

## ДВИГАТЕЛИ, РАБОТАЮЩИЕ НА МЕТАНОЛЕ (по материалам конгресса CIMAC)

В последние годы во всем мире наблюдается значительное усиление как регламентации, так и ожиданий, касающихся снижения вредных выбросов от судовых двигателей. В настоящее время в некоторых регионах введены нормативы, ограничивающие предельное допустимое содержание серы в морских топливах, и предполагается, что количество вредных выбросов при этом будет неуклонно снижаться. Это вызвало необходимость поиска альтернативных топлив с очень низким (<0,1 %) или нулевым содержанием серы. В настоящее время в качестве морского топлива используется преимущественно мазут, содержание серы в котором достигает 4 %, что вызывает необходимость установки системы очистки ОГ, во избежание выбросов окислов серы в атмосферу. Учитывая этот факт, и откликаясь на запрос компании «Stena Line», фирма «Wartsila» приступила к работе над проектом, в ходе которого предстояло выбрать бессернистое топливо, для использования на судах «Stena». Выбор в конечном итоге был сделан в пользу метанола. Способность метанола заменить топлива на минеральной основе известна давно. Поэтому именно метанол был предложен в качестве реальной альтернативы стандартным морским топливам. Метанол способствует снижению выбросов не только серы, но также окислов азота и твердых частиц. Его способность к биодegradации уменьшает риски загрязнения окружающей среды из-за аварийных разливов топлива. Кроме

того, стала очевидной необходимость снижения выбросов двуокиси углерода в атмосферу. Метанол может сыграть важную роль в решении этой задачи, если будет производиться из биомассы или древесной массы. Физические и химические свойства метанола делают его весьма перспективным топливом для двигателей с искровым зажиганием. Он идеально приспособлен для зажигания смеси, имея октановое число 106, а его способность гореть без образования сажи (благодаря отсутствию межуглеродных связей) делает метанол вполне подходящим топливом также и для дизелей. При этом, однако, возникают определенные сложности с системой топливоподачи, связанные со свойствами метанола. Кроме того, меньшая теплотворная способность метанола (19,8 МДж/кг) требует изменений в некоторых элементах системы топливоподачи. Стоимость метанола должна быть ниже, чем морского газойля, что делает его вполне конкурентоспособным альтернативным топливом. В настоящем докладе описаны принципы построения (запатентованной) системы топливоподачи, основные трудности, которые пришлось преодолеть в ходе ее создания, а также результаты ее эксплуатационных испытаний на пароме «Stena Germanica» — первом судне, оборудованном инновационной системой, работающей на метаноле.

*Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником*

### ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕРВОГО В МИРЕ МЕТАНОЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ, УСТАНОВЛЕННОГО НА ПАРОМЕ

*Toni Stojcevski, Dave Jay, Luca Vicenzi,  
Wartsila Corporation*

#### Введение

Двигатели крупнотоннажных судов традиционно работают на мазуте (НФО) — самом дешевом топливе, обеспечивающим высокую общую энергоэффективность. Однако высокое содержание в нем серы является причиной выбросов большого количества окислов серы (SO<sub>x</sub>), окислов азота (NO<sub>x</sub>) и твердых частиц, что неблагоприятно сказывается на состоянии окружающей среды.

В зонах регулируемых выбросов (ЕСА), установленных решениями ИМО для Северной Европы, Северной Америки и Карибского побережья США, предельное допустимое содержание серы в топливе составляет 0,10 % (массы). По этой причине работа на традиционных топливах по традиционным технологиям в зонах ЕСА неприемлема. Необходимо либо переход на другое топливо, либо установка системы очистки отработавших газов.

Все более пристальное внимание, уделяемое вопросам снижения вредных выбросов от судов и ужесточения требований к содержанию серы в топливе, привело к необходимости искать альтернативные морские топлива. Одна из таких альтернатив — метанол, который, как выяснилось, прекрасно подходит в качестве топлива для среднеоборотных судовых двигателей внутреннего сгорания (ИСЕ).

В настоящем докладе рассмотрены различные концепции сгорания метанола, и найдено техническое решение для соответствующего переоборудования парома «Stena Germanica». Рассмотрены также результаты эксплуатационных испытаний первого в мире среднеоборотного ДВС на метаноле. Названы преимущества, которые данное техническое решение даст заказчику и обществу в целом.

После принятия в 2008 г. ИМО решения об установлении предельно допустимого содержания серы в бункерном топливе на уровне 0,1 % для судов, работающих в зонах регулируемых выбросов серы (ЕСА), фирма «Wartsila» была приглашена в качестве участника проекта EFFSHIP [1], как разработчик направления, посвященного использованию существующих и перспективных морских топлив.

В ходе выполнения проекта EFFSHIP метанол был определен как наиболее эффективное альтернативное топливо, позволяющее выполнить требования действующих норм с большим запасом. Поскольку эти нормы распространяются на все находящиеся в эксплуатации суда, были рассмотрены варианты их модернизации, при этом перевод на метанол оказался наиболее перспективным решением. Также стартовал параллельный проект SPIRETH [2] по исследованию применения диметилового эфира (DME) и метанола в качестве морских топлив в полномасштабном пилотном проекте. Фирма «Wartsila» отвечала за создание демонстрационной установки, включающей

опытный двигатель, адаптированный для работы на метаноле, а компания «Stena Rederi AB» установила на судно «Stena Scanrail» двигатели, адаптированные для работы на DME.

Оба проекта — EFFSHIP и SPIRETH — были посвящены оценке технологий горения различных топлив для выявления оптимальной концепции, которая могла бы лечь в основу модернизации существующего флота с наибольшей эффективностью и минимальным сроком окупаемости. Ключевым элементом такой технологии стала комбинированная форсунка с дополнительным насосом для метанола и с необходимой обвязкой. Для управления впрыском и уплотнения используется моторное масло. Эта система также включает в себя два насоса, фильтры и трубную обвязку.

В ноябре 2013 г. «Stena AB» совместно с «Wartsila Oy» получили от EU TEN-T грант на проект под названием «пилотный метанол», который стал частью инициативы «Motorway of the Seas» («Морская автострада»). Фирма «Stena AB» отвечала за адаптацию четырех двигателей существующего парома Ro-Pax, «Stena Germanica», к работе на метаноле. «Wartsila Oy» отвечала за разработку комплекта для адаптации двигателей Sulzer ZA40S к работе на метаноле. Метанол позволяет не только выполнить требования нормативов по выбросам серы, но и реализовать концепцию возобновляемого топлива с низкими уровнями выбросов окислов азота и частиц.

#### Содержание работы

##### Метанол

В мире ежегодно производится более 70 миллионов тонн метанола, который широко доступен. Основное сырье для его выработки — природный газ, поэтому его можно отнести к полностью возобновляемым топливам, что открывает возможности перевода всего мирового флота в ближайшем будущем на это топливо. В долгосрочной перспективе топлива будут полностью производиться из возобновляемого сырья, и при этом с точки зрения энергоэффективности это будут метан и метанол. Оба топлива могут производиться из разнообразных и общедоступных видов сырья. В отличие от метана, который для его использования в качестве морского топлива требует сжижения и хранения при температуре отрицательной температуре (–160 °С), метанол остается в жидком состоянии при любой температуре окружающего воздуха.

С точки зрения экологической безопасности, а именно с учетом рисков утечек и разливов, метанол — идеальное топливо. Он полностью растворим в воде и подвержен быстрой биодegradации, поскольку может окисляться микроорганизмами. Свойства метанола хорошо изучены, поскольку

он уже более ста лет транспортируется по всему миру и используется для самых разнообразных целей, а его способность оставаться в жидком состоянии при атмосферном давлении делает его идеальным топливом с точки зрения использования существующих хранилищ и инфраструктуры.

##### Свойства метанола

Главный недостаток топлив на спиртовой основе, к которым относится метанол, — это более низкое, по сравнению с традиционными топливами, энергосодержание. При одинаковой удельной энергии для хранения метанола требуются примерно вдвое большие емкости. По сравнению с LNG метанол обладает примерно той же плотностью энергии и несколько меньшим объемом (благодаря своему жидкому состоянию).

С точки зрения рабочего процесса низкое значение цетанового числа предполагает необходимость ускоряющей сгорания присадки, однако высокие значения октанового числа (до 109) и скорости распространения фронта пламени (52 см/с) свидетельствуют о вполне удовлетворительной динамике горения. Стехиометрический коэффициент избытка воздуха (6,45), по сравнению с дизельным топливом (14,7), говорят о

Таблица 1

#### Свойства топлива

	Метанол	LNG	Дизель
Молекулярная формула	CH <sub>3</sub> OH	>90 % CH <sub>4</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>1,8n</sub> C <sub>8</sub> –C <sub>20</sub>
Содержание углерода, (% массы)	37,49	~75	~87
Плотность, кг/л	0,79	0,44 (LNG)	0,85
Растворимость в воде	Полная	Нет	Нет
Точка кипения, °С	65	–162	150–370
Температура вспышки, °С	11	–188	min 60
Самовоспламенение, °С	464	540	240
Вязкость при 20 °С, сСт	~0,6	—	~13,5
Октановое число, RON/MON	109/89	120/120	—
Цетановое число	5	—	45–55
LHV, МДж/кг	20	45	42
Пределы воспламеняемости, % об.	7–36	5–15	1–6
Скорости распространения пламени, см/с	52	37	37
Теплота испарения, кДж/кг	1178	n.a.	233
Коэффициент избытка воздуха (стехиометрический)	6,45	17,2	14,7
Адиабатическая температура пламени, °С	1910	1950	2100
Объемный модуль упругости, МПа	777	848	1350
Содержание серы, %	0	0	3,5

том, что в данном случае требуется меньше воздуха, но, поскольку низшая теплотворная способность метанола (LHV) вдвое меньше, чем у дизеля, расход воздуха в двигателе будет тем же самым.

**Концепции сгорания метанола**

Двигатели внутреннего сгорания — наиболее распространенные двигатели, приводящие в движение суда, и останутся таковыми в обозримом будущем. Они работают на дизельном топливе с цетановым числом более 40, тогда как цетановое число метанола равно всего лишь 5. Это означает необходимость использования средств интенсификации сгорания. Перед началом работы над проектом рассматривались следующие возможные концепции организации сгорания:

- а) поверхностное горение: горячая поверхность ускоряет начало горения;
- б) фумигация: подача метанола во впускной порт цилиндра дизеля на такте всасывания ;
- в) концепция использования смеси топлив: на впуск подается предварительно приготовленная смесь дизельного топлива и метанола;
- г) использование ускорителей воспламенения;
- д) зажигание метанола с помощью пилотного дизельного топлива;
- е) сжигание готовой смеси — цикл Отто.

Кратко перечислены некоторые из причин, по которым часть возможных вариантов на втором году выполнения программы была отвергнута:

- > поверхностное горение: недостаточность подобного опыта и возможные проблемы с равномерной работой цилиндров;
- > фумигация: увлажнение стенок может привести к коррозии и деградации масла;
- > концепция использования смеси топлив: метанол полностью растворим в бензине, но не в дизеле, поэтому потребуется эмульгирование. Образовавшаяся эмульсия имеет меньшее цетановое число, поэтому для обеспечения качественного сгорания понадобится добавка еще 30–40 % метанола;
- > использование ускорителей воспламенения: такие ускорители используются на двигателе «visco» фирмы «Scania», но степень сжатия при этом составляет 27:1. При использовании такой степени сжатия на судовом двигателе, учитывая специфику применения, может потребоваться его дефорсирование (из-за повышения давления в цилиндре);
- > сжигание готовой смеси: цикл Отто несет в себе риск детонации и деградации масла.

В итоге команда разработчиков «Wartsila» остановилась на варианте работы с воспламенением метанола пилотным топливом. Основное преимущество подобного решения — оно полностью реализует двухтопливную концепцию, с возмож-

ностью переключиться в любой момент с одного вида топлива на другой. Тем самым обеспечивается резервирование топливоподачи, что является одним из требований судовладельцев. Кроме того, данная концепция может быть использована при адаптации существующих двигателей к применению метанола без каких-либо изменений их основных компонентов, таких как поршни, шатуны и втулки цилиндров.

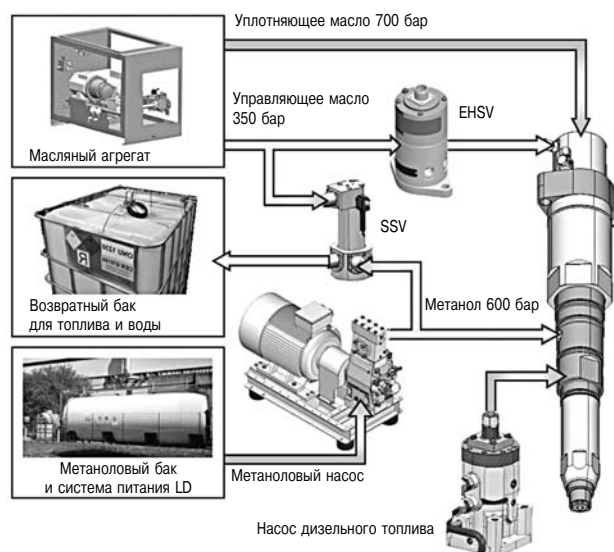
Данный подход был впервые использован фирмой «Wartsila» в 1994 г. при создании газодизелей (GD), прекрасно зарекомендовавших себя в эксплуатации.

Исходя из этого по инициативе заказчика («Stena»), владеющего 11 судами с двигателями типа ZA40S, для настоящего проекта была разработана система метанол–дизель (MD) для лабораторного двигателя ZA40S. Всего в зонах SECA работают 36 судов, оборудованных двигателями типа ZA40S.

**Общая компоновка системы**

Система подачи метанола состоит из клапанов впрыска, насоса высокого давления, масляных систем управления и уплотнения, предохранительно-пускового клапана (SSV — Start-up and Safety Valve) и распределительных трубок масла и метанола. Впрыск топлива осуществляется с помощью обычного плунжерного ТНВД.

Метаноловый ТНВД, как и комбинированный блок, состоящий из агрегатов подачи масла для управления и уплотнения, является внешним устройством по отношению к двигателю. Метаноловый ТНВД устанавливается в отдельном помещении. Масляные агрегаты могут быть установлены в машинном отделении. Все трубки подвода масла и метанола имеют двойные стенки.



**Рис. 1. Архитектура метаноловой системы — лаборатория Trieste**

Система подачи метанола рассчитана на рабочее давление 600 бар. На входе системы давление составляет от 3 до 10 бар при температуре 0–25 °С. Давление уплотняющего масла следует за давлением в метаноловом коллекторе, и система его подачи рассчитана на рабочее давление до 700 бар. Давление уплотняющего масла всегда выше давления метанола.

Максимальное расчетное давление управляющего масла составляет 350 бар. Клапан управления (SSV) находится в конце коллектора управляющего масла. При работе в нормальном режиме давление управляющего масла держит SSV закрытым, и может быть сброшено при открытии клапана. Кроме того, SSV имеет в своем составе механический аварийный клапан, который срабатывает в случае превышения давления в коллекторе. Линия возврата в расходный бак также выполнена с двойными стенками.

### Системы впрыска

При проектировании новых компонентов большое значение имеет конфигурация объекта модернизации (в данном случае это головки цилиндров двигателя ZA40S). В идеальном случае новая форсунка должна вписываться в гнездо существующей с минимальными (если они потребуются) изменениями последнего, но при этом ее функциональная насыщенность будет значительно выше. По сути система впрыска метанола должна быть совмещена с системой впрыска пилотного дизельного топлива, т. е. в новой форсунке должны помещаться распылители обоих видов топлива вместе с механизмами и гидравлическими элементами, необходимыми для согласованной работы обеих систем.

#### ➤ Общее устройство

Распылитель форсунки имеет три отверстия для впрыска метанола, равномерно расположенные на периферии вокруг центрального отверстия для впрыска пилотного топлива.

Запорная игла пилотного топлива подпружинена и открывается давлением дизельного топлива, как в любой обычной системе впрыска.

Три запорные иглы метанола объединены треугольной пластиной. Они открываются давлением управляющего масла, которое поступает из внешнего электрогидравлического сервоклапана (EHSV — electro hydraulic servo valve). Как во всех системах с общим коллектором (common rail) топливо под давлением (в данном случае метанол) поступает в кольцевые каналы вокруг этих игл, подъем которых инициирует впрыск топлива в цилиндр.

Форсунка имеет встроенный топливный аккумулятор, что не только заметно повышает стабильность впрыска, но и упрощает конструкцию системы. Метанол из аккумулятора поступает

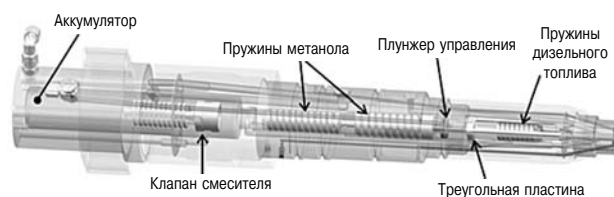


Рис. 2. Схема форсунки

в кольцевые каналы через предохранительный клапан. Если количество метанола в одном из циклов впрыска превысит заданный уровень, этот клапан моментально закроется.

Существует, однако, еще один рубеж безопасности, где происходит защита от утечек метанола. Эта защита реализуется в виде дополнительного контура, который создает в масляных камерах, окружающих каждую из точек возможных утечек метанола, давление масла более высокое, чем в топливной магистрали. Тем самым обеспечивается уплотнение за счет создания положительного перепада давлений.

#### ➤ Корпус форсунки

Один только корпус форсунки представляет собой впечатляющее достижение инженерной мысли. Он имеет три кольцевые выточки для метанола, одну центральную выточку для дизельного топлива, четыре запорные иглы со своими седлами и направляющими, и распылитель с разными сопловыми отверстиями, являющийся наиболее сложной деталью с точки зрения технологии изготовления. Кроме того, имеется контур уплотняющего масла, имеющий ответвления в корпусе ко всем иглам подачи метанола, и система охлаждающего масла, которое охлаждает седла клапанов — самые горячие точки системы.

#### ➤ Метаноловый аккумулятор

Условие стабильности впрыска — достаточно большой объем кольцевых выточек, в идеальном случае равный объему циклового впрыска. Если это невозможно, приходится искать компромисс между объемами аккумулятора и кольцевых выточек. В процессе разработки на гидродинамической модели проверялось влияние этих объемов на качество впрыска. Для каждой кривой впрыска оценивался объем впрыска, который сравнивался с минимально необходимым. Это позволило рассчитать минимально необходимый объем аккумулятора.

Чтобы полностью исключить вероятность утечек, или — что еще хуже — структурных разрушений (что является жизненно важным, учитывая характер жидкости, о которой идет речь) — было выполнено моделирование с помощью МКЭ. Испытания на повышенное давление обычно ведутся при давлении, не менее чем в 1,5 раза превосходящем номинальное рабочее давление.

### Насосная система

На каждом двигателе устанавливается один топливный насос высокого давления (ТНВД) для подачи метанола в коллектор. Типичный ресурс непрерывной работы трущихся деталей составляет порядка 12 000 моточасов. Однако в данном случае это первый пример использования такого насоса на дизельном двигателе, хотя подобные метаноловые насосы применяются в нефтехимической промышленности, например, на нефтяных платформах. Конструкция ТНВД имеет большой запас надежности и прочности, и включает все необходимые вспомогательные компоненты. В их число входят: замкнутая система смазки с маслоохладителем, несколько датчиков давления и температуры в комплекте с пультом управления, а также так называемая система нулевых выбросов (Zero Emission system), являющаяся важным элементом безопасности. Все материалы насоса специально подобраны для обеспечения максимально надежной и долговечной работы с метанолом.

Насос приводится от электродвигателя переменной частоты вращения, которая задается регулятором частоты и зависит от сигнала датчика давления. Насос позволяет поддерживать номинальное давление в топливном коллекторе во всем диапазоне нагрузок, поскольку его привод не имеет механической связи с двигателем.

Система управления получает сигналы от всех датчиков насосного агрегата, включая датчики давления и температуры на входе, а также от датчиков аварийно-предупредительной сигнализации и защиты. Предупредительный сигнал нужен, чтобы обратить внимание оператора на отклонение величины от нормы. Аварийный сигнал переводит двигатель в дизельный режим и отключает метаноловый насос во избежание его поломки. Основные компоненты насоса высокого давления показаны на рис. 3. В их число входят: секция коленвала, промежуточная камера, камера всасывания, узел поршневого уплотнения головка насоса и система нулевых выбросов. В секции кривошипа находится редуктор, позволяющий менять передаточное отношение в широком диапазоне. В редукторе используются шевронные передачи, а в конструкции коленвала — особо прочные подшипники. КПД редуктора составляет более 95 %, а переключение передач происходит плавно и бесшумно.

Промежуточная камера предотвращает попадание метанола в секцию коленвала. Она вместе с системой нулевых выбросов предусматривает сильфонные уплотнения вокруг шатунов. Попадание сказочного масла в промежуточную камеру предотвращается также сильфонными уплотнениями.

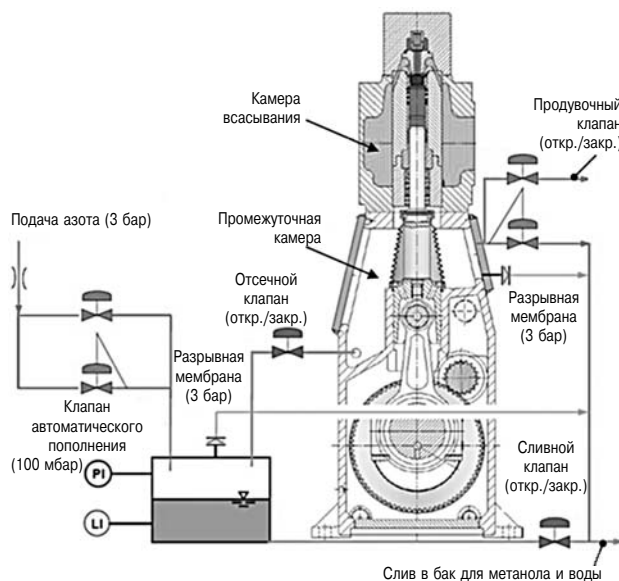


Рис. 3. Общий вид системы нулевых выбросов ТНВД

Камера всасывания, куда подается метанол, имеет достаточно большие полости вокруг плунжеров и узлов поршневых уплотнений. Эти полости могут быть использованы также для охлаждения насоса за счет подачи метанола при определенной температуре. Такое решение связано с требованием классификационных обществ, согласно которым температура подаваемого метанола всегда должна быть ниже 65 °С.

В головке насоса расположены впускной и выпускной клапаны, открываемые низким давлением, что облегчает заполнение метанолом ТНВД и насоса подкачки перед пуском.

### Системы безопасности

При работе на метаноле задействовано большое количество датчиков и систем безопасности. Все трубки с метанолом и маслом под высоким давлением имеют двойные стенки. При разрыве внутренней стенки или при возникновении утечки срабатывает система сигнализации и защиты. В случае возникновения какой-либо проблемы в метаноловой или масляной системе двигатель просто переключается в дизельный режим без снижения мощности или скорости.

В SSV имеется два датчика давления в коллекторе и датчик для определения факта утечки метанола из трубок с двойными стенками в машинное отделение.

Перед началом любого техобслуживания системы необходима ее продувка азотом. Есть две отдельные системы подачи азота: одна — для продувки азотом внутренней трубки с метанолом, другая — для защиты с двойными стенками. Линия возврата из метаноловой системы ведет в резервуар с водой. Чтобы смесь метанола с водой не считалась токсичной, концентрация метанола



Рис. 4. Схема судовой силовой установки

в ней не должна превышать 1:4, однако и при такой концентрации она классифицируется как огнеопасная.

Машинное и насосное отделения оборудуются индикаторами для обнаружения утечки метанола (двигатель выключается при достижении концентрации метанола в воздухе 150 ppm).

Для предотвращения испарения метанола в топливном баке его поверхность защищена азотной газовой подушкой под давлением 0,15 бар.

#### Система нулевых выбросов ТНВД

По мере износа деталей насоса в процессе работы утечка метанола в промежуточную камеру возрастает. Эта камера соединена с баком организованных протечек, который установлен на раме насоса и снабжен индикатором уровня и датчиком давления. Азот подается в промежуточную камеру через этот бак с помощью нескольких электропневматических клапанов, включающихся в определенной последовательности. Система нулевых выбросов может находиться в одном из трех режимов: продувка, нормальная работа и опорожнение бака организованных протечек. Скорость роста протечек можно оценивать по количеству требуемых процедур опорожнения бака.

#### Устройство системы безопасности парама «Stena Germanica»

Компоненты данной системы расположены в различных отсеках судна. Маслосодержащие агрегаты расположены в машинном отделении, а метаноловый насос — в отдельном вентилируемом насосном помещении. Любая утечка метанола возвращается в метаноловый бак или в наполненный водой бак организованных протечек, откуда вода впоследствии сливается.

#### Классификация

При реализации любого инновационного технического решения самым ответственным этапом является разработка и внедрение мер безопасности при работе и обслуживании энергосистем. Существует ряд нормативных документов, регламентирующих мероприятия по обеспечению надежной работы, а также безопасности людей и оборудования.

На протяжении последних лет пересматривался Международный кодекс по конструкции и оборудованию судов, перевозящих сжиженные газы наливом (IGC Code — International Code for the

Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk), а Международной Морской Организацией (IMO) был принят Международный кодекс безопасности судов, использующих газы и другое топливо с низкой температурой воспламенения (IGF Code — International Code of Safety for Ships using Gases or other Low flashpoint Fuels). Первая редакция кодекса IGF не содержит указаний относительно метанола. Проект второй редакции охватывает спирты, включая метанол и этанол. Кодексы расширили возможности применения газового топлива, включая топлива с низкой температурой воспламенения для газозвозов и других судов, но последнее слово здесь принадлежит классификационным обществам, которые должны сформулировать четкие стандарты, требования и методы испытаний, способные обеспечить необходимый уровень безопасности и эксплуатационной надежности.

Паром «Stena Germanica» работает под флагом Швеции в классе «Lloyd's Register» (LR).

#### Результаты исследований

##### и одобрение классификационных обществ

Метанол является новым видом топлива для судов, поэтому он не подпадает ни под какие из существующих классификационных норм. В соответствии с «требованиями LR по Оборудованию и Техническим системам Нетрадиционной Конструкции» (Machinery and Engineering Systems of Unconventional Design) Часть 7, Раздел 15 (2013), существует ряд дополнительных превентивных мероприятий, необходимых для включения в классификацию, после чего можно получить одобрение государства флага. В порядке выполнения упомянутых оценок «Stena» и «Wartsila» совместно с LR выполнили три различных исследования источников опасности (HAZID — Hazard identification study), одно исследование источников опасности и удобства использования (HAZOP Hazard and operability study), и еще два исследования, касающиеся условий хранения метанола и систем пожаротушения [3–7].

Совместно с LR были проведены типовые испытания (TAT — type approval test) переоборудованного двигателя. Испытания на переход с дизельного топлива на метанол проводились для различных нагрузок двигателя. Выполняя требования регистра, была продемонстрирована реакция систем безопасности в «новых» ситуациях, например, при переключении с метанола на дизель. Для демонстрации работоспособности систем обнаружения протечек и продувки была использована метаноловая трубка с протечкой. Все испытания прошли успешно, и в декабре 2014 г. успех типовых испытаний (TAT) был подтвержден LR.

После первого опыта переоборудования двигателя на борту «Stena Germanica» испытания были повторены на реальном двигателе, после чего было выдано разрешение на эксплуатацию судна с двигателем, работающим на метаноле.

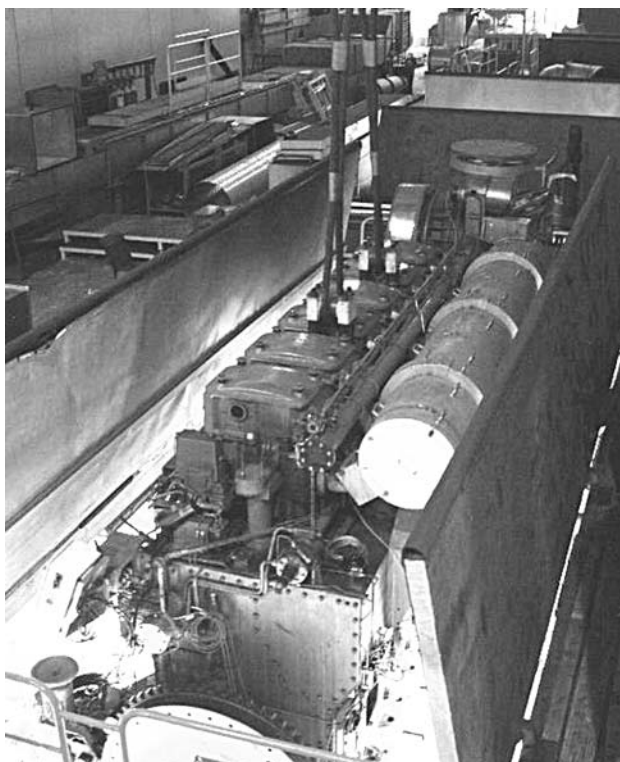
Приняв во внимание все оценки модернизации двигателя «Stena Germanica» и другие исследования по теме, Регистр Ллойда разработал новое руководство по применению топлив с низкой температурой воспламенения (LFPF — low-flashpoint fuels), которое разрешало пользователям и судостроителям проводить демонстрации, доказывающие, что их конструктивные решения отвечают соответствующим требованиям. Это руководство вступило в силу с 1 января 2016 г. в качестве одного из разделов правил Регистра Ллойда.

**Лабораторные испытания**

Экспериментальный двигатель 6LZA40S был установлен на испытательный стенд (рис. 5).

Чтобы перейти от традиционного впрыска дизельного топлива к впрыску метанола, была проделана огромная работа, включающая установку следующих вспомогательных агрегатов:

- метаноловый насос высокого давления;
- агрегаты подачи управляющего и уплотняющего масла;
- метаноловые трубки высокого давления;



**Рис. 5. Двигатель 6LZA40S на испытательном стенде № 4**

**Режимы нагрузки при испытаниях ТАТ.  
Топливо, используемое при испытаниях: LFO и метанол**

№	Время часы	Мощность		MEP		Скорость		Топливо	Прогр. исп. п. 4	Точка
		(%)	кВт	бар	(%)	об/мин				
a	1	Параметры						LFO		
b		Переключение на метанол						LFO/MeOH		
c	0,5	35	1583	12,50	70,6	360	MeOH	10.2.1	8	
d	0,5	50	2250	15,80	79,4	404,8	MeOH	10.2.1	7	
e	0,5	75	3375	20,70	90,9	463,4	MeOH	10.2.1	6	
f	2	100	4500	25,08	100	510	MeOH	10.2.1	1	
g	0,5	95	4275	25,08	95	484,5	MeOH	10.2.1	4	
h	0,5	75	3375	22,13	85	433,5	MeOH	10.2.1	5	
i	0,5	110	4950	26,72	103,2	526,5	MeOH	10.2.1	3a	
j	0,5	100	4500	23,37	107,3	547,2	MeOH	10.2.1	2	
k	0,5	75	3375	18,81	100	510	MeOH	10.2.1	9	
l	0,5	50	2250	12,54	100	510	MeOH	10.2.1	10	
m	0,5	25	1125	6,27	100	510	MeOH	10.2.1	11	

- трубки уплотняющего масла высокого давления;
- трубки управляющего масла высокого давления;
- трубки возврата метанола низкого давления;
- отстойник;
- внешний метаноловый агрегат низкого давления.

При этом в качестве референтного топлива использовалось легкое дистиллятное топливо (LFO — light fuel oil). Затем начались промежуточные испытания, в ходе которых двигатель переключался с LFO на MEON (метанол). На этом этапе были проведены некоторые дополнительные настройки автоматики для оптимизации программного обеспечения. Испытания велись на следующих режимах нагрузки (табл. 2). Все технические данные были получены с помощью ПК и специализированных измерительных приборов фирмы AVL (система сбора данных AVL). Характеристики двигателя при полной нагрузке показаны на рис. 6. Параметры системы впрыска измерялись при работе двигателя в нормальном режиме, а также при переключении с LFO на MEON и обратно:

- давление MEON в аккумуляторе, установленном на раме насоса;
- давление MEON в аккумуляторе форсунки и за отсечным клапаном;
- температура распылителя;
- давление в коллекторе MEON;
- давление управляющего и уплотняющего масла.

Измерение температуры распылителя позволило выявить заметное улучшение качества охлаждения форсунки при переходе на метанол (рис. 7).

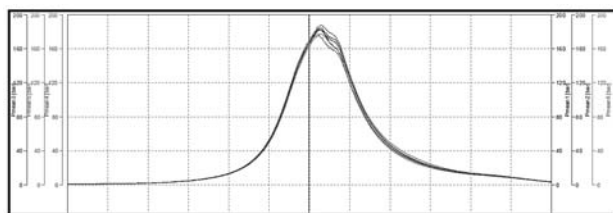


Рис. 6. Параметры двигателя (MEP), полученные с помощью аппаратуры AVL

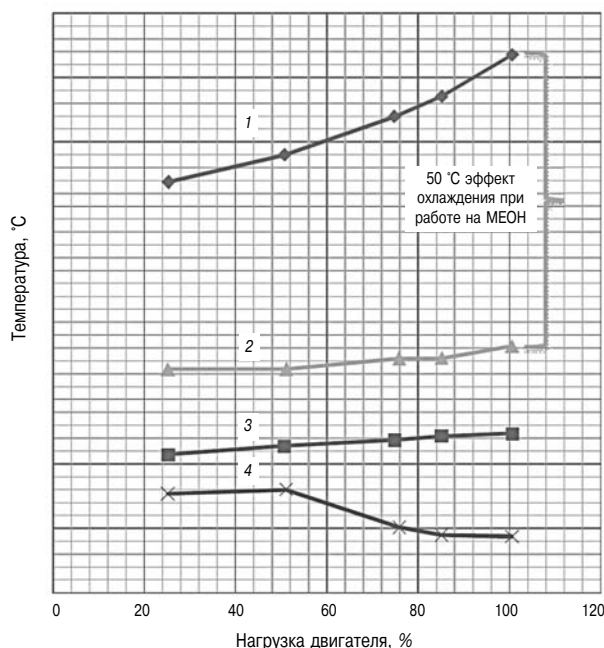


Рис. 7. Температура распылителя:

- 1 — температура распылителя, LFO;
- 2 — температура распылителя, MEON;
- 3 — температура в аккумуляторе, LFO;
- 4 — температура в аккумуляторе, MEON

### Характеристики двигателя

В поисках оптимального компромисса между удельным расходом топлива (SFOC), выбросами и давлением сгорания был выполнен ряд измерений (см. ниже). Эти измерения проводились в метаноловом коллекторе common rail:

- давление в метаноловом коллекторе;
- временные характеристики впрыска метанола;

- величина циклового впрыска.

### Цели проекта

➤ Обеспечение в двухтопливном варианте той же мощности и той же зоны рабочих режимов, что и в дизельном варианте, а именно:

- 750 кВт/цикл. при 510 об/мин;
- диапазон задания скорости 360–510 об/мин.

➤ Определение такого сочетания параметров в двухтопливном варианте, при котором:

- КПД двигателя не хуже, чем при работе только на дизельном топливе;

➤ выбросы  $\text{NO}_x$  не проверялись, поскольку двигатели не имеют сертификатов по выбросам  $\text{NO}_x$ , так как выпущены до 2000 г.;

➤ стабильное сгорание при работе на метаноле с минимальным расходом пилотного топлива в диапазоне нагрузок 25–100 %.

Результаты были получены при наличии следующих ограничений:

➤ давление сгорания при 100 %-ной нагрузке (в дизельном и метаноловом вариантах): 180 бар (заслонка газового перепуска настроена на давление 3,0 бар);

➤ давление сгорания при 85 %-ной нагрузке: 168 бар (как и в дизельном варианте);

➤ минимально возможный расход пилотного топлива, при котором поддерживается стабильность сгорания.

Конфигурация двигателя, поставленного на испытания, приведена в табл. 3.

Результаты испытаний показаны на следующих иллюстрациях:

- давление наддува — рис. 8;
- давление сгорания — рис. 9;
- температура до и после турбокомпрессора — рис. 10 и 11.

Как видно из рис. 10 и 11, давление наддува и давление сгорания при переходе от LFO к метанолу практически не меняется. Видно также, что температура перед турбиной при работе на метаноле снижается по сравнению с работой на LFO. Снижение температуры на полной мощности (при открытой заслонке EWG) составляет порядка 70 °C (см. рис. 10). То же самое можно сказать и о температуре отработавших газов за турбиной. В этом случае снижение температуры составило порядка 50 °C.

### Уровни выбросов

Измерение вредных выбросов проводилось в течение всего цикла испытаний. Результаты сра-

Таблица 3

### Параметры лабораторного двигателя

Тип и назначение двигателя	6LZA40S для работы на ВРШ
Номинальная мощность	750 кВт/цикл.
Номинальная скорость	510 об/мин
Номинальное среднее эффективное давление (BMEP)	25,1 бар
Fuel	LFO / метанол
Воздушный байпас (ABP)	Да — при работе с переменной скоростью
Заслонка газового перепуска (EWG):	Да — при нагрузке 100 % (единственная уставка открытия — при давлении 3,0 бар)
Температура форсунки	50 °C при нагрузке 100 %
Турбокомпрессор	ABB VTR 354-21 (при работе на всех видах топлива)
Выпускная труба	SPEX



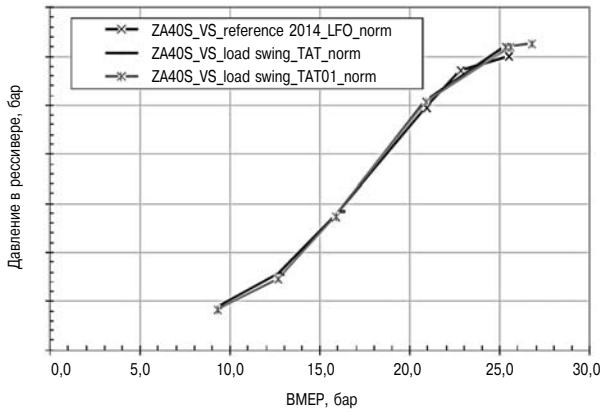


Рис. 8. Характеристики наддува

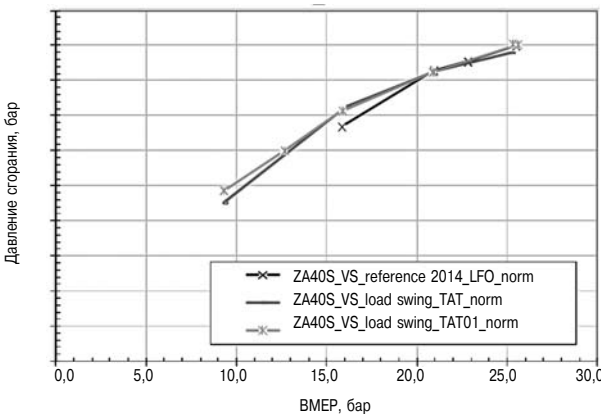


Рис. 9. Зависимости давления сгорания от ВМЕР

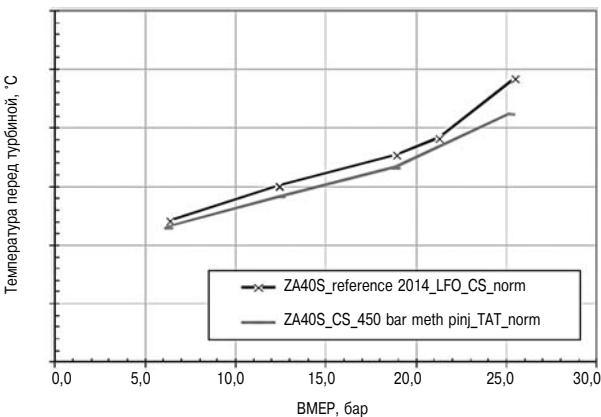


Рис. 10. Зависимости температуры перед турбиной от ВМЕР

внения выбросов при работе на LFO и метаноле представлены на рис. 12 и 13. Видно, что переход с LFO на метанол приводит к резкому снижению уровня вредных выбросов и дымления, которые при работе на метаноле снижаются в 2–3 раза.

**Расход топлива**

В ходе испытаний измерялся расход топлива с учетом работы внешнего метанолового насоса высокого давления.

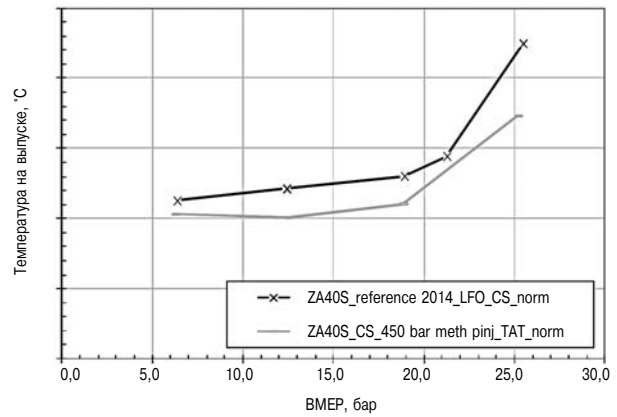


Рис. 11. Зависимости температуры за турбиной от ВМЕР

Результаты этих измерений показаны на рис. 14.

**Итоги лабораторных испытаний**

Анализируя результаты лабораторных испытаний, необходимо отметить следующее:

➤ выбросы NO<sub>x</sub> не являются проблемой, поскольку двигатели не имеют сертификатов по выбросам NO<sub>x</sub>, так как выпущены до 2000 г.:

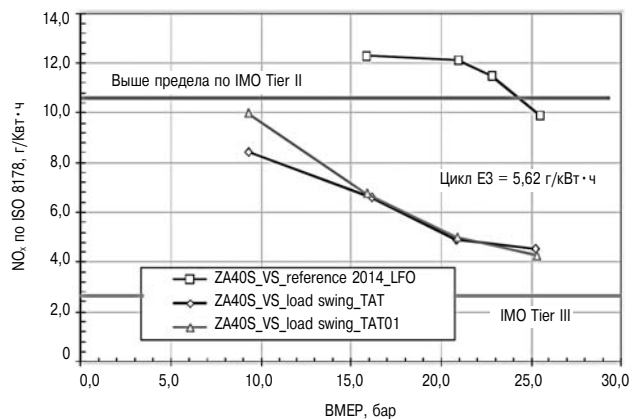


Рис. 12. Уровни выбросов NO<sub>x</sub> при работе с переменной скоростью

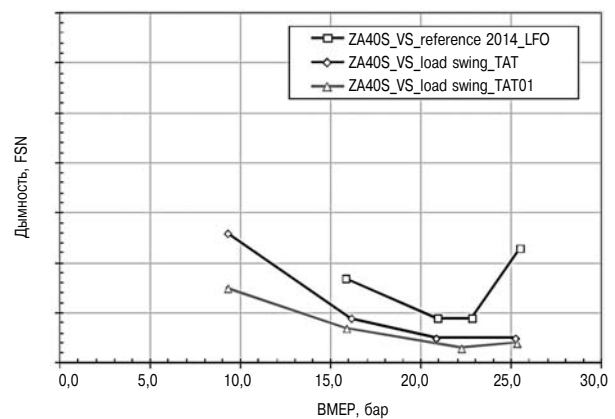


Рис. 13. Дымность

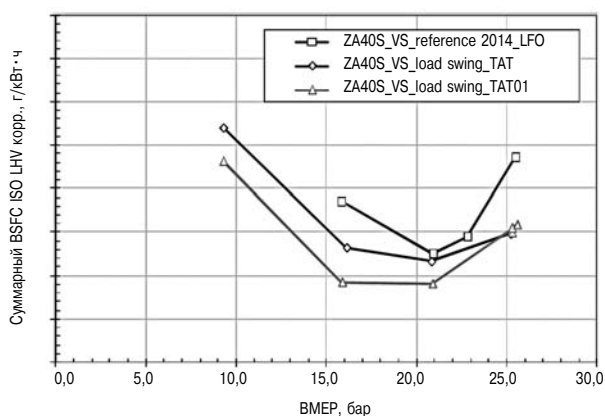


Рис. 14. Расход топлива

► при работе двигателя на метаноле как при постоянной, так и при переменной скорости, выполняются требования ИМО Tier II;

► при работе двигателя на дизельном топливе значения предельно допустимых выбросов по ИМО Tier II превышены;

➤ минимальная нагрузка лабораторного двигателя при работе на метаноле составляла 25 % как при постоянной, так и при переменной скорости;

➤ при работе двигателя на метаноле процесс сгорания был стабильным в диапазоне нагрузки от 25 до 100 %;

➤ тепловая нагрузка;

► температуры до и после турбины при работе на метаноле ниже, чем при работе на дизельном топливе.

#### Модернизация судна

Суда, работающие на коротких маршрутах, такие как паромы Ro-Ro и Ro-Pax, необходимо модернизировать с переводом двигателя на метанол, особенно, при работе в зонах ЕСА, в том числе и потому, что в этих зонах наиболее развита инфраструктура снабжения метанолом. На рис. 15 показан переоборудованный паром «Stena Germanica», технические характеристики которого приведены в табл. 4.

В начале 2015 г. паром «Stena Germanica» был поставлен в док судовой верфи Remontowa. За время докования на нем были установлены и приняты в эксплуатацию системы бункеровки и хранения топлива (в том числе топливный бак объемом 400 м<sup>3</sup>). Были также установлены и приняты в эксплуатацию все системы перекачки топлива, соответствующие трубопроводы и системы безопасности, необходимые для подачи метанола к каждому двигателю. При этом все двигатели были оборудованы системами автоматизации и необходимыми трубопроводами, а один из двигателей был переоборудован для работы на метаноле. Эти работы были совмещены с классификационной инспекцией, проводимой

#### Паром «STENA GERMANICA» — технические характеристики [8]

Длина×Ширина, м	241×28,7
Год постройки	2001
Число перевозимых автомобилей:	300
Пассажировместимость:	1300
Брутто-тоннаж, т	51 837
Скорость, узлы	21,5
Осадка, м	6,15
Провозная способность, погонных м	3800
Мощность двигателей, кВт	24 000
Флаг	Швеция
Судоверфь	Astilleros Espanoles
Двигатели	4×Sulzer 8ZAL40S
Габаритная высота, м	5,00 м
Габаритная ширина, м	5,80 м

раз в пять лет, и другими работами по техобслуживанию, что привело в итоге к существенной экономии средств.

Учитывая коммерческий характер эксплуатации парома, было решено, что остальные двигатели будут переоборудованы после того, как будет достигнута стабильная работа первого двигателя. Этот двигатель работает на метаноле со дня его сдачи в эксплуатацию весной 2015 г. Переоборудование остальных двигателей было выполнено в первом квартале 2016 г.

#### Бункеровочная станция

В настоящее время заправка «Stena Germanica» производится с помощью трейлеров береговой бункеровочной станции, подъезжающих к судну со стороны правого борта.

Емкость судового метанолового бака 400 м<sup>3</sup> достаточна для нормальной работы парома с грузом в течение 4–6 суток. Производительность бункеровочных насосов — около 2000 л/мин, что позволяет обеспечить достаточно быструю заправку парома на ближайшие 4–6 дней во время его стоянки в порту Гётеборга. Возможна также бункеровка со стороны левого борта — с баржи или с танкера-заправщика.

#### Опыт эксплуатации

С точки зрения эксплуатации работа двухтопливного дизель-метанолового двигателя мало отличается от обычного дизеля. Все системы полностью автоматизированы, переключение между двумя видами топлива происходит плавно и никак не сказывается на рабочих параметрах. Пуск двигателя происходит в дизельном режиме, а при нагрузке выше 20 % становится возможным переход на метанол.

По словам представителей заказчика и команды, работа с метаноловым двигателем почти не отличается от работы с обычным дизелем. Обслу-



Рис. 15. Паром «Stena Germanica»

живающий персонал прошел курс обучения в учебном центре «Wartsila», основной упор при этом делался на новых функциях системы автоматике. Фирма «Stena Line», кроме того, провела курс безопасности, посвященный, главным образом, вопросам заправки и хранения топлива.

При обслуживании метаноловой системы использовались дополнительные устройства защиты, такие как перчатки и защитные очки. При доводке систем встречались и некоторые «детские болезни», связанные в основном с уплотнениями метаноловых систем и трубопроводов. Как упоминалось выше, низкая вязкость метанола, циркулирующего в системах высокого давления, создает проблемы для разработчиков уплотнений. Центровка всех узлов уплотнений должна быть выполнена очень тщательно, с минимальными погрешностями.

Были случаи неоднократно повторяющихся утечек, до тех пор, пока разработчикам не удалось прийти к правильному выбору конструктивных решений и материалов. Однако благодаря двойным стенкам метаноловых трубопроводов не произошло ни одной утечки вовне, например, на двигатель или в насосный отсек, причем все утечки немедленно обнаруживались системой мониторинга. Благодаря меньшей тепловой нагрузке и более чистому сгоранию ресурс основных компонентов двигателя, как ожидается, будет увеличен.

Поскольку рабочий процесс построен по дизельному циклу, а впрыск метанола происходит после воспламенения пилотного топлива, расход масла и срок его службы ожидается на том же уровне, что и у обычного дизеля. То же можно сказать и о приемистости двигателя, причем это относится к обоим режимам его работы — на дизеле и на метаноле. Модернизированная система автоматике обеспечивает возможность мониторинга большего числа рабочих параметров, что повышает уровень безопасности и предсказуемости в том, что касается технического состояния двигателя и межремонтных интервалов.

Существует также возможность удаленного мониторинга, позволяющего судовладельцу по-

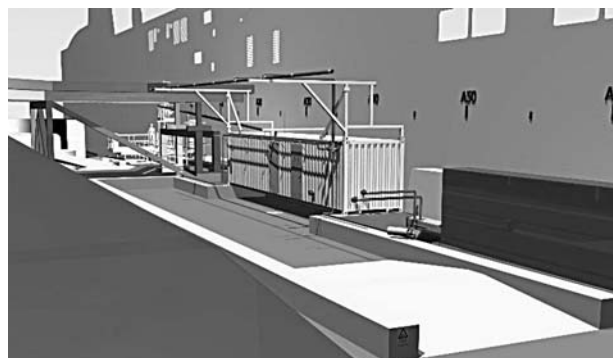


Рис. 16. Береговая бункеровочная станция — схема

лучать эксплуатационные данные непосредственно от систем двигателя. Благодаря меньшему уровню выбросов  $\text{NO}_x$  судовладелец может сэкономить на стоимости обслуживания систем SCR во время нахождения на территории порта до и после отплытия. Возможность выбора вида топлива повышает уровень резервирования, если по каким-либо причинам использование метанола недоступно или нецелесообразно.

#### Заключение

Идея замены традиционных топлив более чистыми видами топлива, например, LNG или метанолом, для исполнения нормативов, устанавливающих предельно допустимое содержание серы, обсуждалась давно, однако экономические стимулы для такой замены были недостаточны. До сих пор в большинстве случаев топливо, к сожалению, выбирается только по критериям быстро меняющихся цен и лишь для того, чтобы уложиться в действующие на сегодняшний день нормы. При этом упускаются из виду не только возможное ужесточение нормативов в будущем, но и социально-экономические выгоды.

Поэтому при планировании возможность производства не-ископаемых топлив не принимается во внимание. Опыт, накопленный в ходе пилотных проектов, демонстрирует возможность и целесообразность более широкого их использования, и в конце концов альтернативные топлива входят в число наиболее популярных решений. По мере накопления опыта альтернативные топлива все шире будут применяться как при постройке новых судов, так и при модернизации существующих, что приведет к значительному снижению соответствующих расходов. В ходе упомянутых пилотных проектов был реализован целый ряд усовершенствований. Наиболее сильное влияние на снижение себестоимости модернизации окажут такие факторы, как более компактная установка. Устройство насосного отсека с меньшим количеством трубопроводов, имеющих двойные стенки для перекачки метанола под высоким давлением, уже заметно скажется на снижении себестоимости работ. В последующих

проектах следует ожидать дальнейшего уменьшения себестоимости за счет переноса метанолового насоса из специального отсека в машинное отделение, если к тому времени оно будет отвечать обновленным требованиям АТЕХ (директивы ЕС, описывающие требования к оборудованию и работе в потенциально взрывоопасной среде).

Дальнейший шаг на этом пути (в том, что касается двигателя) должен заключаться в том, чтобы двигатель запускался на метаноле. При этом будет обеспечена абсолютно работа двигателя. С технической точки зрения метанол в качестве топлива прекрасно показал себя как при лабораторных, так и при эксплуатационных испытаниях. В дальнейшем потребуются более масштабные демонстрационные испытания. Кроме того, развитие судовых двигателей, оптимизированных под метанол, могло бы стать сильным стимулом для двигателестроения. Возможная разработка нового двигателя, использующего впрыск пилотного топлива с регулируемым моментом начала воспламенения (SOI — start of injection) будет способствовать экономии пилотного топлива и даст новый толчок снижению вредных выбросов, вплоть до уровня IMO TIER III, возможно, с добавлением воды в метанол.

Говоря о затратах, связанных с переходом на метанол, необходимо подчеркнуть, что такой переход является экономичным способом удовлетворить требования существующих и будущих экологических стандартов. Хотя метанол нельзя отнести к числу дефицитных материалов, рынок метанола как топлива для судовых двигателей пока что отсутствует. Никто не может предсказать дальнейшую динамику цен на нефть, но опыт показывает, что стоимость нефти и нефтепродуктов, например MGO, бывает подвержена сильным колебаниям. С учетом этого судоводные компании могут снизить риски колебания цен за счет диверсификации топлив, в том числе путем использования на некоторых судах альтернативных топлив, таких как метанол.

В документе «ZERO.8 JUP ZVT initiative» [9], анализирующем «общественные и экологические выгоды от различных проектов», экономический эффект проекта «Stena Germanica» оценивается более 600 000 Евро в год, не считая эффекта от снижения выбросов NO<sub>x</sub>. В расчет принимались эффекты от снижения выбросов SO<sub>x</sub> и PPM, а также от улучшения качества жизни, от снижения расходов на здравоохранение и от повышения урожайности сельскохозяйственных культур. С учетом эффектов от прироста естественного и социального капитала можно ожидать что и новые проекты, предусматривающие переход на метанол, смогут получить финансирование и

субсидии от правительственных и других организаций, повышая их экономическую целесообразность и жизнеспособность. Если будут введены в действие более жесткие ограничения на выбросы двуокиси углерода, метанол станет одним из лучших и конкурентоспособных альтернативных топлив, снижающих количество CO<sub>2</sub> в атмосфере.

Капитанам промышленности следовало бы организовать свой бизнес таким образом, чтобы эффект от него ощущали не только они сами, но и общество в целом, сохраняя в то же время конкурентоспособность за счет использования последних технических достижений. Поучительным примером такого подхода является конверсия двигателей пара «Stena Germanica».

#### Условные обозначения

DME	Диметиловый эфир
EWG	Заслонка газового перепуска (Exhaust waste gate)
FEM	Метод конечных элементов (Finite element method)
GHG	Тепличный газ (Greenhouse gas)
HAZID	Систематическая оценка для определения опасностей (Systematic assessment to identify hazards)
HAZOP	Систематическая оценка для определения опасностей при работе (Systematic assessment to identify operational hazards)
HFO	Мазут (Heavy fuel oil)
HP	Высокого давления (High Pressure)
ICE	Двигатели внутреннего сгорания (Internal Combustion Engines)
IGC	Международный кодекс по конструкции и оборудованию судов, перевозящих сжиженные газы наливом (International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk)
IGF	Международный кодекс безопасности судов использующих газы и другое топливо с низкой температурой воспламенения (International Code of Safety for Ships using Gases or other Low flashpoint Fuels)
LFO	Легкое дистиллятное топливо (Light fuel oil)
LHV	Низшая теплотворная способность (Lower heat value)
LNG	Сжиженный природный газ (Liquefied natural gas)
MEOH	Метанол (Methanol)
MGO	Морской газойль (Marine gas oil)
Ro-Pax	Roll-on/roll-off автомобильный и пассажирский паром
SECA	Зона контроля выбросов серы (Sulfur emission control area)
SFOC	Удельный расход топлива (Specific fuel oil consumption)
SOI	Начало впрыска (Start of injection)
TAT	Типовые испытания (Type approval testing)

#### Литература

1. EFFSHIP [www.fffship.com](http://www.fffship.com)
2. SPIRETH [www.spireth.com](http://www.spireth.com)
3. Lloyd's Register Consulting (2014), Kiel Port Methanol HAZID — Stena Germanica operation Report no: 50102561 R02 Rev: 02, December 2014.
4. Lloyds Register (2014;1)Methanol bunkering, storage and transfer arrangements GOTH/06.14.01, HAZOP report, June 2014.
5. Lloyds Register (2014;2)High pressure methanol pump and engine system HAZOP report GOTH/11.14.01, November 2014.
6. Lloyds Register (2013), Methanol bunkering, storage and pump room arrangement conceptual design HAZID report, GOTH/09.13.01, September 2013.
7. Lloyds Register (2014;3) methanol bunkering high pressure pumps and engine systems HAZID report GOTH/10.01.14, October 2014.
8. Germanica facts <http://www.stenalinefreight.com/ships/Stena-Germanica>.
9. [http://www.zerovisiontool.com/sites/www.zerovisiontool.com/files/attachments/peter\\_grundevik-jup\\_08\\_project\\_aim\\_0.pdf](http://www.zerovisiontool.com/sites/www.zerovisiontool.com/files/attachments/peter_grundevik-jup_08_project_aim_0.pdf)