

Белоусов Евгений Викторович, д.т.н., доц., Херсонская государственная морская академия

Савчук Владимир Петрович, к.т.н., доц., Херсонская государственная морская академия

Самарин Александр Евгеньевич, к.т.н., доц., Херсонская государственная морская академия

Белоусова Татьяна Петровна, ст. преп., Херсонский государственный аграрно-экономический университет

Рыбальченко Николай Евгеньевич, аспирант, Херсонская государственная морская академия

## **АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ПРОБЛЕМЕ СОЗДАНИЯ СУДОВЫХ МАЛООБОРОТНЫХ ГАЗОДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

По оценкам экспертов Lloyd's Marine Intelligence, мировой торговый флот по состоянию на 2018 год насчитывает более 50 тысяч судов общей грузоподъемностью около 1,4 млрд. тонн, которые обеспечивают 75% мировых транспортных операций. При этом доля вредных выбросов от судовых энергетических установок (СЕУ) в атмосферу не превышает 5...7%. Несмотря на это, требования к экологическим показателям судовых дизелей год от года ужесточаются. Объясняется это большими агрегатными мощностями, которые в некоторых случаях превышают 100 МВт, что приводит к существенному загрязнению воздушного бассейна в местах интенсивного судоходства [1].

Процесс законодательного регулирования вредных выбросов в атмосферу судами торгового флота был начат в 1973 г. с принятия Международной морской организацией (International Maritime Organization – ИМО) Конвенции «О предотвращении загрязнения с судов», которая была ратифицирована в 1978 г. и получила название – MARPOL 73/78. В 1997 г. Конвенция была дополнена «Протоколом 1997», включавшим в себя Приложение № VI «Порядок предотвращения загрязнения атмосферы судами», вступившим в силу в 2005 г. Конвенция ограничивает содержание в топливе продуктов сгорания серы ( $SO_x$ ), оксидов азота ( $NO_x$ ), твердых частиц (PM), а так же парниковых газов [2].

Кроме общих международных норм, ИМО также устанавливает особые зоны контроля (ECA – Emission Control Area). В этих зонах к выбросам предъявляются более жесткие требования. С каждым годом ограничения MARPOL становятся жестче, так если в 2010 г. содержание серы в топливе не должно было превышать 1,0% в зонах ECA и 4,5 % в других акваториях, то к 2020 г. допустимое количество было ограничено до 0,1 и 0,5 %, соответственно [3].

Что бы достичь приведенные выше нормы для всех типов судовых двигателей, в настоящее время, наиболее перспективным направлением рассматривается использование в качестве основного топлива горючих газовых смесей. Перспективными газовыми топливами (ГТ) можно считать природный газ, состоящий в основном из метана ( $CH_4$ ), и нефтяные газы, представляющие

собой смеси преимущественно пропана ( $C_3H_8$ ) и бутана ( $C_4H_{10}$ ).

На борту судна природный газ может храниться в сжиженном состоянии при температурах ниже  $-160^{\circ}C$  (Liquefied Natural Gas (LNG)) в специальных криогенных емкостях, а пропанобутановые смеси (Liquefied petroleum gas (LPG)) могут храниться в жидком состоянии при температурах окружающей среды под давлением выше 1,6 МПа. Технологически, ГТ могут специально храниться на борту судна как основное топливо для функционирования СЭУ, так и являться побочным продуктом процесса транспортировки различных видов топлив, например судами газовозами или нефтеналивными танкерами [4].

Применение ГТ позволяет существенно сократить количество вредных выбросов, полностью исключить выбросы серы, кардинально (на 90 %) снизить выбросы  $NO_x$  и существенно (на 30 %) снизить выбросы РМ и  $CO_2$ .

Специфические условия работы главных двигателей судов потребовали поиска новых оригинальных решений для малооборотных двухтактных двигателей (МОД), работающих на ГТ. Данные двигатели должны сохранять возможность полноценной работы на жидких топливах (ЖТ), которая возникает всякий раз, когда судно движется в балласте или ГТ на борту заканчивается. Для газовозов и нефтеналивных танкеров состав ГТ, используемых СЭУ, может существенно изменяться в зависимости от вида груза, условий плавания и времени. Система управления главного двигателя должна адекватно реагировать на такие изменения и обеспечивать его работу во всем диапазоне рабочих режимов. Поэтому все МОД выпускаются двухтопливными (dual-fuel (DF)), и способны работать на ГТ с использованием небольшой порции запального ЖТ, на ЖТ или на обоих топливах сразу в различных пропорциях.

В двухтактных МОД организовать относительно простое внешнее смесеобразование невозможно. Перед поступлением в рабочий цилиндр воздух заполняет подпоршневую полость, имеющую достаточно большой объем, что увеличивает опасность взрыва и серьезность его последствий. Поэтому в МОД используется внутреннее смесеобразование, при котором ГТ подается в рабочий цилиндр после закрытия газораспределительных органов.

К внутреннему смесеобразованию существует два основных подхода:

- ГТ подается в рабочий цилиндр сразу после закрытия выпускного клапана под относительно небольшим давлением, поэтому такие системы получили название – систем питания низкого давления;

- ГТ подается в камеру сгорания вместе с запальным топливом в конце такта сжатия под высоким давлением. Такие системы получили название систем высокого давления или прямого впрыска газа (Direct Injected Gas (GD)) [5].

Системы прямого впрыска позволяют организовать рабочий процесс близкий к рабочему процессу на ЖТ, однако экологические показатели таких двигателей значительно уступают аналогичным показателям двигателей низкого давления. Именно этим объясняется факт активных работ в области

создания двигателей низкого давления фирмой MAN Diesel SE, которая до этого была основным идеологом технологии высокого давления [6].

Работа двигателя низкого давления на ГТ позволяет получить на выходном фланце мощность на уровне 80% от номинальной мощности двигателя на ЖТ. При необходимости получения более высоких мощностей двигатель переводится на ЖТ. Пуск и остановка двигателя в целях безопасности так же осуществляется на ЖТ. Следует отметить, что получаемая мощность на ГТ соответствует основному эксплуатационному режиму судовых двигателей.

Основным фактором, ограничивающим мощность, является возникновение детонации в рабочем пространстве цилиндра (рис. 1). Двухтопливность двигателя сделала необходимым сохранение высокой степени сжатия, в результате чего, в рабочем цилиндре возможно неконтролируемое преждевременное самовоспламенение газоз-воздушной смеси. Чтобы избежать детонации, приходится поддерживать состав обедненной газоз-воздушной смеси в достаточно узком диапазоне, что влечет за собой снижение энергетического потенциала заряда и, следовательно, уменьшение производимой им работы.

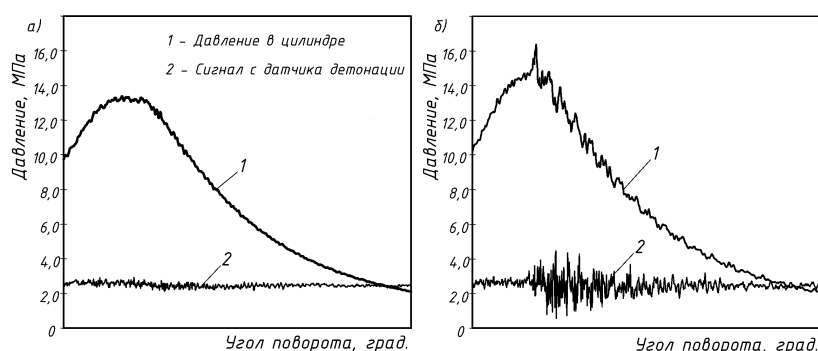


Рисунок 1. Нормальное (а) и детонационное сгорание газоз-воздушной смеси (б) в рабочем цилиндре газодизельного МОД RT-flex50B

Причиной возникновения детонации является ряд физико-химических процессов, происходящих в ходе сжатия на фоне возрастающей температуры газоз-воздушной смеси. Скорость протекания физико-химических процессов, приводящих к детонации, зависит от состава газоз-воздушной смеси. Для работы двигателя на номинальной мощности, метановое число ГТ не должно быть меньше 80, при снижении мощности, метановое число так же может быть снижено до 80...55 единиц. Кроме того, продолжительное сжатие газоз-воздушной смеси, сопровождающееся ростом ее температуры, делает рабочий процесс чрезвычайно чувствительным к температуре воздуха на входе в двигатель.

Высокий уровень гомогенизации газоз-воздушной смеси имеет и обратную сторону. В зазорах между головкой поршня и втулкой цилиндра газоз-воздушная смесь выгорает плохо, что приводит к попаданию метана в отработавшие газы. На сегодня нет действующих ограничений на выбросы метана судовыми ДВС, однако необходимо иметь ввиду, что парниковый

эффект от метана в 20...25 раз выше чем от CO<sub>2</sub>. В целом выбросы метана в атмосферу газодизельными МОД не превышают 0,3%, а общее количество выбрасываемых парниковых газов на 20...30% ниже, чем у двигателей работающих на ЖТ.

Перспективным направлением развития газодизельных МОД может стать переход на подачу ГТ в рабочий цилиндр под давлениями 4...6 МПа [7]. Это позволит сочетать преимущества методов подачи под высоким и низким давлениями и нивелировать недостатки, свойственные этим методам. Так, согласно исследованиям авторов, повышение давления ГТ до 4,13 МПа перед газовым клапаном позволит сократить время сжатия газоздушной смеси, исключив тем самым условия, приводящие к возникновению детонационного сгорания [7]. Варьируя сечением проходного канала и его формой (рис. 2) можно добиться переноса процесса подачи ГТ на участок сжатия от 1,91 до 2,10 м по ходу поршня (рис. 3), что соответствует прохождению поршнем к моменту начала подачи 72% своего хода и 79% к окончанию подачи ГТ.

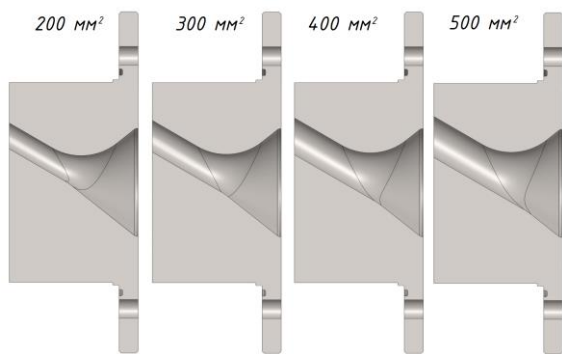


Рисунок 2. Сечения сопловых каналов газоподающего модуля двигателя X62DF фирмы WinGD

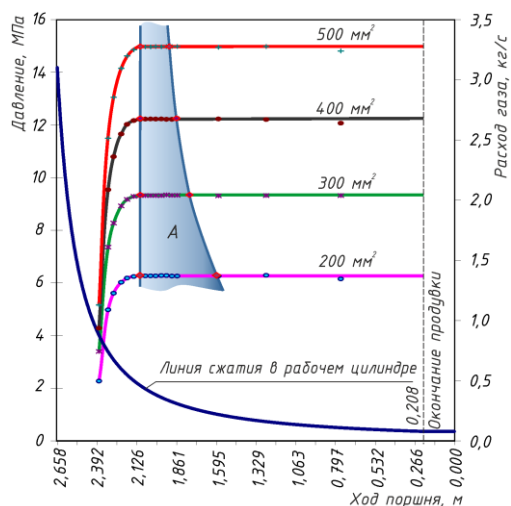


Рисунок 3. Изменение расходных характеристик газового модуля как функция хода рабочего поршня на линии сжатия: А – зона подачи ГТ

В результате время, необходимое на смесеобразование, может быть сокращено в 1,8 раза, а сам процесс подачи ГТ максимально приближен к ВМТ.

Оптимизация профиля соплового канала является существенным резервом сокращения времени подачи ГТ в рабочий цилиндр, а вопросы оптимизации требуют дополнительного исследования.

### Литература

1. <https://lloydslist.maritimeintelligence.informa.com/special-reports>
2. <http://pilotservice.narod.ru/docs/MARPOL.htm>

3. [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Emission-Control-Areas-\(ECAs\)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-\(NOx-emission-control\).aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Emission-Control-Areas-(ECAs)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-(NOx-emission-control).aspx)

4. Белоусов Е. В. Топливные системы современных судовых дизелей. Изд. 4-е стереотипное. СПб.: Издательство «Лань», 2019. – 256 с.

5. Белоусов Е. В., Савчук В. П., Белоусова Т. П. Анализ современных подходов к проблеме создания судовых малооборотных газодизельных двигателей. Двигатели внутреннего сгорания. 2016. № 1. С 81–88.

6. MAN B&W ME-GA Propulsion engine. MAN Energy Solutions, Copenhagen Denmark, 2021. – 2 p.

7. Марченко А.П. Влияние геометрии проточной части газоподающего модуля на процесс подачи газового топлива в малооборотном газодизельном двигателе / Марченко А.П., Белоусов Е.В., Савчук В.П., Вербовский, В.С., Рыбальченко Н.Е. // Двигун внутрішнього згорання. Всеукраїнський науково-технічний журнал. – Харків: вид. НТУ «ХПІ» – 2021. – № 1. – С 59-65.

Віштак Інна Вікторівна, к.т.н., доцент, Вінницький національний технічний університет, [innavish322@gmail.com](mailto:innavish322@gmail.com)

## **ПОКРАЩЕННЯ ТУРБОНАДДУВАННЯ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ГАЗОВИХ ОПОР**

**Турбонаддув** є вид наддування, за якого повітря в циліндри двигуна подається під тиском за рахунок використання енергії відпрацьованих газів.

Турбонаддув використовується як в бензинових, так і в дизельних двигунах, але найбільш ефективним вважається турбонаддув на дизелях враховуючи високий ступінь стискання двигуна та відносно низької частоти обертання мотора. Для бензинових двигунів турбонаддув загрожує можливістю настання детонації, що пов'язана з різким збільшенням частоти обертання двигуна, а також висока температура відпрацьованих газів і відповідний нагрів турбонагрівача.

Робота системи турбонаддування заснована на використанні енергії відпрацьованих газів. Відпрацьовані гази обертають турбіне колесо, яке через ротор обертає компресорне колесо. Компресорне колесо стискає повітря і нагнітає його в систему.

Турбонаддув не має жорсткого зв'язку з колінчастим валом двигуна і ефективність роботи системи залежить від числа обертів двигуна. Чим вище обороти мотору, тим вище енергія відпрацьованих газів, швидше обертається турбіна, більше стиснутого повітря надходить в циліндри двигуна.

Недолік системи турбонаддування це чутливість до зношення поршневої групи. Зростання тиску картерних газів суттєво знижає ресурс турбіни. За тривалої роботи в таких умовах настає «масляний голод» і помилка турбокомпресора. При чому пошкодження цього вузла може призвести до виходу з ладу всього двигуна.