

УДК 629.017

РАЗВИТИЕ МАЛООБОРОТНЫХ ДВУХТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**Петров Александр Павлович**¹, доцент, кандидат технических наук, доцент*e-mail:* petrovap@gumrf.ru**Живлюк Григорий Евгеньевич**¹, доцент, кандидат технических наук, доцент*e-mail:* zhivlyukge@gumrf.ru¹ Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Благодаря своей простоте, надежности и высокой топливной экономичности малооборотный двухтактный крейцкопфный дизельный двигатель в настоящее время является основой судовой энергетической установки для большинства крупнотоннажных судов торгового флота. В статье рассмотрен современный уровень разработок конструкций малооборотных двигателей и представлены перспективы их развития с учетом основных направлений, включая: снижение расхода топлива, снижение выбросов и повышение надежности. Отмечается, что несмотря на высокий уровень совершенства, остаются некоторые резервы, которые позволят достичь более высоких показателей.

Ключевые слова: двухтактный двигатель, конструкция, прямой привод, прямоточная продувка, крейцкопф; эффективность, расход топлива, выбросы вредных веществ, надежность.

DEVELOPMENT OF LOW-RPM TWO-TACK ENGINES**Alexander P. Petrov**¹, Associate professor, Candidate of Technical Sciences, Associate professor*e-mail:* petrovap@gumrf.ru**Grigory E. Zhivlyuk**¹, Associate professor, Candidate of Technical Sciences, Associate professor*e-mail:* zhivlyukge@gumrf.ru¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

Abstract. Due to its simplicity, reliability, and high fuel efficiency, the low-speed two-stroke crankshaft diesel engine is currently the basis of the marine power plant for most large-capacity merchant ships. This article examines the current state of development in low-speed engine design and presents the prospects for their evolution, focusing on key areas such as reducing fuel consumption, emissions, and improving reliability. It is noted that despite the high level of perfection, there are still some reserves that will allow for achieving higher results.

Keywords: two-stroke engine, design, direct drive, direct-flow scavenging, crankshaft; efficiency, fuel consumption, emissions, and reliability.

Целью настоящей работы является анализ достигнутых результатов развития и определение возможных перспектив дальнейшего совершенствования судовых малооборотных двухтактных крейцкопфных двигателей.

Требования к пропульсивной установке большинства торговых судов обычно удовлетворяются установкой малооборотного двухтактного крейцкопфного дизельного двигателя (МОД) соответствующей частоты вращения коленчатого вала и мощности. Непосредственная прямая передача крутящего момента к гребному винту без редукторов и муфт обеспечивает минимальные потери передачи мощности к движителю. Благодаря своим размерам цилиндра, МОД является наиболее эффективным из известных тепловых двигателей, причем высокая эффективность работы поддерживается при использовании самых дешевых материалов в конструкции и остаточных сортов тяжелого топлива [1]. Малооборотные двигатели способны сжигать тяжёлое топливо более эффективно, чем среднеоборотные, поскольку имеют больше времени и пространства для организации процессов смесеобразования и тепловыделения.

В отличие от тронковых двигателей, в которых для смазки механизмов и цилиндропоршневой группы используется одно масло, что неизбежно приводит к некоторому компромиссу в отношении его свойств, в крейцкопфном двигателе эти системы разделены. Следовательно, для смазки подшипников можно использовать циркулирующее чистое масло, а для поршневых колец и гильз – отдельное расходное цилиндрическое масло. В этом случае для смазки цилиндропоршневой группы МОД используются специальные щелочные масла, дозированно подаваемые на поверхность цилиндра и способные нейтрализовать кислотные остатки продуктов сгорания топлива.

При равенстве рабочих объемов малооборотный двигатель, как правило, имеет меньше цилиндров и, следовательно, меньше движущихся частей, что, в принципе, означает более высокую общую надежность. Это в большинстве случаев приводит к меньшим затратам на техническое обслуживание по сравнению со среднеоборотными двигателями. Кроме того, уровень шума малооборотного двигателя значительно ниже, а работы по техническому обслуживанию облегчаются большим пространством внутри двигателя. Недостатки МОД, выраженные в больших габаритах и требованиях к занимаемому пространству, большому весу и более высокой начальной цене, оказываются менее существенными если рассматривать силовую установку в целом.

Несмотря на свои явные преимущества, состоящие в техническом совершенстве и приближенной к безупречности конструкции, малооборотный двухтактный крейцкопфный двигатель имеет определенный нераскрытый потенциал, способный обеспечить дополнительную оптимизацию своих свойств, параметров и характеристик.

Рынок судовых двигателей зависит от активности в строительстве новых судов и изменений в размерах судов. Это, в свою очередь, зависит от мировой экономики и необходимости замены старых судов.

На разработку судовых двигателей влияют:

- стоимость углеводородных видов топлива, а также стоимость и доступность альтернативных видов топлива;
- введение новых правил технического регулирования;
- состояние рынка судовых двигателей;
- конструкция корпуса судна;
- эксплуатационный профиль судов, сочетание стоимости топлива и фрахтовых ставок.

Основная направленность разработок ориентирована на решение трех главных задач, а именно: повышение эффективности; повышение уровня экологической безопасности и повышение надежности.



Повышение эффективности остается важнейшей из задач двигателестроения которая достигается различными методами. Следует признать, что МОД эффективнее других двигателей в первую очередь благодаря большим размерам цилиндра и низкой частоты вращения коленчатого вала. Большой размер означает, что меньшее отношение поверхности к объему камеры сгорания приведет к меньшим потерям теплопередачи [2], а уменьшенная частота вращения коленчатого вала обеспечит меньшие потери на трение. В то же время, размер и стоимость больших двигателей делают экономически выгодной установку систем рекуперации энергии, которые могут повысить общую энергоэффективность.

Практические ограничения эффективности двигателя связаны с необратимыми потерями, такими как неполнота сгорания топлива, работой диссипативных сил трения в механизмах и термодинамическим несовершенством процессов, происходящих в цилиндре. Необходимо также учитывать ограничения, создаваемые свойствами используемых материалов в конструкции, которые напрямую влияют на рабочие параметры двигателя. Самым очевидным из способов повышения эффективности является увеличение полноты извлечения работы, совершаемой газами в цилиндре или, альтернативно, использование энергии, отводимой с отработавшими газами, в устройствах рекуперации энергии.

Выходная мощность может увеличиваться в основном за счет увеличения массы воздуха, подаваемого в цилиндры для сжигания топлива, т.е. увеличения объема цилиндров или / и их числа, увеличения частоты вращения коленчатого вала, изменения давления воздуха на всасывании и, наконец, изменения коэффициента избытка воздуха, что связано с более рациональной организацией внутрицилиндровых процессов. Также необходимо учитывать, что на работу цикла двигателя оказывают влияние непроизводительные потери тепла, которые отражаются в показателе политропы. В двухтактных двигателях с непосредственной передачей крутящего момента на гребной винт увеличение отношения хода поршня к диаметру цилиндра при сохранении средней скорости поршня на уровнях, определяемых трибологией, позволяет снизить скорости вращения гребного вала. Извлечение работы за счет увеличения хода приведет к снижению отдачи из-за ограничений на трение.

Уровень форсирования дизельного двигателя определяется средним эффективным давлением, увеличение которого потенциально приводит как к росту теплонапряженности конструкции, так и к механической напряженности в результате увеличения давлений в цикле. Технологический прогресс обуславливает улучшение свойств материалов и методов проектирования, что позволяет производить двигатели с повышенной тепловой и механической нагрузкой.

Повышение эффективности турбокомпрессоров и производство компонентов системы впрыска топлива высокого давления способствует увеличению среднего эффективного давления в цилиндре. Подобные разработки способствуют улучшению конструкции камеры сгорания, что определяет возможность достижения более высоких давлений при снижении тепловой нагрузки и улучшенном смесеобразовании. Возможности электронного управления впрыском топлива обеспечивают оптимизацию сгорания при различных нагрузках двигателя. Использование многократных впрысков и изменение фаз и скорости впрыска приводят к контролируемому сгоранию, что отражается на эффективности работы двигателя. За счет электронного управления и оптимальных регулировок может быть достигнуто дальнейшее снижение расхода топлива (и выбросов CO_2) не только на установившихся номинальных режимах, но и на переходных режимах и режимах частичных мощностей. Системы электронного управления работой двигателя автоматически отслеживают и регулируют мощность отдельных цилиндров. Самовыравнивание мощности, генерируемой отдельными цилиндрами двигателя,



позволяет производителю устранить те ограничения мощности двигателя, которые он вынужден вводить в связи с возможной неравномерностью подачи топлива по цилиндрам. Несмотря на значительную оптимизацию процессов тепловыделения, сгорание в двигателях происходит вне химического равновесия, и часть энергии расходуется на разрыв химических связей и нагрев реагентов. Здесь присутствует потенциал для будущих исследований.

Снижение непроизводительных потерь тепла в стенки теплоизолированного цилиндра является привлекательной перспективой повышения эффективности. Однако было убедительно продемонстрировано [3], что изготовление стенок камеры сгорания из материалов, обладающих низкими коэффициентами теплопроводности с целью тепловой изоляции рабочего объема, не улучшает термодинамическую эффективность двигателя. Из-за меньшего теплоотвода в стенки цилиндра температура отработавших газов будет повышаться, следовательно, турбокомпрессор может использовать часть дополнительной энергии для обеспечения повышенного давления наддува, чтобы ослабить негативные последствия потерь наполнения цилиндра свежим зарядом. Кроме того, увеличенная энергия, отводимая от двигателя с отработавшими газами, может быть утилизирована с помощью различных методов рекуперации, но использование потенциала рекуперации тепла отработавших газов будет связано с дополнительными затратами на установку агрегатов утилизации. Тем не менее, использование утилизационных циклов приведет к росту эффективности энергетической установки, поэтому затраты на установку дополнительного оборудования подлежат окупаемости в процессе эксплуатации.

Вопросы сокращения механических потерь в процессе передачи работы газов в цилиндре к фланцу съема мощности двигателя оказывают непосредственное влияние на экономичность работы. Основной составляющей механических потерь являются потери на трение. Снижение потерь может быть обеспечено за счет модернизации конструкции пар трения и усовершенствований в системе смазки. Для снижения трения могут быть использованы современные материалы или технологии создания покрытий с высокими антифрикционными свойствами и высококачественные смазочные материалы.

Механический КПД может быть увеличен за счет сокращения мощности, потребляемой на привод зависимых от двигателя агрегатов и устройств, а также снижения потерь на продувку цилиндров. На сокращение потерь на привод вспомогательного оборудования может оказать влияние интеллектуальное управление производительностью. Так, программное управление циркуляционным насосом охлаждающей жидкости позволяет добиться до 60% сокращения потребляемой на привод мощности в зависимости от режима работы двигателя. Также дополнительному снижению потерь могут способствовать оптимизация топливных насосов высокого давления в системах Common Rail и других паразитных нагрузок.

Увеличение механического КПД происходит с увеличением уровня форсировки двигателя, т.к. доля потерь в этом случае уменьшается по сравнению с полезной мощностью. Уровень форсирования неразрывно связан с давлением наддува, поэтому увеличение давления наддува с необходимыми корректировками впрыска топлива может привести к некоторому повышению эффективности. Однако при этом возможно увеличение максимального давления в цилиндре, которое создает дополнительные проблемы. Одноступенчатый турбонаддув имеет практический предел степени повышения давления 5:1. Двухступенчатый турбонаддув представляет собой относительно простое решение для увеличения удельной мощности, но с более высокими затратами, сложной системой трубопроводов и снижением эффективности при низких нагрузках, когда рабочие колеса работают с низким КПД. Для расширения рабочего диапазона турбокомпрессора предлагается изменяемая геометрия проточных частей. Она предусматривает



предварительное изменение углового положения регулируемых направляющих сопловых аппаратов, позволяющих осуществить более точную настройку режимов турбокомпрессора в широком диапазоне мощностных режимов работы двигателя.

Таким образом, несмотря на то что МОД имеют самые высокие значения механического КПД среди других поршневых ДВС, достигающего 94 – 95%, резервы по сокращению механических потерь могут быть найдены и задействованы.

Всемерное сокращение выбросов вредных веществ с отработавшими газами становится все более актуальной проблемой современного двигателестроения. Для производителей, в целом ряде случаев, стремление соответствовать постоянно ужесточающимся требованиям по экологической безопасности судовых энергетических установок отодвигает на второй план проблемы достижения высокой топливной экономичности [4]. В виду специфики протекания внутрицилиндровых процессов, а также особенностей состава используемых топлив, МОД подпадают под регулирование норм в большей степени, при этом обеспечение соответствия требованиям достигается более сложными решениями, чем для среднеоборотных и высокооборотных двигателей.

Высокие температуры и увеличенная продолжительность процесса сгорания в малооборотных двухтактных двигателях оказываются главными причинами роста выбросов оксидов азота, которые рассматриваются как основная составляющая вредных выбросов дизельного двигателя и подлежит регулированию в первую очередь. Поиск решений борьбы с выбросами оксидов азота имеет достаточно длительную историю. Разработанные методы, направленные на сдерживание максимальных температур в цикле, приводят к неоднозначным результатам по эффективности применения. Наибольшую эффективность проявляют системы рециркуляции отработавших газов. Несмотря на накопленный опыт использования систем в четырехтактных двигателях иных назначений (в основном автотранспортного назначения) применение рециркуляции отработавших газов для судовых двухтактных ДВС до настоящего времени ограничено. Это обусловлено целым рядом технических и организационных проблем решение которых способствует достижению минимизации выбросов оксидов азота до уровня самых жестких ограничений и обеспечения возможности работы судов в зонах особого контроля выбросов, которые проявляют тенденции к постоянному расширению. Следует ожидать, что благодаря низким эксплуатационным затратам и возможности использования различных видов топлива, системы рециркуляции будут получать все более широкое распространение в конструкциях судовых МОД.

В качестве основного конкурента системам рециркуляции отработавших газов рассматриваются системы селективного каталитического восстановления оксидов азота. Несмотря на высокие эксплуатационные затраты, использование селективного каталитического восстановления получает все более широкое распространение. Дальнейшие разработки в области организации процессов восстановления оксидов азота, применения различных катализаторов и реагентов имеют значительный потенциал в снижении затрат при использовании таких систем, а также сокращения их стоимости.

Эффективное использование тяжелых остаточных топлив, как важное преимущество судовых малооборотных двухтактных двигателей, приводит к увеличенным выбросам оксидов серы и твердых частиц. Требования по сокращению выбросов оксидов серы вынуждают производителей к переходу на малосернистые сорта топлива или задействованию скрубберных систем очистки отработавших газов. Переход на малосернистые топлива представляется наиболее простым решением, однако такой переход сопряжен с удорожанием расходов на топливо в структуре стоимости перевозок. Кроме того, малосернистые топлива оказывают влияние на условия смазки деталей



цилиндропоршневой группы и требуют адаптации двигателя под новые смазочные материалы.

Ограничение выбросов твердых частиц и несгоревших углеводородов является важной составляющей обеспечения требуемого уровня экологической безопасности судового двигателя. В этой связи, принимая во внимание успешную апробацию и широкое применение технологий каталитического окисления и сажевых фильтров на двигателях автотранспортного назначения, уместно будет ожидать в дальнейшем распространение аналогичных технологий на судовые модификации МОД с учетом специфики используемых топлив.

Можно предположить, что с учетом требований по энергоэффективности энергетических установок, в обозримом будущем будет происходить неуклонное увеличение объемов использования альтернативных сортов топлива (включая природный газ), которое позволит одновременно решить проблему выбросов не только оксидов азота и серы, но и снизить антропогенное влияние на климат планеты, не нарушая естественный круговорот углерода в природе [5].

Повышение надежности малооборотных двигателей традиционно решается за счет совершенствования конструкций, технологий изготовления и тщательного подбора материалов. Достигнутые успехи и накопленный опыт в области конструирования, создания новых материалов и технологий позволяют позиционировать малооборотные двухтактные двигатели как чрезвычайно надежные агрегаты в составе судовой энергетической установки. Исходя из этого, дальнейшее повышение надежности смещается в плоскость непрерывной точной оценки текущего состояния двигателя в эксплуатации [6]. В перспективе следует ожидать дальнейшее распространение и совершенствование систем мониторинга технического состояния как отдельных, наиболее ответственных деталей и узлов двигателя, так и двигателя в целом. Значительное внимание уделяется дальнейшему развитию элементной базы, обеспечивающей высокую достоверность получаемых результатов и повышению качества оценки технического состояния за счет автоматизированных систем сбора и анализа данных мониторинга, с возможной разработкой и привлечением новых технологий искусственного интеллекта. Предоставляемые достоверные данные мониторинга будут способствовать выработке судоходными компаниями выверенной стратегии эксплуатации и технического обслуживания, тем самым выводя надежность двигателей на новые уровни.

Список литературы:

1. Шурпак В. К. Анализ современных тенденций применения двигателей внутреннего сгорания на морских судах / В. К. Шурпак // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 75. — С. 47–60. — EDN GDAGAH.
2. Костин А.К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания: справочное пособие / А.К. Костин, В.В. Ларионов, Л.И. Михайлов. — Л. : Машиностроение, 1979, — 222 с.
3. Живлюк Г. Е. Анализ возможности создания высокоэкономичного турбокомпаундного двигателя 6ЧН 12/14 / Г. Е. Живлюк // Двигателестроение. — 1989. — № 10. — С. 49–53.
4. Живлюк Г. Е. Основные направления и перспективы развития судовых двухтактных крейцкопфных малооборотных двигателей / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 112–127. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-112-127. — EDN WHUZQX.



5. Реуцкий А. С. Оценка влияния типа используемого судового топлива на величину угле-родного следа транспортной услуги / А. С. Реуцкий, В. В. Якимов, А. А. Буцанец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 87–95. — EDN ICJSDQ.
6. Kyrtatos N. P. Slow-Speed Two-Stroke Engines / N. P. Kyrtatos // Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering 2017. — С. 1–10. DOI: 10.1002/9781118476406.emoe098.

