

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596

## FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF ENVIRONMENTALLY SAFE MODERN DIESEL POWER PLANTS

**G. E. Zhivljuk, A. P. Petrov**

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

*Currently, the development of the global engine manufacturing is impossible without taking into account modern requirements of environmental safety requirements for marine power plants. The article review the main trends in the development and design of internal combustion engines to meet environmental standards. It is asserted that the problems of ensuring environmental safety are becoming a priority for the leading manufacturers, and this direction begins to occupy the leading position in the main directions of the development of modern engine building. Among the main directions of the authors are identified and analyzed: improving the flow in-cylinder processes; development of designs of the peripheral systems and technologies, influencing the toxicity of exhaust gases; the use of alternative fuels from the standpoint of reducing the harmful effects of the engine on the environment. It is emphasized that the conditions for the organization of the working process determine the intensity of the formation of harmful substances controlled by environmental safety requirements. The influence of cleaning devices and the bypass of exhaust gases on the growth of environmental safety indicators of a modern diesel engine is considered. The authors analyze the features of the use of natural gas and methanol in dual-fuel and gas engines. Examples of designs by leading engine manufacturers demonstrated the possibility of achieving high environmental parameters through the implementation and development of these areas. The main conclusions of the article are based on the 28 Congress of the International Council on combustion engines (CIMAC Congress), held in Helsinki in June 2016.*

*Keywords: internal combustion engine, environmental safety, fuel injection, Miller cycle, exhaust gases, exhaust gas recirculation, selective catalytic reduction, scrubber, alternative fuels, injector.*

**For citation:**

Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "Features of the development of environmentally safe modern diesel power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.

**УДК 621.431.074**

## ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ СОВРЕМЕННЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

**Г. Е. ЖИВЛЮК, А. П. ПЕТРОВ**

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

*В настоящее время развитие мирового двигателестроения невозможно без учета современных требований экологической безопасности, предъявляемых к судовым энергетическим установкам. В статье рассматриваются основные тенденции разработок и конструирования двигателей внутреннего сгорания в обеспечение требований экологических стандартов. Проблемы обеспечения экологической безопасности становятся приоритетными для ведущих производителей, и данное направление начинает занимать главенствующее положение в основных направлениях развития современного двигателестроения. В числе главных направлений авторами выделяются и анализируются: совершенствование протекания внутрицилиндровых процессов; развитие конструкций периферийных систем и технологий, влияющих на токсичность отработавших газов; использование альтернативных видов топлив с позиций сокращения вредного воздействия двигателя на окружающую среду. Подчеркивается, что условия организации рабочего процесса определяют интенсивность образования вредных веществ, контролируемых требованиями экологической безопасности. Рассмотрено влияние устройств очистки и перепуска отработавших газов на рост показателей экологической безопасности современного дизельного двигателя. Анализируются особенно-*

сти применения природного газа и метанола в двухтопливных и газовых двигателях. На примерах конструкций ведущих производителей двигателей продемонстрированы возможности достижения высоких экологических параметров благодаря реализации и развитию выделенных направлений. Основные выводы по статье базируются на материалах 28 Конгресса Международного совета по двигателям внутреннего сгорания (CIMAC Congress), состоявшегося в Хельсинки в июне 2016 г.

*Ключевые слова:* двигатель внутреннего сгорания, экологическая безопасность, впрыск топлива, цикл Миллера, отработавшие газы, рециркуляция отработавших газов, селективное каталитическое восстановление, скруббер, альтернативные виды топлива, форсунка.

**Для цитирования:**

Живлюк Г. Е. Особенности развития экологически безопасных современных дизельных энергетических установок / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.

## Введение

Неизменно в течение многих десятилетий главными тенденциями развития мирового двигателестроения являлись повышение топливной экономичности, сокращение массо-габаритных характеристик при одновременном росте удельных мощностных показателей новых агрегатов, обеспечение высоких ресурсных показателей, снижение себестоимости производства. Условия конкуренции формировали такой технический облик двигателя, который, в первую очередь, позволял в целом минимизировать экономические затраты потребителя в процессе эксплуатации и получать максимальные прибыли производства.

В современном мире дизелестроения вектор направленности новых разработок неуклонно смещается в направлении достижения наибольшей экологической безопасности создаваемых конструкций двигателя. Постоянное повышение требований экологических стандартов вынуждает производителей двигателей обеспечивать эти требования, невзирая на возможные потери в топливной экономичности и увеличение стоимости, размеров и веса агрегатов. Эта тенденция достаточно явно прослеживается в материалах 28 конгресса СИМАК, состоявшегося в Хельсинки 6 – 10 июня 2016 г.

Разработки в области достижения высоких экологических параметров современных двигателей инициированы целым рядом нормативных документов, таких как EU Stage 4, EPA Tier 4 и др. Развитие технологий сокращения вредных выбросов в воздушный бассейн с отработавшими газами двигателей судового назначения было ускорено в связи с введением регулирования Международной морской организации ИМО Tier III [1]. Регулирование предусматривает поэтапное сокращение выбросов:

- с 2013 г. парниковых газов путем введения индекса энергоэффективности — Energy Efficiency Design Index (EEDI), [2];
- с 2015 г. оксидов серы в районах контроля — SECA (SO<sub>x</sub> Emission Control Areas);
- с 2016 г. оксидов азота в зонах контроля NECA (NO<sub>x</sub> Emission Control Areas);
- одновременно ужесточаются требования на ограничение выбросов твердых частиц.

Находясь под жестким прессом регулирования и контроля выбросов вредных веществ, производители двигателей и поставщики комплектующих изделий и систем вынуждены предпринимать соответствующие меры по достижению требований экологических стандартов своей продукцией. На основе анализа деятельности основных производителей в рассматриваемой области выделяется ряд основных направлений совершенствования конструкции двигателей для обеспечения экологических параметров, из которых важнейшими являются:

- совершенствование протекания внутрицилиндровых процессов, включая точное автоматическое управление процессом сгорания — тепловыделения посредством формирования требуемого закона топливоподачи и обеспечение специальных условий протекания процессов сгорания в камере сгорания;
- развитие конструкций периферийных устройств и технологий для очистки отработавших газов;

– создание конструкций двигателя, предусматривающих использование альтернативных видов топлив с целью обеспечения максимального сокращения вредного воздействия на окружающую среду.

В настоящей статье рассматриваются изложенные тенденции развития конструкций и на примерах публикаций ведущих производителей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) отслеживаются возможности достижения требуемых параметров экологической безопасности энергетических установок. В этой связи, в первую очередь, необходимо упомянуть о ходе выполнения программы HERCULES [3] – [5], представляющей комплексный научно-исследовательский проект по созданию высокоэффективных и экологически безопасных судовых двигателей. Этот проект осуществляется с 2004 г. по настоящее время при активном участии фирм *MAN u Wärtsilä* и поддержке со стороны Европейского Союза. Его цели иллюстрируются рис. 1.

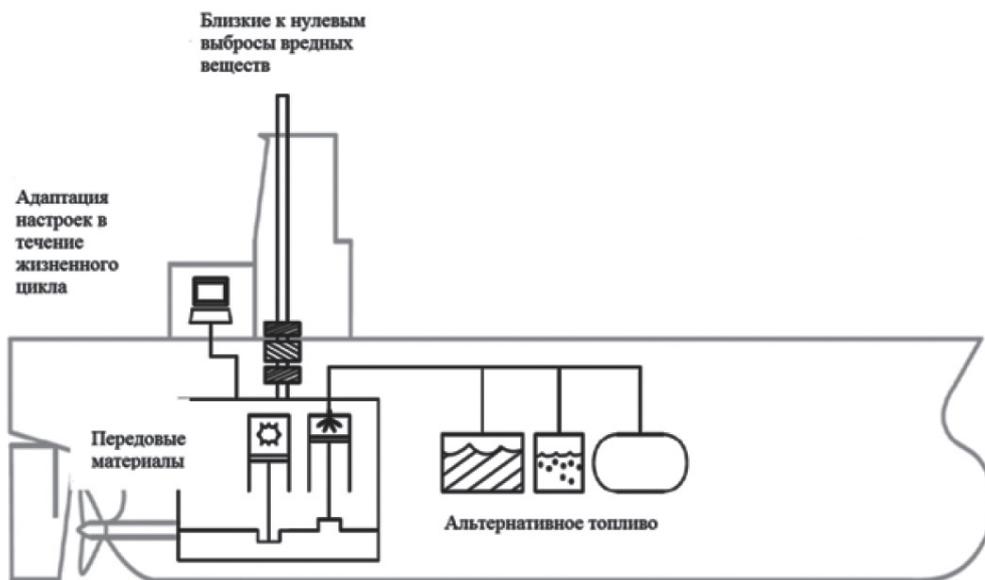


Рис. 1. Основные направления реализации проекта HERCULES

Промежуточные итоги выполнения проекта были подведены в 2014 г. В качестве главных достижений отмечается увеличение на 3 % КПД двигателя и снижение выбросов  $\text{NO}_x$  — на 80 %. Кроме того, было достигнуто рекордное значение максимального давления в цилиндре в 30 МПа на прототипе экспериментального двигателя *R&D*.

### Совершенствование протекания внутрицилиндровых процессов

Наиболее логичным, эффективным и технически обоснованным путем решения проблем экологической безопасности двигателя является специальная доводка его рабочего процесса. Условия протекания внутрицилиндровых процессов определяют интенсивность образования вредных веществ, контролируемых требованиями экологической безопасности.

Выбросы твердых частиц инициируются процессами образования сажи, на поверхности которой абсорбируются вредные вещества, являющиеся продуктами неполного сгорания топлива. Поскольку механизм образования сажи в камере сгорания дизельного двигателя представляется как высокотемпературный крекинг капель распыленного топлива, сокращение выбросов твердых частиц может быть достигнуто в основном путем увеличения дисперсности распыливания топлива за счет повышения давления впрыска и более равномерного распределения топлива в объеме камеры сгорания, избегая повышенных концентраций в пристеночных областях. Вторым нормируемым вредным продуктом в отработавших газах дизельного двигателя являются оксиды азота  $\text{NO}_x$ , образование которых также напрямую связано с условиями протекания процесса сгорания. Стремление к сокращению удельного расхода топлива приводит к повышению динамичности процесса тепловыделения

и, как следствие, к росту максимальных температур в цикле, уровень которых, как известно, определяет термический КПД цикла. При этом быстрый рост температур рабочего тела до достижения максимума в цилиндре поршневого ДВС определяет количественную характеристику образования оксидов азота, а резкое снижение температур газа на такте расширения не оставляет времени на протекание реакций восстановления NOx. Что касается содержания в отработавших газах оксидов серы, то их количество зависит только от состава топлива, и сокращение SOx не может быть достигнуто путем влияния на протекание внутрицилиндровых процессов.

Таким образом, при рассмотрении особенностей организации малотоксичных внутрицилиндровых процессов в первую очередь встает задача точного управления законом подачи топлива, определяющим динамику процесса тепловыделения. Эту задачу позволяют успешно решать электронно-управляемые аккумуляторные системы подачи Common Rail Systems (CRS), способные за счет формирования многоступенчатого впрыска топлива реализовать практически любой закон тепловыделения [6]. Заслуженное первенство в разработке и массовом внедрении таких систем принадлежит *Robert Bosch Diesel Systems*. Основываясь на более чем 20-летнем опыте производства и эксплуатации систем электронного управления впрыском на двигателях автотранспортного назначения, специалисты фирмы активно выходят на рынок больших размеров двигателей (в том числе — судовых) с цилиндровой мощностью более 560 кВт [7], которые уже сегодня, способны обеспечивать требования EU Stage 4 и EPA Tier 4. Специальными разработками CRS для двигателей судового назначения заняты фирмы *L'Orange GmbH* [8], *Ganser CRS AG* [9] и др.

Одновременно со специализированными фирмами разработками в области электронно-управляемого впрыска топлива заняты ведущие производители двигателей. Фирма *MAN Diesel & Turbo SE*, имеющая большой опыт разработки и производства CRS для среднеоборотных двигателей, проводит работы по созданию новой модульной системы MCRS 2.2 с давлением в рампе до 220 МПа [10], [11] на смену предыдущей системе MCRS 1.6 (рис. 2). Благодаря её использованию в конструкции двигателя 6L 32/44 достигается снижение дымности и сокращение выбросов оксидов азота во всем мощностном диапазоне работы двигателя (рис. 3).

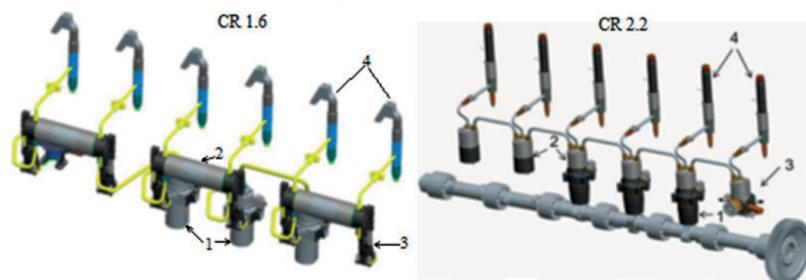


Рис. 2. Системы Common Rail MAN Diesel & Turbo SE:  
1 — топливный насос высокого давления; 2 — аккумулятор давления;  
3 — блок клапанов; 4 — топливные форсунки

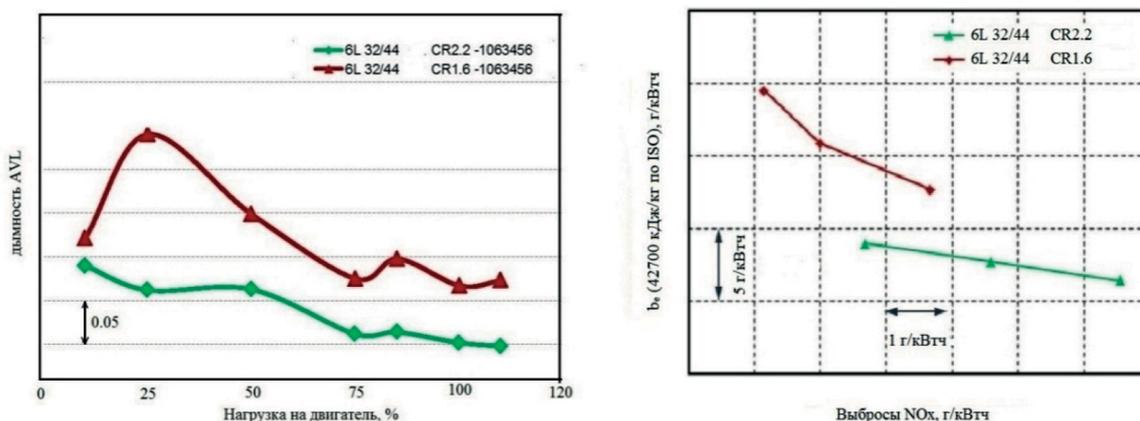


Рис. 3. Характеристики двигателя фирмы MAN по дымности и выбросам оксидов азота

Аналогичные работы проводит мировой лидер в производстве судовых двигателей — фирма *Wärtsilä*. В 2013 г. фирма установила двигатели W46 с топливоподачей под управлением системы Common Rail первого поколения — CR1 на 14 круизных судах. К середине 2015 г. суммарная наработка двигателей составила свыше 3 млн ч. Основываясь на благоприятных результатах эксплуатации, фирма *Wärtsilä* предпринимает усилия по созданию нового поколения оборудования — CR2, которое в полном объеме предполагается использовать на новом двигателе W31 (рис. 4) [12].

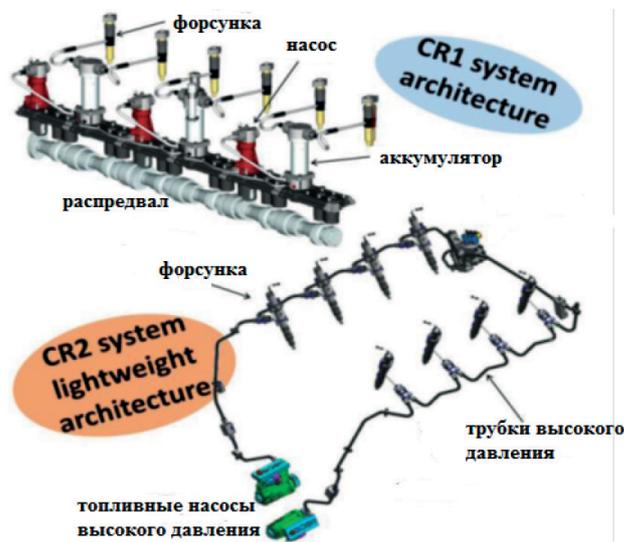


Рис. 4. Конструктивные отличия систем CR1 и CR2, разработанных фирмой *Wärtsilä*

Как видно из рис. 4, система Common Rail второго поколения оказывается более простой по конструкции. Так, вместо индивидуальных насосов и отдельных аккумуляторов топлива для форсунок в системе используются блочные насосы высокого давления, а управление впрыском производится не управляющим маслом (серво маслом) а непосредственно топливом, что значительно увеличивает быстродействие системы, повышает возможности по управлению впрыском и дополнительно упрощает конструкцию. Кроме того, аккумулирующие объемы топлива в системе второго поколения дополнительно организованы непосредственно в форсунках (рис. 5). Как отмечает разработчик, благодаря использованию новой конструкции системы достигается значительное сокращение комплектующих деталей, в частности, конструкция форсунки CR2 имеет приблизительно на 30 комплектующих единиц меньше, чем форсунка CR1.

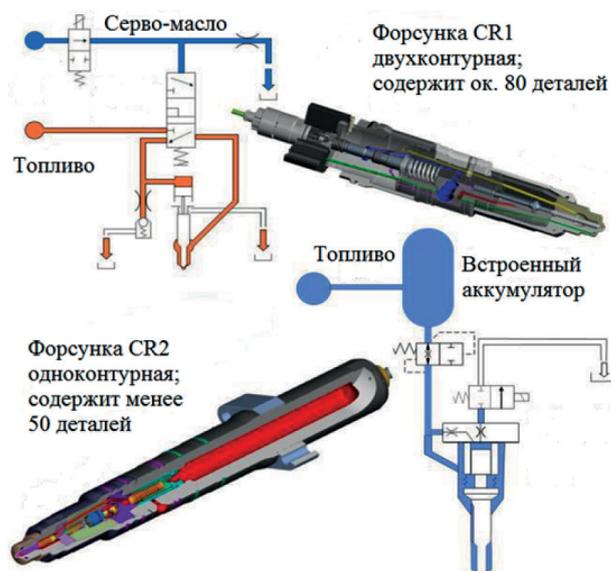


Рис. 5. Особенности исполнения форсунок

Диапазон использования CRS расширен и в отечественном производстве. Так, Уральский дизель-моторный завод (УДМЗ) в представленном новом семействе двигателей ДМ-185 с системой электронного управления обеспечивает достижение требований EU IIIA / IMO2 без использования периферийных систем доочистки отработавших газов [13].

Не менее важным аспектом организации рабочего процесса низкотоксичного дизельного двигателя, на который обращено пристальное внимание разработчиков, является обеспечение специальных условий протекания сгорания цикловой подачи топлива в камере сгорания. Поскольку образование оксидов азота является высокотемпературным процессом, становится актуальным использование методов сдерживания роста температур рабочего тела в цилиндре. По мнению специалистов MTU [14], эффективным способом сокращения выбросов оксида азота является использование внутрицилиндрового охлаждения свежего заряда (цикла Миллера) в сочетании с двухступенчатым наддувом. Дальнейшее развитие двигателей MTU серии 4000 – «Model Type 05» предусматривает использование ряда ключевых технологий, включая упомянутые, для преодоления противостояния между жесткими требованиями стандарта выхлопа (EU Stage IIIB, EPA Tier 4 и IMO 3) и сокращением эксплуатационных затрат.

Очень близкой к идеологии MTU концепции придерживается и флагман отечественного двигателестроения ОАО «Коломенский завод» в разработке новой платформы для конструкций двигателей Д500. На рис. 6 показано влияние различной эффективности зарядки цилиндра (интенсивность реализации цикла Миллера) на температуры заряда цилиндра в реперных точках цикла, необходимое давление наддувочного воздуха для компенсации потери заряда и сокращение эмиссии оксидов азота по данным Коломенского завода [15].

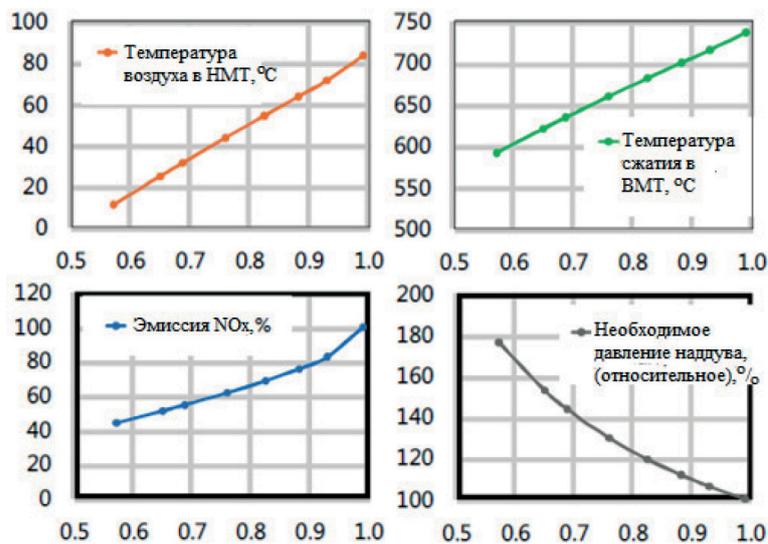


Рис. 6. Эффект от использования цикла Миллера

Для более глубокой адаптации характеристик двигателя ко всем режимам работы оказывается уместным внедрение в его конструкцию системы электронного управления [10] изменением фаз газораспределения — Variable Valve Timing (VVT). Электронное управление процессом газообмена в дизельном двигателе позволяет улучшить очистку цилиндра от отработавших газов и наполнение цилиндра свежим зарядом для всего скоростного и мощностного диапазона работы. Попутно могут решаться проблемы реализации цикла Миллера и вопросы оптимизации условий работы агрегата газотурбинного наддува.

Примером разработок в этой области является конструкция нового двигателя фирмы *Anglo Belgian Co*. Новый высокоэкономичный двигатель D36 мощностью 650 кВт/цикл при 750 об/мин, оснащенный, в том числе, системой изменения фаз газораспределения, отвечает всем современным требованиям по выбросам вредных веществ [16]. Использование изменения фаз газораспре-

деления предусматривается в конструкции своих судовых дизелей фирмами *YANMAR CO, LTD* [17], *Hyundai Heavy Industries* [18] (рис. 7 и 8). На рис. 7, благодаря использованию в конструкции привода клапанов передаточного звена в виде управляемого гидроцилиндра, показана реализация возможности изменения времени открытия клапана в зависимости от давления масла, создаваемого в полости под верхним плунжером. Управляющее воздействие на клапан 3 формируется исходя из параметров состояния и режима работы двигателя.

Наиболее просто и эффективно система изменения фаз газораспределения реализуется в случае применения двухраспредвальной конструкции механизма [19], когда каждый кулачковый вал управляет своей группой клапанов — впускных и выпускных. Механизм изменения фаз в такой системе газораспределения смонтирован в конструктивном элементе привода распределительного вала. Это позволяет обеспечить управляемый поворот любого из распределительных валов относительно приводного шкива (шестерни) на требуемый угол (см. рис. 7).

Такая схема реализована на большинстве высокооборотных двигателей автотранспортного назначения и достаточно хорошо зарекомендовала себя в эксплуатации, включая применение системы DVVT (Dual Variable Valve Timing), позволяющей плавно изменять фазы газораспределения в зависимости от условий работы двигателя. Это достигается путем поворота и впускного и выпускного распределительных валов относительно приводной звездочки в диапазоне 40 – 60 ° угла поворота коленчатого вала.

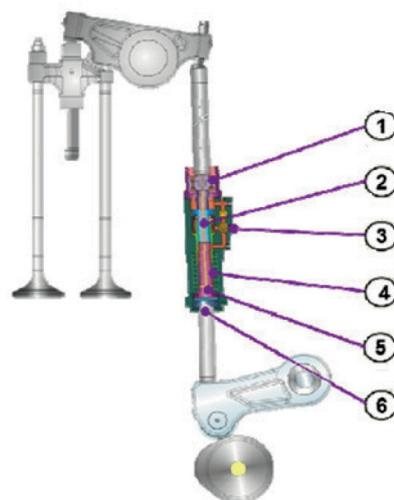


Рис. 7. Конструкция системы изменения фаз газораспределения фирмы *Hyundai Heavy Industries*:  
 1 — сферическая опора верхней штанги толкателя; 2 — верхний плунжер; 3 — клапан подачи масла;  
 4 — возвратная пружина; 5 — нижний плунжер; 6 — сферическая опора нижней штанги



Рис. 8. Конструктивное исполнение системы VVTi на двухраспредвальном двигателе (управление только впускными клапанами, торцевая крышка механизма снята)

### Развитие конструкций периферийных устройств и технологий для очистки отработавших газов

Уверенное долгосрочное достижение требований ИМО Tier III и тем более ИМО Tier IV, оказывается практически невозможным без использования в конструкции агрегата периферийных устройств, обеспечивающих дополнительный рост показателей экологической безопасности современного коммерческого дизельного двигателя. Периферийные устройства, во-первых, позволяют изменять состав свежего заряда цилиндра в обеспечение достижения максимальной экологической безопасности внутрицилиндровых процессов и, во-вторых, производят дополнительную очистку отработавших газов от вредных компонентов перед выбросом в атмосферу.

Широкое распространение в конструкциях двигателя получают системы рециркуляции отработавших газов Exhaust Gas Recirculation (EGR) с электронно-программным управлением. Благодаря смешиванию свежего воздуха, подаваемого в цилиндр, с отработавшими газами происходит снижение концентрации свободного кислорода  $O_2$  и увеличивается масса углекислого газа  $CO_2$  в свежем заряде цилиндра. Совместное влияние этих двух факторов вызывает понижение максимальной температуры в камере сгорания как за счет снижения скорости горения из-за низкой концентрации  $O_2$ , так и за счет высокой теплоемкости  $CO_2$ . В результате обеспечивается сокращение концентрации термического  $NOx$  в отработавших газах двигателя. Однако эффективность системы EGR ограничивается режимами работы, на которых коэффициент избытка воздуха значительно превышает минимально необходимый для обеспечения организации процесса сгорания.

Кроме того, в самых простых системах EGR высокого давления, которые получили широкое распространение в двигателях автомобильного класса, существенной проблемой является осаждение слоя твердых частиц продуктов неполного сгорания на поверхностях впускного тракта. Смешиваясь с масляным туманом, неизбежно поступающим из системы вентиляции картера, твердые частицы образуют на стенках впускных каналов и поверхностях впускных клапанов постоянно нарастающий слой отложений. Уплотненный слой отложений не только уменьшает сечение каналов, но и, в случае отрыва его отдельных фрагментов потоком газа, способен привести к серьёзным авариям двигателя при попадании под клапаны и препятствуя их полному закрытию.

В отличие от предельно жестко скомпонованных двигателей автомобильного класса, габариты больших стационарных и судовых двигателей позволяют развить объемы системы EGR и избежать рисков накопления отложений во впускных каналах. В то время как на автомобильном двигателе, в лучшем случае, может устанавливаться охладитель отработавших газов, подаваемых в систему рециркуляции, в судовом двигателе представляется возможным задействовать в этой системе скруббер и произвести очистку газов системы рециркуляции. Схемы систем EGR, предлагаемые для реализации *Mitsubishi Heavy Industries Marine Machinery & Engine Co. Ltd. (MHI-MME)* в малооборотном двигателе 6UEC45LSE-Eco-B2, работающем на тяжелом топливе, представлены на рис. 9 [20].

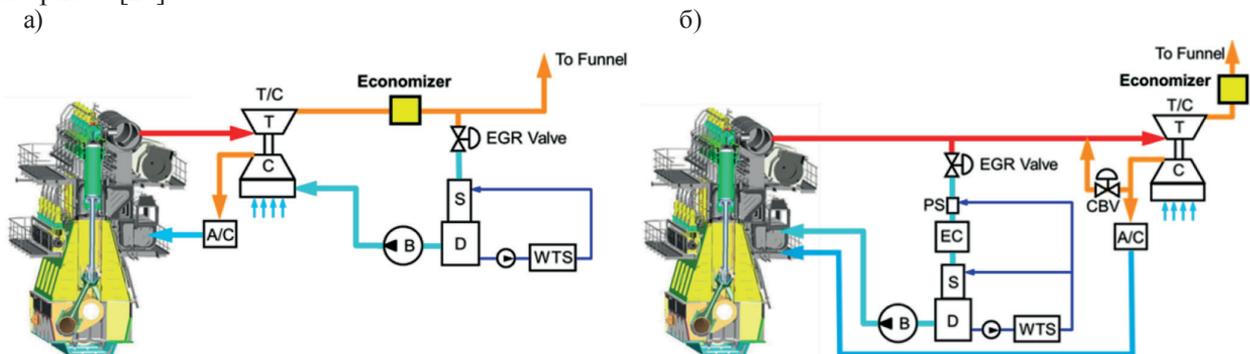


Рис. 9. Схема систем рециркуляции отработавших газов:

а — низкого давления; б — высокого давления; Т/С — турбокомпрессор; С — компрессор; Т — турбина; А/С — охладитель воздуха; СВВ — клапан байпаса; EGR Valve — клапан перепуска отработавших газов; PS — предскруббер; EC — охладитель перепускаемых газов; S — скруббер; D — влагоотделитель; WTS — система очистки влаги; B — нагнетатель EGR; To Funnel — в дымовую трубу

Из приведенных на рис. 9 схем системы EGR специалисты МНИ-ММЕ отдают предпочтение системе низкого давления (LP-EGR), отмечая, что, невзирая на большие объемы системы, система LP-EGR выгодно отличается простотой конструкции скруббера и пониженной температурой газа. Кроме того, на турбине срабатывает полный объем газа, покинувшего цилиндр. Результаты испытаний адаптированного двигателя 6UEC45LSE-Eco-B2 с системой LP-EGR, показавшие достижение значительного сокращения (свыше 80 %) эмиссии NO<sub>x</sub>, представлены на рис. 10.

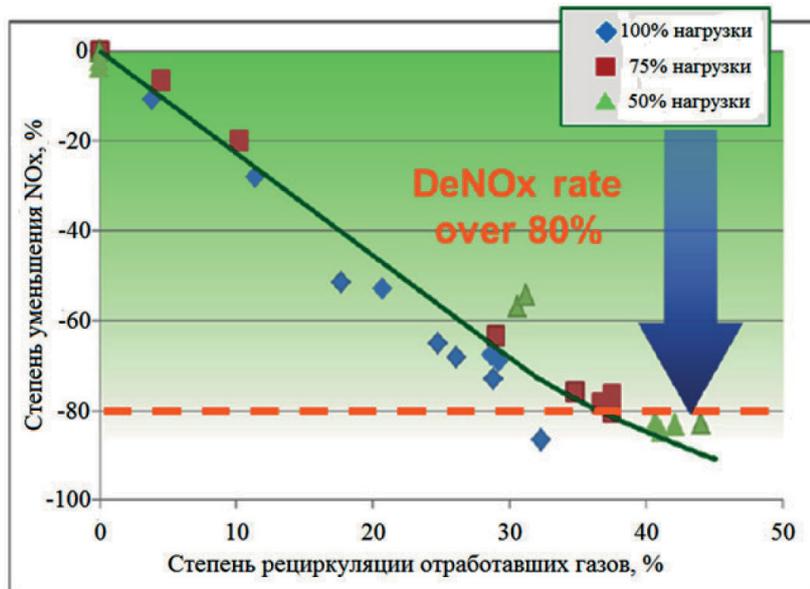
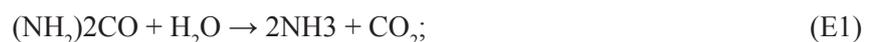


Рис. 10. Сокращение выбросов NO<sub>x</sub> на различных режимах работы двигателя 6UEC45LSE-Eco-B2 с системой LP-EGR в зависимости от степени рециркуляции отработавших газов

В отечественной промышленности системой EGR оборудован высокооборотный двигатель нового семейства «Пульсар», разрабатываемый на ОАО «Звезда» совместно с *AVL List GmbH Austria* [21].

Как уже отмечалось ранее, по очевидным причинам эффективная работа системы EGR на всех режимах работы двигателя оказывается труднодостижимой по причине снижения фактического коэффициента избытка воздуха в камере сгорания. Поэтому параллельно с рециркуляцией отработавших газов в конструкции большегабаритных двигателей все более активно используется широко апробированные в автомобильной промышленности с 1999 г. устройства селективного каталитического восстановления — Selective Catalytic Reduction (SCR) [22]. Система SCR предусматривает использование катализатора на основе каталитически активных соединений металлов переходной валентности (например, пентаоксида ванадия V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) на керамических носителях кристаллической структуры и реализует протекание двух основных реакций E1 и E2 с образованием азота и воды:



Необходимо отметить, что до последнего времени SCR и скрубберы рассматривались как дополнительные внешние опции к энергетическим установкам. В настоящее время эти агрегаты очистки отработавших газов глубоко интегрированы в конструкцию двигателя и являются его неотъемлемой частью. Из всего многообразия компоновочных решений следует выделить разработки фирмы *MAN Diesel & Turbo*, которая развивает систему, названную авторами по аббревиатуре фирмы MDT [23] — рис. 11.

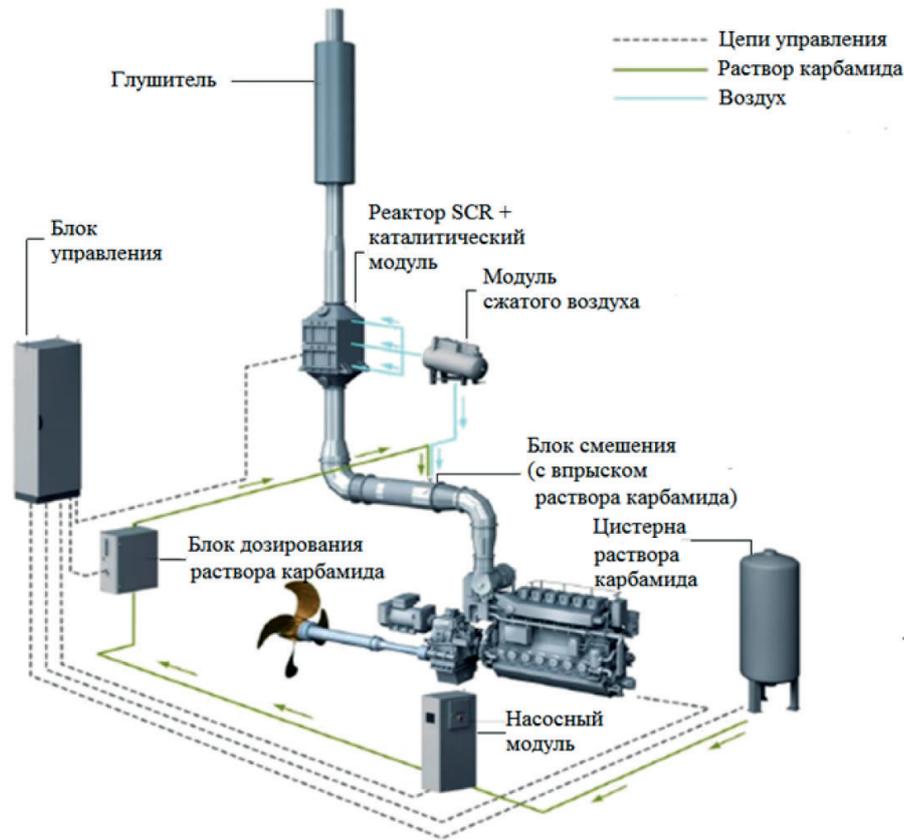


Рис. 11. Система MDT и её компоненты

Отдельный интерес вызывают работы, проводимые специалистами фирмы *Wärtsilä* [24], рассматривающие возможность установки каталитических устройств между ступенями турбины в двухступенчатом наддуве с целью повышения температуры газа и улучшения управляемости процессов в SCR.

Сокращение эмиссии соединений серы с отработавшими газами дизельных двигателей также является важной задачей, которая традиционно решается установкой скрубберов [23].

### Использование альтернативных видов топлива

Альтернативные топлива для тепловых двигателей традиционно рассматривалось с позиций сокращения эксплуатационных расходов или в плане использования возобновляемых источников тепловой энергии. Новый взгляд на альтернативные топлива продиктован требованиями экологии. Исходя из этого, большинство производителей рассматривают природный газ как экологически чистое топливо, способное обеспечить требования по выбросам:

- оксидов серы по причине отсутствия серы в природном газе;
- углекислого газа за счет малого содержания углерод-углеродных связей в топливе, при сгорании которого конечные продукты сгорания смещаются к образованию паров воды;
- несгоревших углеводородов и твердых частиц.

Этим предопределяется возросший интерес к разработкам двухтопливных и газовых двигателей. Разработками в области использования газового топлива заняты как специализированные фирмы, занимающиеся конструированием, доводкой и производством топливной аппаратуры (*L'Orange GmbH, Robert Bosch Diesel Systems* и др.), так и ведущие производители двигателей. Значительный опыт в разработке газодизельных систем подачи топлива накоплен с 1989 г. специалистами фирмы *L'Orange GmbH* [8]. Успешное коммерческое внедрение получают как двухтопливные системы низкого давления газа (LP-Gas), реализующие гомогенный процесс сгорания топлива (рис. 12), так и системы газа высокого давления (HP-Gas) со сгоранием гетерогенной смеси (рис. 13).

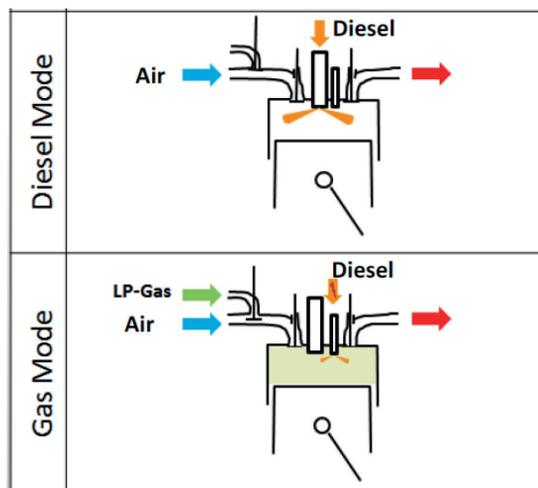


Рис. 12. Принцип действия двухтопливной системы в двух вариантах (Diesel Mode и Gas Mode) с газом низкого давления (LP-Gas)

Внешний вид топливоподающих форсунок фирмы *L'Orange GmbH*, разработанных для двухтопливных двигателей *Wärtsilä Corporation* представлен на рис. 14. При этом разработчик отмечает высокую сложность конструкции системы в плане необходимости конструктивного обеспечения полной подачи топлива при работе двигателя только на жидком топливе и малой подачи запального (пилотного) топлива при работе газодизеля по двухтопливной схеме.

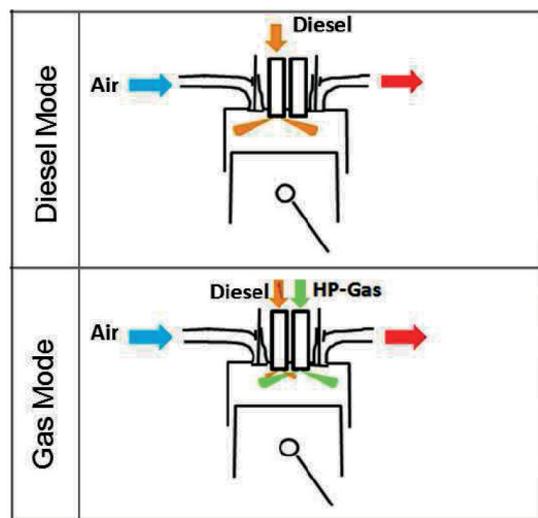


Рис. 13. Принцип действия двухтопливной системы в двух вариантах (Diesel Mode и Gas Mode) с газом высокого давления ((LP-Gas, до 35 МПа)

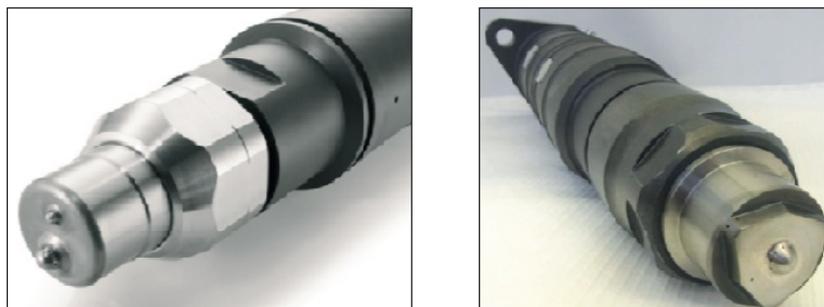


Рис. 14. Форсунки фирмы *L'Orange GmbH* двухтопливного двигателя для газодизельных систем низкого и высокого давления

Преимущество газовых двигателей перед дизельными по эмиссии вредных компонентов демонстрирует фирма *Yanmar Co. LT* [25] на примере двигателя EYG 26L (рис. 15).

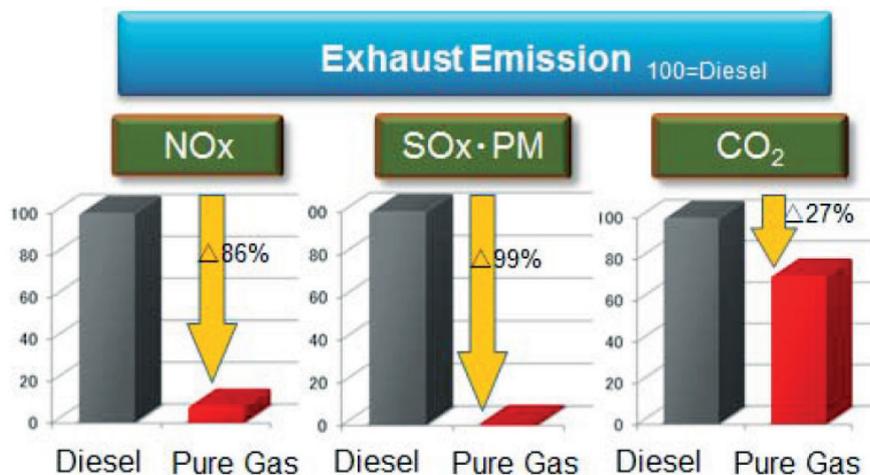


Рис. 15. Сокращение вредных веществ в отработавших газах газового двигателя EYG 26L по сравнению с дизельной модификацией:

*Exhaust Emission* — выбросы вредных веществ; *PM* — твердые частицы; *Pure Gas* — только газ

Разработкой двухтопливных модификаций линейки своих дизельных двигателей заняты практически все ведущие производители. Так, инженеры фирмы *Daihatsu Diesel Mfg. Co., Ltd.* создали двухтопливный двигатель DE28DF, который прошёл сертификацию и допущен к морскому применению [26]. Два типа газовых двигателей разработала фирма *Kawasaki Heavy Industries, Ltd.* [27], [28], демонстрируя возможности по снижению эмиссии вредных веществ и достижения более высокой энергетической эффективности по сравнению с дизельным двигателем на примере серии двигателей KG-V мощностью от 5 до 7,8 МВт в 12- и 18-ти цилиндровом исполнении. Фирма *MAN B&W* дополнительно запустила в производство двигатель G90ME-C10.5, способный работать на сжатом природном газе [29] и т. д.

Определенный интерес проявляется также к другим видам «неископаемого» топлива. Так, *Wärtsilä Corporation* запатентовала систему впрыска метанола и внедрила его на двигателе для пассажирского парома «Stena Germanica» [30]. Специалисты фирмы *Wärtsilä* отмечают, что добавление водорода к газовому топливу создает предпосылки к увеличению КПД двигателя и снижению суммарного вреда, наносимого окружающей среде. Серьезные исследования в этой области выполнены японскими учеными университетов Осаки и Киото, фирмы *Osaka Gas* (Япония) [31].

### Заключение

На основании выполненного в настоящей работе анализа технологий и конструкций, разработанных для повышения экологической безопасности современных дизельных энергетических установок, можно сделать следующие выводы.

1. Постоянно ужесточающиеся международные требования экологических стандартов сформировали и выделили в отдельное направление развития двигателестроения обеспечение экологической безопасности современных дизельных двигателей. При этом проблемы обеспечения экологической безопасности становятся приоритетными для ведущих производителей, а сформированное направление начинает занимать главенствующее положение в основных направлениях развития современного двигателестроения.

2. В общем объеме работ по созданию экологически безопасного двигателя можно проследить отдельные области исследований, к которым, в первую очередь, следует отнести: специальную организацию рабочего процесса двигателя; разработку периферийных устройств, обеспечи-

вающих достижение требований экологических стандартов и внедрение таких устройств в конструкцию двигателя; создание конструкций двигателя, способных использовать нетрадиционные виды топлив.

3. Интерес производителей в области организации и доводки рабочего процесса экологически безопасного дизельного двигателя в основном сфокусирован на точном управлении законом подачи топлива в камеру сгорания и создании специальных температурных условий для свежего заряда цилиндра, способных обеспечить достижение требований действующих экологических стандартов.

4. Достижению соответствия экологическим нормам и правилам способствует развитие и внедрение в конструкцию современного поршневого двигателя периферийных устройств обеспечения сокращения выбросов вредных веществ с отработавшими газами. Особое внимание в этой области уделяется разработкам систем рециркуляции отработавших газов — EGR, и систем селективного каталитического восстановления — SCR.

5. Использование в качестве топлива природного газа и метанола рассматривается ведущими производителями не только с позиций сокращения эксплуатационных расходов потребителем, но и как возможность обеспечения соответствия разрабатываемых конструкций экологическим нормам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Латухов С. В.* Проблемы экологической безопасности судоходства: монография / С. В. Латухов, В. А. Никитин, В. Н. Окунев [и др.]. — СПб., 2015. — 160 с.

2. *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.

3. *Мельник Г. В.* Вопросы экологии на конгрессе CIMAC-2007 / Г. В. Мельник // Двигателестроение. — 2007. — № 4. — С. 45–50.

4. *Kyrtatos N.* The 10-Year ‘HERCULES’ R&D Program on Marine Engines / N. Kyrtatos // Marine Engineering. — 2012. — Vol. 47. — No. 3. — Pp. 305–310. DOI: 10.5988/jime.47.305.

5. *Kyrtatos N. P.* From Hercules ABC to Hercules-2: Cutting Edge R&D in Ship Engines / N. P. Kyrtatos // Transportation Research Procedia. — 2016. — Vol. 14. — Pp. 1581–1590. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.123.

6. *Живлюк Г. Е.* Состояние и перспективы совершенствования систем топливоподачи Common Rail / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 108–123. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-108-123.

7. *Kendlbacher C.* The challenge of EU Stage 5 emissions - Are current injection systems sufficient for future large engine emission limits / C. Kendlbacher, M. Fenner, C. Barba, M. Bernhaupt, H. Giessauf, P. Haider // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 74.

8. *Senghaas C.* Simplified High Performance Injection Systems for Dual-fuel Engines / C. Senghaas, M. Willmann, H. J. Koch // MTZ industrial. — 2016. — Vol. 6. — Is. 3. — Pp. 32–39. DOI: 10.1007/s40353-016-0024-4.

9. *Zimmermann K.* New Common Rail Injector and Engine Application Performances / K. Zimmermann, P. Ghorbani, R. Haefeli, M. Ganser // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 90.

10. *Wloka J.* The new modular MAN Common-Rail System for future HFO-applications / J. Wloka, T. Klaua, W. Wagner, A. Weber, S. Kern, C. Friedrich, L. Eric, A. Hauschild, L. Maier // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 13.

11. *Петров А. П.* Развитие электронных систем управления судовыми двигателями внутреннего сгорания / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 152–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-152-169.

12. *Jay D.* Development of CR technology in the last decade – 4 Stroke Wartsila engines / D. Jay, A. Järvi, D. Delneri, F. Cavressi, S. Saario // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 12.

13. *Müther M.* UDMZ's New DM-185 diesel engine family / M. Müther // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 4.
14. Развитие модельного ряда двигателей ПАО «Звезда» и ООО УДМЗ (материалы конгресса CIMAC 2016) // *Двигателестроение*. — 2016. — № 3. — С. 32–55.
15. *Harscher S.* The new MTU series 4000 with advanced technological concepts for EU Stage IIIB, EPA Tier 4 and IMO 3 emission legislations / S. Harscher // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 4.
16. *Jacoby P.* Turbocharging system optimization for Kolomna D500 newly designed engine platform / P. Jacoby, M. Laaksonen, V. Ryzhov, V. Kneltz // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 66.
17. *Vervaeke L.* Update on the extended engine portfolio of Anglo Belgian Corporation / L. Vervaeke // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 10.
18. *Fukui Y.* Development of Low Fuel Consumption Technology for Medium Speed Diesel Engines / Y. Fukui, S. Hamaoka, Y. Takahata, P. Tremuli // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 17.
19. *Park T.* HiMSEN Engine's solution for engine starting and low-load operation / T. Park, K. Kim, S. Cho, S. Kim // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 53.
20. *Ueda T.* Development of Low Pressure Exhaust Gas Recirculation System for Exhaust Gas Emission Control of Mitsubishi UE Diesel Engine/ T. Ueda // *Marine Engineering*. — 2015. — Vol. 50. — No. 6. — Pp. 726–730. DOI: 10.5988/jime.50.726.
21. *Kling W.* The new ZVEZDA's multi-purpose high speed diesel engine family "PULSAR - M150" / W. Kling, S. Khilchenko, A. Arkhipov, A. Toth, C. Fuchs, M. Ronchetti, A. Ludu // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 4.
22. *Vejlgaard-Laursen M.* Controlling Tier III technologies / M. Vejlgaard-Laursen, H. R. Olesen // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 51.
23. *Döring A.* The MAN SCR system – more than just fulfilling IMO Tier III / A. Döring, M. Bugsch, J. Hetzer, I. Bader, D. Struckmeier, M. Baydak, R. Losher, G. Stiesch // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 69.
24. *Korpi H.* Development of exhaust gas aftertreatment systems applied to modern high efficiency four-stroke medium-speed engines / H. Korpi, G. Hellén, L. O. Liavåg, A. D. Miceli // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 68.
25. *Issei O.* New marine gas engine development in YANMAR / O. Issei, K. Nishida, K. Hirose // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 36.
26. *Kawase K.* Development of the new DAIHATSU 2MW class dual-fuel engine for marine use / K. Kawase, T. Yamada, A. Okada // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 36.
27. *Sakai Y.* This Operational experience and new development for high performance of Ka-wasaki Green Gas Engine / Y. Sakai, T. Sugimoto, T. Horie, H. Iwasaki, M. Enomoto, K. Fujihara // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 64.
28. *Nonaka Y.* Development of Kawasaki Green Gas Engine for marine, L30KG series / Y. Nonaka, S. Fujihara, T. Hirayama // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 71.
29. *Kindt S.* MAN B&W two-stroke engines latest design development within engine types, Tier III and multiple gas fuels / S. Kindt // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 26.
30. *Stojcevski T.* Operation experience of world's first methanol engine in a ferry installation / T. Stojcevski, D. Jay // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 10.
31. *Tanaka H.* Impacts of Minor Components on Knock Tendency of Methane-based Fuels / H. Tanaka, K. Kobayashi, T. Sako, K. Kuwahara, H. Kawanabe, T. Ishiyama // *Ship & Offshore | Schiff&Hafen*. — June 2016. — Special. — Pp. 84.

## REFERENCES

1. Latushov, S. V., V. A. Nikitin, V. N. Okunev, O. V. Soljakov, and P. G. Himich. *Problemy jekologicheskoy bezopasnosti sudohodstva: monografiya*. SPb., 2015.
2. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivljuk. "Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions." *Vestnik Gosudar-stvennogo 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.

3. Mel'nik, G. V. "Voprosy jekologii na kongresse CIMAC-2007." *Dvigatlestroenie* 4 (2007): 45–50.
4. Kyrtatos, Nikolaos. "The 10-Year 'HERCULES' R&D Program on Marine Engines." *Marine Engineering* 47.3 (2012): 305–310. DOI: 10.5988/jime.47.305.
5. Kyrtatos, Nikolaos P. "From Hercules A-B-C to Hercules-2: Cutting Edge R&D in Ship Engines." *Transportation Research Procedia* 14 (2016): 1581–1590. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.123.
6. Zhivlyuk, Gregory Evgenyevich, and Aleksandr Pavlovich Petrov. "Status and prospects of perfection of fuel supply system common rail." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(35) (2016): 108–123. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-108-123.
7. Kendlbacher, C., M. Fenner, C. Barba, M. Bernhaupt, H. Giessauf, and P. Haider. "The challenge of EU Stage 5 emissions - Are current injection systems sufficient for future large engine emission limits." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 74.
8. Senghaas, Clemens, Michael Willmann, and Hans-Joachim Koch. "Simplified High Performance Injection Systems for Dual-Fuel Engines." *MTZ industrial* 6.3 (2016): 32–39. DOI: 10.1007/s40353-016-0024-4
9. Zimmermann, K., P. Ghorbani, R. Haefeli, and M. Ganser. "New Common Rail Injector and Engine Application Performances." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 90.
10. Wloka, J., T. Klaua, W. Wagner, A. Weber, S. Kern, C. Friedrich, L. Eric, A. Hauschild, and L. Maier. "The new modular MAN Common-Rail System for future HFO-applications." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 13.
11. Petrov, A. P., and G. E Zhivlyuk. "Development of electronic control systems of internal combustion engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 152–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-152-169.
12. Jay, D., A. Järvi, D. Delneri, F. Cavressi, and S. Saario. "Development of CR technology in the last decade – 4 Stroke Wartsila engines." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 12.
13. Müther, M. "UDMZ's New DM-185 diesel engine family." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): Pp. 4.
14. "Razvitie model'nogo rjada dvigatelej PAO «Zvezda» i OOO UDMZ (materialy kongressa CIMAC 2016)." *Dvigatlestroenie* 3 (2016): 32–55.
15. Harscher, S. "The new MTU series 4000 with advanced technological concepts for EU Stage IIIB, EPA Tier 4 and IMO 3 emission legislations." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): Pp. 4.
16. Jacoby, P., M. Laaksonen, V. Ryzhov, and V. Kneltz. "Turbocharging system optimization for Kolomna D500 newly designed engine platform." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): Pp. 66.
17. Vervaeke, L. "Update on the extended engine portfolio of Anglo Belgian Corporation." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 10.
18. Fukui, Y., S. Hamaoka, Y. Takahata, and P. Tremuli. "Development of Low Fuel Consumption Technology for Medium Speed Diesel Engines." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 17.
19. Park, T., K. Kim, S. Cho, and S. Kim. "HiMSEN Engine's solution for engine starting and low-load operation." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 53.
20. Ueda, Takashi. "Development of Low Pressure Exhaust Gas Recirculation System for Exhaust Gas Emission Control of Mitsubishi UE Diesel Engine." *Marine Engineering* 50.6 (2015): 726–730. DOI: 10.5988/jime.50.726.
21. Kling, Wolfgang, Sergey Khilchenko, Alexander Arkhipov, Attila Toth, Christian Fuchs, Michael Ronchetti, and Andrei Ludu. "The new ZVEZDA's multi-purpose high speed diesel engine family "PULSAR - M150"." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 4.
22. Vejlggaard-Laursen, M., and H. R. Olesen. "Controlling Tier III technologies." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 51.
23. Döring, A., M. Bugsch, J. Hetzer, I. Bader, D. Struckmeier, M. Baydak, R. Losher, and G. Stiesch. "The MAN SCR system – more than just fulfilling IMO Tier III." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 69.
24. Korpi, H., G. Hellén, L. O. Liavåg, and A. D. Miceli. "Development of exhaust gas aftertreatment systems applied to modern high efficiency four-stroke medium-speed engines." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 68.
25. Issei, O., K. Nishida, and K. Hirose. "New marine gas engine development in YANMAR." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): Pp. 36.
26. Kawase, K., T. Yamada, and A. Okada. "Development of the new DAIHATSU 2MW class dual-fuel engine for marine use." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 36.

27. Sakai, Y., T. Sugimoto, T. Horie, H. Iwasaki, M. Enomoto, and K. Fujihara. "This Operational experience and new development for high performance of Ka-wasaki Green Gas Engine." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 64.

28. Nonaka, Y., S. Fujihara, and T. Hirayama. "Development of Kawasaki Green Gas Engine for marine, L30KG series." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 71.

29. Kindt, S. "MAN B&W two-stroke engines latest design development within engine types, Tier III and multiple gas fuels." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 26.

30. Stojcevski, T., and D. Jay. "Operation experience of world's first methanol engine in a ferry installation." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 10.

31. Tanaka, H., K. Kobayashi, T. Sako, K. Kuwahara, H. Kawanabe, and T. Ishiyama. "Impacts of Minor Components on Knock Tendency of Methane-based Fuels." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 84.

#### 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](mailto:spb-engine-prof@mail.ru), [kaf\\_dvs@gumrf.ru](mailto:kaf_dvs@gumrf.ru)

**Петров Александр Павлович** —

кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С.О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: [app.polab@inbox.ru](mailto:app.polab@inbox.ru), [kaf\\_dvs@gumrf.ru](mailto:kaf_dvs@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](mailto:spb-engine-prof@mail.ru), [kaf\\_dvs@gumrf.ru](mailto:kaf_dvs@gumrf.ru)

**Petrov, Aleksandr P.** —

PhD, associate 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](mailto:app.polab@inbox.ru), [kaf\\_dvs@gumrf.ru](mailto:kaf_dvs@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 6 апреля 2017 г.

Received: April 6, 2017.