

УДК 629.5.01 + 629.5.011 + 629.5.016
EDN LOTFGJ

О ВОЗМОЖНОСТИ ЗАМЕНЫ СУДОВЫХ МАЛООБОРОТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СВОБОДНОПОРШНЕВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

А.М. Абакумов, инженер ООО «Криогаз моторное топливо», 199106 Россия, Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., 80А, комн. 137, e-mail: a.abakumov@cryogasmt.ru

В статье проанализировано текущее состояние рынка малооборотных судовых двигателей (МОД). Приведены основные требования к судовым двигателям, выдвигаемые Международной морской организацией (ИМО) в части энергоэффективности и эмиссии вредных веществ. Кратко рассмотрены дальнейшие пути совершенствования МОД в части снижения выбросов CO₂ путем перехода на безуглеродное судовое топливо — аммиак. Показано, что в условиях отсутствия возможности приобрести лицензию на производство таких двигателей организация в России собственного производства МОД в разумные сроки маловероятна. Приведен краткий обзор конструкции и истории развития свободнопоршневых двигателей (СПД) и их применения на судах в качестве МОД. Показана возможность замены МОД классической конструкции на СПД с учетом современных требований по экологичности и экономичности судовых двигателей. Дана информация о ходе работ по проекту-демонстратору возможностей СПД в качестве МОД. Задача автора статьи привлечь внимание к альтернативному традиционным МОД пути развития отечественного судового двигателестроения на базе свободнопоршневой технологии.

Ключевые слова: газодизель, свободнопоршневой двигатель, двухтактный двигатель, малооборотный двигатель, эмиссия NO_x, эмиссия SO_x, эмиссия CO₂, ИМО, перспективное судовое топливо, энергоэффективность, импортозамещение.

Для цитирования: Абакумов А.М. О возможности замены судовых малооборотных двигателей свободнопоршневыми двигателями / А.М. Абакумов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 119 — 133. — EDN LOTFGJ.

ON THE POSSIBILITY OF REPLACING MARINE LOW-SPEED ENGINES WITH FREE-PISTON ENGINES

A.M. Abakumov, Engineer, ООО «Kriogaz motornoe toplivo», 199106 Russia, St. Petersburg, Bol'shoi pr. V.O., 80A, komn. 137, e-mail: a.abakumov@cryogasmt.ru

The article analyzes the current state of the low-speed marine engines (LSME) market. The main requirements for marine engines put forward by the International Maritime Organization (IMO) in terms of energy efficiency and emissions of harmful substances are given. Further ways of improving LSMEs in terms of reducing CO₂ emissions by switching to carbon-free marine fuel — ammonia — are briefly considered. It is shown that in the absence of the possibility of acquiring a license for the production of such engines, the organization of our own LSME production in Russia within a reasonable time frame is unlikely.

A brief overview of the design and history of development of free-piston engines and their use on ships as LSMEs is given. The possibility of replacing LSMEs of a classical design with free-piston engines is shown, taking into account modern requirements for environmental friendliness and efficiency of marine engines. Information is given on the progress of work on a project demonstrating the capabilities of free-piston engines as LSMEs.

The author's task is to draw attention to a way of developing domestic marine engine-building based on free-piston technology as an alternative to traditional LSME.

Keywords: gas-diesel, free-piston engine, two-stroke engine, low-speed engine, NO_x emission, SO_x emission, CO₂ emission, IMO, advanced marine fuel, energy efficiency, import substitution.

For citation: Abakumov A.M. On the possibility of replacing marine low-speed engines with free-piston engines. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 119 — 133. EDN LOTFGJ. (In Russ.)

1. КРАТКИЙ ОБЗОР МИРОВОГО РЫНКА МАЛООБОРОТНЫХ СУДОВЫХ ДВУХТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Постоянное ужесточение экологических требований к судовым главным малооборотным двигателям, повышение требований к их экономичности, размеру и стоимости развернули небывалую конкурентную гонку среди ведущих мировых двигателестроительных компаний.

Темпы и затраты на разработку низкооборотных двигателей таковы, что на международном рынке остались всего три компании, ведущие самостоятельные разработки МОД [1]:

1) MAN Energy Solutions — 70 % рынка, основной задел получен путем поглощения датской компании Burmeister & Wain, которая имеет опыт производства ДВС с 1890 года. Основной объем двигателей производится в компаниях-лицензиатах (15 компаний);

2) WinGD (г. Винтертур, Швейцария) — 20 % рынка, технологический задел получен при поглощении в 1997 году финской компанией Wärtsilä швейцарской Sulzer, которая выпустила первый дизельный двигатель в 1898 году. В 2016-м владельцем 100 % акций WinGD становится China State Shipbuilding Corporation (CSSC). Основной объем двигателей производится компаниями-лицензиатами (9 компаний);

3) J-eng (Japan engine) — 10 % рынка, компания создана в 2017 году путем слияния компаний Mitsubishi Heavy Industries Marine Machinery и ее основного лицензиата Kobe Diesel, технологический задел получен от компании Mitsubishi, которая выпустила первый морской дизель в 1928 году по лицензии B&W. Компания не имеет лицензиатов собственной технологии и, напротив, сама является лицензиатом технологий компании WinGD.

Новые МОД должны соответствовать правилам Международной морской организации (ИМО) в части экологических требований и требований к энергоэффективности и безопасности [2]. Рассмотрим наиболее важные из этих правил.

- Правила, ограничивающие содержание серы в судовых топливах для судов, указаны в Правиле 14 (Оксиды серы (SO_x) и твердые частицы (PM)) Приложения VI к МАРПОЛ 73/78, в котором требования к предельному содержанию серы постепенно ужесточаются. Ограничение для района открытого моря было усилено с 3,50 % до 0,50 % с 1 января 2020 года. В зонах контроля выбросов (ЕСА) с 1 января 2015 года 0,1 %. Зона ЕСА постоянно расширяется: с 1 мая 2024 года в ЕСА входит все Средиземное море.

- Предельные значения выбросов оксидов азота (NO_x) определены в Правиле 13 Приложения VI МАРПОЛ: с 2011 года вне пределов зоны ЕСА выбросы оксидов азота МОД не должны превышать 14,4 г/кВтч (Tier 2), а в зоне ЕСА 3,4 г/кВтч (Tier 3).

- ИМО не выдвигает прямых требований к уровню эмиссии CO_2 . Они определяются через Конструктивный коэффициент энергоэффективности (Energy Efficiency Design Index, EEDI) [3], который определен в Правиле 22 Приложения VI МАРПОЛ. EEDI представляет собой соотношение эмиссии CO_2 к полезной транспортной работе. С течением времени требования по EEDI ужесточаются. Эмиссия CO_2 находится в прямой зависимости от количества использованного топлива и от количества содержащегося в нем углерода, поэтому удельный расход топлива важен для EEDI. На EEDI влияет не только экономичность двигателя, но и правильно выбранная скорость, обводы корпуса и т.д. [4].

Обеспечение требований по эмиссии SO_x

Есть всего три способа снизить эмиссию оксидов серы [1, 5, 6].

1. Использование жидких топлив с низким содержанием серы. MGO с содержанием серы <0,5 % для районов открытого моря, VLFSO с содержанием серы <0,1 % для районов ЕСА. Эти два вида топлива дороже традиционного тяжелого топлива IFO380 примерно на 40 % и 20 % соответственно.

2. Использование скрубберов (устройств для отмывки выхлопных газов забортной или специально подготовленной водой) удорожает проект судна, требует много места, снижает мореходность, приводит к снижению топливной экономичности примерно на 0,5 г/кВтч из-за увеличения сопротивления для выхлопных газов, требует дополнительного расхода э/э от бортовых генераторов до 6 кВтч/МВт мощности МОД, требует расхода щелочи до 20 л/МВтч мощности МОД. Также не все порты принимают суда со скрубберами, не везде можно сливать оборотную воду от скрубберов.

3. Использование альтернативных топлив, не содержащих серы, — на сегодняшний день это стандарт «де-факто». По данным английской консалтинговой компании Clarkson Research, в 2022 году 54 % заказанных судов по тоннажу были на альтернативном топливе (СПГ, метанол, СУГ), а в первом полугодии 2024 года — 41 % [7]. Большая часть двигателей на альтернативном топливе использует газодизельный процесс с использованием

впрыска газа под давлением 300 бар непосредственно в цилиндр вблизи ВМТ, что обеспечивает самую лучшую топливную экономичность, не отличающуюся от экономичности при работе на жидком топливе, нетребовательность к качеству газа и минимальную эмиссию метана — порядка 0,2 г/кВтч. Использование запального жидкого топлива минимально, лучшее значение всего 1,5 %. Небольшая часть двигателей, в основном для газозубов СПГ, использует процесс с предварительным смешиванием воздуха и топливного газа. Давление газа небольшое, обычно 12 — 16 бар. Использование запального жидкого топлива хуже, обычно 3 — 5 % [8]. Эмиссия несгоревших углеводородов значительна. Газодизельный процесс низкого давления предъявляет более высокие требования к качеству топливного газа.

Обеспечение требований по эмиссии NO_x

Требования Tier 2 для районов открыто выполняются за счет оптимизации процесса сгорания, уровень эмиссии NO_x на тяжелом судовом топливе составляет обычно 11 — 12 г/кВтч, в газодизельном режиме с использованием СПГ — меньше на 20 — 25 % [1, 5, 6].

Требования Tier 3 для районов с контролируемой эмиссией ECA могут быть выполнены тремя способами [9, 6, 10, 11].

1. С помощью системы рециркуляции выхлопных газов (Exhaust Gas Recirculation, EGR) с промежуточным охлаждением, обеспечивающей 2 — 3 различных варианта прохождения выхлопных газов через турбокомпрессор(ы). Выхлопные газы охлаждаются и очищаются от сернистых газов с помощью щелочи. Требуется система очистки оборотной воды. В случае работы на тяжелом судовом топливе размеры и стоимость системы очистки значительна. EGR ухудшает топливную экономичность примерно на 3 — 5 г/кВтч при 100%-й нагрузке, требует расхода от бортовых генераторов э/э примерно 4 — 9 кВтч/МВт, расхода щелочи 0,1 — 10 л/МВтч. Для газодизельного режима операционные затраты на систему EGR существенно меньше, примерно 30 — 50 % от режима работы на тяжелом топливе.

2. С помощью системы каталитической очистки выхлопных газов SCR (Selective Catalytic Reduction) с впрыском мочевины до или после турбокомпрессора. Отдельную сложность представляет собой задача поддержания требуемой температуры реакции при малых нагрузках двигателя и термической стабильности двигателя, решение которой требует включения в состав системы SCR горелок и мощных воздуходувок. Система SCR, работающая до турбокомпрессора, конструктивно проще, но не позволяет работать на сернистом судовом топливе. SCR ухудшает топливную экономичность примерно на 0,5 — 2 г/кВтч, разбег значений соответствует нагрузке на МОД 25 — 100 %.

3. С помощью системы послонного ввода воды и MDO через одну форсунку в камеру сгорания. Вода, испаряясь, сильно снижает температуру в камере сгорания, что приводит к существенно более низкому уровню образования оксидов азота. Нет потерь в топливной экономичности и дополнительных затрат. Применяется только компанией J-eng для двигателей мощностью до 15 МВт. Но есть и существенный недостаток: можно использовать только одно монотопливо — дорогое MDO [1, 9].

Обеспечения требований по эмиссии парниковых газов, топливная эффективность

Как уже говорилось выше, эмиссия CO₂ находится в прямой зависимости от количества использованного топлива и от количества содержащегося в нем углерода, поэтому удельный расход топлива важен. Газодизельные и газовые двигатели дают примерно на 20 % меньшую эмиссию CO₂ при той же работе [8].

Лучший удельный расход топлива при 100%-й нагрузке 156 — 165 г/кВтч имеют МОД J-eng [9]. МОД WinGD имеют худшие показатели по экономичности, в среднем 170 — 180 г/кВтч [10]. Двигатели MAN B&W по экономичности находятся посередине между J-eng и WinGD с показателями 161 — 176 г/кВтч [11]. Удельный расход на 75 % мощности МОД обычно меньше на 3 — 5 г/кВтч.

Ключевым решением, позволившим МОД достичь столь высоких экологических и эксплуатационных характеристик, стала концепция «электронного двигателя», когда МОД не имеют распредвала, а все системы жизнеобеспечения двигателя управляются гидравлическими актуаторами с электрическим приводом. Полностью электронное управление двигателем стало стандартом «де-факто». В 2024 году в производственной программе MAN B&W остался всего один двигатель с распредвалом [11].

Электронно управляемый гидропривод выпускного клапана позволяет реализовать гибкое управление степенью сжатия, сохраняя высокое значение среднего эффективного давления (MEP) при ограничении максимального давления цикла (Pz). Например, последняя серия 10 двигателей MAN B&W имеет MEP 21 бар

при $P_z = 186$ бар [11]. Также управление клапаном используется для достижения требуемых экологических характеристик и режимов работы турбокомпрессора.

Фактически современные МОД являются двигателями с изменяемой степенью сжатия и расширенным циклом расширения. Выпускной клапан закрывается позже на цикле сжатия, позволяя сохранять высокую геометрическую степень сжатия и расширения при управляемой рабочей степени сжатия. Рабочая степень сжатия меняется в зависимости от нагрузки. При частичной нагрузке она увеличивается, а при полной немного уменьшается (контроль P_z). Можно назвать такую работу реализацией цикла Миллера для двухтактных двигателей [12].

Электронно управляемый гидропривод ТНВД реализует режим «восходящего впрыска», который обеспечивает рост давления по мере осуществления впрыска, в то время как в обычной топливной системе с топливным аккумулятором давление падает по мере осуществления впрыска. На сегодняшний момент это самая передовая топливная система для дизельных двигателей, которая обеспечивает практически мгновенный впрыск после достижения двигателем P_z . Можно сказать, что такая топливная система сочетает в себе преимущества изобарного сгорания по циклу Дизеля и изохорного сгорания по циклу Отто [12].

Электронное управление системой смазки позволяет впрыскивать смазку точно между первым и вторым кольцом, что позволяет добиться низкого коэффициента трения и расхода смазки $0,6$ г/кВтч на бессернистом топливе.

Электронное управление двигателем позволило применить высокоэффективные системы наддува высокого давления со степенью повышения давления в одну ступень $4,7$. КПД одноступенчатого наддува 67% , двухступенчатого 80% (MAN B&W) [13]. На двигателях с большими диаметрами поршня применяется система турбо-компаунд, когда часть избыточных выхлопных газов отводится в силовую турбину, соединенную через редуктор с генератором, позволяющая экономить $3 - 5\%$ от мощности двигателя через уменьшение использования вспомогательных двигателей [14].

Важным элементом повышения общей топливной экономичности судна является использование валогенераторов и паровых котлов-утилизаторов остаточной теплоты выхлопных газов [15].

Котлы на отработавших газах и паровые турбины с одним или двумя уровнями давлений позволяют экономить $4 - 7\%$ или $5 - 8\%$ от мощности двигателя через уменьшение использования вспомогательных двигателей. Использование валогенераторов, когда к задней части коленвала МОД подключается генератор специальной конструкции, позволяет существенно уменьшить использование менее эффективных вспомогательных двигателей [14].

Перспективные требования по эмиссии парниковых газов, аммиачный двигатель

В 2023 году ИМО приняла новую Стратегию по парниковым газам для судоходства [16]. Она направлена на сокращение выбросов парниковых газов в отрасли на 1 млн тонн в год и достижение нулевого уровня выбросов от морских перевозок к 2050 году (рис. 1).

Сокращение выбросов парниковых газов в международном судоходстве, 2008 – 2050 гг.

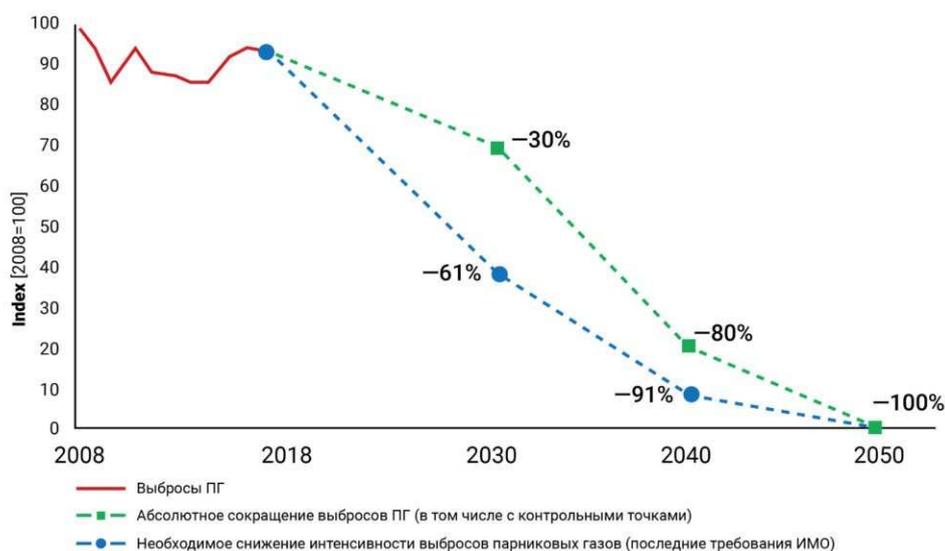
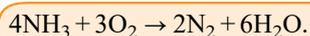


Рис. 1. Дорожная карта снижения выбросов парниковых газов на водном транспорте ИМО 2023 [17]

Документ устанавливает «ориентировочные контрольные точки» общих выбросов от судов. К 2030 году они должны быть сокращены не менее чем на 20 %, стремясь к 30 %, по сравнению с уровнями 2008 года. Также поставлена цель добиться того, чтобы в судоходстве к 2030 году доля топлива и технологий с нулевым или близким к нулю уровнем выбросов парниковых газов составляла 5 — 10 % [16].

Понимание, что перспективные требования ИМО на обычном углеводородном топливе невыполнимы, а «зеленый» водород как энергетический носитель по-прежнему недоступен, заставило большую тройку производителей МОД включиться в гонку по созданию газодизельного МОД, работающего на аммиаке [4]. Как известно, сгорание аммиака идет без образования CO_2 по формуле:



Однако использование аммиака в ДВС сопряжено с рядом проблем из-за его токсичности, коррозионной активности и трудности воспламенения и хорошего сгорания.

Лидером в гонке по производству аммиачных МОД является MAN B&W, которая отгрузила в 2024 году первый коммерческий двигатель на аммиаке. Кроме того, технология впрыска аммиака под давлением 300 бар в жидкой фазе обеспечивает самое лучшее замещение в 95 % и топливную эффективность, аналогичную дизельному режиму работы [18]. WinGD принимает коммерческие заказы и обещает поставить свой первый коммерческий аммиачный МОД во 2-м квартале 2035 года. Аммиак подается в газовой фазе под давлением в 85 бар. J-eng несколько отстала в этой гонке и обещает в течение 2025 года только закончить заводские тесты пилотного образца МОД.

2. ПЕРСПЕКТИВЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ВЫПУСКА РОССИЙСКОГО МОД

До 2040 года в РФ необходимо построить не менее 270 крупнотоннажных судов, часть из них уже строится, следует из данных Минпромторга. При этом для их строительства потребуется не менее 414 судовых малооборотных двигателей мощностью свыше 10 МВт [19].

Возможность лицензирования производства существующих МОД у большой тройки в силу политических причин полностью исключается, как, впрочем, и продажа. Иллюзии получить лицензию или технологическую помощь от китайской CSSC, контролирующей WinGD, безосновательны. Необходимо помнить, что сама WinGD является швейцарской компанией, находящейся в городе Винтертур. Китайские заводы являются лицензиарами WinGD, которая вне зависимости от позиции собственника должна соблюдать санкционный режим.

В настоящий момент в СМИ появились сообщения о двух независимых проектах создания отечественного МОД, отвечающего действующим и перспективным требованиям ИМО: группа «Синара» на собственных мощностях и ОСК на новой, специально построенной площадке. Оценочные суммы инвестиций 190 и 200 млрд рублей, срок изготовления пилотного образца 5 лет. Предполагается, что отечественный МОД будет получен путем реинжиниринга одного из МОД большой тройки [20].

Насколько реальны эти планы? При существующем технологическом заделе, к сожалению, мало реальны. Существует риск неэффективного расходования государственных средств и срыва программы строительства российских крупнотоннажных судов. Понимаю, что это утверждение весьма печально, но попробую аргументировать свою позицию, перечислив ключевые «бутылочные горлышки», через которые придется пролезть авторам этих проектов.

- Практически все МОД являются электронными без распредвала, со сложной электрогидравлической системой контроля выпускного клапана, топливной аппаратуры, системы подачи смазки и т.д. В России отсутствует производство прецизионной механики и гидравлики такого уровня. Поставка такой гидравлики под жесткими санкционными ограничениями. Без таких систем выполнение требований ИМО крайне проблематично.

- Высокоэффективные системы турбонадува с высоким КПД и малой инерционностью. За последние 70 лет в СССР и РФ предпринималось много попыток создать турбокомпрессор с высокими характеристиками — все они потерпели поражение. Нет оснований считать, что в условиях ограничений на поставку высокоточных металлообрабатывающих центров, жаропрочных сталей и пр. удастся за несколько лет решить вопросы, которые не были решены за десятилетия.

- Систему управления МОД невозможно просто скопировать, придется создавать ее заново на доступной компонентной базе. Это потребует наличия цифровой модели управления, которая должна быть создана с использованием специальных программных комплексов. В России такие программные комплексы полностью отсутствуют.

- Системы балансировки МОД чрезвычайно сложны, так как должны учитывать взаимодействие с корпусом судна при различных уровнях загрузки и качки на волне. Часто такие системы имеют активный компонент, создающий волны вибраций в противофазе. Конструирование таких систем невозможно без специального программного моделирующего обеспечения, которое в России отсутствует.

- Как говорилось выше, все современные МОД в основном газодизельные. Форсунка для впрыска газа под давлением 300 атмосфер находится за пределами не только российских технологических возможностей: и в мире практически никто не может повторить успех немецких машиностроителей. Будет представлять сложность в проектировании и производстве газификатор высокого давления большой производительности. Он должен обеспечить подачу топливного газа практически без пульсаций. Подача газа осуществляется по специальным трубам системы «труба в трубе», и внутренняя и внешняя трубы должны выдержать давление 300 бар. Такие трубы не выпускаются в России и никогда не выпускались в СССР.

- Стандартные машиностроительные сложности — коленвалы больших размеров, крупноразмерное литье и его последующая обработка. Отсутствие литейного чугуна и стали нужных марок. Отсутствие опыта в выпуске систем SCR и EGR больших размерностей. Это уже «мелочи» на фоне вышеизложенных сложностей.

Напомню, что современные МОД ведут свою генеалогию по большому счету от двух компаний, стоявших у истоков дизельного двигателестроения 130 лет назад: Burmeister & Wain и Sulzer. Даже компания MAN не смогла освоить сама производство конкурентных МОД и была вынуждена купить V&W. К сожалению, пройти путь технического развития в 130 лет невозможно ни за пять, ни за десять лет. Нужен другой путь.

3. РОССИЙСКИЙ СВОБОДНОПОРШНЕВОЙ ДВИГАТЕЛЬ, РЕАЛЬНАЯ АЛЬТЕРНАТИВА МОД

История создания и принципы работы свободнопоршневого двигателя

Идея комбинированной силовой установки, состоящей из генератора газа и отдельной расширительной машины, впервые была предложена в начале XX века профессором МВТУ В.И. Гриневецким, дальнейшее развитие эта разработка получила в трудах его ученика А.Н. Шелеста в 1914 году. В 1923 году советский инженер Е.Е. Лонткевич осуществил один из первых проектов свободнопоршневого генератора газа (СПГГ) путем непосредственного соединения поршней двигателя внутреннего сгорания с поршнями компрессора [21].

Дальнейшее развитие и свой современный вид СПД и СПГГ получили в работах французского инженера аргентинского происхождения барона Рауля Пескары. Р. Пескара основал легендарную компанию SIGMA, которая добилась коммерческого успеха СПГГ с моделью GS34 мощностью 1,25 МВт (рис. 3).

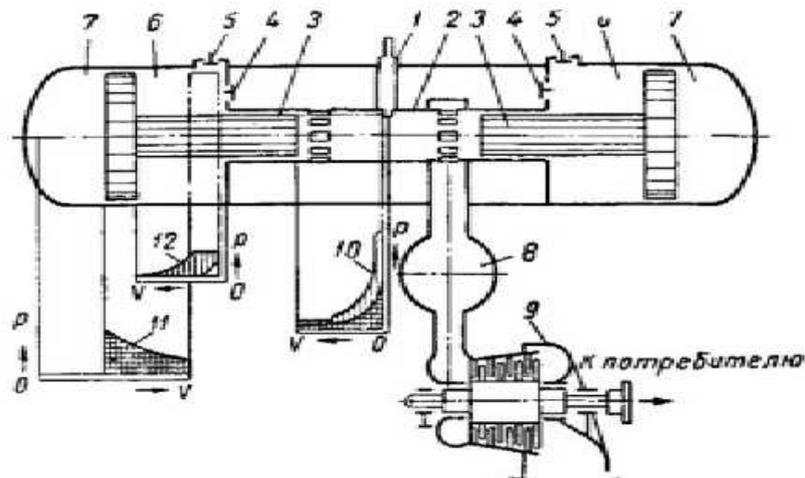


Рис. 2. Свободнопоршневой двигатель = свободнопоршневой генератор газа (СПГГ, схема GS34) + силовая турбина [22]:

1 — дизельная форсунка; 2 — гильза (рабочий цилиндр); 3 — комбинированный силовой и компрессорный поршень;

4 — выпускные клапаны; 5 — впускные клапаны; 6 — компрессорная полость; 7 — воздушная пружина;

8 — выходной коллектор; 9 — силовая турбина; 10 — индикаторная диаграмма 2-тактного дизельного цикла;

11 — индикаторная диаграмма воздушной пружины; 12 — индикаторная диаграмма компрессора

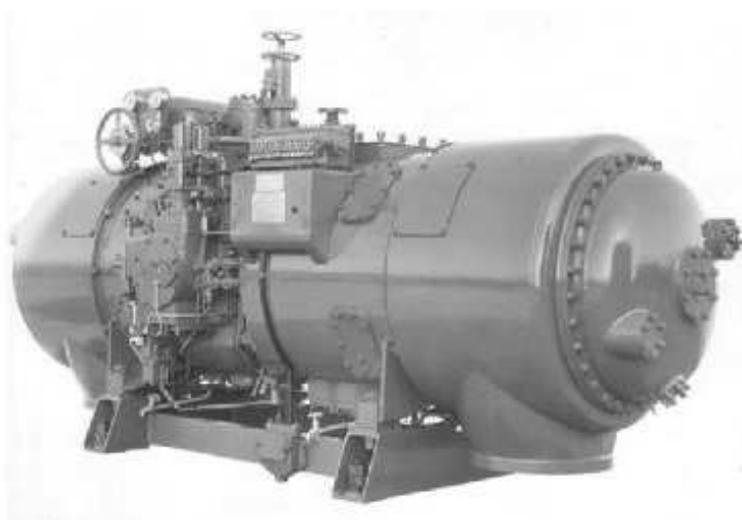


Рис 3. Легендарный СПГГ GS34 компании SIGMA [23]

Свободные поршни (3) под действием сил, полученных от сгорания дизельного топлива в рабочем цилиндре (2), сжимают воздушную пружину (7), которая, разжимаясь, приводит в действие поршневой воздушный компрессор (6). Воздух из атмосферы поступает через входные клапаны (5), сжимается и поступает через выходные клапаны (4) в ресивер, откуда поступает в дизельный цилиндр, где после его сжатия на обратном ходе воздушной пружины (7) происходит впрыск дизельного топлива. Конечным продуктом работы является сжатый воздух, перемешанный с продуктами сгорания, энергия которого срабатывается в расширительной машине (турбине 9) [22]. Принципиальной особенностью СПГГ является свободный ход поршней, не ограниченный кинематикой коленвала и, как следствие, изменяемая «из коробки» степень сжатия.

Изложу коротко историю компании SIGMA. С 1939 года она производила свободнопоршневые дизельные компрессоры (СПДК), когда полезной работой являлся сжатый воздух (любопытный факт: идею украл Юнкерс, и все немецкие подводные лодки оснащались СПДК для продувки балластных цистерн). Удачный работающий прототип СПГГ GS34 был построен в 1945 году с 16-й (!) попытки. Серийное производство GS34 началось с 1951 года. К середине 60-х годов прошлого века выпущено около 500 СПГГ GS34, в компании работает свыше 2000 человек. Успех наконец-то пришел. Но! В 1966 году в возрасте 76 лет Пескара умирает, и в течение пары лет акционеры продают SIGMA компании Bosch. Вместе с SIGMA Bosch получает в свое распоряжение все ключевые патенты в области свободнопоршневого машиностроения, которые продолжают действовать до 90-х годов прошлого века. Bosch закрывает SIGMA, лицензии на использование патентов никому не выдает. Французский конкурент дизельным двигателям классической конструкции устранен, цель достигнута.

За время работы компании SIGMA СПД на базе СПГГ GS34 широко использовались на гражданском и военном флоте в качестве главных двигателей (рис. 4) [22].

Отдельно стоит опыт применения СПД в СССР. В 1961 году был построен пилотный газотурбоход «Павлин Виноградов» [24]. Его силовая установка состояла из четырех свободнопоршневых генераторов газа GS34, вырабатывающих рабочий газ для турбины мощностью 3800 л. с. Водоизмещение судна составляло 9080 т. Скорость хода — 15,6 узла [25]. Всего было построено шесть газотурбоходов с СПГГ. Все они отработали более 25 лет (рис. 5). Одно судно прошло Севморпуть. Сохранились воспоминания главного механика этого судна, в которых он положительно отзывался о надежности и тяговых характеристиках СПД [26, 27]. В связи со списанием кораблей СПГГ были сняты и еще работали в наземной электростанции. Во время перестройки были порезаны на металлолом [28].

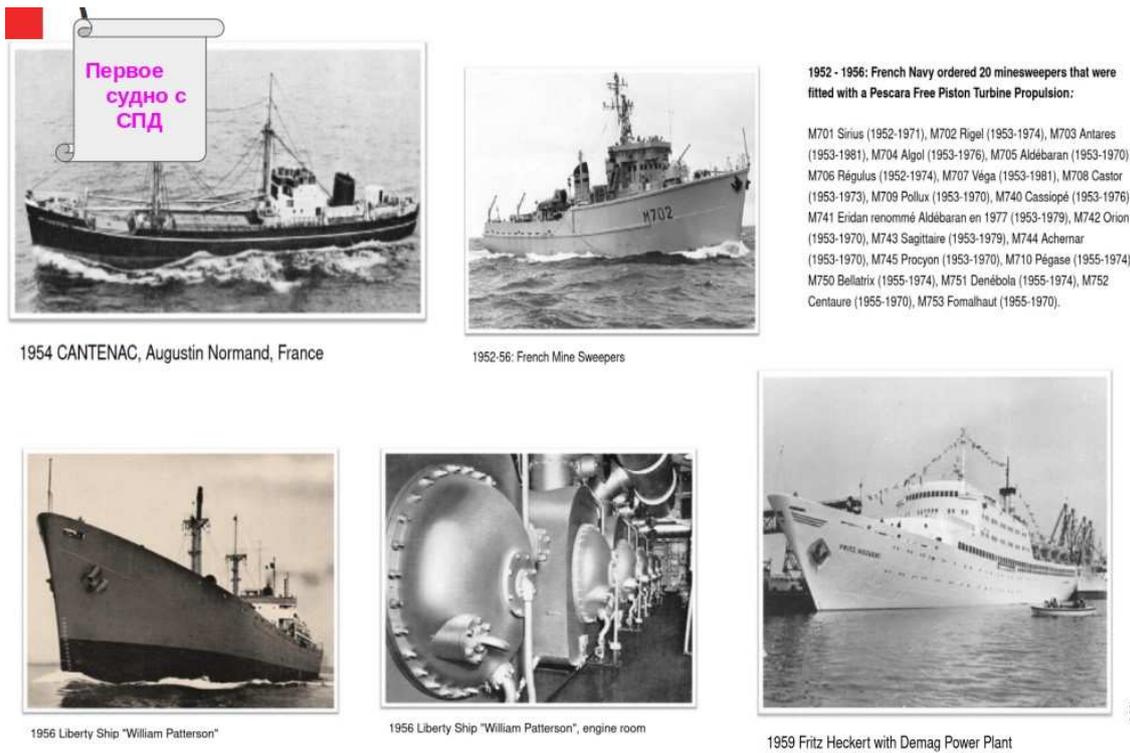


Рис 4. Различные суда, использовавшие СПД на базе СПГ GS34 в качестве главного двигателя [23]

Стр. №	Построено	Списано	Название	Дата	Приписка
535	11.1960		Лотта	2008	Мурманск
			Павлин Виноградов	1992 01.1980	Архангельск
536	1961	1985	Мезеньлес		Архангельск
537	1962	1985	Умбалес		Архангельск
538	1963	11.1986	Теодор Нетте		Архангельск
539	1964	21.10.1987	Печоралес		Архангельск
540	1965	20.02.1989	Stal	01.1989	(ФРГ)
			Иоганн Махмасталь	1973	Архангельск



Рис 5. Отечественные суда Проект 580, тип «Павлин Виноградов», использовавшие СПГ GS34 и отечественную силовую турбину в качестве главного двигателя [29]

Свободнопоршневой двигатель как альтернатива МОД классической конструкции

Разберем основные преимущества СПД как альтернативу МОД классической конструкции.

- Существенно проще по конструкции традиционного ДВС. Может выпускаться серийно на многих машиностроительных предприятиях РФ с учетом имеющегося станочного парка и возможностей по литью. Цилиндрическая камера сгорания позволяет обойтись несколькими дизельными форсунками, освоенными в производстве в России, вместо одной мощной. Импортозамещение 100 % (кроме микросхем в блоке управления).

- Судовая турбина легко реверсируется и обладает идеальной тяговой гиперболической характеристикой, то есть при минимальных оборотах имеет максимальный момент, по мере нарастания оборотов момент падает. Коробка передач или электрическая передача не требуются. Судовые турбины для привода винта — хорошо освоенная, серийно выпускаемая продукция в России. Температура рабочего тела, выработанного СПГГ, не превышает 450 °С, поэтому лопатки турбины могут быть выполнены из дешевой отечественной конструкционной стали.

- Идеально масштабируется вверх просто добавлением нужного количества СПГГ, работающих на одну турбину. Имея один СПГГ, допустим, на 1 МВт, сразу имеем всю линейку МОД от 3 до 25 МВт. Для классического МОД требуется линейка диаметров цилиндров 40 — 900 мм, а внутри каждого диаметра — разное количество цилиндров.

- Высочайшая надежность и ремонтпригодность достигается как за счет конструкционной надежности единичного СПГГ (нет тангенциальных нагрузок на поршень, нет износа гильзы), так и за счет матричного использования нескольких СПГГ на одну силовую турбину. Возможен ремонт любой сложности, включая капитальный непосредственно на борту, в том числе не теряя хода в движении.

- Абсолютная сбалансированность СПГГ. Оппозитная симметричная конструкция полностью уравнивает силы инерции первого и высшего порядка. Описаны случаи, когда монетка, поставленная на работающий СПГГ, оставалась стоять часами неподвижно. Нет необходимости в сложных системах активной и пассивной балансировки. Принципиально другой уровень акустического и вибрационного комфорта для пассажиров и экипажа. В прошлом СПГГ начали применять на роскошных круизных судах прежде всего из этих соображений.

- Изменяемая степень сжатия позволяет работать СПГГ в газодизельном режиме как на СПГ, так и на перспективных экологических видах топлива (аммиак, метанол) с учетом требований МАРПОЛ. Организация подачи в цилиндр топлива возможна при небольшом избыточном давлении.

- В СПГГ может быть реализован перспективный термодинамический цикл НССИ¹, недоступный для традиционных ДВС с выдающимися экологическими характеристиками по NO_x менее 0,1 г/кВтч без использования SCR и EGR.

- Отсутствие коленвала и тангенциальных нагрузок в поршневой группе позволяет существенно поднять степень сжатия и выйти на ВМЕР > 30 МПа и экономичность менее 160 г/кВтч.

- Более простая конструкция системы SCR, что связано с возможностью на режимах частичной нагрузки поддерживать высокую температуру отработавших газов путем отключения части СПГГ.

- Более простая конструкция системы EGR благодаря тому, что температура отработавших газов не превышает 450 °С.

- Возможность использования форсажной камеры, подогревающей рабочее тело между СПГГ и силовой турбиной, позволит кратковременно увеличивать мощность главного СПД на 15 — 20 %.

- Мгновенный запуск из холодного состояния даже при низких температурах. СПГГ заводится с первого цикла или не заводится вообще (неисправен).

Имеются ли у СПД недостатки? Да, безусловно.

- Главный недостаток — необходимость использования редуктора между приводом силовой турбины и винтом. Редуктор существенно ухудшает масса-габаритные характеристики СПД, но не является сложным или дорогим в производстве изделием.

- СПГГ является автоколебательной системой — имеются сложности в регулировании диапазона мощности без снижения общего КПД. Эта проблема решается отключением части СПГГ. Работа остальных СПГГ осуществляется в режиме полной нагрузки.

- Существенно большее количество отработавших газов, смешанных с воздухом, потребуют или SCR большего размера, или специальной конструкции СПГГ с разделением потоков, когда в дизельный цилиндр поступает только необходимое количество воздуха, а остальной воздух сразу поступает на силовую турбину. Возможно, для СПГГ нет смысла вообще использовать SCR. Для режима НССИ он не нужен, для обычного режима EGR получается конструкционно проще, чем для стандартного МОД.

¹Двигатель с воспламенением однородной горючей смеси от сжатия (НССИ, от англ. homogeneous charge compression ignition) — двигатель внутреннего сгорания, в котором хорошо смешанное топливо и окислитель (обычно воздух) сжимаются до точки самовоспламенения. Такой двигатель сочетает в себе характеристики обычных бензинового и дизельного двигателей. Также двигатели НССИ имеют чрезвычайно низкий выхлоп оксидов азота NO_x даже без применения каталитического нейтрализатора.

4. ПРОЕКТ-ДЕМОНСТРАТОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ СПД. СВОБОДНОПОРШНЕВОЙ ГЕНЕРАТОР ГАЗА СПГГ-600

ООО «Криогаз моторное топливо» (cngas.ru, входит в группу компаний «Криогаз») в инициативном порядке реализует проект-демонстратор свободнопоршневого генератора газа мощностью 0,6 МВт (рис. 6).

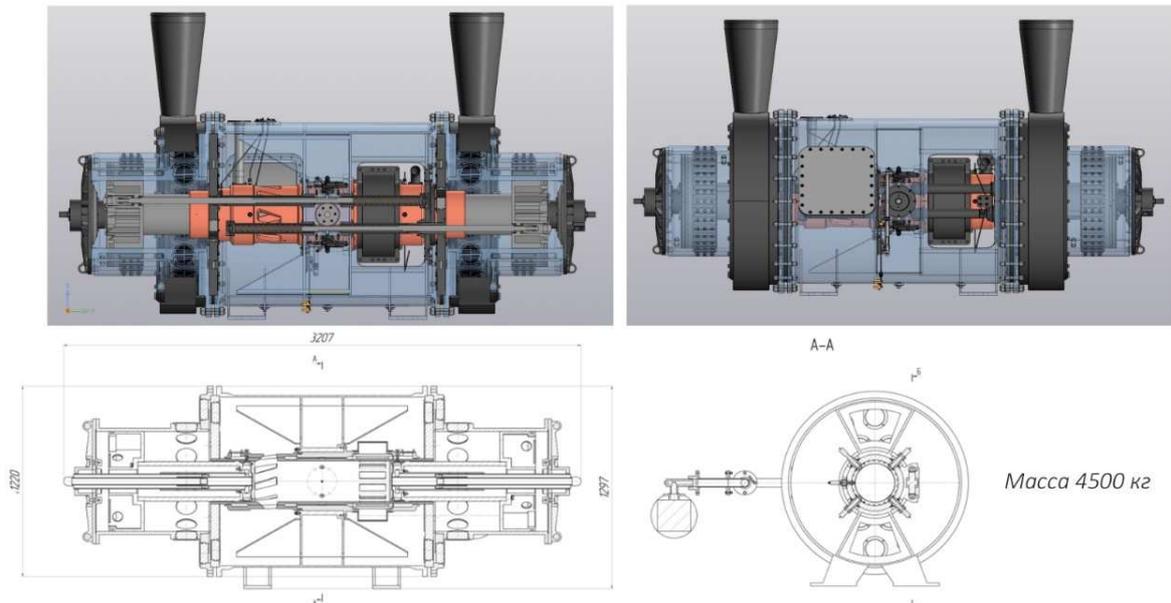


Рис 6. Общий вид с габаритными размерами СПГГ-600 (собственные материалы ООО «КГМТ»)

Технические характеристики свободнопоршневого генератора газа СПГГ-600:

- степень сжатия — изменяемая (базовая 8) при давлении наддува 5,6 бар. $P_z = 160$ бар;
- количество циклов в минуту 1000, мощность в сжатом газе 600 кВт, средняя скорость поршня 9 м/с, с учетом потеряннного хода 5,3 м/с;
- основной режим работы — на 100 % газовый с воспламенением от сжатия гомогенной топливной смеси (НССИ), выбросы NO_x 0,068 г/кВтч, CO 0,016 г/кВтч. Tier 3 достигается без SCR и EGR. Удельный расход топлива при 100%-й нагрузке 184 г/кВтч;
- первый вспомогательный режим работы — дизельный, выбросы NO_x 5,24 г/кВтч, CO 1,41 г/кВтч. Tier 2 достигается без SCR и EGR. Удельный расход топлива при 100%-й нагрузке 202 г/кВтч;
- второй вспомогательный режим работы — газодизельный, выбросы NO_x 4,4 г/кВтч. Tier 2 достигается без SCR и EGR. Удельный расход топлива при 100%-й нагрузке 198 г/кВтч;
- при повышении максимального давления цикла до $P_z = 250$ бар топливная экономичность улучшится примерно на 11 % (НССИ 163 г/кВтч). В связи с отсутствием тангенциальных нагрузок на поршень СПД переносят повышение максимального давления цикла легче;
- масса 4,5 т/МВт, габариты — длина 3,2 м, диаметр 1,3 м.

По состоянию на конец 2024 года конструкторская документация выпущена в полном объеме. Выполнены следующие виды расчетных работ в трехмерной постановке в специализированных программных комплексах:

- расчет рабочего процесса дизельного СПГГ;
- расчет рабочего процесса газодизельного СПГГ;
- расчет рабочего процесса газового СПГГ с искровым зажиганием;
- расчет продувки компрессорной полости. Моделирование перепадов давления на впуске и выпуске;
- моделирование последовательных циклов рабочего процесса дизельного СПГГ (рис. 7);
- оценка влияния угла опережения зажигания и положения свечей зажигания в цилиндре на рабочий процесс;
- оценка параметров рабочего процесса СПГГ при работе в дизельном режиме с разным количеством форсунок.

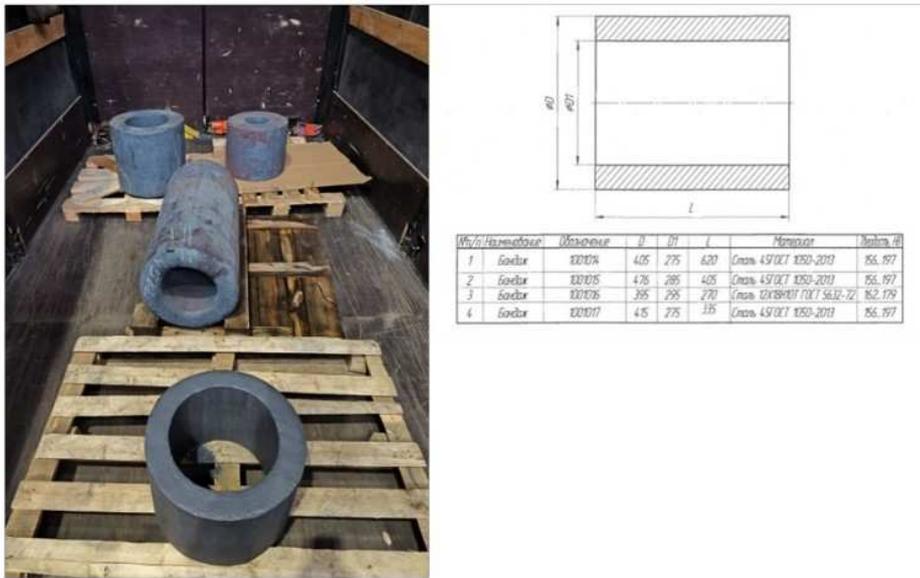


Рис 9. Поковки для бандажей втулки рабочего цилиндра для СПГГ-600 (собственные материалы ООО «КГМТ»)

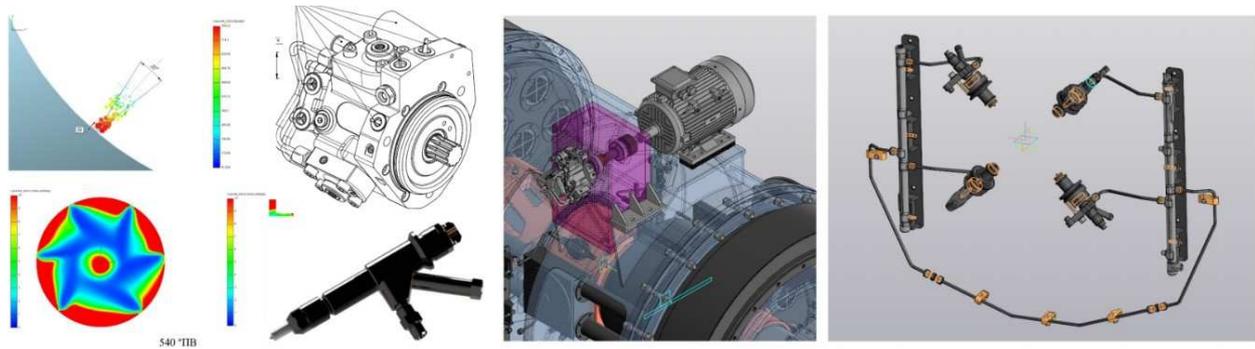


Рис 10. Моделирование процесса распыла дизельного топлива и расположение опытной топливной аппаратуры на СПГГ-600 (собственные материалы ООО «КГМТ»)

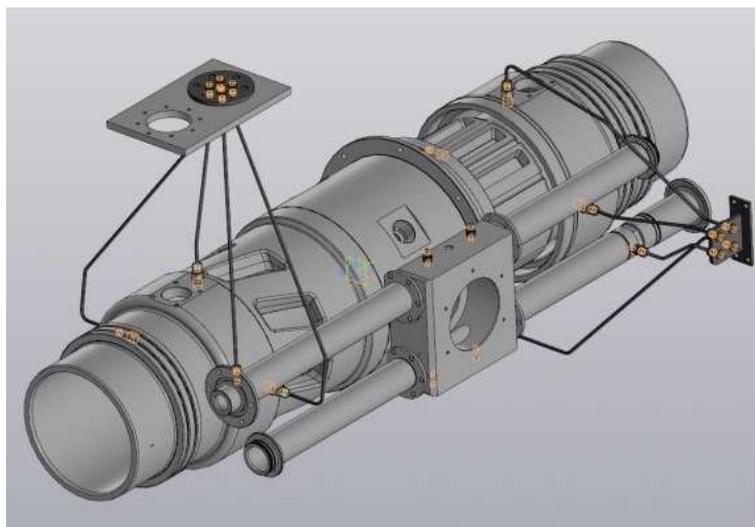


Рис 11. Втулка рабочего цилиндра в сборе (собственные материалы ООО «КГМТ»)

Возможные характеристики свободнопоршневого двигателя для судов класса «Афрамекс» 13 МВт на базе СПГГ-600 вместо WinGD 7X62DF

Танкеры класса «Афрамекс» являются самым универсальным танкером большого размера, который могут принять практически все порты мира, проходя через каналы недоступные для более крупных судов. Потребности России в судах типа «Афрамекс» связаны с необходимостью транспортировки нефти, в том числе через каналы и проливы, а также в условиях Арктики. Особое значение «афрамексы» приобретают в связи со строительством трубопровода «Восточная Сибирь — Тихий океан».

Технические возможности дальневосточного судостроительного комплекса «Звезда» (ССК «Звезда») позволяют строить суда класса «Афрамекс», однако МОД для таких судов отсутствуют.

Рассмотрим характеристики главного двигателя мощностью 13 МВт для танкера класса «Афрамекс» на базе СПД, как замены популярного МОД WinGD 7X62DF:

- количество СПГГ — 24 шт., компоновка блока СПГГ $2 \times 2 \times 6$ шт., размеры блока СПГГ $4 \times 7 \times 10$ м, вес 120 т;
- силовая турбина однокорпусная, реверсивная, КПД 92 %, четырехступенчатая. Размеры и вес ориентировочно $3 \times 2 \times 2$ м, 50 т;
- редуктор планетарный, двухступенчатый, КПД 98 %. Размеры $3 \times 2 \times 2$ м, вес 20 т;
- удельный расход топлива при 100%-й нагрузке в основном топливном режиме (HCCI) 180 г/кВтч при $P_z = 250$ бар (WinGD 7X62DF 178 г/кВтч);
- основной режим работы — на 100 % газовый с воспламенением от сжатия гомогенной топливной смеси (HCCI), выбросы NO_x 0,068 г/кВтч, CO 0,016 г/кВтч. Tier 3 достигается без SCR и EGR;
- вспомогательный режим работы — дизельный, выбросы NO_x 5,24 г/кВтч, CO 1,41 г/кВтч. Tier 2 достигается без SCR и EGR;
- регулирование мощности без потери КПД и с сохранением ресурса СПГГ через отключение неработающих СПГГ;
- общий вес двигателя 190 т при объеме 304 м^3 (WinGD 7X62DF 370 т и 585 м^3);
- совместимость с валогенераторами (режим РТО) через вал отбора мощности в редукторе или через отдельную силовую турбину.

Анализ выполнимости квалификационных требований СПД и СПГГ

В настоящий момент раздел требований к СПГГ и СПД исключен из Правил Регистра в связи с отсутствием в течение длительного времени случаев постройки судов.

В Правилах классификации и постройки морских судов изданий 1978 — 1995 годов требования к СПГГ и СПД приведены в разделе 9 «ГТУ со свободнопоршневыми генераторами газа» части IX «Механизмы» [30]. Все требования выполняются, как в проекте-демонстраторе СПГГ-600, так и в возможном СПД для судов класса «Афрамекс». Небольшие вопросы вызывает пункт 9.1.4, требующий устройства визуального контроля положения поршней во внешних мертвых точках. Современное развитие средств автоматизации делает такое требование излишним, контроль положения поршней может и должен осуществляться системой управления СПГГ в автоматическом режиме.

ВЫВОДЫ

В условиях беспрецедентного санкционного давления на Россию, сложной международной обстановки, ограниченности внутренних резервов чрезвычайно важно не ошибиться, принять реалистичный план развития российского двигателестроения для крупнотоннажных судов. Ошибка может слишком дорого обойтись для развития флота России, ее обороноспособности и социально-экономического развития.

К сожалению, в настоящий момент национальные технологические, финансовые и производственные возможности ограничены. Развитие свободнопоршневых технологий является разумной альтернативой классическому пути развития судовых МОД. С учетом объема работ по созданию проекта-демонстратора СПГГ-600, уже выполненных ООО «Криогаз моторное топливо», опытный образец СПД мощностью 13 МВт для импортозамещения МОД WinGD 7X62DF для судов класса «Афрамекс» может быть создан в течение двух лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Latache M. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. 10th ed. / M. Latache. — Oxford: Elsevier, 2021. — 930 p.
2. Реуцкий А.С. Определение основных путей реализации климатических проектов на водном транспорте / А.С. Реуцкий, Д.С. Семионичев, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 75. — С. 4 — 15.
3. Resolution MEPC.364(79) 2022 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. [Электронный ресурс] URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364\(79\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf) (дата обращения 18.01.2025).
4. Реуцкий А.С., Якимов В.В., Буцанец А.А. Оценка влияния типа используемого судового топлива на величину углеродного следа транспортной услуги // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 87 — 95.
5. Okubo M. New technologies for emission control in marine diesel engine / M. Okubo, T. Kuwahara. — Oxford: Butterworth-Heinemann, 2020. — 297 p.
6. Emission Project Guide MAN B&W Two-stroke Marine Engines. [Электронный ресурс] URL: https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/special_pg/PG_7020-0145.pdf (дата обращения 18.01.2025).
7. Green Technology & Alternative Fuel Uptake. [Электронный ресурс] URL: <https://www.clarksons.com/home/news-and-insights/2024/green-technology-alternative-fuel-uptake/> (дата обращения 20.01.2025).
8. Karim G.A. Dual-Fuel Diesel Engines / G.A. Karim. — Boca Raton: CRC Press, 2015. — 312 p.
9. UE Engine. [Электронный ресурс] URL: https://www.j-eng.co.jp/news/2022/141e6t0000002eaz-att/UE_catalogue_2022.pdf (дата обращения 18.01.2025).
10. WinGD low-speed engines. [Электронный ресурс] URL: <https://wingd.com/products-solutions/engines/> (дата обращения 20.01.2025).
11. Marine Engine Programme. [Электронный ресурс] URL: <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/marine-engine-programme> (дата обращения 17.01.2025).
12. Карьянский С.А. Двигатели MAN-B&W типа ME с электронным управлением: уч. пос. / С.А. Карьянский, Е.М. Оженко. — Одесса: НУ «ОМА», 2020. — 92 с. = Karianskiy S., Ozhenko Ye. Electronically controlled MAN-B&W ME type engines: textbook. Odessa, 2020. 92 p. (Рус. и англ. текст.)
13. Fußstetter K. HPT: High Pressure Tuning for MAN Diesel & Turbo two-stroke engines / K. Fußstetter. — 2014. [Электронный ресурс] URL: <https://library.e.abb.com/public/402824f46668b565c1257c94003b6106/HPT-HighPressureTuning.pdf> (дата обращения 12.02.2025).
14. Efficiency of MAN B&W two-stroke engines. [Электронный ресурс] URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync-archive/efficiency-of-man-b-w-two-stroke-engines-eng.pdf?sfvrsn=e9d98f29_1 (дата обращения 18.01.2025).
15. Shaft generators for low speed main engines. [Электронный ресурс] URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0003-03ppr.pdf?sfvrsn=b570e4e5_14 (дата обращения 18.01.2025).
16. IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. [Электронный ресурс] URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx> (дата обращения 20.01.2025).
17. Сокращение выбросов парниковых газов в международном судоходстве, 2008 — 2050 [Дорожная карта IMO 2023]. [Электронный ресурс] URL: <https://paluba.media/wp-content/uploads/2023/11/14-14-1024x642.jpg> (дата обращения 21.01.2025).
18. MAN B&W ammonia engine development // MAN Energy Solutions. [Электронный ресурс] URL: <https://www.man-es.com/marine/products/two-stroke-engines/ammonia-engine> (дата обращения 20.01.2025).
19. Дятел Т. Большому кораблю — большой двигатель / Т. Дятел // Коммерсантъ. 13.02.2024. [Электронный ресурс] URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6508708> (дата обращения 20.01.2025).
20. Дятел Т. ОСК на малых оборотах / Т. Дятел // Коммерсантъ. 10.10.2024. [Электронный ресурс] URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7215327> (дата обращения 20.01.2025).
21. Асеев Е.Н. Конструирование и расчет безвальных генераторов газа / Е.Н. Асеев, А.С. Эпштейн. — М.: Машгиз, 1962. — 355 с.
22. Шелест П.А. Безвальные генераторы газов / П.А. Шелест. — М.: Машгиз, 1960. — 380 с.
23. www.freikolben.ch [Материалы сайта]. [Электронный ресурс] URL: <https://web.archive.org/web/20130824094639/https://www.freikolben.ch/37464/98443.html> (дата обращения 21.01.2025).
24. Гаврилов С.В. Судовые энергетические установки. История развития: уч. пос. / С.В. Гаврилов. — Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2003. — 382 с.
25. Захаров Б.Н. Морские лесовозы / Б.Н. Захаров, В.К. Смирнов. — Л.: Судостроение, 1967. — 227 с.
26. Трубин А.Ф. Анализ технической эксплуатации ГТУ с СПГ судов типа «Павлин Виноградов» и экспериментальное исследование рабочего процесса СПГ при работе на тяжелых топливах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / А.Ф. Трубин, Л., 1968. — 30 с.
27. Филиппов А.П. Эксплуатация судовых двигателей внутреннего сгорания на тяжелом топливе / А.П. Филиппов, Ю.Н. Васильев. — М.: Транспорт, 1965. — 344 с.
28. Теодор Нетте. Имя на борту. [Электронный ресурс] URL: <http://forum.flot.su/showthread.php?t=826&pagenumber=> (дата обращения 22.01.2025).
29. Проект 580, тип Павлин Виноградов. [Электронный ресурс] URL: <https://fleetphoto.ru/projects/1296/?lang=ru> (дата обращения 22.01.2025).
30. ГТУ со свободнопоршневыми генераторами газа. [Электронный ресурс] URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules?ln=ru#> (дата обращения 21.01.2025).

REFERENCES

1. Latache M. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. 10th ed. Oxford: Elsevier, 2021. 930 p.
2. Reutskii A.S., Semionichev D.S., Mikheeva A.A. Identification of the main ways to implement climate projects in waterborne transport. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 75. P. 4 — 15. (In Russ.)
3. Resolution MEPC.364(79) 2022 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364\(79\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf) (accessed 18.01.2025).
4. Reutskii A.S., Yakimov V.V., Butsanets A.A. Assessment of the impact of the type of marine fuel used on the carbon footprint of the transport service. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 75. P. 87 — 95. (In Russ.)
5. Okubo M., Kuwahara T. New technologies for emission control in marine diesel engine / M. Okubo, T. Kuwahara. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2020. 297 p.
6. Emission Project Guide MAN B&W Two-stroke Marine Engines. URL: https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/special_pg/PG_7020-0145.pdf (accessed 18.01.2025).
7. Green Technology & Alternative Fuel Uptake. URL: <https://www.clarksons.com/home/news-and-insights/2024/green-technology-alternative-fuel-uptake/> (accessed 20.01.2025).
8. Karim G.A. Dual-Fuel Diesel Engines. Boca Raton: CRC Press, 2015. 312 p.
9. UE Engine. URL: https://www.j-eng.co.jp/news/2022/14le6f0000002eaz-att/UE_catalogue_2022.pdf (accessed 18.01.2025).
10. WinGD low-speed engines. URL: <https://wingd.com/products-solutions/engines/> (accessed 20.01.2025).
11. Marine Engine Programme. URL: <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/marine-engine-programme> (accessed 17.01.2025).
12. Karianskyi S., Ozhenko Ye. Electronically controlled MAN-B&W ME type engines: textbook. Odessa, 2020. 92 p. (In Russ. and Eng.)
13. Fußstetter K. HPT: High Pressure Tuning for MAN Diesel & Turbo two-stroke engines. 2014. URL: <https://library.e.abb.com/public/402824f46668b565c1257c94003b6106/HPT-HighPressureTuning.pdf> (accessed 12.02.2025).
14. Efficiency of MAN B&W two-stroke engines. URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync-archive/efficiency-of-man-b-w-two-stroke-engines-eng.pdf?sfvrsn=e9d98f29_1 (accessed 18.01.2025).
15. Shaft generators for low speed main engines. URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0003-03ppr.pdf?sfvrsn=b570e4e5_14 (accessed 18.01.2025).
16. IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx> (accessed 20.01.2025).
17. Sokrashchenie vybrosov parnikovykh gazov v mezhdunarodnom sudokhodstve [Reduction of greenhouse gas emissions from international shipping], 2008 — 2050 [IMO 2023 Roadmap]. URL: <https://paluba.media/wp-content/uploads/2023/11/14-14-1024x642.jpg> (accessed 21.01.2025).
18. MAN B&W ammonia engine development. *MAN Energy Solutions*. URL: <https://www.man-es.com/marine/products/two-stroke-engines/ammonia-engine> (accessed 20.01.2025).
19. Dyatel T. Bol'shomu korablyu — bol'shoi dvigatel' [A great ship asks for a great engine]. *Kommersant*. 13.02.2024. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6508708> (accessed 20.01.2025).
20. Dyatel T. OSK na malykh oborotakh [United Shipbuilding Corporation on low-speed engine]. *Kommersant*. 10.10.2024. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7215327> (accessed 20.01.2025).
21. Aseev E.N., Epshtein A.S. Konstruirovaniye i raschet bezval'nykh generatorov gaza [Design and calculation of shaftless gas generators]. Moscow: Mashgiz, 1962. 355 p.
22. Shelest P.A. Bezval'nye generatory gazov [Shaftless gas generators]. Moscow: Mashgiz, 1960. 380 p.
23. www.freikolben.ch [Site materials]. URL: <https://web.archive.org/web/20130824094639/https://www.freikolben.ch/37464/98443.html> (accessed 21.01.2025).
24. Gavrilov S.V. Sudovye energeticheskie ustanovki. Istoriya razvitiya [Ship power plants. History of development: textbook]. Petropavlovsk-Kamchatskii: KamchatGTU, 2003. 382 p.
25. Zakharov B.N., Smirnov V.K. Morskie lesovozy [Marine timber carriers]. L.: Sudostroenie, 1967. 227 p.
26. Trubin A.F. Analiz tekhnicheskoi ekspluatatsii GTU s SPGG sudov tipa «Pavlin Vinogradov» i eksperimental'noe issledovanie rabocheho protsessa SPGG pri rabote na tyazhelykh toplivakh [Analysis of technical operation of free-piston gas turbines of "Pavlin Vinogradov" type vessels and experimental study of free-piston gas turbines at operation on heavy fuel: abstract of PhD thesis]. Leningrad, 1968. 30 p.
27. Filippov A.P., Vasil'ev Yu.N. Ekspluatatsiya sudovykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya na tyazhelom toplive [Operation of heavy fuel internal combustion marine engines]. M.: Transport, 1965. 344 p.
28. Teodor Nette. Imya na bortu [Theodor Nette. A name on the board]. URL: <http://forum.flot.su/showthread.php?t=826&pagenumber=> (accessed 22.01.2025).
29. Project 580, Pavlin Vinogradov type. URL: <https://fleetphoto.ru/projects/1296/?lang=ru> (accessed 22.01.2025).
30. Gas-turbine unit with free-piston gas generators. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules?ln=ru#> (accessed 21.01.2025).