

А.П. Марченко, Е.В. Белоусов, В.П. Савчук, В.С. Вербовский

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПОДАЧИ И СЕЧЕНИЙ СОПЛОВЫХ КАНАЛОВ НА ПРОЦЕССЫ ТОПЛИВОПОДАЧИ В ГАЗОДИЗЕЛЬНЫХ МАЛООБОРОТНЫХ ДВУХТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В настоящее время ведущими производителями судовых малооборотных двигателей ведутся интенсивные работы по их переводу на газовые топлива. В основном это продиктовано возросшими требованиями к снижению выбросов парниковых газов в атмосферу. В силу конструктивных особенностей в этом классе двигателей возможно только внутреннее смесеобразование, к организации которого существует несколько принципиально разных подходов, из которых в настоящее время реализовано только два. Фирма MAN разработала и наладила производство двигателей с подачей газового топлива в пространство рабочего цилиндра под высоким давлением в конце такта сжатия, а фирма WinGD – под низким давлением в начале такта сжатия. Обоим подходам свойственны как преимущества, так и существенные недостатки. Предыдущие исследования авторов показали, что подача газового топлива на такте сжатия под давлениями 4,5...6 МПа позволяет сократить время пребывания газо-воздушной смеси в рабочем цилиндре и уменьшить вероятность возникновения детонационного сгорания. Существенное влияние на расходные характеристики газоподающих модулей и на характер истечения из них оказывает то обстоятельство, что процесс смесеобразования на такте сжатия протекает в условиях изменяющегося противодействия. Поскольку дозирование цикловой порции в таких двигателях регулируется временем открытия газоподающих модулей, понимание основных закономерностей истечения газового топлива из них является основой для выбора правильной времени их открытия и закрытия. Авторами разработана математическая модель, позволяющая определить характер истечения и расход газового топлива через газоподающие модули двигателя в условиях изменяющегося противодействия в рабочем цилиндре. В данной работе было исследовано влияние давления газового топлива перед газоподающими модулями и сечения их сопловых каналов на характер истечения газового топлива из них. По результатам расчетов определены оптимальные давления и сечения сопловых каналов и их связь с углами открытия и закрытия газовых клапанов, исходя из условия постоянства расхода на всем участке подачи и максимального смещения участка подачи к концу процесса сжатия.

Ключевые слова: судовые малооборотные двухтопливные двигатели; газовое топливо.

Введение

Транспортировка морем различных товаров и сырья в общем мировом грузообороте занимает более 80%. В настоящее время средняя стоимость перевозки морем оценивается в 1,8 цента США, в то время как тот же показатель для железнодорожного транспорта в 1,8 раза выше, для автомобильного – в 9,2 раза, а для авиационного – в 56 раз. В значительной мере, такая ситуация связана с использованием на флоте дешевых сортов тяжелых нефтяных топлив [1]. Еще до недавнего времени это обстоятельство делало судовую энергетику достаточно защищенной от колебаний нефтяного рынка. С ростом глубины переработки нефти, тяжелые сорта, которые традиционно использовались для получения флотских топлив, становятся ценным сырьем для выработки более дорогостоящих нефтепродуктов, что начало существенно влиять на сокращение топливной базы судовых двигателей и усиление конкуренции на рынке нефтяных топлив. Это привело к значительному росту цен на бункеровку по основным бункеровочным базам [2]. К тому же, ужесточение экологических норм по содержанию в отработавших газах судовых двигателей токсичных веществ и парниковых газов, сделало использование тяжелых топлив менее привлекательным. Несмотря на то, что доля выбросов от

судовых энергетических установок в общем балансе ежегодных вредных выбросов в атмосферу относительно невысока и не превышает 5...7% [3], требования к экологическим показателям судовых двигателей год от года ужесточаются. Так как основу судовой энергетики составляют малооборотные двухтактные двигатели (МОД), их производители вынуждены были сосредоточить свои усилия на разработке газодизельных версий выпускаемых ими двигателей. Использование более дешевых газовых топлив (ГТ) позволяет обеспечить выполнение действующих на сегодня экологических норм, установленных третьим протоколом Международной морской организации (Tier III, International Maritime Organization – IMO). Специфика эксплуатации морского транспорта требует сохранения газодизельным двигателем возможности работать на жидких топливах. Это обстоятельство и легло в основу разработки концепции двухтопливных двигателей (dual-fuel (DF)) [4, 5].

В существующих на сегодня двухтактных малооборотных газодизельных двигателях используется внутреннее смесеобразование [4]: в начале сжатия (двигатели фирмы WinGD [5]) или в конце сжатия (двигатели фирмы MAN [4] и Mitsubishi).

Анализ состояния проблемы

Типичным представителем серии газодизель-

ных двигателей со смесеобразованием в начале процесса сжатия является двигатель W-X62DF производства компании Winterthur Gas & Diesel Ltd. Двигатель был разработан на базе дизельного двигателя и является двухтопливной версией с запальным воспламенением обедненной газозвоздушной смеси. Для подачи газового топлива в втулке цилиндра установлено два газоподающих модуля (рис. 1), которые крепятся на некоторой высоте от продувочных окон, чтобы обеспечить необходимое время на подачу цикловой порции. ГТ поступает в рабочий цилиндр двигателя под давлением 1,6 МПа в начале сжатия и, перемешиваясь с воздухом, воспламеняется с помощью впрыска запального топлива, величина подачи которого не превышает 1% от полной цикловой подачи [5].

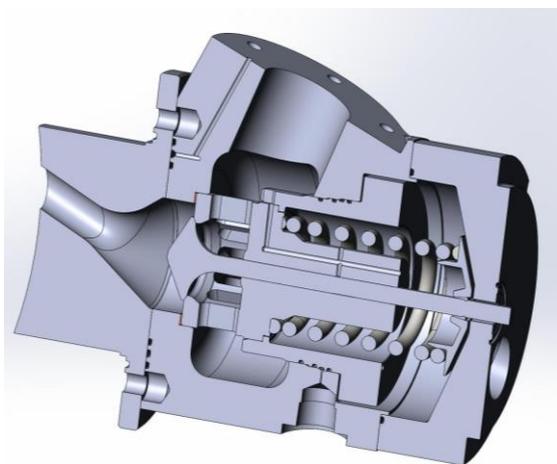


Рис. 1. Трехмерная модель газоподающего модуля двигателя W-X62DF фирмы WinGD, выполненная в среде SolidWorks

Ранее авторами была обоснована целесообразность подачи газового топлива в рабочий цилиндр под более высоким давлением [6], что позволяет в определенной степени сочетать преимущества, присущие газодизельным двигателям низкого и высокого давления. Важным аспектом совершенствования процесса топливоподачи является определение влияния различных факторов на характер истечения ГТ из сопловых каналов газоподающих модулей (рис. 1) и, в первую очередь, давления перед сопловыми каналами и их проходного сечения. Исследованию этого влияния и посвящена данная работа.

Пути решения проблемы

Для исследования процессов подачи ГТ в рабочее пространство двигателя авторами была разработана расчетная модель [6, 7], а также выполнено твердотельное 3D-моделирование в среде SolidWorks (рис. 1).

В качестве примера далее приведены резуль-

таты моделирования процессов смесеобразования в судовом малооборотном газодизельном двигателе W-X62DF. Описание главных геометрических характеристик двигателя и основные данные для моделирования приведены в работе [8].

В работах [7, 8] было показано, что при давлениях свыше 1,3 МПа истечение ГТ через канал заданной формы носит закритический характер, что обеспечивает выход газа из соплового канала газоподающего модуля со скоростью 397 м/с, а величина расхода не зависит от противодавления в рабочем цилиндре. Это создает благоприятные условия для хорошего перемешивания ГТ с содержащим рабочем цилиндре и упрощает процесс дозирования цикловой подачи путем изменения времени открытия газового клапана.

Также было установлено, что при повышении давления перед газовым клапаном расход газа увеличивается (рис. 2), а величина промежутка, необходимого для обеспечения максимальной цикловой подачи, сокращается. Это позволяет в границах располагаемого участка варьировать началом и концом подачи ГТ, реализуя различные варианты регулирования по концу или началу подачи, а также осуществлять смешанное регулирование.

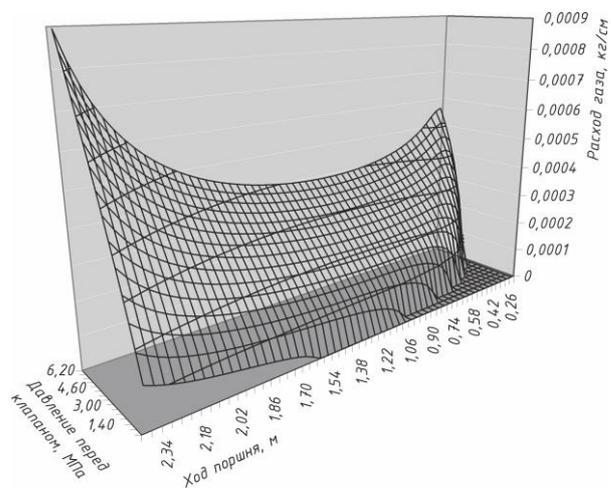


Рис. 2. Изменение расхода ГТ по длине хода поршня в зависимости от давления перед газовым клапаном

Для более полного представления о влиянии давления перед газовым клапаном на процесс подачи ГТ в рабочий цилиндр, по результатам моделирования была построена совмещенная диаграмма, на которой основные показатели процесса топливоподачи представлены как функция хода поршня (рис. 3). Такая диаграмма может быть использована при выборе оптимального участка для организации смесеобразования. В частности, она дает четкое представление о том, на какой высоте втулки цилиндра необходимо установить газоподаю-

щие модули, чтобы обеспечить заданный режим подачи ГТ. Также диаграмма позволяет определить максимальное давление перед клапаном газоподводящего модуля, при котором возможно обеспечить заданную цикловую подачу и определить характер истечения ГТ из соплового канала.

Для рассматриваемого в данной работе случая, совмещенная диаграмма построена с шагом изменения давления в 0,2 МПа.

С использованием разработанной методики аналогичные диаграммы можно построить для любых типов двигателей.

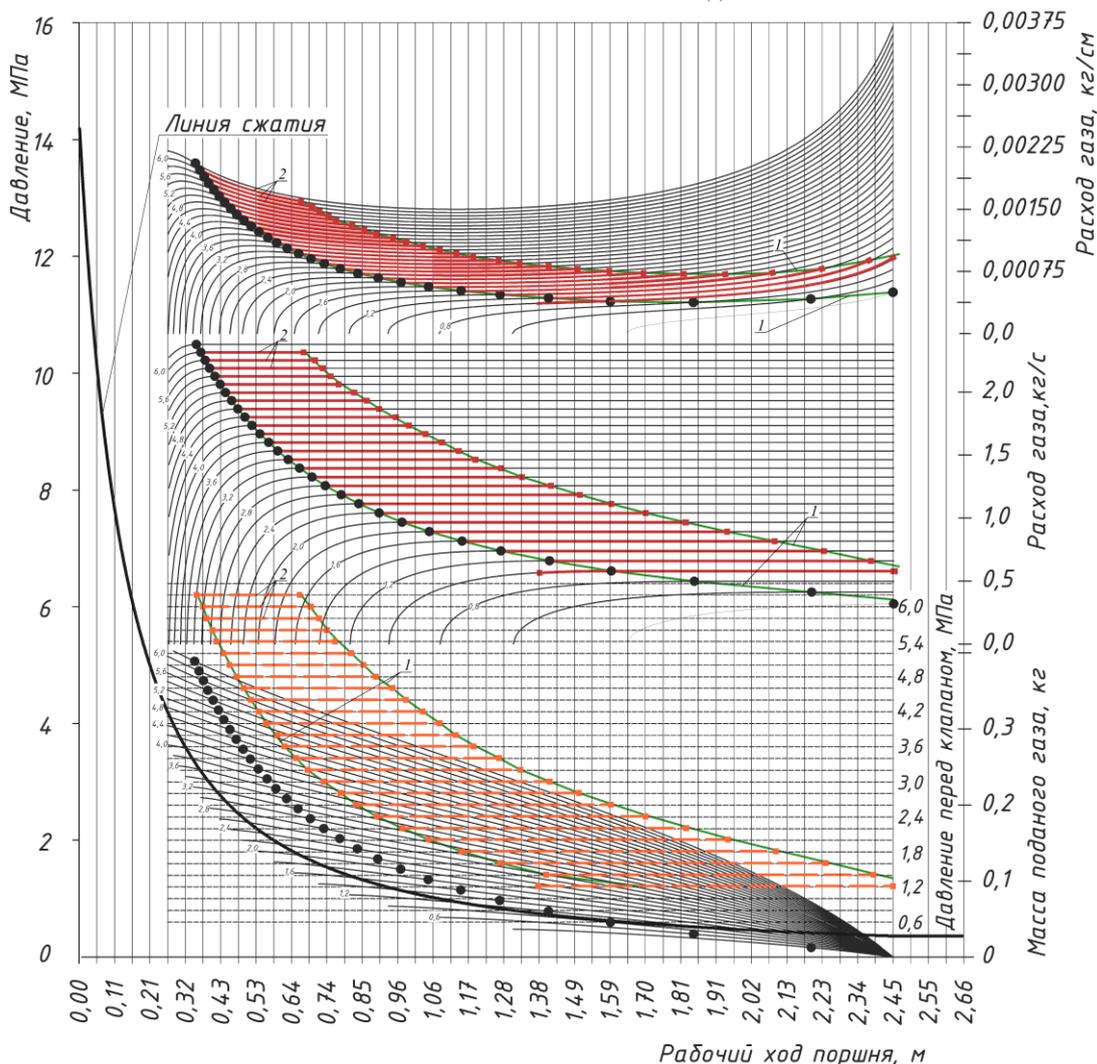


Рис. 3. Совмещенная диаграмма подачи ГТ как функция хода поршня: ● – точка перехода характера истечения ГТ из закритической области в докритическую; ■ – границы участка подачи ГТ, лежащие в закритической области при условии закрытия газового клапана в момент смены режима истечения

Так как для подачи ГТ в цилиндр наиболее рациональным является промежуток, на котором в течение всего процесса наполнения величина расхода не меняется, закрытие газового клапана для различных давлений газа необходимо производить при углах, соответствующих точкам перехода истечения из закритической зоны в докритическую. При таком подходе величина цикловой подачи будет регулироваться моментом открытия газового клапана газоподводящего модуля. На рис. 3 оптимальная зона регулирования выделена линиями 1. Нижняя линия соответствует моменту закрытия газового клапана, а верхняя – моменту его откры-

тия, при котором обеспечивается максимальная цикловая подача ГТ. На расчетное поле режимов подачи ГТ наложены промежутки, обеспечивающие полную цикловую подачу в закритической области при условии максимального сокращения времени пребывания газо-воздушной смеси в цилиндре двигателя на такте сжатия (линии 2).

Еще одним существенным резервом повышения качества смесеобразования является оптимизация геометрических характеристик соплового канала, в частности, его сечения и формы. Для исследования влияния сечения соплового канала на процесс истечения ГТ была выполнена серия однофак-

торных численных экспериментов, в ходе которых варьируемым параметром было проходное сечение соплового канала с шагом 0,6 мм. В качестве начального сечения газового канала было принято

значение в 10,2 мм. Влияние сечения соплового канала на величину расхода ГТ для располагаемого участка наполнения рабочего цилиндра, характерного для прототипа, представлено на рис. 4.

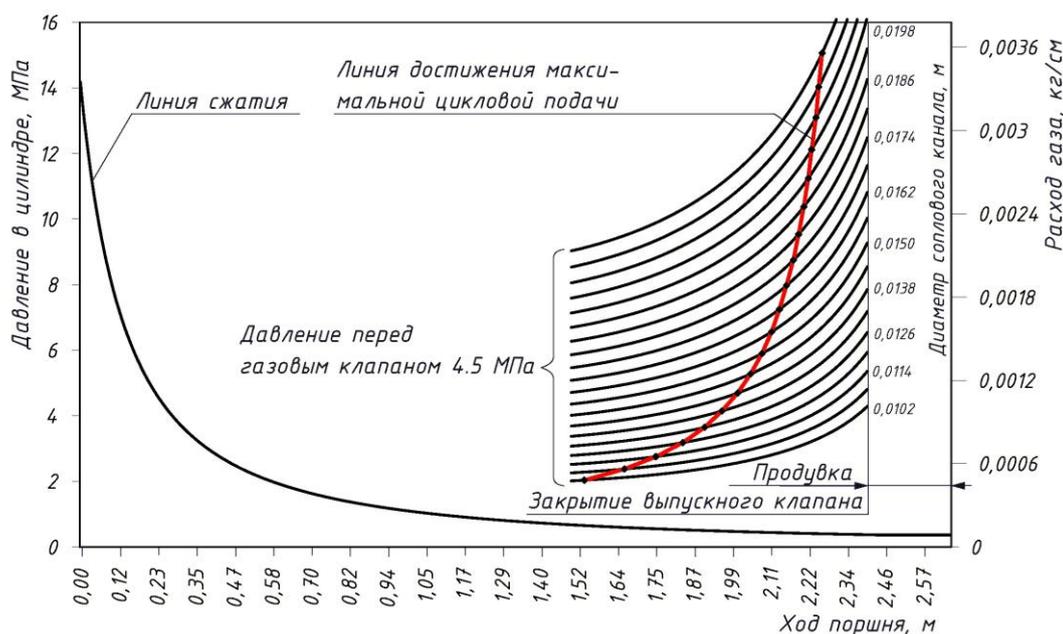


Рис. 4. Влияние сечения соплового канала на величину расхода ГТ для располагаемого участка наполнения рабочего цилиндра двигателя W-X62DF

Из приведенных зависимостей видно, что при диаметре соплового канала 10,2 мм для обеспечения максимальной цикловой подачи необходимо использовать практически весь располагаемый временной промежуток до момента перекрытия сопловых каналов поршнем. При увеличении диаметра сопловых каналов величина расхода возрастает, а время открытия, необходимое для подачи максимальной цикловой порции ГТ, сокращается. При этом изменение диаметра с 10,2 до 16,2 мм (с 87,7 до 206,1 мм²) приводит к сокращению участка полной цикловой подачи на 66%. При дальнейшем увеличении диаметра до 21,6 мм (366,4 мм²), необходимый для подачи ГТ промежуток изменяется не так интенсивно, сокращаясь всего на 14,4%. Таким образом, для рассматриваемого случая оптимальный диаметр соплового канала составляет около 16 мм, что соответствует реальному значению для двигателя W-X62DF. Увеличение диаметра соплового канала выше этого значения не приводит к улучшению условий поступления ГТ в рабочий цилиндр при регулировании по концу подачи.

Как и в случае с давлением перед газовым клапаном, имеет смысл рассмотреть влияние сечения соплового канала на процесс подачи ГТ в рабочий цилиндр на более широком участке процесса сжатия, чем это реализовано в двигателе прототипе.

Для исследования влияния сечения соплового канала на процесс истечения ГТ была выполнена серия однофакторных численных экспериментов, в ходе которых варьируемым параметром было проходное сечение соплового канала с шагом 0,5 см².

Расходные характеристики рассчитывались для участка процесса сжатия от 40 до 150° п.к.в.

Нижняя граница участка определялась моментом закрытия выпускного клапана, а верхняя, ограничивалась максимальным противодавлением в рабочем цилиндре на уровне примерно 30% от максимального давления сжатия. На рассматриваемом участке максимальное противодавление в цилиндре составляет 4,13 МПа, а поршень проходит 90% полного хода. Последнее обстоятельство крайне важно, так как сокращение времени сжатия газо-воздушной смеси снижает вероятность возникновения детонационного сгорания.

В качестве начального сечения газового канала было принято значение в 150 мм², что соответствует диаметру 13,82 мм. Влияние сечения соплового канала на величину расхода ГТ для рассматриваемого участка подачи газа в рабочий цилиндр представлено на рис. 5.

В результате моделирования была получена серия диаграмм, на которых расход ГТ представлен как функция хода поршня в зависимости от сечения соплового канала газоподающего модуля. Ве-

личина давления ГТ перед газовым клапаном принималась близкой к максимальному противодействию

нию на рассматриваемом участке – 4,5 МПа.

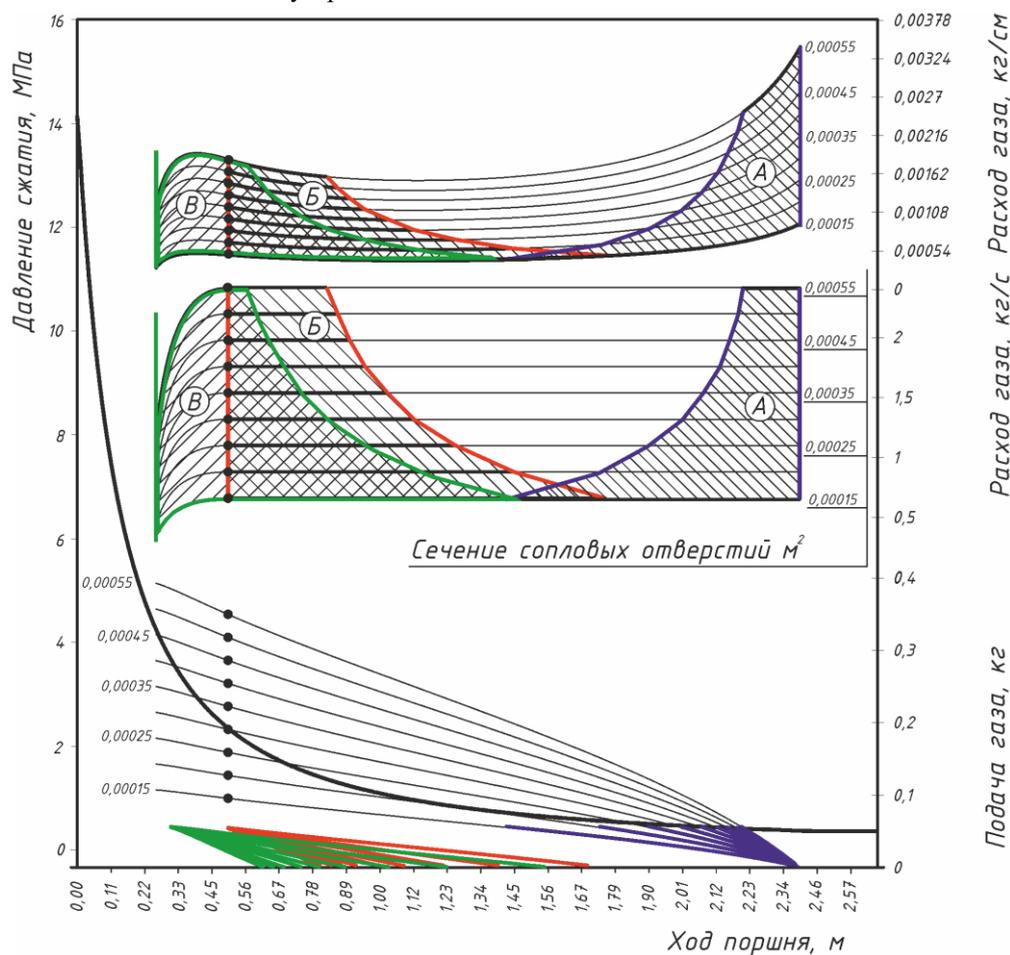


Рис. 5. Изменение расхода ГТ по длине хода поршня в зависимости от сечения соплового канала газового клапана при постоянном давлении газового топлива в 4,5 МПа и варианты возможного регулирования цикловой подачи. ● – точка перехода характера истечения ГТ из закритической области в докритическую

Линия достижения максимальной цикловой порции, представленная на рис. 4, по сути, ограничивает область регулирования по концу подачи. На рис. 5 эта область обозначена как «А». Если за начало подачи ГТ принять момент закрытия выпускного клапана, то увеличение сечения соплового канала ведет к сокращению участка подачи и увеличению времени сжатия газ-воздушной смеси.

С целью сокращения участка, на котором происходит сжатие газ-воздушной смеси, целесообразно выделить два частных случая, обозначенных на рис. 5 как области «Б» и «В». Область, обозначенная как «В», является частным случаем регулирования по началу подачи в зависимости от принятого сечения соплового канала, когда конец подачи совпадает с моментом равенства давления перед газовым клапаном и противодействия в рабочем цилиндре. Положительным моментом такого регулирования является максимальное сокращение

времени пребывания газ-воздушной смеси в рабочем цилиндре. Так, при сечении соплового канала 550 мм² (диаметр 26,5 мм) поступление ГТ в рабочий цилиндр начинается, когда поршень уже прошел 79% своего хода. Отрицательным моментом является то, что увеличение диаметра соплового канала ведет к смещению процесса истечения в докритическую зону, в результате чего скорость подачи ГТ в рабочий цилиндр падает, что отрицательно сказывается на гомогенизации заряда.

Область, обозначенная как «Б», является частным случаем смешанного регулирования, при котором за момент окончания подачи принята точка перехода истечения заряда в докритическую область. При таком регулировании на всем участке подачи скорость истечения остается постоянной, равной 397 м/с, что способствует хорошему перемешиванию ГТ с содержимым рабочего цилиндра. Увеличение диаметра соплового отверстия не влияет на момент закрытия газового клапана (150°

п.к.в. после НМТ), однако ведет к сокращению участка подачи. В интервале до 22,6 мм (сечение 400 мм²) это сокращение существенно зависит от сечения соплового канала, а при диаметрах свыше становится не таким значительным. Так, при диаметре 22,6 мм, чтобы обеспечить максимальную цикловую подачу, газовый клапан должен быть открыт, когда поршень пройдет 64% своего хода (1,71 м или 129° п.к.в. после НМТ), а при диаметре 26,5 мм (сечение 550 мм²) 68,8% хода (1,83 м или 134,5° п.к.в. после НМТ). При этом время открытия газового клапана для обеспечения максимальной цикловой подачи составит для диаметров 22,6 и 26,5 мм – 0,033 и 0,024 с, соответственно, а время пребывания газо-воздушной смеси в рабочем цилиндре сократится до 28,3 и 25,3% от полного времени, отводимого на процесс сжатия. Учитывая, что у базового двигателя W-X62DF время пребывания газо-воздушной смеси в рабочем цилиндре составляет 78% времени, отводимого на сжатие, комплекс предложенных мер позволяет сократить этот промежуток в 2,75...3,1 раза.

Выводы

По результатам исследований можно сделать вывод, что выбор оптимального диаметра соплового канала (для рассмотренного случая 22,5...26,5 мм) и изменение давления газа перед газоподающим модулем (для рассмотренного случая 1,6...4,5 МПа) совместно с изменением углов открытия (129...134,5° п.к.в. после НМТ) и закрытия газовых клапанов (150° п.к.в. после НМТ) может быть использовано для расширения диапазона регулирования газодизельных малооборотных двигателей.

При работе на нагрузках, близких к максимальной мощности, целесообразно повышать давление перед газоподающим модулем с одновременным переносом участка наполнения ближе к ВМТ.

При снижении нагрузки на двигатель, давление ГТ может быть снижено, а участок наполнения перенесен ближе к началу сжатия. Таким образом, на режимах малого и среднего хода, за счет снижения давления ГТ, затраты на его компрессирование могут быть уменьшены, а при переходе на режимы полного хода, смещение процесса смесеобразования к ВМТ позволит исключить возникновение детонационного сгорания. Исходя из приведенных соображений, для данного класса двигателей может быть разработан многофакторный алгоритм управления, при котором варьирование геометрий сопловых каналов, давлением ГТ и промежуточными открытиями клапанов газоподающих модулей, параметры рабочего процесса двигателя поддержива-

ются на уровне, находящемся за пределами зоны детонации во всем диапазоне нагрузочно-скоростных режимов эксплуатации.

Список литературы:

1. Rodrigue J.P. *The Geography of Transport Systems. Fifth edition.* / Rodrigue J.P. // New York: Routledge, 2020. – 456 p.
2. *Future ship powering options. Exploring alternative methods of ship propulsion.* Royal Academy of Engineering. Registered Charity Number: 293074. London., July 2013. – 51 p.
3. *Обзор Морского Транспорта. 2018 год.* Geneva, Switzerland, 2018. – 127 p.
4. Rolsted H. *MAN B&W 2-stroke Marine Engine Leading today's Environmental challenges.* / Rolsted H. // Korea: MAN Diesel & Turbo SE.– 2010. – 86 p.
5. Wettstein R. *The Wärtsilä low-speed, low-pressure dual-fuel engine.* / Wettstein R. // AJOUR Conference, Odense, 27/28 Nov, 2014. – 31 p.
6. Белоусов Е.В. *Организация внутреннего смесеобразования в судовых малооборотных газодизельных двигателях.* / Белоусов Е.В., Савчук В.П., Грицук И.В., Белоусова Т.П. // *Двигатели внутреннего сгорания.* – 2017. – №2. – С. 13-16.
7. Белоусов Е.В. *Определение углов открытия и закрытия газовых клапанов при организации внутреннего смесеобразования в судовых малооборотных газодизельных двигателях.* / Белоусов Е.В., Грицук И.В., Вербовский В.С. // *Двигатели внутреннего сгорания.* – 2018. – № 2. – С 21-25.
8. Белоусов Е.В. *Исследование процессов топливоподачи в газодизельных малооборотных двухтактных двигателях низкого давления.* / Е.В. Белоусов, Р.А. Варбанец, В.П. Савчук, И.В. Грицук, В.С. Вербовский // *Двигатели внутреннего сгорания.* – 2019. – № 1. – С 27-33.

Bibliography (transliterated):

1. Rodrigue, J.P. (2020), "The Geography of Transport Systems. Fifth edition", New York: Routledge, 456 p.
2. "Future ship powering options. Exploring alternative methods of ship propulsion" Royal Academy of Engineering. Registered Charity Number: 293074. London., July 2013, 51 p.
3. "Overview of Maritime Transport. 2018 year" Geneva, Switzerland ["Обзор Морского Транспорта. 2018 год" Geneva, Switzerland] – 127 p.
4. Rolsted H. (2010), "MAN B&W 2-stroke Marine Engine Leading today's Environmental challenges" Korea, MAN Diesel & Turbo SE, 86 p.
5. Wettstein, R. (2014), "The Wärtsilä low-speed, low-pressure dual-fuel engine" AJOUR Conference, Odense, 27/28 Nov, 31 p.
6. Belousov, Ye.V., Savchuk, V.P., Gritsuk, I.V., Belousova, T.P. (2017) "Organization of internal mixture formation in ship low-speed gas-diesel engines", *Internal combustion engines* All-Ukrainian scientific and technical journal. ["Организация внутреннего смесеобразования в судовых малооборотных газодизельных двигателях" Dvigateli vnutrennego sgoraniya.], No 2, pp. 13-16, DOI: 10.20998/0419-8719.2017.1.03.
7. Belousov, Ye.V., Gritsuk, I.V., Verbovskiy, V.S. (2018), "Determination of the opening and closing angles of gas valves in the organization of internal mixture formation in marine low-speed gas-diesel engines" *Internal combustion engines. All-Ukrainian scientific and technical journal.* ["Определение углов открытия и закрытия газовых клапанов при организации внутреннего смесеобразования в судовых малооборотных газодизельных двигателях" Dvigateli vnutrennego sgoraniya.], No 2, pp. 21-25, DOI: 10.20998/0419-8719.2018.2.04.
8. Belousov, Ye.V., Varbanets, R.A., Savchuk, V.P., Gritsuk, I.V., Verbovskiy, V.S. (2019) "Study of fuel supply processes in gas-diesel low-speed two-stroke low-pressure engines" *Internal combustion engines. All-Ukrainian scientific and technical journal.* ["Исследование процессов топливоподачи в газодизельных малооборотных двухтактных двигателях низкого давления" Dvigateli vnutrennego sgoraniya.], No 1, pp. 27-33, DOI: 10.20998/0419-8719.2019.1.05.

Марченко Андрей Петрович – доктор техн. наук, профессор, проректор по научной работе, Национальный технический университет «ХПИ», Украина, andreymarchenko51@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9746-4634>.

Белоусов Евгений Викторович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации судовых энергетических установок, Херсонская государственная морская академия, Украина, ewbelousov67@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8185-8209>.

Савчук Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой эксплуатации судовых энергетических установок, Херсонская государственная морская академия, Украина, postsavchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5266-850X>.

Вербовський Валерий Степанович – научный сотрудник отдела переработки и транспортировки газа, Институт газа НАН Украины, Verbovsky@nas.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4684-6768>.

STUDY OF THE INFLUENCE OF FEED PRESSURE AND NOZZLE CHANNELS CROSS-SECTIONS ON FUEL SUPPLY PROCESSES IN GAS-DIESEL LOW-SPEED TWO-STROKE LOW-PRESSURE ENGINES

A.P. Marchenko, E.V. Belousov, V.P. Savchuk, V.S. Verbovskiy

Currently, the leading manufacturers of marine low-speed engines are intensively working to convert them to gas fuel. This is mainly dictated by increased requirements to reduce greenhouse gas emissions into the atmosphere. Due to the design features in this class of engines, only internal mixing is possible, to the organization of which there are several fundamentally different approaches, of which only two are currently implemented. MAN developed and established the production of engines with gas fuel supply to the space of the working cylinder under high pressure at the end of the compression stroke, and WinGD under low pressure at the beginning of the compression stroke. Both approaches have advantages as well as significant disadvantages. Previous studies of the authors have shown that the supply of gas fuel at a compression stroke under pressures of 4,5...6 MPa can reduce the residence time of the gas-air mixture in the working cylinder, and reduce the likelihood of detonation combustion. A significant impact on the flow characteristics of the gas supply modules and on the nature of the outflow from them is exerted by the fact that the process of mixture formation on the compression stroke proceeds under conditions of varying backpressure. Since the dispensing of the cyclic portion in such engines is regulated by the opening time of the gas supply modules, an understanding of the basic laws of the flow of gas fuel from them is the basis for choosing the correct time for their opening and closing. The authors have developed a mathematical model that allows determining the nature of the outflow and consumption of gas fuel through the gas supply modules under conditions of varying back pressure in the working cylinder. In this paper, the influence of gas fuel pressure in front of gas supply modules and the cross sections of their nozzle channels on the nature of the gas fuel outflow from them was investigated. Based on the calculation results, the optimal pressures and cross sections of the nozzle channels and their relationship with the opening and closing angles of the gas valves were determined based on the condition of constant flow throughout the entire supply section and the maximum displacement of the supply section towards the end of the compression process.

Key words: marine low-speed dual-fuel engines; gas fuel.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТИСКУ ПОДАЧІ І ПЕРЕТИНУ СОПЛОВИХ КАНАЛІВ НА ПРОЦЕСИ ПОДАЧІ ПАЛИВА У ГАЗОДИЗЕЛЬНИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДВОТАКТНИХ ДВИГУНАХ НИЗЬКОГО ТИСКУ

A.P. Marchenko, E.V. Belousov, V.P. Savchuk, V.S. Verbovskiy

В даний час провідними виробниками судових малообертових двигунів ведуться інтенсивні роботи по їх переведенню на газові палива. В основному це продиктовано зростанням вимог до зниження викидів парникових газів в атмосферу. В силу конструктивних особливостей в цьому класі двигунів можливо тільки внутрішнє сумішоутворення, до організації якого існує кілька принципово різних підходів, з яких в даний час реалізовано тільки два. Фірма MAN розробила і налагодила виробництво двигунів з подачею газового палива в простір робочого циліндра під високим тиском в кінці такту стиснення, а фірма WinGD – під низьким тиском на початку такту стиснення. Обом підходам властиві як переваги, так і суттєві недоліки. Попередні дослідження авторів показали, що подача газового палива на такті стиснення під тиском 4,5...6 МПа дозволяє скоротити час перебування газоповітряної суміші в робочому циліндрі і зменшити вірогідність виникнення детонаційного згоряння. Істотний вплив на витратні характеристики газопостачальних модулів і на характер витікання з них надає та обставина, що процес сумішоутворення на такті стиснення протікає в умовах змінного протитиску. Оскільки дозування циклової порції в таких двигунах регулюється часом відкриття газопостачальних модулів, розуміння основних закономірностей витікання газового палива з них є основою для вибору правильного часу їх відкриття і закриття. Авторами розроблена математична модель, що дозволяє визначити характер витікання і витрату газового палива через газопостачальні модулі двигуна в умовах змінного протитиску в робочому циліндрі. У даній роботі було досліджено вплив тиску газового палива перед газопостачальними модулями і перетину їх соплових каналів на характер витоку газового палива з них. За результатами розрахунків визначено оптимальні тиски і перетини соплових каналів і їх зв'язок з кутами відкриття і закриття газових клапанів, виходячи з умови сталості витрати на всій ділянці подачі і максимального зсуву ділянки подачі до кінця процесу стиснення.

Ключові слова: суднові малообертові двопаливні двигуни; газове паливо.