

ENVIRONMENTAL SAFETY OF POWER PLANTS: DUAL-FUEL AND GAS ENGINES

Г. Е. Zhivljuk, А. П. Petrov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The subject of this study is internal combustion engines capable of using gaseous fuels — gas and dual-fuel engines. The main technologies of using natural gas in piston engines from the standpoint of ensuring the highest energy efficiency and environmental safety are considered in the paper. It is noted that the use of natural gas as a fuel, regardless of the technology, reduces carbon dioxide emissions from combustion products by 28 % compared to liquid fuels. All known designs of gas and dual-fuel engines fundamentally implement two technologies, namely, the use of homogeneous or heterogeneous gas-air mixtures. The most common is the technology of homogeneous mixtures, which provides high fuel efficiency and the highest environmental safety indicators. This technology provides for the supply of low-pressure gas to the intake ducts of the engine through automatic gas valves. There are practically no sulfur oxides, solid particles in the exhaust gases of the engine, and the emission of nitrogen oxides can be provided at the level of the requirements of the Tier III standard. At the same time, the main disadvantage of the homogeneous mixture technology is the potential penetration of natural gas with a high level of greenhouse effect (which is up to 28 times higher than the effect of carbon-acid gas) into the exhaust tract of the engine — “methane slippage”. This negative aspect can be largely minimized through the use of heterogeneous technology, when fuel gas is fed directly into the cylinder of a dual-fuel engine under high pressure, up to 50 bar, at the end of the compression process. This technology is becoming widespread in the structures of two-stroke engines due to the specifics of their gas exchange process. However, the high dynamics of the heat release process in the implementation of heterogeneous technology of gas-air mixtures is associated with a high emission of nitrogen oxides, commensurate with the emission of NOx by a diesel engine. Based on the analysis of the parameters and characteristics of the products of leading manufacturers implementing various technologies for using natural gas as fuel, conclusions about the potential advantages and prospects of using gas and dual-fuel engines are made.

Keywords: natural gas, gas engine, dual-fuel engine, energy efficiency, environmental safety, parameters, prospects of use.

For citation:

Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. “Environmental safety of power plants: dual-fuel and gas engines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 449–462. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-449-462.

УДК 621.43.074

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК: ДВУХТОПЛИВНЫЕ И ГАЗОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Г. Е. Живлюк, А. П. Петров

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предметом настоящего исследования являются двигатели внутреннего сгорания, способные использовать газообразное топливо, — газовые и двухтопливные двигатели. В работе рассмотрены основные технологии использования природного газа в поршневых двигателях с позиций обеспечения наивысшей энергоэффективности и экологической безопасности. Отмечается, что использование в качестве топлива природного газа, вне зависимости от технологии, позволяет сократить выбросы диоксида углерода с продуктами сгорания на 28 % по сравнению с жидкими видами топлив. Все известные конструкции газовых и двухтопливных двигателей принципиально реализуют две технологии: использование гомогенных или гетерогенных газовоздушных смесей. Наиболее распространенной является технология гомогенных смесей, обеспечивающая высокую топливную экономичность и наиболее высокие показатели экологической

безопасности. Данная технология предусматривает подачу газа низкого давления во впускные каналы двигателя через автоматические газовые клапаны. В отработавших газах двигателя практически отсутствуют оксиды серы, твердые частицы, а эмиссия оксидов азота может быть обеспечена на уровне требований стандарта Tier III. При этом основным недостатком технологии гомогенной смеси является потенциальная возможность проникновения природного газа, обладающего высоким уровнем парникового эффекта, превышающий до 28 раз эффект от углекислого газа в выпускной тракт двигателя — «проскальзывание метана». Подчеркивается, что этот негативный аспект может быть в значительной мере минимизирован за счет использования гетерогенной технологии, когда топливный газ подается непосредственно в цилиндр двухтопливного двигателя под высоким давлением, до 50 бар, в конце процесса сжатия. Данная технология получает распространение в конструкциях двухтактных двигателей в связи со спецификой их процесса газообмена. Однако высокая динамика процесса тепловыделения при реализации гетерогенной технологии газовоздушных смесей сопряжена с высокой эмиссией оксидов азота, соизмеримой с эмиссией NOx дизельным двигателем. На основе анализа параметров и характеристик продукции ведущих производителей, реализующих различные технологии использования природного газа в качестве топлива, сделаны выводы о потенциальных преимуществах и перспективах использования газовых и двухтопливных двигателей.

Ключевые слова: природный газ, газовый двигатель, двухтопливный двигатель, энергоэффективность, экологическая безопасность, параметры, перспективы использования.

Для цитирования:

Живлюк Г. Е. Экологическая безопасность энергетических установок: двухтопливные и газовые двигатели / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 449–462. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-449-462.

Введение (Introduction)

В последние два десятилетия, по данным и прогнозам British Petroleum (BP) [1], наблюдаются существенные изменения структуры мирового энергетического потребления в сторону увеличения доли экологически безопасных первичных источников энергии (рис. 1). Тем не менее, несмотря на рост суммарной составляющей возобновляемых источников энергии (включая составляющую гидроэнергии), доля ископаемых источников (уголь, нефть и газ) в структуре энергопотребления остается значительной, составляя до 80 % и более.

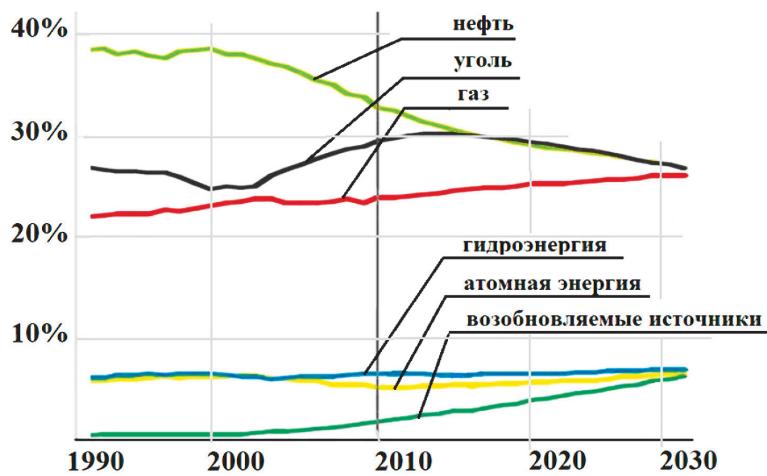


Рис. 1. Структура мирового энергопотребления

Основным потребителем ископаемых углеводородов является транспортная инфраструктура, на которую приходится около 65 % потребления нефтепродуктов. Сжигание ископаемых углеводородных топлив в транспортных энергетических установках, основой которых в подавляющем большинстве случаев является поршневой двигатель внутреннего сгорания, наносит вред окружающей среде, насыщая атмосферу Земли опасными продуктами сгорания, к которым относятся оксиды азота NOx, оксиды серы SOx, несгоревшие углеводороды и твердые частицы. При этом углекислый

газ как естественный (чистый) продукт сгорания любого углеводородного топлива, аккумулирующийся в нижних слоях атмосферы, вызывает *парниковый эффект*, способствуя климатическим изменениям антропогенного происхождения [2].

Судоходная отрасль, являясь структурным звеном транспортной инфраструктуры и одним из потребителей ископаемых углеводородов, оказывает влияние на эти негативные процессы. Проблемы сокращения эмиссии вредных продуктов сгорания от судовых энергетических установок (СЭУ) относятся к важнейшим направлениям развития современного судоходства и регулируются в соответствии с требованиями ряда международных и национальных экологических стандартов [3]–[5]. Перспективным направлением сокращения меры вредного воздействия на окружающую среду со стороны транспортных энергетических установок в ближайшее время является использование в качестве топлива природного газа.

Целью настоящей работы является рассмотрение и анализ возможных технологий использования газомоторного топлива в агрегатах СЭУ как способ достижения требований действующих экологических стандартов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Необходимо отметить, что появление поршневых ДВС в начале XIX в. связано с открытием светильного газа, получаемого при пиролизе каменного угля и состоящего из водорода, метана, угарного и других горючих газов. Светильный газ был применен в качестве топлива в двигателе Жана Этьена Ленуара, который является создателем первых работоспособных конструкций ДВС. Таким образом, первые промышленные ДВС, включая двигатели Николауса Августа Отто, классифицируются как газовые двигатели. Применение этих двигателей в качестве транспортных энергетических установок ограничивалось проблемами хранения запасов топлива, и только в конце XIX в. разработки Готлиба Даймлера, Вильгельма Майбаха, Рудольфа Дизеля и других изобретателей двигателей на жидкотопливном отодвинули использование газовых двигателей на второй план. Вместе с тем газовые двигатели не утратили своей привлекательности в современной энергетике. Двигатели, работающие на природном газе, рассматриваются как наиболее экологически безопасные и энергоэффективные, что обуславливает повышенный к ним интерес в частности в судоходной отрасли [6]–[8].

Современное мировое двигателестроение отличается большим многообразием конструкций, реализующих различные технологии использования газомоторного топлива. Принципиально их можно разделить на технологии использования *гомогенных* и *гетерогенных* смесей. К технологии организации сгорания гомогенных топливовоздушных смесей в первую очередь следует отнести классические газовые двигатели с внешним смесеобразованием и принудительным воспламенением топливовоздушной смеси (искровые двигатели, работающие по циклу Отто). Также к технологии гомогенных смесей относятся двигатели, имеющие смешанное воспламенение (газодизели), в которых принудительное воспламенение смеси воздуха и газа происходит за счет самовоспламенения некоторого количества впрыскиваемого жидкого топлива (пилотное или запальное топливо). При таком способе организации рабочего процесса двигателя используется газ низкого давления, который подается во впускные каналы двигателя через специальные клапаны, автоматически дозирующие подачу топливного газа в определенный момент процесса наполнения цилиндра свежим зарядом. В процессе сжатия заряда происходит выравнивание полей концентрации топливовоздушной смеси, обеспечивающее гомогенизацию. В газовых двигателях, реализующих концепцию гетерогенных смесей, газ подается через газовые клапаны под высоким давлением (порядка 30 МПа) непосредственно в цилиндр двигателя одновременно с запальной порцией топлива. Такая подача газа обеспечивает высокие скорости выгорания гетерогенной топливовоздушной смеси и характер протекания процесса тепловыделения близок к процессу дизельного двигателя с механическим распыливанием топлива.

Вне зависимости от технологии использования природный газ, содержащий в своем составе до 98 % метана, при сгорании обеспечивает минимизацию эмиссии диоксида углерода, при этом ее сокращение достигает 28 % и происходит благодаря отсутствию углерод-углеродных связей

в молекуле CH_4 . Действительно, реакция полного окисления молекулы CH_4 образует одну молекулу диоксида углерода CO_2 на две молекулы воды H_2O . Ни один из других газов такое соотношение обеспечить не способен. К примеру, при окислении этана C_2H_6 , имеющего всего одну углерод-углеродную связь, будет образовано две молекулы CO_2 на три молекулы H_2O . Таким образом будет обеспечено смещение состава продуктов сгорания в сторону повышения концентрации углекислого газа. Если рассмотреть реакцию окисления молекулы непредельного углеводорода, возглавляющего класс алкинов, — ацетилена (C_2H_2), имеющего три углерод-углеродных связи, то в результате сгорания будет получено две молекулы углекислого газа и всего одна молекула воды. Вследствие этого сам факт использования природного газа в качестве топлива обуславливает более высокий уровень экологической безопасности любого теплового двигателя. Кроме того, благодаря специфике состава природного газа, продукты его сгорания практически не содержат оксидов серы и твердых частиц.

В отношении оксидов азота, образующихся при сжигании природного газа, необходимо отметить, что этот параметр экологической опасности имеет непосредственную связь с технологией использования газа и способом организации рабочего процесса двигателя. Рассмотрим более подробно указанные технологии с позиций их эффективности и экологической безопасности.

Концепция гомогенной газовоздушной смеси является наиболее распространенной в конструкциях современных двигателей, работающих на газообразном топливе низкого давления. Рассматривая классический газовый двигатель (рис. 2), конструкция которого базируется на конструкциях бензиновых двигателей с искровым принудительным воспламенением топлива, следует отметить, что такой двигатель по своим особенностям организации рабочего процесса не склонен к реализации высоких уровней топливной экономичности и эффективных КПД. Это положение объясняется тем, что термический КПД поршневого двигателя зависит от степени сжатия и увеличивается по мере роста последней. Невзирая на высокие антидетонационные свойства природного газа как топлива, используемого в рассматриваемой концепции двигателя, проявление детонации с ростом степени сжатия является главным сдерживающим фактором для реализации высокой степени сжатия и, как следствие, достижения высокой топливной экономичности.

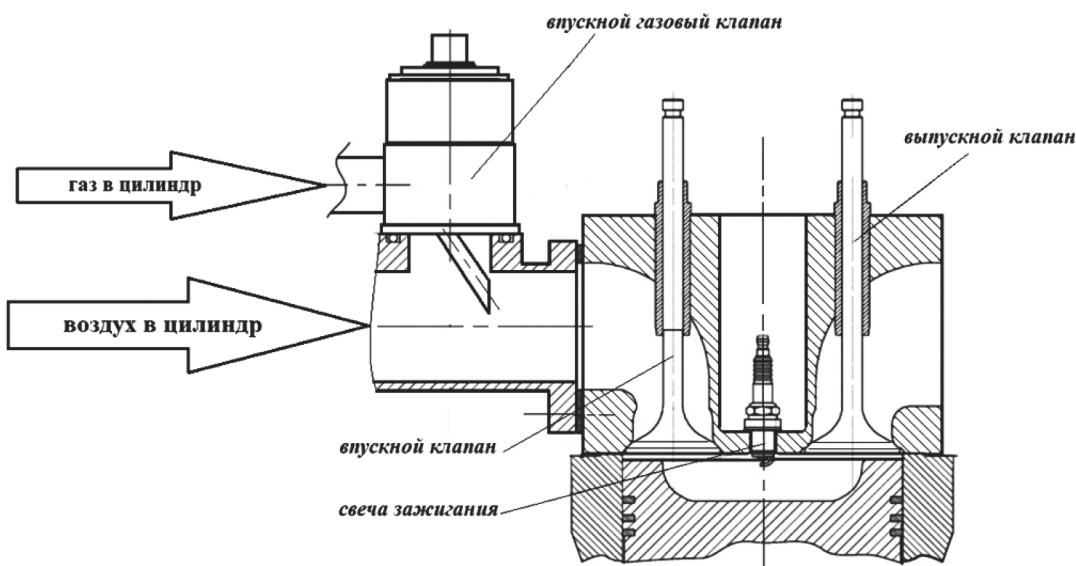


Рис. 2. Конструктивная схема газового двигателя
с принудительным воспламенением топливовоздушной смеси

Существуют конструкции и принципы организации рабочего процесса, позволяющие обойти такие ограничения. К ним относится двигатель с форкамерно-факельным зажиганием, способный работать на обедненных смесях, схема которого представлена на рис. 3.

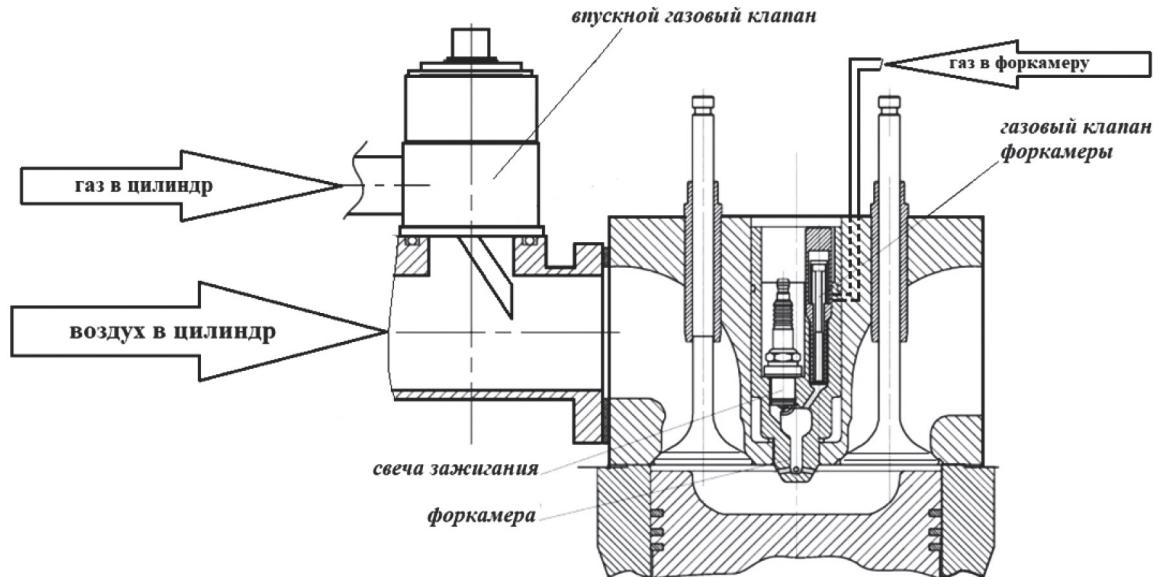


Рис. 3. Схема форкамерного газового двигателя

Примером реализации концепции форкамерного газового двигателя может служить конструкция газового двигателя фирмы «Янмар» (Yanmar Co. LTD) [9], специалисты которой создали две новые модели EYG26L и EY26DF судовых газовых двигателей на базе модели EY26LW (двигатель типа ЧН 28/38,5) с цилиндровой мощностью 307 кВт при частоте вращения коленчатого вала 720 об/мин и среднем эффективном давлении 2,51 МПа. Один из двигателей — EYG26L — способен работать на обедненных смесях за счет использования форкамерно-факельного зажигания. Отличительная особенность организации форкамерного процесса сгорания в нем такова, что топливовоздушная смесь в форкамере, имеющая более высокую концентрацию топливного газа, чем заряд цилиндра, поджигается разрядом свечи зажигания и газовая струя, истекающая из форкамеры с высокой энергией, быстро зажигает обедненную смесь в цилиндре.

Особенностью судового двигателя является необходимость обеспечения и поддержания нестационарных режимов, возникающих при работе судна в штормовых условиях и в режимах маневрирования. При резком наборе нагрузки возникает потенциальная возможность перехода двигателя в область устойчивой детонации, а при сбросе нагрузки двигатель может попасть в область работы с пропусками вспышек газа в цилиндре. Благодаря точной настройке рабочего процесса и системы наддува двигатель должен обеспечивать бездетонационную и бесперебойную работу в широком диапазоне нагрузочных режимов (рис. 4).

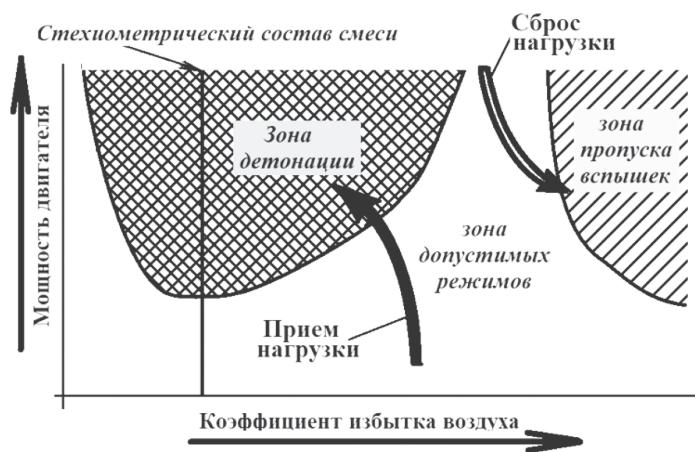


Рис. 4. Режимы работы газового двигателя

Испытания двигателя Yanmar Co. LTD EYG26L выявили преимущества газового двигателя по сравнению с базовой дизельной модификацией, выраженные в увеличении термического КПД на 2,5 %, при этом за счет невысоких максимальных температур цикла достигнуто снижение выбросов NO_x до уровня требований стандарта ИМО TIER III с одновременным сокращением выбросов диоксида углерода и практически полным отсутствием эмиссии твердых частиц (PM) и оксидов серы (рис. 5).

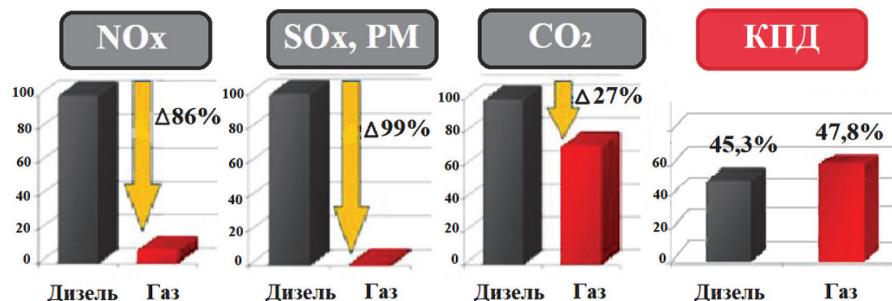


Рис. 5. Параметры газового двигателя EYG26L

Схожую по идеологии организацию процесса сгорания имеют двигатели со смешанным воспламенением топлива, в которых источником принудительного воспламенения обедненной смеси топливного газа и воздуха, заполняющей цилиндр, является самовоспламеняющаяся порция жидкого топлива. Схема такого двигателя показана на рис. 6.

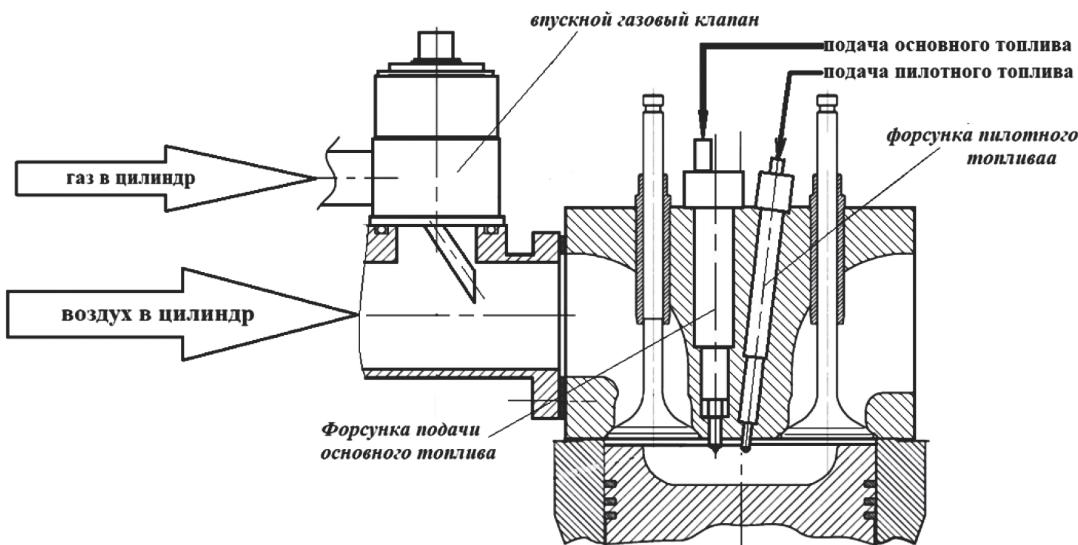


Рис. 6. Схема двухтопливного двигателя с газом низкого давления

Важным преимуществом двухтопливных двигателей оказывается возможность работы на жидком или газообразном топливе, что обеспечивает более широкий маневр его выбора. Принципиально для подачи основного и запального (пилотного) топлива может использоваться одна традиционная механическая система топливоподачи, в которой будет задействована одна форсунка подачи основного топлива. Однако в таком случае отсутствует возможность точной настройки процессов газового двигателя, а организация качественного распыливания малых цикловых подач топлива, необходимых для самовоспламенения газовоздушной смеси, оказывается затруднительной ввиду больших эффективных проходных сечений отверстий распылителя. Исходя из этого в практике конструирования судовых двухтопливных двигателей приняты к использованию раздельные форсунки, которые конструктивно могут быть объединены в одном корпусе для подачи основного

топлива в режиме работы на жидким топливом как обычный дизельный двигатель, и пилотного топлива при переходе на газомоторное топливо при работе в качестве газодизеля. При этом подача пилотного топлива оптимально реализуется по схеме аккумуляторной электронно-управляемой системы топливоподачи Common Rail. Такой подход обеспечивает наиболее точное управление процессами сгорания газовоздушной смеси в камере сгорания двигателя как в части оптимизации зажигания подачи минимальной порции запального топлива, так и в плане задания оптимального момента воспламенения основного заряда цилиндра для всего поля допустимых режимов работы двигателя.

Принимая во внимание достаточно близкий по физико-химическим явлениям характер протекания горения гомогенных обедненных газовых смесей в цилиндре газового и газодизельного двигателя, следует рассмотреть в плане сопоставления второй двигатель EY26DF из линейки ранее отмеченных разработок Yanmar Co. LTD [10]. Параметры двигателя приведены на рис. 7.

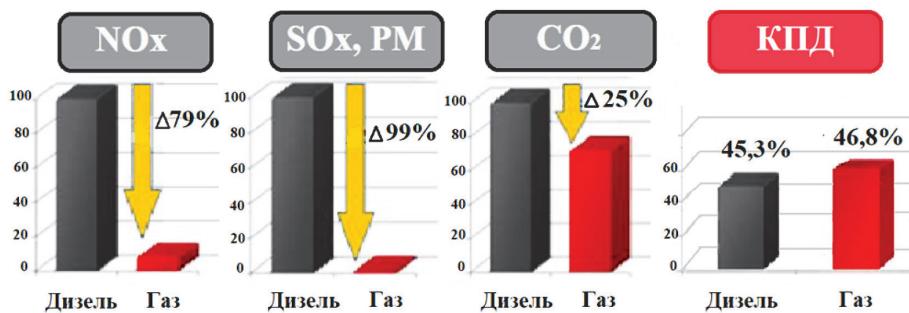


Рис. 7. Параметры двухтопливного двигателя EY26DF

Несмотря на то, что во внутрицилиндровых процессах двигателя реализуются отдельные элементы дизельного цикла, считается, что цикл двухтопливного двигателя с газом низкого давления, как и цикл чисто газового двигателя, максимально приближен к циклу Отто. Однако ввиду некоторых особенностей протекания процессов самовоспламенения запального топлива и более быстрого протекания тепловыделения, в газодизельном цикле несколько увеличивается эмиссия оксидов азота по сравнению с газовым двигателем. Тем не менее принципиально двигатель обеспечивает достижение требований стандарта Tier III. Незначительное увеличение выбросов диоксида углерода связано с использованием жидкого запального топлива. Необходимо отметить, что по мере увеличения размерности двигателя и его цилиндровой мощности указанные негативные изменения будут минимизированы за счет сокращения относительной доли используемого запального топлива. Для сопоставления энергетических параметров работы двигателей результаты их испытаний представлены в таблице.

Некоторые сопоставимые параметры двигателей Yanmar Co. LTD

Модель двигателя	EY26LW	EYG26L	EY26DF
Тип двигателя	Базовый дизель	Газовый двигатель	Двухтопливный двигатель
Диаметр цилиндра	280 мм	280 мм	280 мм
Ход поршня	385 мм	385 мм	385 мм
Частота вращения коленчатого вала	720 об/мин	720 об/мин	720 об/мин
Цилиндровая мощность	307 кВт	225 кВт	255 кВт
Среднее эффективное давление	2,51 МПа	1,84 МПа	2,08 МПа
Удельный эффективный расход топлива, приведенный к MDO	183 г/кВт · ч	176 г/кВт · ч	180 г/кВт · ч
Термический КПД	45,3 %	47,8 %	46,8 %
Выбросы NOx	9,15 г/кВт · ч	1,3 г/кВт · ч	1,7 г/кВт · ч
Выбросы CO ₂ (относительно дизеля)	1,0	0,73	0,75

Обращает на себя внимание сокращение цилиндровой мощности и среднего эффективного давления двигателя при переходе на газомоторное топливо. Объяснением этому служит тот факт, что при внешнем смесеобразовании происходит уменьшение парциального объема воздуха за счет заполнения части объема цилиндра газообразным топливом. Как следствие, при прочих равных условиях в процессе сгорания в газовом и двухтопливном двигателях низкого давления газа может участвовать количество топлива, соответствующее уменьшенному количеству кислорода воздуха.

Вынужденное сокращение цилиндровой мощности — не единственный недостаток, присущий газовым двигателям рассматриваемого типа. Необходимо учитывать, что по некоторым данным (например, [11], [12]) интенсивность парникового эффекта от метана, попадающего в атмосферу, может превышать в 28 раз и более аналогичную интенсивность от диоксида углерода. Поэтому при конструировании газовых двигателей необходимо всеми способами избегать проникновение газа в выпускной тракт. В газовых двигателях с подачей газа низкого давления во впускные магистрали возникает потенциальная опасность «проскальзывания» метана через двигатель и смешение его с отработавшими газами. Такой эффект может происходить как в процессе газообмена, так и в результате неполноты сгорания газа в пристеночных зонах и «закрытых» полостях камеры сгорания.

Решение вопросов неполноты сгорания газомоторного топлива в цилиндре требует специального конструирования деталей цилиндропоршневой группы и особого рода организации внутрицилиндровых процессов. К примеру, в совместной разработке Mitsui Engineering & Co., Ltd. (MES) с DAIHATSU DIESEL MFG. CO., Ltd. (DAIHATSU) газового двигателя MD36G, работающего на бедной смеси, для минимизации подобных эффектов был применен разделный впрыск запальной порции топлива (рис. 8). Двигатель создавался на базе среднеоборотного дизеля DAIHATSU DK-36 (ЧН 36/46), получившего широкое распространение в качестве главного судового двигателя и двигателя для привода различных стационарных установок [13].

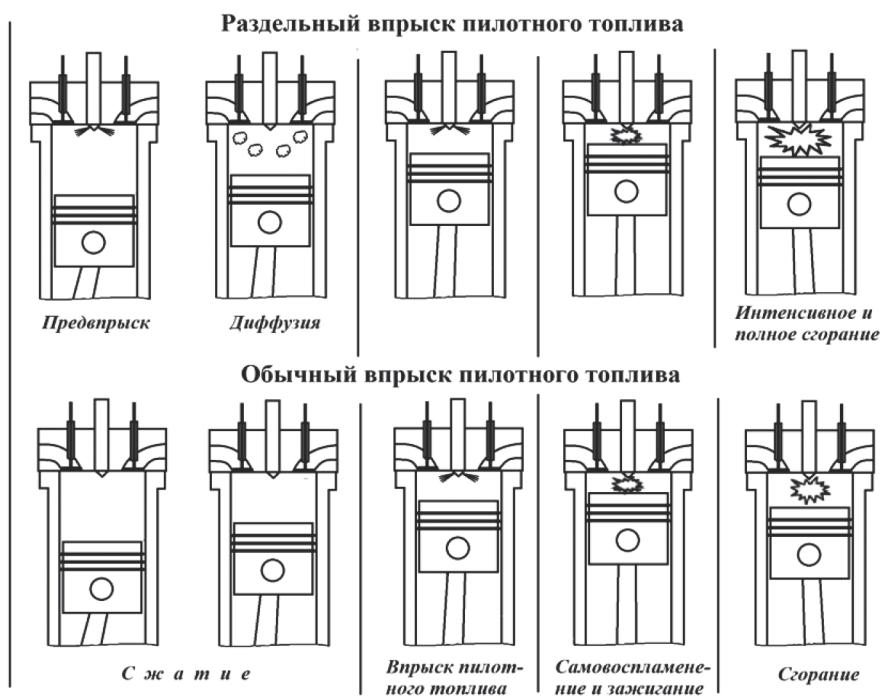


Рис. 8. Принцип разделного впрыска

Использование разделенного впрыска запальной порции топлива в газодизельной модификации двигателя обеспечивает высокую стабильность протекания процесса тепловыделения и некоторую его интенсификацию при увеличении доли тепла, выделяемого за счет сгорания пилотного топлива с 0,5–1,0 % при обычном впрыске до 0,8–1,6 % при разделенном впрыске. На рис. 9 при-

ведено изменение характеристики скорости тепловыделения двигателя с разделенным впрыском по сравнению с обычным впрыском запального топлива при одинаковых регулировках по углу основного впрыска пилотного топлива.

Интенсификация процесса тепловыделения способствует более полному и стабильному сгоранию газовоздушной смеси в камере сгорания. В результате коэффициент дисперсии среднего индикаторного давления в двигателе с разделенным впрыском уменьшился на 25 %, а работа двигателя обеспечивается без аномального сгорания и пропусков вспышек в более широком диапазоне режимов. При этом необходимо отметить, что интенсификация процесса сгорания неизбежно приводит к увеличению образования оксидов азота, однако рост эмиссии NO_x оказывается незначительным (не превышает 2~3 %).

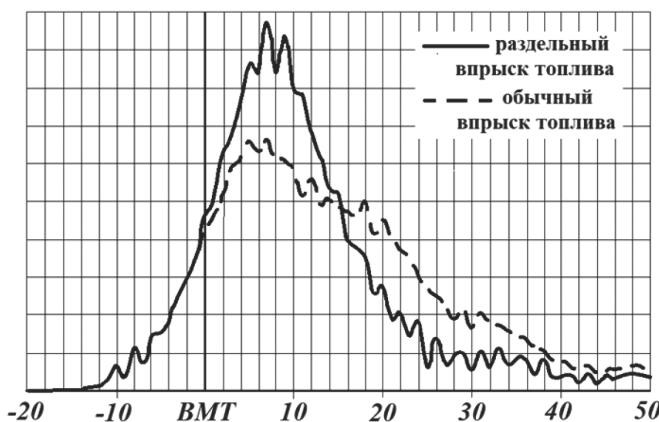


Рис. 9. Скорость тепловыделения в цилиндре двухтопливного двигателя MD36G при обычном и разделенном впрыске топлива

В целях минимизации «закрытых» объемов камеры сгорания конструкция поршня двигателя MD36G была изменена по сравнению с базовой конструкцией в сторону уменьшения расстояний от плоскости огневого днища до первого компрессионного кольца (рис. 10).

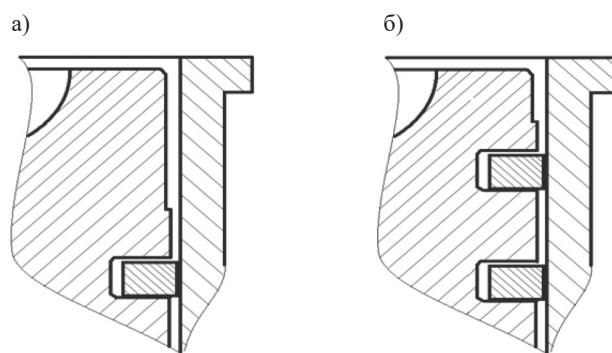


Рис. 10. Минимизация объема несгорающей топливовоздушной смеси:
а — базовый дизельный двигатель; б — двухтопливный двигатель

Внедрение мероприятий по доводке рабочего процесса, а также использование технологий глубокой утилизации энергии отработавших газов позволили достичь КПД газового двигателя типа MD36G до 51,7 % в модификации двенадцати и шестнадцати цилиндров (в V-образной конфигурации цилиндров). Проблема с «проскальзыванием» топливного газа в процессе газообмена решается благодаря точному электронному управлению работой впускного газового клапана. В четырехтактном двигателе подача топливного газа начинается только после закрытия выпускного клапана. Отдельные сложности возникают при переводе на газообразное топливо двухтактных двигателей в связи с особенностями организации в них процессов газообмена.

Поэтому для этих двигателей требуются особо точные настройки фаз подачи газа, во избежание проникновения продувочного воздуха, смешанного с продуктами сгорания и содержащего топливный газ в процессе газообмена.

Технологии гетерогенных смесей принципиально позволяют избежать попадания топливного газа в выпускной тракт двигателя на стадии газообмена, так как подача газа производится непосредственно в цилиндр двигателя под высоким (300–500 бар) давлением в конце процесса сжатия. Принципиальная схема двухтопливного двигателя, использующего газ высокого давления, приведена на рис. 11.

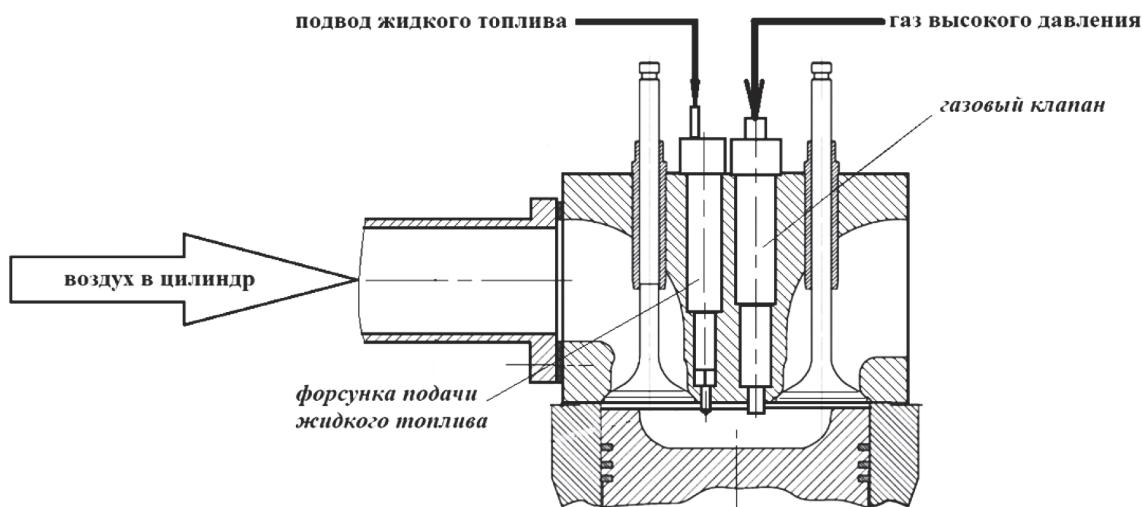


Рис. 11. Схема двухтопливного двигателя с газом высокого давления

Как следует из ранее изложенного, непосредственная подача газа в цилиндр двигателя под высоким давлением является наиболее актуальной для двухтактных двигателей. Разработкой и внедрением подобных систем совместно со своими партнерами занимается фирма MAN Diesel & Turbo (MDT) для двухтактных двигателей серии ME в версиях L, S и G с диаметром цилиндра от 500–900 мм. Первая демонстрация полноразмерного двигателя ME-GI, переоборудованного под газ, состоялась в 2011 г. в исследовательском центре в г. Копенгагене. Подача газа в рассматриваемом двигателе производится параллельно с впрыском запального топлива в конце такта сжатия, поэтому время на гомогенизацию топливовоздушной смеси в процессе смесеобразования практически отсутствует. Скорость выгорания гетерогенной смеси оказывается существенно выше, чем в гомогенных смесях. В первую очередь, это объясняется увеличением площади фронта реакции конвективного горения гетерогенной смеси, вызванного разницей скорости распространения пламени в зависимости от концентрации топливовоздушной смеси. В отличие от протекания реакции горения гомогенной смеси фронт пламени в гетерогенных смесях, в соответствии с изменяющейся концентрацией, не имеет гладкую форму, что обуславливает увеличение площади фронта реакции. Таким образом, в двигателе, работающем с непосредственной подачей газа высокого давления в цилиндр, характер тепловыделения оказывается максимально приближенным к дизельному циклу. На рис. 12 приведены индикаторная диаграмма и характеристики тепловыделения двигателя L70ME-C-GI [13]–[15] при работе на природном газе и дизельном топливе для номинального режима работы.

Основным достоинством двигателя с использованием непосредственной подачи газа высокого давления в цилиндр (наравне с меньшими, по сравнению с другими типами газовых двигателей, выбросами несгоревшего метана) является высокая топливная экономичность, превышающая на 5 % топливную экономичность дизельного двигателя. Однако, ввиду высокой динамики протекания процесса тепловыделения, аналогично дизельному двигателю, отработавшие газы такого двухтопливного двигателя содержат повышенное, по сравнению с двигателями, работающими на гомогенных обедненных газовых смесях, содержание оксидов азота, обеспечивающее достижение только

стандартов Tier II (рис. 13). Достижение соответствия требованиям стандарта Tier III (работа в зонах контроля эмиссии NO_x (NECA)) для рассматриваемых двигателей возможно только с применением специальных методов очистки отработавших газов.

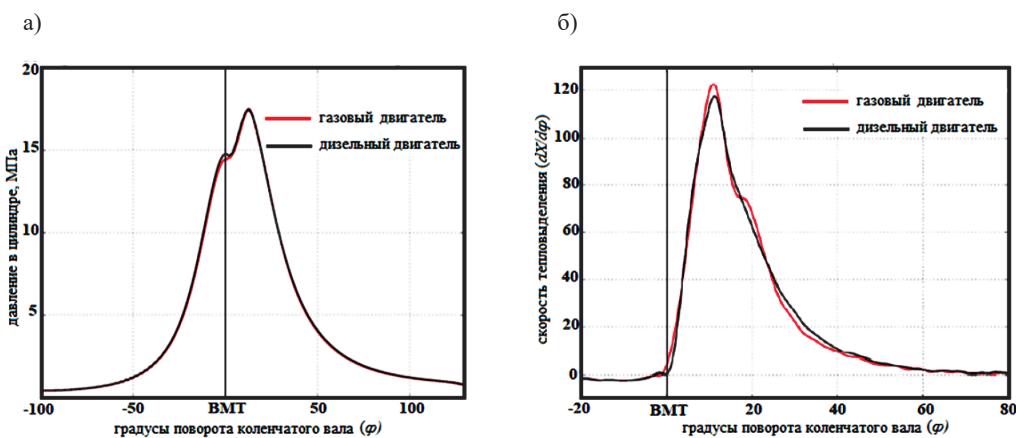


Рис. 12. Сопоставление индикаторной диаграммы и скорости тепловыделения двухтопливного двигателя с газом высокого давления (а) и дизельного двигателя (б)

К существенным недостаткам двухтопливных двигателей, использующих гетерогенные технологии, также следует отнести повышенную сложность оборудования для подготовки газообразного топлива с необходимостью использования компрессоров и криогенных насосов высокого давления (в случае использования сжиженного природного газа). Кроме того, трубопроводы газа высокого давления требуют специальных мер по обнаружению и предотвращению утечек для обеспечения безопасной эксплуатации энергетической установки.

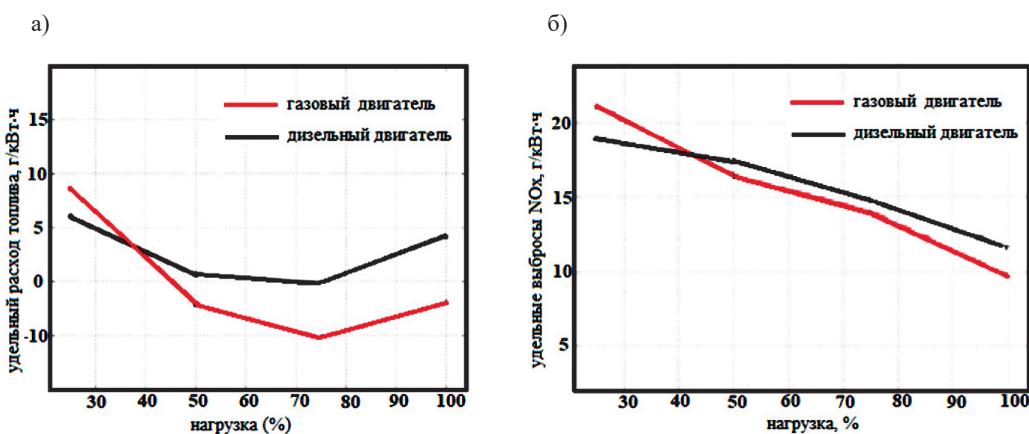


Рис. 13. Изменение относительного удельного расхода топлива (а) и удельной эмиссии NO_x (б) двигателя с газом высокого давления и дизельного двигателя

Особые требования предъявляются к системам управления и настройки параметров оптимизации рабочего процесса газового или двухтопливного двигателя. В отличие от жидкотопливных двигателей при оптимизации рабочего процесса двигателей, использующих сжиженный природный газ, возникает необходимость постоянного отслеживания состава топлива и введение соответствующих корректировок. Данная необходимость обусловлена тем, что при хранении газа в криогенных условиях поддержание температуры хранения и компенсация теплоты, проникающей через теплоизолированные стенки резервуаров хранения, происходит благодаря испарению части топливного газа с отбором тепловой энергии на теплоту парообразования сжиженного многофракционного криогенного газа. При этом в первую очередь испарению подлежат наиболее

низкотемпературные кипящие газы, начиная с метана. Таким образом, по мере расходования топливного газа с отбором паров, состав смеси газов смещается к более тяжелым углеводородам. Поэтому системы управления должны включать датчики-газоанализаторы, определяющие состав смеси топливных газов, поступающая информация с которых учитывается при введении корректировок в процессе оптимизации настроек параметров внутрицилиндровых процессов.

Выходы (Summary)

На основе анализа технологий и проблем использования газообразных топлив в поршневых двигателях внутреннего сгорания необходимо выделить следующие важные аспекты:

1. Высокий уровень энергетической эффективности и экологической безопасности СЭУ с двигателями, способными работать на газообразных топливах, вызывает неуклонный рост заинтересованности операторов судов и судовладельцев в использовании двухтопливных и газовых двигателей.

2. Благодаря уникальности состава природного газа карбоновый след энергетической установки при его использовании сокращается до 28 %.

3. Естественное сокращение выбросов вредных веществ с отработавшими газами двигателей, использующих газообразное топливо в условиях глобальных ограничений, обеспечивает высокую конкурентоспособность судов, использующих технологии газовых и двухтопливных СЭУ во всех районах работы, включая работы в зонах контроля эмиссии.

4. Ввиду относительной простоты конструкции, удобства эксплуатации, а также высоких показателей экологической безопасности и энергетической эффективности наибольшее распространение получают двигатели с газом низкого давления, реализующие концепции гомогенных смесей.

5. Несмотря на более высокий уровень экономичности, концепция гетерогенных газовоздушных смесей имеет ограниченное распространение, находя применение в основном в двухтактных двигателях.

6. Широкое использование и распространение двигателей, использующих газомоторное топливо, до настоящего времени сдерживается громоздкостью систем хранения и ограниченными возможностями бункеровки ввиду недостаточно развитой инфраструктуры.

7. Использование газомоторного топлива является наиболее целесообразным для СЭУ танкеров-газовозов, когда исчезает проблема выделения больших объемов под резервуары хранения запасов газового топлива, а стоимость топливного газа для использования в установке оказывается минимальной.

8. Энергетические установки, работающие на природном газе, могут рассматриваться как перспективная базовая конструкция для перехода на экологически безопасные углеродно-нейтральные виды топлива, такие как биогаз, синтетический газ и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Statistical Review of World Energy 2021 / 70th edition. — London: Whitehouse Associates, 2021. — 70 p.
2. Живлюк Г. Е. Перспективные технологии водного транспорта для ограничения парникового эффекта / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 730-743. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-730-743.
3. Иванченко А. А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
4. Петров А. П. Экологическая безопасность. Ограничение выбросов серы судовыми энергетическими установками / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 130–145. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-130-145.

5. Живлюк Г. Е. Техническое обеспечение для соответствия судовых энергетических установок новым требованиям 2021 г. по выбросам оксидов азота / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 122–138. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-122-138.

6. Трофимова Г. И. Метан как альтернативное топливо / Г. И. Трофимова [и др.] // Символ науки: международный научный журнал. — 2016. — № 11–3 (23). — С. 165–172.

7. Костылев И. И. Сжиженный природный газ как судовое топливо: проблемы и перспективы их решения / И. И. Костылев // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 2 (75). — С. 74–78.

8. Карпенко А. А. Перспективы перевода судов морского и речного транспорта на альтернативные виды топлива / А. А. Карпенко, Е. П. Копцева // Транспортное дело России. — 2017. — № 3. — С. 63–66.

9. Hagiwara R. Development of pure marine gas engine (EYG26L) / R. Hagiwara, I. Ohashi // Marine Engineering. — 2015. — Vol. 50. — Is. 6. — Pp. 719–725. DOI: 10.5988/jime.50.719.

10. Мельник Г. В. Развитие конструкции газовых двигателей (по материалам конгресса CIMAC) / Г. В. Мельник // Двигателестроение. — 2020. — № 3 (281). — С. 35–53.

11. Saunois M. The growing role of methane in anthropogenic climate change / M. Saunois, R. B. Jackson, P. Bousquet, B. Poulter, J. G. Canadell // Environmental Research Letters. — 2016. — Vol. 11. — Is. 12. — Pp. 120207. DOI: 10.1088/1748–9326/11/12/120207.

12. Семенов С. М. Парниковый эффект: открытие, развитие концепции, роль в формировании глобального климата и его антропогенных изменений / С. М. Семенов // Фундаментальная и прикладная климатология. — 2015. — Т. 2. — С. 103–126.

13. Мельник Г. В. Развитие газовых двигателей (по материалам конгресса CIMAC) / Г. В. Мельник // Двигателестроение. — 2021. — № 4 (286). — С. 31–53.

14. ME-GI dual fuel MAN B&W engines. A technical, operational and cost-effective solution for ships fuelled by gas. — Denmark, Copenhagen: MAN Diesel & Turbo, 2015. — 32 p.

15. Stoumpos S. Towards Marine Dual Fuel Engines Digital Twins — Integrated Modelling of Thermodynamic Processes and Control System Functions / S. Stoumpos, G. Theotokatos, C. Mavrellos, E. Boulougouris // Journal of Marine Science and Engineering. — 2020. — Vol. 8. — Is. 3. — Pp. 200. DOI: 10.3390/jmse8030200.

REFERENCES

1. *Statistical Review of World Energy 2021 / 70th edition*. London: Whitehouse Associates, 2021.
2. Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. “Advanced water transport technologies for limiting the greenhouse effect.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 730–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-730-743.
3. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivljuk. “Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
4. Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. “Environmental safety. Limitation of sulfur emissions by the ship power plants.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 130–145. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-130-145.
5. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. “Technical support for ship power plants compliance with the new requirements for nitrogen oxide emissions in 2021.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 122–138. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-122-138.
6. Trofimova, G. I., N. I. Trofimov, I. A. Bakushkina, and V. G. Cheremisina. “Metan kak al’ternativnoe toplivo.” *Simvol nauki: mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal* 11–3(23) (2016): 165–172.
7. Kostylev, I.I. “Liquefied natural gas as marine fuel: problems and solution prospects.” *Transport of the Russian Federation* 2(75) (2018): 74–78.
8. Karpenko, A., and E. Koptseva. “Perspectives for rendering ships of maritime and inland transport to alternative types of fuel.” *Transport Business in Russia* 3 (2017): 63–66.
9. Hagiwara, Ryoichi, and Issei Ohashi. “Development of pure marine gas engine (EYG26L).” *Marine Engineering* 50.6 (2015): 719–725. DOI: 10.5988/jime.50.719.
10. Mel’nik, G. V. “Razvitiye konstruktsii gazovykh dvigatelei (po materialam kongressa CIMAC).” *Engines construction* 3(281) (2020): 35–53.

11. Saunois, M., R. B. Jackson, P. Bousquet, B. Poulter, and J. G. Canadell. "The growing role of methane in anthropogenic climate change." *Environmental Research Letters* 11.12 (2016): 120207. DOI: 10.1088/1748-9326/11/12/120207.
12. Semenov, S. M. "Greenhouse effect: discovery, concept development, role in formation of global climate and its human-induced changes." *Fundamental and Applied Climatology* 2 (2015): 103–126.
13. Mel'nik, G. V. "Development of gas engines (based on CIMAC proceedings)." *Engines construction* 4(286) (2021): 31–53.
14. *ME-GI dual fuel MAN B&W engines. A technical, operational and cost-effective solution for ships fuelled by gas*. Denmark, Copenhagen: MAN Diesel & Turbo, 2015.
15. Stoumpos, Sokratis, Gerasimos Theotokatos, Christoforos Mavrelos, and Evangelos Boulogouris. "Towards marine dual fuel engines digital twins — integrated modelling of thermodynamic processes and control system functions." *Journal of Marine Science and Engineering* 8.3 (2020): 200. DOI: 10.3390/jmse8030200.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Живлюк Григорий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

Петров Александр Павлович —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: app.polab@inbox.ru, PetrovAP@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhivljuk, Grigorij E. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

Petrov, Aleksandr P. —
PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: app.polab@inbox.ru, PetrovAP@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 6 мая 2022 г.
Received: May 6, 2022.