запальной форсунки, подача которой составляет 1 % от общего тепловыделения на номинальном режиме. На рис. 6 представлена конструкция двухтопливного двигателя «MAN



**Рис. 5. Принцип работы двигателя типа X-DF**

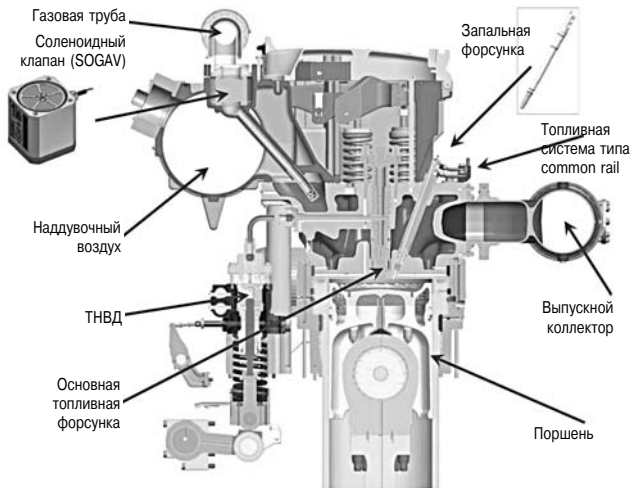


Рис. 6. Конструкция система подачи топлива в цилиндр дизеля фирмы «MAN Diesel & Turbo SE» типа DF

Diesel & Turbo SE» серии DF [14]. Аналогичные двигатели серии DF выпускает фирма «Wartsila».

В соответствии с требованиями Регистра [11], все двухтопливные двигатели должны быть оборудованы аварийной системой автоматического перехода с газового топлива на жидкое, а также газоанализаторами состава атмосферы в картере.

**2. Специфика использования СПГ в судовых ДВС**

СПГ, добытый в различных регионах мира, имеет разный состав. В таблице представлен стандартный состав СПГ, используемый при проведении проектных расчетов, а также реальные композиции природного газа для некоторых крупных месторождений.

Одной из наиболее важных характерных особенностей СПГ как топлива является непостоянство его композиции во времени. В результате исследования [15], проведенного на борту СПГ-танкера «Castillo de Sentisteban», были получены данные об изменении состава газа по мере длительности морского перехода. Для этого судна длительность грузового и балластного переходов составляла по 20 суток. Изменения

**Состав СПГ**

Элемент	Стандартный состав	Алжир	Ливия	Малайзия	Катар
Метан, моль %	89,63	88,0	71,4	93,29	89,5
Этан, моль %	6,32	7,95	16,0	3,42	6,33
Пропан, моль %	2,16	2,37	7,9	2,12	2,49
Бутан, моль %	1,20	1,05	3,4	0,98	1,26
Пентан, моль %	0,00	0,03	1,3	0,00	0,08
Азот, моль %	0,69	0,60	0,00	0,19	0,34

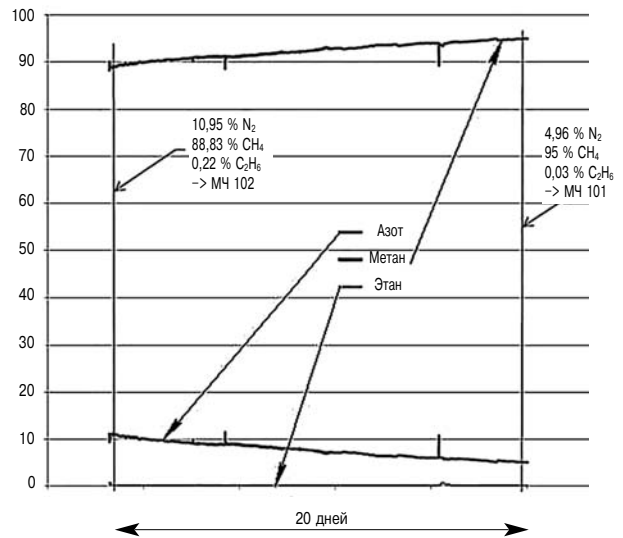


Рис. 7. Изменение композиции газа за время грузового перехода

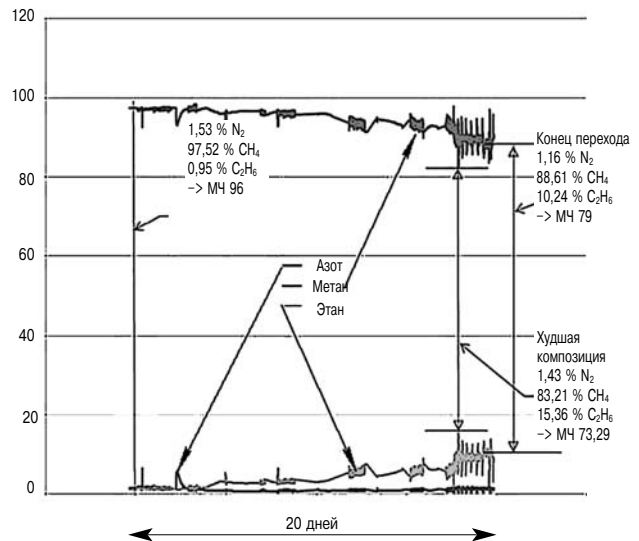


Рис. 8. Изменение композиции газа за время балластного перехода

композиции СПГ за время грузового перехода и в балласте представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

Как видно из приведенных данных, после погрузки СПГ на борт начинает активно испаряться азот вследствие более низкой температуры кипения (-195,8 °C) в сравнении с метаном (-161,4 °C). При грузовом переходе количество азота в композиции испарившегося газа уменьшается. При этом метановое число (МЧ) испарившегося газа почти не меняется. МЧ характеризует детонационную стойкость газа (чистый метан

считается детонационностойким и его МЧ = 100, включение менее детонационностойких газов, например этана, понижает МЧ). МЧ для устойчивой работы современных двухтопливных двигателей не должно быть ниже 70.

При балластном переходе начинает увеличиваться содержание этана в композиции испарившегося газа, что обусловлено его более высокой температурой кипения ( $-88,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Этан имеет более высокую теплотворную способность, ( $\text{C}_2\text{H}_6$  —  $63,77\text{ МДж/м}^3$ ), чем метан ( $\text{CH}_4$  —  $35,83\text{ МДж/м}^3$ ), однако при этом значительно снижается МЧ смеси. За 20 дней перехода произошло изменение МЧ смеси с 96 (с теплотой сгорания  $32\text{ МДж/м}^3$ ) до МЧ, равного 73,2 (с теплотой сгорания  $41,6\text{ МДж/м}^3$ ). Более длительный переход способствовал бы дальнейшему снижению МЧ и соответственно снижению стабильной работы двигателей.

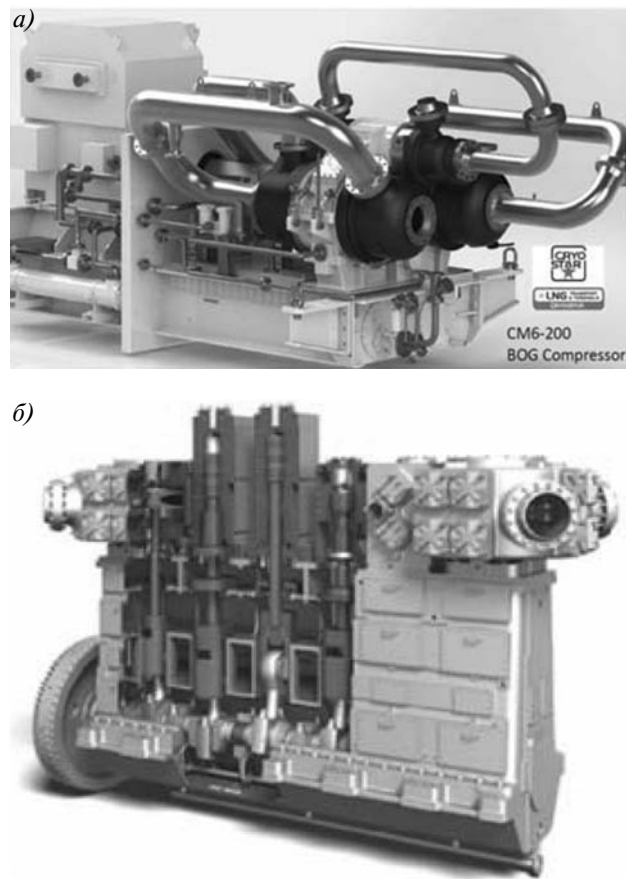
### 3. Сравнительный анализ комплексов двигатель–система подготовки газа

Одной из главных характеристик комплексов двигатель–система подготовки газа — это давление подачи газа в рабочий цилиндр. Для двигателей с системой подачи газа низкого давления (Low Pressure — LP) использование системы LNGPac с давлением в криогенной емкости 6–9 бар позволяет обойтись без применения газового компрессора, что упрощает систему подготовки газа, снижает ее стоимость и энергозатратность.

Использование мембранной криогенной емкости, предлагаемой компанией GTT, изначально подразумевает наличие в системе подготовки газа компрессора, способного обеспечить давление, гарантирующее подачу газообразного топлива в цилиндр. Для двигателей с системой LP, как правило, используются многоступенчатые центробежные компрессоры со степенью повышения давления от 6,5 до 17 в зависимости от конструкции двигателя [16]. В случае применения системы подачи газа высокого давления ~300 бар (High Pressure — HP) применяется многоступенчатый поршневой компрессор. Общий вид компрессоров представлен на рис. 9.

Согласно данным [17], многоступенчатые поршневые компрессоры имеют ряд недостатков по сравнению с центробежными аналогичной мощности: энергоемкость повышается в ~1,6–1,7 раза; занимаемый объем в технологическом помещении в ~14 больше; масса всей установки больше в ~6 раз; требуется компенсация пульсаций давления.

Также, согласно данным, представленным в работе [17], меньший удельный расход топлива на номинальном режиме имеют двигатели с системой подачи газа низкого давления (рис. 10),



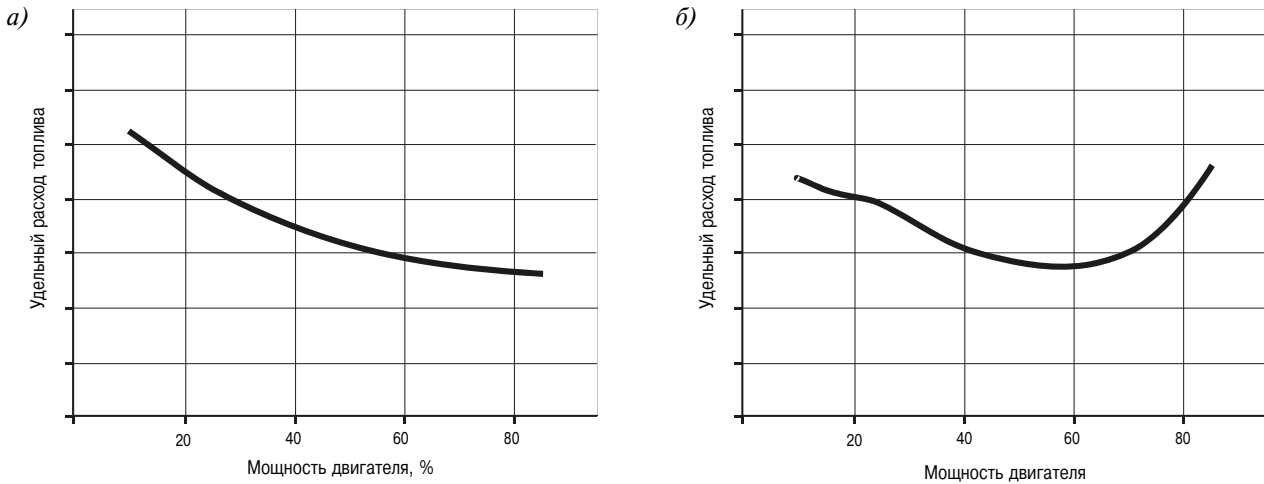
**Рис. 9. Компрессоры подачи газа к двухтопливному двигателю:**

*a* — 6-ступенчатый центробежный компрессор фирмы «CryoStar» с рабочим давлением 16 бар; *б* — многоступенчатый поршневой компрессор фирмы «Burckhardt Compression» с рабочим давлением 300 бар

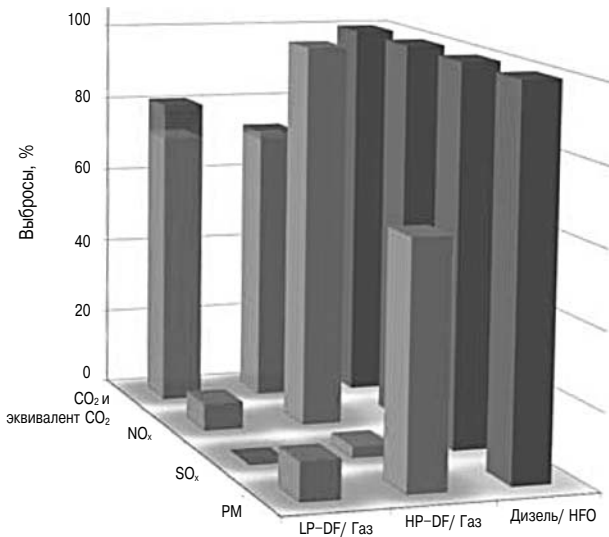
однако стоит отметить, что на долевых режимах двигатели с HP имеют меньший расход топлива.

Следует отметить, что двигатели с системой HP уступают двигателям с системой LP в экологичности. Согласно данным, приведенным в работе [18], двигатели с системой подачи газа высокого давления не имеют выбросов оксидов серы (ввиду ее отсутствия в природном газе), а по уровню выбросов углекислого газа, оксидов азота и твердых частиц незначительно отличаются от обычных дизельных двигателей (рис. 11).

Из преимуществ двигателей с системой HP стоит отметить их устойчивость при работе на газовом топливе вне зависимости от МЧ. В двигателях этого типа не снижается мощность при переходе с дизельного топлива на газовое. В двигателях с системой LP при снижении МЧ ниже 80 мощность снижается на 1 % на каждую единицу МЧ (рис. 12), а также при переходе с дизельного топлива на газовое потеря мощности составляет ~20 % от MCR [19].



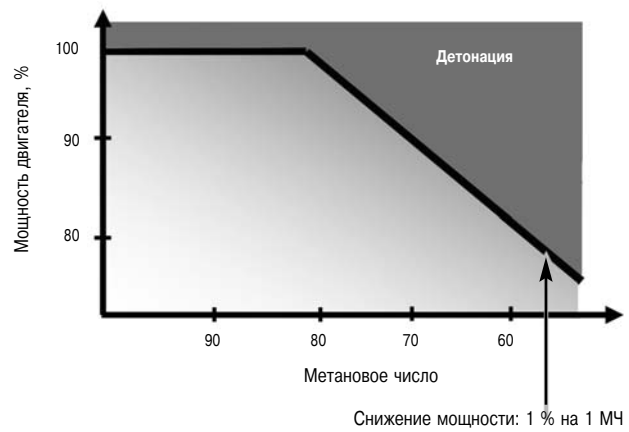
**Рис. 10. Сравнительная характеристика изменения удельного расхода топлива:**  
 а — для двигателя с системой подачи газа низкого давления, работающего по циклу Отто;  
 б — для двигателя с системой подачи газа высокого давления, работающего по циклу Дизеля



**Рис. 11. Относительные уровни эмиссии вредных веществ для двухтопливного двигателя с системой подачи газа низкого давления (LP-DF), двухтопливного двигателя с системой подачи газа высокого давления (HP-DF) и конвенционального дизеля (Diesel)**

**Заключение**

Природный газ становится все более востребованным источником энергии на флоте и, как показывают существующие тенденции, количество судов, использующих СПГ в качестве топлива, будет стремительно увеличиваться. Это потребует увеличения количества судов-бункеровщиков СПГ. Также целесообразна разработка международного стандарта на состав судового



**Рис. 12. Зависимость ограничения мощности двигателя с системой подачи газа низкого давления от значения МЧ**

газового топлива для контроля его качества при бункеровке. При этом следует учесть, что для СПГ-танкеров необходимо совершенствовать системы управления рабочими процессами ДВС, так как они берут на борт газ непосредственно с месторождений и его состав и свойства значительно различаются.

Двигатели с системой подачи газа низкого давления более экономичны, имеют меньшую стоимость при постройке судна и полностью соответствуют требованиям IMO Tier-III по выбросам NO<sub>x</sub>, что позволяет эксплуатацию судов в зонах ECA без использования систем очистки газов.

## Литература

1. International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code). URW: <http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/SafetyTopics/Pages/IGF-Code.aspx> (дата обращения: 08.10.2020).
2. «Зеленые» «Афрамексы» СКФ. URW: [http://www.scf-group.com/fleet/sustainable\\_development/afraamax.aspx](http://www.scf-group.com/fleet/sustainable_development/afraamax.aspx) (дата обращения: 09.10.2020).
3. LNG as marine fuel. URW: <https://www.gtt.fr/en/applications/lng-as-a-fuel> (дата обращения 08.10.2020).
4. Current price development oil and gas. URW: <https://www.dnvgl.com/maritime/lng/current-price-development-oil-and-gas.html> (дата обращения: 08.10.2020).
5. Understanding exhaust gas treatment systems. URW: [https://www.alfalaval.sk/globalassets/documents/microsites/pur-esox/understanding\\_exhaust\\_gas\\_treatment\\_systems.pdf](https://www.alfalaval.sk/globalassets/documents/microsites/pur-esox/understanding_exhaust_gas_treatment_systems.pdf) (дата обращения: 08.10.2020).
6. AdBlue and UREA for Ships. URW: <https://www.greenchem-adblue.com/areas/adblue-urea-ships-int/> (дата обращения: 08.10.2020).
7. Новиков Л.А. Ограничение выбросов NO<sub>x</sub> на уровне ИМО Tier-3 для судовых дизелей отложено до 2021 года // Двигателестроение. 2013. № 2. С. 26–32.
8. Новиков Л.А., Корчинский В.С. Оценка дополнительных затрат судовладельцев при использовании SCR-технологии на судах // Двигателестроение. 2016. № 3. С. 23–31.
9. Природный газ идет на смену мазуту. URW: [https://www.korabel.ru/news/comments/prirodniy\\_gaz\\_idet\\_na\\_smenu\\_mazutu.html](https://www.korabel.ru/news/comments/prirodniy_gaz_idet_na_smenu_mazutu.html) (дата обращения: 08.10.2020).
10. Разработка требований Правил Регистра по использованию газа в качестве топлива на судах, не являющихся газовозами. URW: [http://intari.com/job\\_list/razrabotka-trebovaniij-pravil-registra-po-ispolzovaniju-gaza-v-kachestve-topliva-na-sudakh-ne-javlajush-hikhsja-gazovozami/](http://intari.com/job_list/razrabotka-trebovaniij-pravil-registra-po-ispolzovaniju-gaza-v-kachestve-topliva-na-sudakh-ne-javlajush-hikhsja-gazovozami/) (дата обращения: 08.10.2020).
11. Правила классификации и постройки морских судов. Часть IX. Механизмы. URW: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument?type=rules&d=B0205C93-7555-414F-8E7E-290B4F303730&f=2-020101-114-9> (дата обращения: 08.10.2020).
12. ME-GI Applications. URW: <https://marine.man-es.com/two-stroke/2-stroke-engines/me-gi-engines> (дата обращения: 08.10.2020).
13. X72DF. URW: <https://www.wingd.com/en/engines/engine-types/x-df-dual-fuel/x72df/> (дата обращения 08.10.2020).
14. MAN 51/60DF. URW: [https://www.manes.com/docs/default-source/energy-storage/dual-fuel-engines-energy-storage/man\\_51\\_60df\\_ts\\_preview.pdf?sfvrsn=229f156\\_6](https://www.manes.com/docs/default-source/energy-storage/dual-fuel-engines-energy-storage/man_51_60df_ts_preview.pdf?sfvrsn=229f156_6) (дата обращения: 08.10.2020).
15. Bockhoff N. Operational experience of the 51/60DF from MAN Diesel & Turbo SE // CIMAC Congress, Bergen. 2010. Paper №37. P. 29.
16. MULTI STAGE. URW: <https://cryostar.com/cryogenic-compressors-blowers/multi-stage/> (дата обращения: 09.10.2020).
17. Two-stroke Dual-fuel Technology Evaluation. URW: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40353-016-0005-7> дата обращения 09.10.2020).
18. Low-Pressure X-DF Engines. FAQ. URW: <https://www.wingd.com/en/documents/general/brochures/x-df-faq-brochure.pdf/> (дата обращения: 09.10.2020).
19. Анализ современных подходов к проблеме создания судовых малооборотных газодизельных двигателей. URW: [https://www.researchgate.net/publication/337159769\\_ANALIZ\\_SOVREMENNYH\\_PODHODOV\\_K\\_PROBLEME\\_SOZDANIA\\_SUDOVYH\\_MA LOOBOROTNYH\\_GAZODIZELNYH\\_DVIGATELEJ](https://www.researchgate.net/publication/337159769_ANALIZ_SOVREMENNYH_PODHODOV_K_PROBLEME_SOZDANIA_SUDOVYH_MA LOOBOROTNYH_GAZODIZELNYH_DVIGATELEJ) (дата обращения: 09.10.2020).