

ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ NO_x И ЧАСТИЦ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ (материалы конгресса CIMAC 2013)

Продолжая публикацию докладов CIMAC-2013, редакция выбрала два сообщения, отражающих, на наш взгляд, современные тенденции в области снижения вредных выбросов судовых дизельных двигателей.

В докладе фирмы «Niigata» рассматриваются возможные методы снижения выбросов NO_x до уровня IMO Tier 3. Наиболее эффективным методом признана селективная каталитическая очистка (SCR). Фирмой «Niigata» создана компактная система SCR, которая обеспечивает снижение выбросов NO_x более чем на 80 %. Это означает, что данная технология способна обеспечить выполнение требований IMO Tier 3 без привлечения дополнительных технических средств.

Альтернативным методом является использование сжиженного природного газа. В рамках представленной темы разработан двухтопливный двигатель, способный в «газовом» режиме удовлетворять требованиям IMO Tier 3 по вредным выбросам и обеспечить достаточную приемистость при резких изменениях нагрузки.

Кроме того, еще не полностью использован потенциал «внутренних» средств, т. е. совершенствования рабочего процесса. Использование усиленного цикла Миллера в сочетании с двухступенчатым турбонаддувом позволяет обеспечить 50-процентное сокращение

выбросов NO_x без ухудшения топливной экономичности, хотя для выполнения требований IMO Tier 3 этого недостаточно. Поэтому в качестве одного из вариантов можно рассматривать дополнение названных выше мероприятий системой EGR, однако надежность и долговечность этой системы нуждаются в подтверждении.

Доклад национального университета Японии (National Fisheries University) посвящен вопросам очистки отработавших газов от твердых частиц (PM). Применение обычных систем SCR на мощных судовых двигателях сталкивается с рядом трудностей, поскольку обычно в таких двигателях используются тяжелые топлива (HFO) с большим содержанием серы. При сгорании HFO образуется большое количество твердых частиц (PM), вызывающих деактивацию катализатора. Возникает необходимость использования фильтра частиц (DPF). Авторами доклада проведено исследование влияния DPF на выбросы PM и разработан DPF новой конструкции с нагревателем-регенератором, который обеспечивает возможность регенерации на работающем двигателе. Приводятся характеристики качества фильтрации и регенерации, полученные на двух двигателях разного класса в стендовых и судовых условиях.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ NO_x ДО УРОВНЯ IMO TIER 3

*Yoshiyasu Murayama, Tetsuya Tagai,
Takahisa Mimura, Satoru Goto,
Niigata Power Systems Co. Ltd., Япония*

Реферат

Инженеры фирмы «Niigata» продолжают работать над технологиями снижения вредных выбросов судовых двигателей до значений, узаконенных действующими и перспективными экологическими стандартами. Снижение выбросов NO_x до предельно допустимого уровня, установленного документом IMO Tier 3, который вступит в силу в ближайшем будущем, возможно либо за счет внедрения очистки отработавших газов, либо за счет перехода на альтернативные топлива, либо за счет совершенствования рабочего процесса. Выбор одного или нескольких из перечисленных методов будет определяться мощностью двигателя, особенностями его использования, а также типом судна. Наиболее эффективный способ — это очистка отработавших газов путем селективного каталитического восстановления (SCR). Системы SCR на судовых дизелях «Niigata» устанавливаются с середины 1990-х гг. За это время фирма успела накопить значительный опыт их проектирования и эксплуатации. Наиболее критичными характеристиками системы

SCR при ее использовании в судовых условиях являются габариты, а также выбранная технология управления процессом, т. е. обеспечения нужной зависимости подачи восстановителя от нагрузки. Для проверки выполнения требований Tier 3 с помощью созданной системы SCR были проведены испытания на борту судна. Необходимая подача восстановителя задавалась сигналами нескольких обычных датчиков, установленных на двигателе. Учитывалось также влияние атмосферных условий на выбросы NO_x. Созданная система SCR применима не только для судов внутреннего плавания, но и для океанских судов. Эта система обеспечила снижение выбросов NO_x в условиях эксплуатации на 80 % по сравнению с нормативами Tier 1 и показала надежную работу при полном отсутствии утечек аммиака. Другое направление — использование альтернативных топлив. В настоящее время газовые двигатели применяются в составе стационарных электростанций и установок когенерации. Высокую надежность продемонстрировали как газовые двигатели с искровым зажиганием, так и двухтопливные двигатели (газодизели), в которых зажигание рабочей смеси осуществляется за счет впрыска пилотного топлива в камеру сгорания. Благодаря относительно низкой температуре адиабатического горения бедной смеси

уровень выбросов NO_x у газового двигателя на порядок ниже, чем у дизеля. Это свидетельствует о том, что в газовом двигателе выбросы NO_x могут быть снижены до уровня, соответствующего Tier 3. Наконец, третье направление — совершенствование процесса сгорания при работе двигателя на дизельном топливе. Это достигается, в частности, применением цикла Миллера, что обеспечивает снижение температуры газов в цилиндре и повышение термодинамического КПД цикла. Именно этим способом было достигнуто уменьшение выбросов NO_x до уровня Tier 2, однако в рамках настоящей работы были предприняты шаги по дальнейшему повышению эффективности данного метода. Поскольку усиление эффекта Миллера влечет за собой необходимость существенного повышения давления наддува, был применен двухступенчатый наддув. Благодаря двойному эффекту — повышению КПД турбокомпрессора и повышению КПД цикла — снижение выбросов NO_x по сравнению с Tier 1 при этом достигало 50 %. Двухступенчатый наддув хорошо дополняется применением системы EGR, которая обеспечивает дальнейшее снижение выбросов NO_x . Иными словами, снижение расхода топлива становится возможным за счет совместного применения двухступенчатого наддува, более глубокого цикла Миллера и EGR. В настоящем докладе подробно описано влияние каждого из перечисленных выше факторов. Основная его часть посвящена исследованию эффективности двух методов — SCR и совершенствования процесса сгорания. Аспекты, касающиеся газового двигателя, также рассмотрены, но лишь в общих чертах, поскольку детальному анализу данного вопроса посвящен отдельный доклад, представленный на этом конгрессе.

Введение

В мае 2005 г. вступило в силу Приложение VI к конвенции MARPOL 73/78, регламентирующее предельно допустимое содержание вредных веществ в газообразных выбросах морских судов. В октябре 2008 г. на 58-й сессии ИМО (MEPC58) были приняты очередные более жесткие нормативы, распространяющиеся на вновь построенные суда. В 2011 г. были введены в действие нормы Tier 2, предусматривавшие снижение допустимых выбросов NO_x на 15–22 % по сравнению с нормами Tier 1. Наконец, на 2016 г. запланирован ввод в действие нормы Tier 3, согласно которой снижение вредных выбросов в зонах регулируемых выбросов (ECA) должно составить не менее 80 %.

«Niigata Power Systems» (NPS) давно работает над технологиями, позволяющими выполнить требования указанных нормативов. В частности, компанией были предложены и реализованы

методы очистки отработавших газов, а также созданы газовые двигатели для использования в качестве главных судовых [1]. Применение каждой из рассматриваемых технологий связано с необходимостью решения определенных технических проблем. Что касается очистки отработавших газов, то очевидно, что в условиях ограниченного пространства, обусловленного судовой спецификой, агрегат каталитического восстановления (SCR) по своим габаритам должен быть меньше, чем аналогичные установки стационарных двигателей. Необходимо также улучшить приемистость двигателя, поскольку по данному показателю газовые двигатели, как известно, уступают дизелям. В предлагаемом докладе представлены некоторые технические аспекты решения проблем, с которыми пришлось столкнуться во время испытаний на стенде и на борту судна. Описано также влияние применения цикла Миллера и двухступенчатого турбонаддува на снижение выбросов NO_x дизельным двигателем. Рассмотрены различные способы достижения показателей ИМО Tier 3.

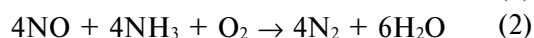
Стратегия достижения показателей ИМО TIER 3 по NO_x

Применение SCR позволяет существенно снизить выбросы NO_x с отработавшими газами дизеля. Системы SCR для главных судовых двигателей были разработаны NPS в 1990-х гг. В 1995 г. подобная система была установлена на судне «Wakashiomaru» [1] (рис. 1), где она проработала в течение длительного времени. В ходе настоящей работы система SCR была модернизирована и испытана в судовых условиях, чтобы проверить, насколько эта система в состоянии обеспечить выполнение требований стандарта ИМО Tier 3.

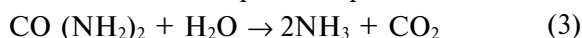


Рис. 1. Судно «Wakashiomaru» с агрегатом SCR

В системе SCR происходит преобразование аммиака (NH_3) и NO_x в воду и азот в ходе (преимущественно) следующих восстановительных реакций:



Как видно из приведенных уравнений, для работы SCR требуется NH_3 в качестве восстановителя. Однако, поскольку NH_3 является вредным веществом, существуют жесткие правила обращения как с газообразным, так и с жидким аммиаком. Поэтому на практике в качестве восстановителя используется не сам аммиак, а мочевины, работа с которой намного легче и безопаснее. NH_3 является продуктом гидролиза (уравнение 3), происходящего при вводе раствора мочевины в поток горячих отработавших газов.



Смесь NH_3 и отработавших газов проходит через катализатор, где протекает реакция восстановления. Степенью очистки отработавших газов от NO_x можно управлять путем регулирования подачи мочевины. Можно сказать, что порядка 90 % содержания NO_x в отработавших газах дизеля приходится на NO. Следовательно, преобладающую роль в восстановлении NO_x играет реакция по уравнению (2). Например, для обеспечения степени восстановления NO_x 80 % нужно поддерживать расход мочевины таким, при котором поддерживалось бы соотношение NH_3 к NO на уровне 0,8:1,0.

Способы регулирования расхода мочевины

Для обеспечения заданной степени восстановления NO_x необходимо вводить в поток отработавших газов определенное количество мочевины. Уменьшение этого количества снижает степень очистки отработавших газов от NO_x , тогда как его увеличение сверх оптимального приведет к появлению избытка аммиака, выбрасываемого в атмосферу. Концентрация NO_x , как и расход отработавших газов, зависят от рабочих параметров двигателя. Эти параметры должны учитываться при расчете расхода мочевины.

Существует два возможных способа регулирования расхода мочевины в SCR: реактивное регулирование (с обратной связью) и упреждающее регулирование. В первом случае измеряется концентрация NO_x на выходе реактора, а изменение расхода мочевины производится до тех пор, пока расчетная концентрация NO_x не будет достигнута. Для измерения концентрации NO_x на выходе реактора в реальном времени необходимо иметь газоанализатор. Преимуществом такого метода является возможность точного поддержания расхода мочевины на необходимом уровне

даже при меняющейся концентрации NO_x на выходе реактора.

Идея упреждающего регулирования состоит в оценке концентрации NO_x на основе текущих рабочих параметров двигателя. Концентрация NO_x может быть рассчитана исходя из рабочих параметров двигателя, причем для этого достаточно знать скорость двигателя и любой из параметров, связанных с нагрузкой, например положение топливной рейки или величину топливоподачи. Для измерения указанных параметров могут использоваться обычные датчики. Соотношение между концентрацией NO_x и рабочими параметрами двигателя вводится в программу управления в параметрическом виде. Кроме того, в расчете делается поправка на атмосферные условия, в частности на температуру и абсолютную влажность воздуха.

Судовые испытания системы SCR

Судно, на котором была установлена система SCR, показано на рис. 2. Это сухогруз, предназначенный для перевозки стальных изделий. В качестве главного двигателя на судне установлен четырехтактный малооборотный дизель (рис. 3). Его основные характеристики приведены в табл. 1. При проведении испытаний двигатель



Рис. 2. Судно, на котором походили испытания

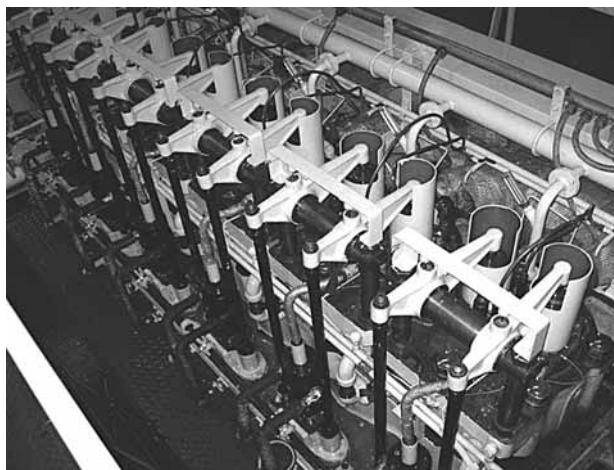


Рис. 3. Главный двигатель (6M34AFT)

Таблица 1

Характеристики главного двигателя

Тип двигателя	Niigata 6M34AT
Мощность, кВт	1491
Частота вращения двигателя, об/мин	300
Число цилиндров	6
Диаметр цилиндра, мм	340
Вид топлива	MDO



Рис. 4. Заправка судна раствором мочевины

работал на флотском мазуте (MDO) с содержанием серы 0,7–1,0 %.

Во время испытаний использовалось, главным образом, упреждающее регулирование. Целью данных испытаний были оценка эффективности очистки отработавших газов от NO_x, а также проверка метода регулирования расхода мочевины и работоспособности катализатора. Раствор мочевины загружался на судно из автоцистерны (рис. 4). Заправка 2,4 м³ раствора мочевины (так называемый AdBlue® — препарат, используемый в грузовых и легковых автомобилях) занимала 20 минут.

Схема системы SCR

Схема системы SCR показана на рис. 5. Раствор мочевины через форсунку вводится в поток горячих отработавших газов. При этом происходит испарение мочевины и ее разложение с образованием аммиака (NH₃). Эффективность использования мочевины обратно пропорциональна размеру капель, образующихся при ее распыливании. Чем меньше капли, тем быстрее идет перемешивание отработавших газов с NH₃. Это позволяет сократить минимально необходимое расстояние от входа в реактор до форсунки подачи мочевины, и тем самым уменьшить габариты системы SCR. Чтобы использовать указанные преимущества с наибольшим эффектом, была выбрана схема с двухфазным впрыском под воздействием сжатого воздуха. В результате удалось сократить минимально необходимое расстояние между входом реактора и форсункой до 2 м, что

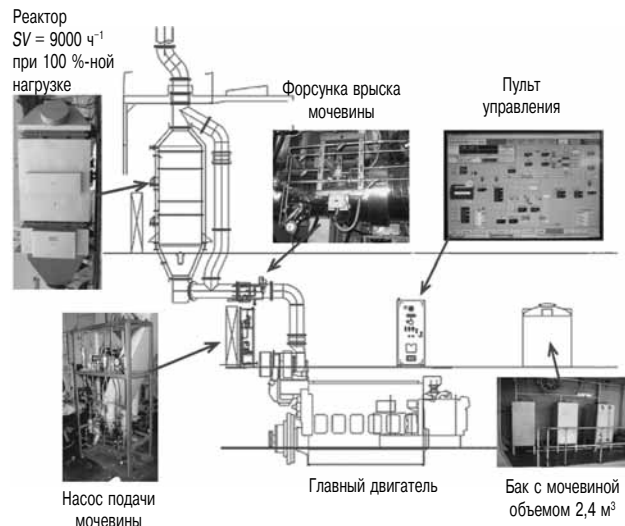


Рис. 5. Схема бортовой системы SCR

чрезвычайно важно, если вспомнить об ограниченных размерах машинного отделения. Именно такая конфигурация использовалась при оценке эффективности SCR.

Для определения размеров реактора обычно используется понятие объемной скорости (*SV* — space velocity). *SV* определяется как частное от деления расхода отработавших газов [Нм³/ч] на объем катализатора [м³]. Объемная скорость обратно пропорциональна размерам реактора. В рассматриваемой системе SCR величина *SV* составляет 9000 ч⁻¹ при полной нагрузке двигателя, тогда как в типичных стационарных системах SCR величина *SV* обычно находится в пределах от 5000 до 6000 ч⁻¹. Это означает, что рассматриваемая система SCR по габаритам существенно меньше стационарных.

Схема реактора показана на рис. 6. Реактор состоит из двух слоев катализатора. Концентрация отработавших газов измеряется в трех точках: на входе в реактор, после первого слоя катализатора (середина) и на выходе их реактора (выход). Подобная конфигурация позволяет измерять

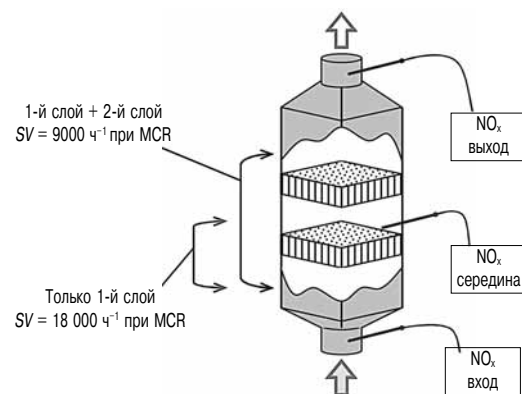


Рис. 6. Структура слоев катализатора и точки измерения состава отработавших газов

степень восстановления NO_x после первого слоя катализатора при SV до $18\ 000\ \text{ч}^{-1}$ на 100 %-ной нагрузке двигателя.

Данные, необходимые для расчета параметров регулирования SCR, измерялись на первом этапе судовых испытаний, после чего эти данные вводились в программу регулирования в качестве исходных.

Параметры, необходимые для регулирования SCR, а именно концентрация NO_x , расход отработавших газов, расход топлива и т. д., измерялись при разных значениях нагрузки двигателя. Эти данные вводились в контроллер, после чего система переключалась в режим автоматического управления.

Результаты судовых испытаний

Временной график прогрева катализатора — от пуска двигателя до достижения необходимой температуры катализатора показан на рис. 7. Перед впрыском мочевины катализатор должен быть прогрет. В нашем случае катализатор считался прогретым, когда температура на выходе реактора достигала $280\ ^\circ\text{C}$. Этот момент наступал через 40 минут после пуска двигателя.

Параметры каталитической очистки — от момента пуска двигателя до достижения установленного режима — показаны на рис. 8. При

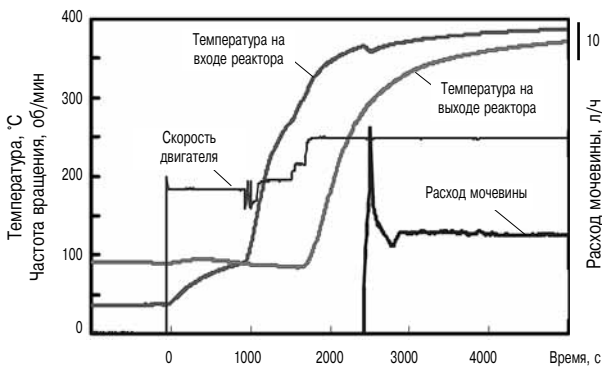


Рис. 7. Процесс прогрева реактора



Рис. 8. Степень снижения выбросов NO_x

пуске двигателя концентрация NO_x в отработавших газах довольно высока, но сразу же после начала впрыска мочевины она начинает снижаться. Расход мочевины регулируется в соответствии с колебаниями нагрузки. Как видно из рис. 8, степень снижения содержания NO_x стабильно поддерживалась на уровне 80 %. Полная запись параметров с начала и до конца испытательного цикла показана на рис. 9. Испытания длились с июля по декабрь 2010 г., при этом суммарная наработка главного двигателя составила 830 часов. В течение всего этого времени катализатор подвергался воздействию отработавших газов, а период активной работы SCR достиг 700 часов. По окончании испытаний никаких отклонений в техническом состоянии системы SCR выявлено не было.

Измерения выбросов аммиака за выпускной трубой не производились, однако никакого аммиачного запаха не наблюдалось. Это означает, что практически все количество аммиака, поступившего в систему, было использовано по назначению, т. е. для снижения выбросов NO_x .

Зависимость между молекулярным отношением аммиака к NO_x и степенью снижения NO_x оказалась близка к теоретической. При молеку-

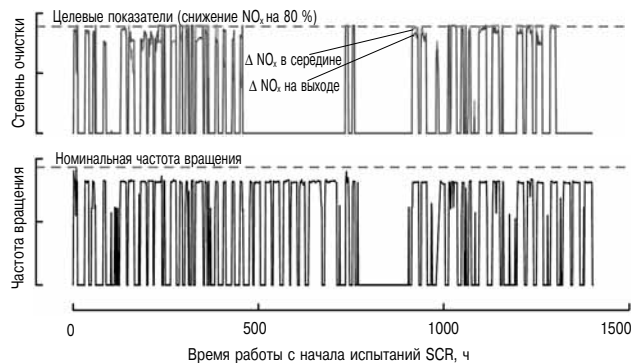


Рис. 9. Запись полного цикла судовых испытаний

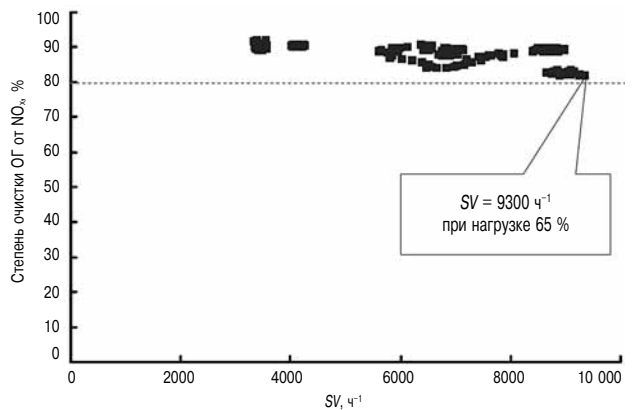


Рис. 10. Соотношение между SV и степенью очистки газов от NO_x по результатам испытаний

лярном отношении NH_3 к NO_x менее 0,9 утечки NH_3 не превышали 10 ppm [2]. Во время испытаний молекулярное отношение аммиака к NO_x поддерживалось в пределах 0,9, так что фактические утечки аммиака могли быть менее 10 ppm.

Результаты определения SV и степени снижения NO_x при испытаниях показаны на рис. 10. Во время плавания грузеного судна нагрузка на двигатель поддерживалась на уровне примерно 65 %, а объем отработавших газов соответствовал $SV = 9300 \text{ ч}^{-1}$. Таким образом, система SCR обеспечивает заявленную степень восстановления NO_x 80 % даже при $SV = 9300 \text{ ч}^{-1}$, что подтверждает правильность принятой концепции повышения SV .

Оценка ресурса катализатора

Вид катализатора после окончания судовых испытаний показан на рис. 11. На поверхности катализатора можно видеть незначительные следы сажи, но следы отложения масла и/или несгоревшего топлива отсутствуют. Не выявлено также образований, возникающих при кристаллизации раствора мочевины.

Для оценки стойкости катализатора был проведен дополнительный цикл испытаний на стенде в объеме 300 часов. После наработки в 1000 часов (700 часов на судне + 300 часов на стенде) поставщик катализатора провел его контрольное обследование.

Было установлено, что скорость регенерации катализатора и его прочность на сжатие не изменились, т. е. остались на том же уровне, что и у нового катализатора. Анализ отложений не выявил ни посторонних отложений, ни агрессивных веществ, таких как щелочи или сернистые соединения, вызывающие деградацию катализатора.

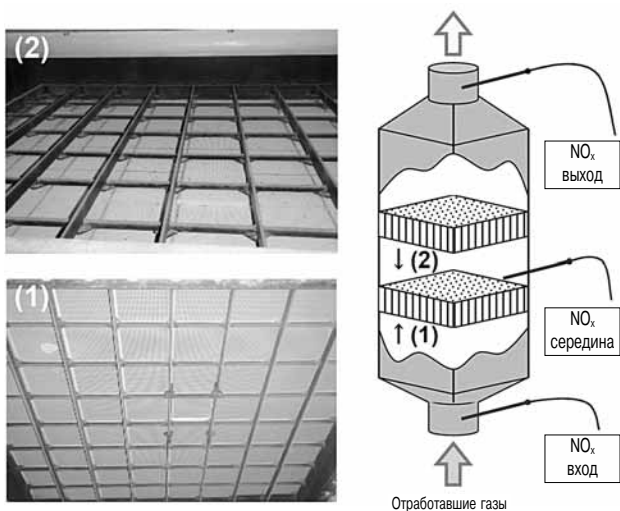


Рис. 11 Внешний вид катализатора после судовых испытаний

Газовые двигатели в качестве главных судовых

Использование альтернативных топлив — одно из наиболее перспективных направлений для снижения выбросов NO_x до уровня IMO Tier 3. Во многих странах природный газ, дешевле жидкого топлива, поэтому широко используется в стационарных установках. Практически любой природный газ представляет собой метан с разного рода примесями. Горючий газ и воздух подаются в цилиндр одновременно перед началом хода сжатия. Технологии, используемые для воспламенения бедной смеси в газовых двигателях, обеспечивают адиабатическое сгорание газа, в частности, метана, при низкой температуре, способствующей снижению выбросов NO_x .

Еще одной характерной особенностью газовых двигателей является предварительное смешивание газа и воздуха в ходе цикла сжатия, что повышает однородность рабочей смеси в момент ее зажигания. Воспламенение гомогенной смеси происходит при более низкой температуре, нежели в дизеле. Это относится ко всему объему камеры сгорания и означает, что выбросы NO_x будут соответственно ниже. Процесс сгорания в дизеле принципиально иной. Горение имеет диффузионный характер, при этом локальные температуры в зоне сгорания оказываются выше по сравнению с газовым двигателем.

При горении природного газа образуется меньше CO_2 , чем при горении дизельного топлива, поскольку значение соотношения C/H для природного газа ниже, чем для жидкого топлива, состоящего, в основном, из парафиновых углеводородов, при той же низшей теплотворной способности. Кроме того, выбросы SO_2 в газовом двигателе чрезвычайно малы, так как природный газ обычно содержит незначительное количество серы.

Обычная система управления коэффициентом избытка воздуха, используемая в стационарных газовых двигателях, работающих на бедной сме-

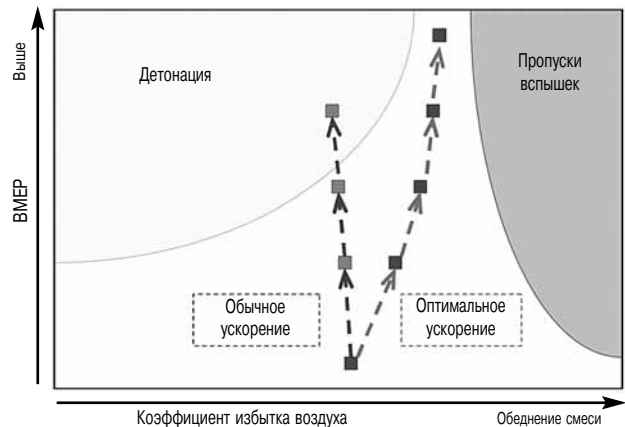


Рис. 12. Рабочая область газового двигателя

си, не совсем подходит для главного судового двигателя, поскольку в последнем случае требуется лучшая управляемость. В особенности это относится к буксирам, где система управления должна быть значительно более быстросействующей и чувствительной, чтобы поддерживать соотношение воздух–топливо в допустимых пределах, показанных на рис. 12.

Оптимизация расхода воздуха (управление коэффициентом избытка воздуха)

Как известно, большое влияние на приемистость поршневого двигателя оказывает настройка турбокомпрессора. В дизеле несоответствие характеристик двигателя и турбокомпрессора может стать причиной дефицита воздуха для сгорания, что вызовет дымление (черный дым) при быстром увеличении топливоподачи.

В газовых двигателях такие нарушения рабочего процесса, как детонация и пропуски вспышек, возникают в тех случаях, когда из-за неправильного подбора турбокомпрессора значение коэффициента избытка воздуха может выйти за пределы допустимого диапазона.

Следовательно, для стабильной и безопасной работы газового двигателя при переменной нагрузке, необходимо обеспечить эффективное управление коэффициентом избытка воздуха. Для главного судового двигателя, работающего на газе, ключевым условием, обеспечивающим подобное управление, является наличие турбокомпрессора с регулируемым сопловым аппаратом. Он позволяет изменять проходное сечение турбины и тем самым регулировать давление наддува.

Регулируемый турбокомпрессор существенно повышает управляемость двигателя. Проходное сечение соплового аппарата уменьшается для повышения скорости вращения турбокомпрессора, когда нужно обеспечить достаточный воздушный заряд в двигателе на низких и средних нагрузках. И напротив, проходное сечение соплового аппарата может быть увеличено при высоких нагрузках, чтобы уменьшить подачу воздуха в цилиндры во избежание пропуска вспышек.

Прототип двухтопливного двигателя

Схема прототипа двухтопливного двигателя показана на рис. 13. В дизельном режиме осуществляется прямой впрыск топлива в каждый цилиндр с помощью ТНВД и механической форсунки.

В газовом режиме горючий газ подается во впускное окно. Управление длительностью и началом впрыска газа осуществляется с помощью электромагнитных газовых клапанов. Для работы на газе необходим источник зажигания. На

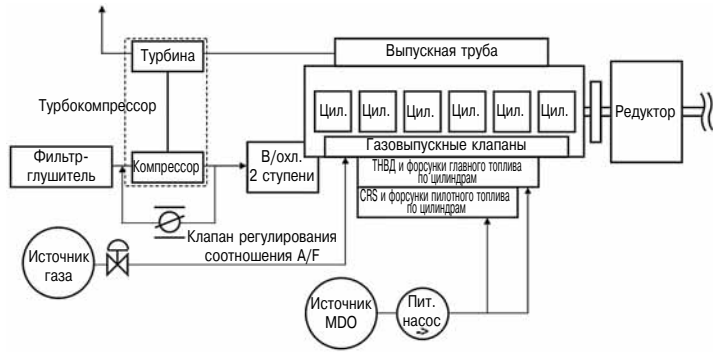


Рис. 13. Схема опытного образца двухтопливного двигателя

опытном двигателе зажигание осуществлялось с помощью впрыска в камеру сгорания небольшого количества пилотного топлива. Такой способ зажигания обеспечивает надежное воспламенение бедной смеси и стабильную работу двигателя. Поскольку от момента и длительности впрыска пилотного топлива в значительной мере зависит склонность двигателя к детонации, впрыск осуществляется с помощью системы common rail (CRS). При этом во избежание нарушений процесса сгорания необходимо обеспечить управление углом и длительностью впрыска пилотного топлива, в том числе в переходных процессах. Для этой цели используются датчики детонации и температуры отработавших газов. Таким образом, применение двухтопливного двигателя в качестве главного судового требует наличия CRS как компонента системы управления.

Результаты испытаний

Согласно техническому заданию, двигатель должен соответствовать требованиям IMO Tier 3 в газовом режиме работы и IMO Tier 2 — в дизельном режиме работы. Целевые и фактические показатели выбросов, полученные при стендовых испытаниях, приведены в табл. 2.

Результаты использования различных методов повышения приемистости двигателя показаны на рис. 14. Начало и продолжительность впрыска пилотного топлива во всем диапазоне нагрузок задавались системой CRS. В данном случае время приема нагрузки при ее изменении от 15 до 75 % уменьшилось на 25 % по сравнению с исходным вариантом. Фаза и продолжительность

Таблица 2

Выбросы NO_x в дизельном и газовом режимах

Режим работы	Дизельный	Газовый
IMO NO _x	IMO Tier 2	IMO Tier 3
Предельно допустимое значение, г/кВт·ч	≤ 9,6	≤ 2,4
Измеренное значение, г/кВт·ч	9,59	1,01

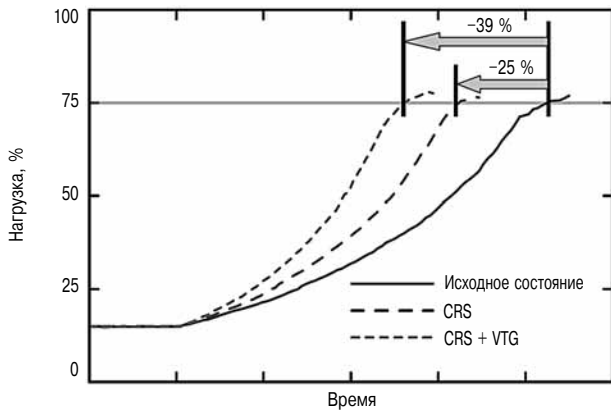


Рис. 14. Различные методы улучшения приемистости двигателя

впрыска пилотного топлива во всем диапазон нагрузок управлялись системой CRS. Кроме того, приемистость двигателя может быть повышена за счет использования турбокомпрессора с регулируемым сопловым аппаратом. При этом длительность переходного процесс сокращается на 39 % по сравнению с исходным вариантом.

Резервирование в двухтопливном двигателе

Система регулирования двигателя состоит из датчиков и исполнительных устройств, между которыми необходимо обеспечить гарантированную передачу сигналов. В первую очередь это касается электронной системы CRS, требующей непрерывного электропитания. При исчезновении питания двигатель немедленно остановится. Во избежание подобной ситуации и для обеспечения непрерывности хода судна система управления должна обладать функциями резервирования.

Необходимые конфигурации и настройки двигателя для работы в дизельном и газовом режимах, в общем случае, различны. Это касается таких параметров, как степень сжатия, момент и продолжительность впрыска топлива, а также углы и продолжительность открытия впускных и выпускных клапанов. Отсюда следует, насколько важно при проектировании двигателя обеспечить баланс между обеими конфигурациями, чтобы выполнялись требования, специфичные для каждого из двух рабочих режимов. Например, чтобы обеспечить выполнение требований IMO Tier 2 в дизельном режиме, нужно спроектировать механизм регулировки углов газораспределения с целью повышения термодинамического КПД двигателя. Более подробно об этом сказано в докладе № 99, представленном в другой секции настоящего Конгресса CIMAC.

Снижение выбросов NO_x за счет

совершенствования рабочего процесса дизеля

Выбросы NO_x в главном судовом дизеле определяются, главным образом, высокой температурой в камере сгорания. Следовательно, для

снижения NO_x необходимо уменьшить температуру в цилиндре. Одной из главных задач при адаптации газового двигателя к судовым условиям является поддержание низкой локальной температуры горения. Эффективным средством достижения этой цели является цикл Миллера. Использование цикла Миллера приводит к снижению температуры горения в результате уменьшения эффективной степени сжатия. Это происходит за счет сокращения фазы сжатия путем сдвига в ту или иную сторону углов начала или конца открытия впускного клапана (IVC — intake valve close), что снижает температуру газов в конце цикла сжатия. Соответственно продлевается фаза расширения и возрастает КПД цикла. Фирма NPS применила данную технологии при создании двигателя, соответствующего требованиям Tier 2. Однако для того, чтобы в дальнейшем увеличить степень очистки отработавших газов от NO_x на 80 % по сравнению с Tier 1, глубина цикла Миллера должна быть также увеличена.

Длительность фазы всасывания при использовании цикла Миллера со сдвигом IVC тоже сокращается, что вызывает снижение мощности двигателя из-за уменьшения величины воздушного заряда. Чтобы этого не произошло, необходимо повышать давление наддува, то есть увеличение глубины цикла Миллера должно сопровождаться ростом степени повышения давления в компрессоре. При этом неизбежно возрастут габариты турбокомпрессора, а его КПД заметно снизится. Последнее отрицательно скажется на одном из основных показателей главного судового двигателя — его приемистости. Для решения этой проблемы двигатель был оборудован двухступенчатой системой турбонаддува, состоящей из двух турбокомпрессоров с умеренной степенью повышения давления.

На рис. 15 показаны опытный двигатель на испытательном стенде, используемом для оценки влияния усиленного цикла Миллера с двухступенчатой системой наддува на показатели двигателя, и термодинамическая модель, позволяющая предварительно оценить эффективность данных мероприятий для снижения выбросов NO_x. После компрессора первой ступени воздух поступает в промежуточный охладитель, где охлаждается до температуры 50 °С. Затем воздух попадает в компрессор второй ступени, где сжимается до 0,7 МПа. Далее воздух поступает в охладитель второй ступени, а оттуда — в цилиндры двигателя. С другой стороны, отработавшие газы проходят сначала через турбину высокого давления, а затем — через турбину низкого давления. В настоящем исследовании использовался четырехтактный среднеоборотный дизель (табл. 3),

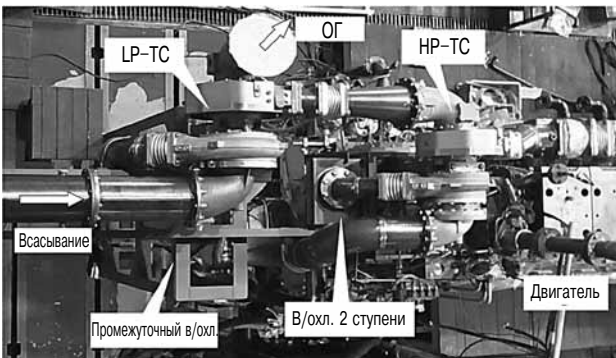
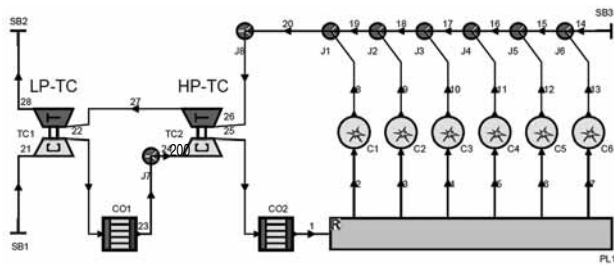


Рис. 15. Термодинамическая модель установки с двухступенчатой системой наддува и конфигурация двигателя

в котором возможности снижения выбросов NO_x изучались за счет варьирования таких параметров, как фазы газораспределения, момент впрыска топлива, а также максимальное давление сгорания (PFP — peak firing pressure).

Во-первых, была выполнена оценка возможного усиления цикла Миллера за счет более раннего открытия впускного клапана при постоянном максимальном давлении сгорания, а также необходимого для этого давления наддува. Графики открытия впускного клапана показаны на рис. 16, а соответствующее изменение показателей двигателя — на рис. 17. Каждый из показателей приводится в безразмерном виде (относительно соответствующего показателя базовой конфигурации). При увеличении опережения открытия впускного клапана снижаются расход топлива и выбросы NO_x , давление наддува при этом повышалось для поддержания постоянства максимального давления сгорания. Однако при увеличении IVC свыше 30 град ПКВ начинает возрастать расход топлива, хотя выбросы NO_x продолжают снижаться.

Причина заключается в росте количества воздуха, перетекающего со стороны всасывания

Таблица 3

Характеристики опытного двигателя

Размерность двигателя, мм	165×265
Частота вращения двигателя, об/мин	1200
Номинальная мощность, кВт/цил.	125
p_{me} , МПа	2,21
CR	15,55

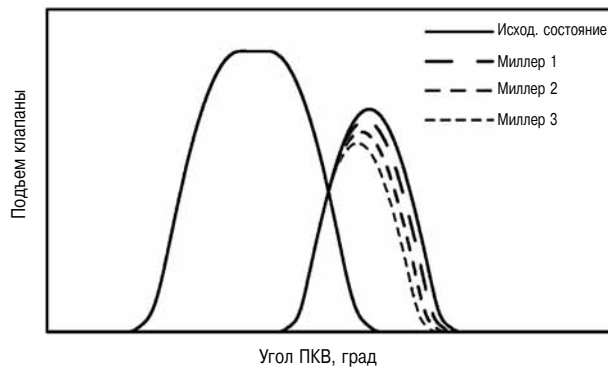


Рис. 16. Изменение углов газораспределения

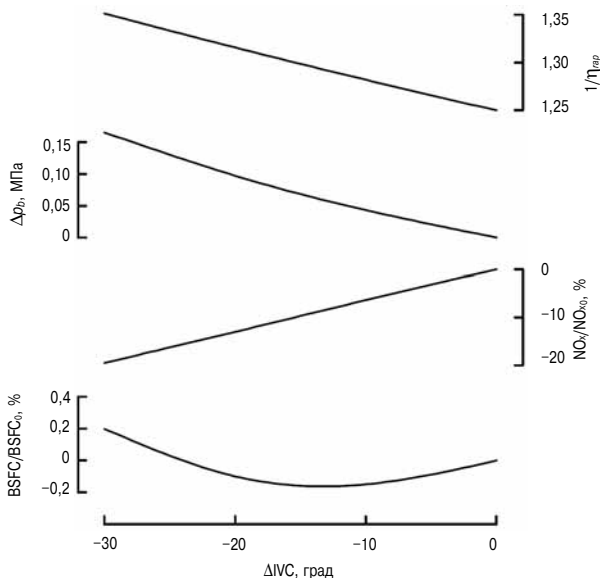


Рис. 17. Изменение расхода топлива и выбросов NO_x при варьировании IVC

на выпуск в период перекрытия клапанов. Работа турбокомпрессора при этом возрастает, но «лишний» воздух в процессе сгорания не участвует, в то время как необходимое давление наддува продолжает увеличиваться.

В следующем эксперименте было увеличено максимальное давление сгорания на 5 МПа. На рис. 18 показано влияние роста давления наддува на показатели двигателя (по результатам моделирования), а на рис. 19 приведены графики изменения давления и температуры в цилиндре во времени. По мере роста давления воздушного заряда увеличивается масса оставшегося в цилиндре воздуха. Из-за роста теплоемкости находящегося в цилиндре газа степень снижения выбросов NO_x значительно возрастает (рис. 20). Хотя максимальное давление сгорания при росте давления наддува повышается, точка максимума приближается к ВМТ, поэтому повышение давления за счет сгорания становится неочевидным.

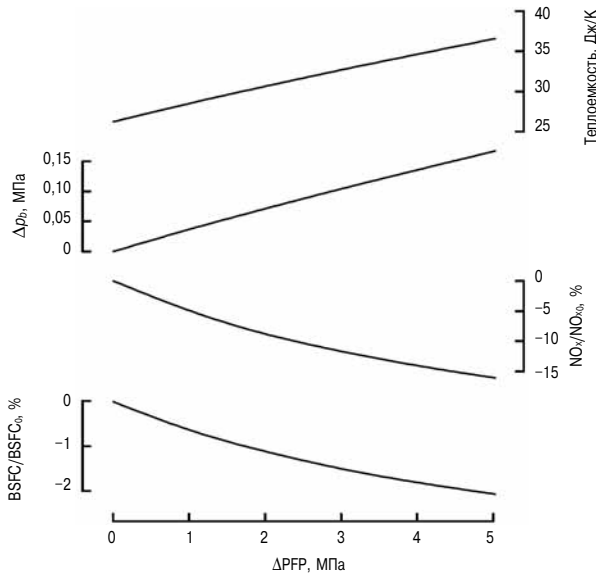


Рис. 18. Изменение расхода топлива и выбросов NO_x при увеличении PFP

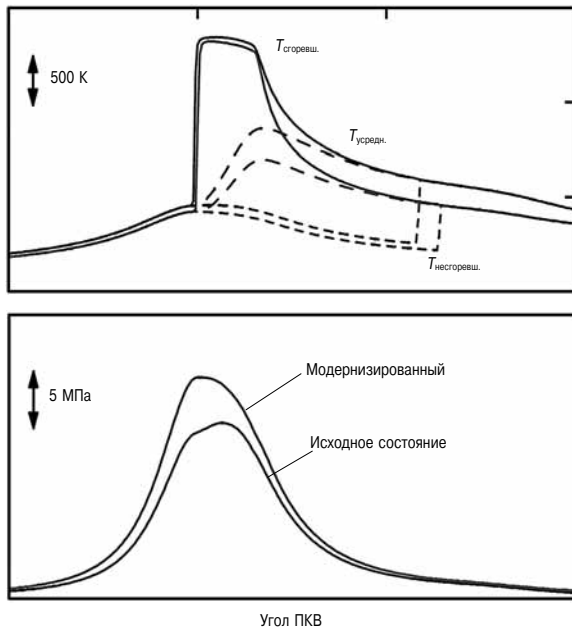


Рис. 19 Изменение давления и температуры в цилиндре

В нашем случае обе упомянутые выше технологии — усиленный цикл Миллера и повышение максимального давления сгорания — были применены одновременно. Влияние угла опережения подачи топлива на баланс между выбросами NO_x и расходом топлива показано на рис. 21. Каждая характеристика приведена в безразмерном виде, причем за номинал выбрано значение соответствующее показателям двигателя в конфигурации для Tier 1. За счет использования усиленного цикла Миллера совместно с повышением максимального давления сгорания удалось обеспечить снижение выбросов NO_x на

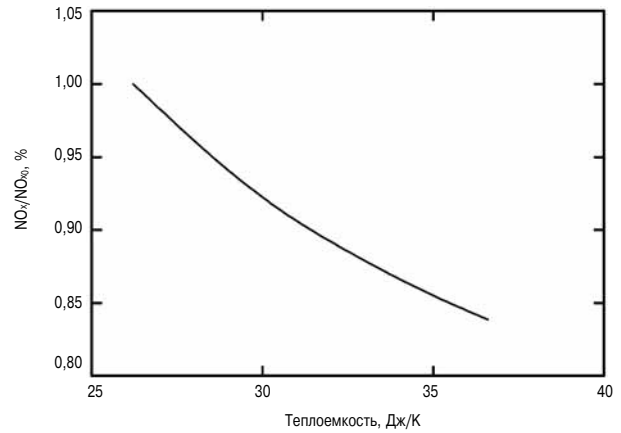


Рис. 20 Снижение выбросов NO_x в зависимости от теплоемкости заряда

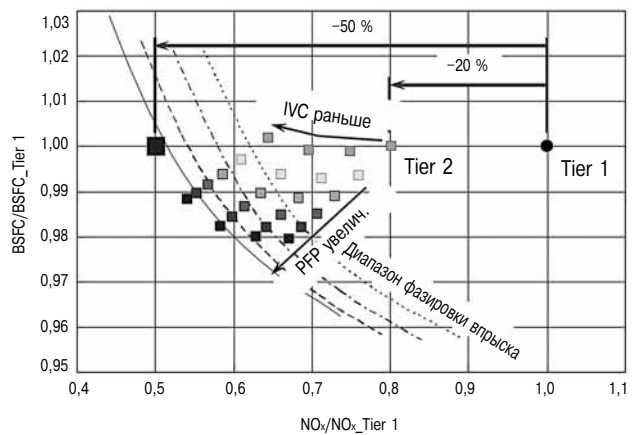


Рис. 21 Оптимизация компромисса между выбросами NO_x и расходом топлива

46 % по сравнению с уровнем Tier 1, при этом снизился и расход топлива (примерно на 1 %). Таким образом выбросы NO_x могут быть уменьшены почти на 50 % по сравнению с требованиями Tier 1 без ухудшения показателей расхода топлива только за счет оптимизации фазовых углов впрыска.

В качестве средства дальнейшего снижения выбросов NO_x рассматривалась рециркуляция отработавших газов (EGR). Основной технологии EGR является снижение температуры в цилиндре за счет подачи на впуск отработавших газов, имеющих высокую теплоемкость благодаря присутствию трехатомных компонентов — паров воды и двуокиси углерода. Кроме того, отработавшие газы вытесняют из цилиндра часть воздушного заряда, что ведет к снижению содержания кислорода и соответствующему уменьшению скорости сгорания. В то же время использование EGR в судовых двигателях потребует решения ряда технических проблем, таких как влияние на работу дизеля серы и других вредных примесей, а также увеличение весогабаритных

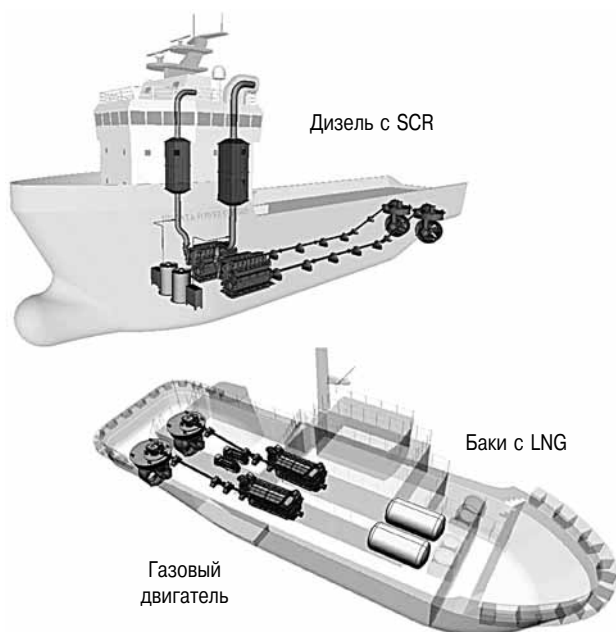


Рис. 22 «Зеленое» судно будущего

показателей установки. Выбор усиленного цикла Миллера в сочетании с двухступенчатым турбонаддувом и технологией EGR при условии оптимизации рабочих параметров позволит не только уменьшить выбросы NO_x , но и снизить расходы на техобслуживание системы очистки отработавших газов.

Предложение по судовой силовой установке

Предложены технологии, позволяющие обеспечить соответствие выбросов NO_x главных судовых двигателей требованиям IMO Tier 3. Обеспечение необходимыми для работы системы SCR и газового двигателя расходными материалами — мочевиной и газом — должно быть организовано за счет изменения существующей портовой инфраструктуры.

На рис. 22 показаны примеры возможной конфигурации судна снабжения с главными судовыми дизелями, оборудованными системами SCR, а также аналогичного судна с газовыми двигателями. Реализация силовой установки с высоким термодинамическим КПД, разработанной в рамках данного исследования, позволяет ми-

нимизировать размеры машинного помещения, топливных баков со сжиженным газом и системы SCR, а также существенно повысить эффективность работы установки.

Выводы

Разработаны методы снижения вредных выбросов, обеспечивающие выполнение требований новых, более жестких экологических стандартов. Три подобных метода были подробно исследованы с помощью компьютерного моделирования, а также натурных испытаний, проведенных на стенде и на борту судна. Прделанная работа позволяет сделать следующие выводы:

➤ Созданная в рамках данной темы компактная система SCR обеспечивает снижение выбросов NO_x более чем на 80 %. Это означает, что данная технология способна обеспечить выполнение требований IMO Tier 3 без привлечения дополнительных технических средств.

➤ Разработан двухтопливный двигатель, способный в газовом режиме удовлетворять требования IMO Tier 3 по вредным выбросам и обеспечить достаточную приемистость при резких изменениях нагрузки. Двигатель также сохраняет возможность работы на дизельном топливе, при этом система его управления обладает функциями резервирования.

➤ Использование усиленного цикла Миллера в сочетании с двухступенчатым турбонаддувом позволяет обеспечить 50-процентное сокращение выбросов NO_x без ухудшения топливной экономичности, однако для выполнения требований IMO Tier 3 этого недостаточно. Поэтому в качестве одного из вариантов можно рассматривать дополнение названных выше мероприятий системой EGR, однако надежность и долговечность этой системы нуждаются в подтверждении.

Литература

1. Tagai, T., et al. «Emission control technology by Niigata, the clean marine diesel engine for low speed, medium speed and high speed» 26th CIMAC World Congress. 2010. Paper №. 136.
2. Yaguchi, K., et al. «High NO_x Reduction System Mounted on 500GT Class Vessel» ISME Yokohama '95. 1995.

**РАЗРАБОТКА ФИЛЬТРА ЧАСТИЦ
С РЕГЕНЕРАТОРОМ ДЛЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ**

*Minoru Tsuda, Dai Yamanishi, Kazuyuki Maeda,
National Fisheries University, Япония*

Реферат

Выбросы твердых частиц (PM) с отработавшими газами дизелей, оказывают вредное воздействие на органы дыхания. Поэтому предельно допустимые величины выбросов PM строго регламентируются, а разного рода устройства для снижения содержания PM в отработавших газах широко используются в автомобильных двигателях. Однако автомобильные устройства каталитического типа в судовых условиях неприменимы. Дело в том, что в главных судовых дизелях обычно используются тяжелые топлива (HFO — heavy fuel oil) с большим содержанием серы. Частицы, содержащиеся в отработавших газах главных судовых дизелей, состоят из сухой сажи, растворимых органических фракций (SOF — soluble organic fraction) и сульфатов. Международная морская организация (ИМО) предложила правила, ограничивающие содержание серы в топливе. Ввод данных правил в действие будет означать снижение допустимого содержания серы в топливе с 3,5 до 0,5 %, начиная с 2020 г., а в зонах контролируемых выбросов (ECA), — с 1,0 до 0,1 %, начиная с 2015 г. Снижение содержания серы в топливе приведет к существенному уменьшению выбросов PM от морских судов, однако количество сухой сажи и SOF при этом не изменится. Настоящая работа посвящена исследованию влияния фильтра частиц на показатели судового двигателя. В ходе работы в выпускной тракт высокооборотного судового дизеля был установлен разработанный фильтр частиц (DPF — diesel particulate filter) с регенератором, и проведено экспериментальное исследование его влияния на снижение выбросов PM и показатели двигателя. В общих чертах план исследования выглядел следующим образом.

1. Исследование влияния DPF на выбросы PM. Фильтрующий материал помещался в выпускной тракт двигателя на участке между пробоотборником PM и смесительным каналом. Сравнивались компоненты PM при наличии и при отсутствии фильтрующего материала. В экспериментах были задействованы два двигателя: малооборотный главный судовой двигатель учебного судна «Seiun Maru» мощностью 7722 кВт, работающий на HFO, и высокооборотный судовой двигатель мощностью 103 кВт, установленный в лаборатории Национального Университета Рыболовства (National Fisheries University), работающий на газойле и флотском мазуте (MDO — Marine Diesel Oil).

2. Эффективная температура и время, необходимое для регенерации фильтра. Была проведена

серия экспериментов, в которых варьировались время и температура при регенерации фильтра в DPF. Собранные с фильтра отложения помещались в тигель при заданной температуре, после чего фиксировалось время, затраченное на регенерацию фильтра.

3. Влияние разработанного фильтра DPF на выброс частиц. Фильтр DPF с регенератором был подключен к выпускному тракту высокооборотного судового дизеля; исследовалось влияние данного устройства на уровень выбросов частиц и рабочие параметры двигателя.

4. Регенерация DPF. Был разработан DPF с нагревателем для удаления PM, скапливающихся на фильтре.

На основании проведенных исследований авторы пришли к следующим практическим выводам.

➤ Фильтр DPF способен удалять основную часть сухой сажи, однако количество SOF и сульфатов в отработавших газах остается прежним. Причина заключается в том, что температура регенерации DPF должна быть достаточно высокой, а при такой температуре SOF и сульфаты также газифицируются.

➤ Экспериментально определена оптимальная температура, при которой гарантированно происходит полная регенерация фильтра в течение нескольких первых минут работы при минимальном расходе электроэнергии на его нагрев. Эта температура составляет 650 °С. Более низкая температура удлиняет период регенерации, более высокая — сокращает период регенерации, однако расход электроэнергии и соответственно ее стоимость возрастает.

➤ DPF удаляет большую часть сухой сажи, а также некоторую часть SOF и сульфатов, однако его загрязнение увеличивает удельный расход топлива (SFC) дизеля. Увеличение SFC составляет порядка 3 % на каждые 10 кПа перепада давления на фильтре.

➤ Нагрев фильтра до температуры не менее 650 °С обеспечивает полное выгорание PM. Это создает возможность непрерывной регенерации DPF без необходимости замены фильтра.

1. Введение

Частицы (PM), содержащиеся в отработавших газах главных судовых дизелей, состоят из сухой сажи, растворимых органических фракций и сульфатов. Состав PM, присутствующих в отработавших газах судовых и стационарных дизелей, в общем случае зависит от типоразмера двигателя, его скорости, а также качества используемого топлива [1–4]. Компоненты PM оказывают вредное воздействие на органы дыхания, поэтому предельно допустимые величины выбросов PM строго регламентируются. Это

вынуждает производителей автомобильных двигателей устанавливать разного рода устройства для очистки отработавших газов от частиц. Однако в судовых условиях каталитические очистители неприменимы, поскольку топливо для главных судовых дизелей обычно содержит большое количество серы, вызывающей деградацию катализатора.

С 1 января 2016 г. предельно допустимое значение эмиссии NO_x в зонах контролируемых выбросов (ECA) должно быть снижено на 80 % по отношению к нормативу IMO Tier 1. Одним из наиболее эффективных средств для достижения столь радикального снижения выбросов окислов азота является использование технологии селективного каталитического восстановления (SCR), в процессе которой NO_x в присутствии катализатора восстанавливаются до N_2 и H_2O . Однако существует опасность засорения катализатора содержащимися в отработавших газах сажей и SOF, которые могут оседать на поверхности катализатора, уменьшая ее эффективную площадь. Следовательно возникает необходимость создания фильтра РМ (DPF) для судовых систем каталитического восстановления, который не только предотвращает загрязнение атмосферы частицами, но и повышает эффективность работы катализатора.

Целью настоящего исследования было создание для судовых дизелей фильтра DPF с функцией регенерации. Вначале была проверена эффективность снижения РМ с помощью DPF, для чего фильтрующий материал помещался в выпускной тракт двигателя между пробоотборником частиц и смесительным каналом.

Анализировался состав РМ в отработавших газах при наличии и отсутствии фильтрующего материала. Для экспериментов были использованы два типа двигателей: малооборотный главный судовой двигатель учебного судна «Seiun Maru» мощностью 7722 кВт, работающий на HFO, и высокооборотный судовой двигатель мощностью 103 кВт, установленный в лаборатории Национального Университета Рыболовства (National Fisheries University), работающий на газойле и флотском мазуте (MDO). На этих двигателях был проведен ряд экспериментов по исследованию эффективности фильтра РМ в судовых условиях. Кроме того, был проведен эксперимент по изучению способности фильтра РМ к регенерации. В ходе данного эксперимента фильтр подвергался нагреву, причем температура и длительность нагрева менялись. Дальнейшие эксперименты проводились с вновь разработанным фильтром DPF, который периодически, после регенерации (сжигания РМ), соединялся с выпускным трактом высокооборотного судового дизеля, при этом

изучалось его влияние на снижение выбросов РМ и показатели двигателя. На основании результатов этих экспериментов были разработаны рекомендации по выбору конфигурации DPF для установки на судах.

2. Очистка газов от частиц с помощью DPF

Для проверки качества очистки отработавших газов от РМ с помощью DPF последний был помещен между пробоотборником частиц (расположенном в выпускном тракте стендового двигателя) и смесительным каналом. В ходе испытаний состав РМ на выходе из двигателя сравнивался для двух вариантов — при наличии и при отсутствии фильтрующего материала в выпускном тракте.

2.1. Экспериментальная установка

Схема системы измерения РМ и расположение DPF показаны на рис. 1.

Отработавшие газы поступают в смесительный канал, расположенный горизонтально. Отбор пробы отработавших газов в смесительный канал осуществляется через систему труб с двойными стенками, которые подогреваются таким образом, чтобы их температура была равна температуре выпускной трубы. При выборе конструкции системы труб и температуры их нагрева ставилась задача свести к минимуму возможность оседания SOF, составляющих компоненты несгоревшего

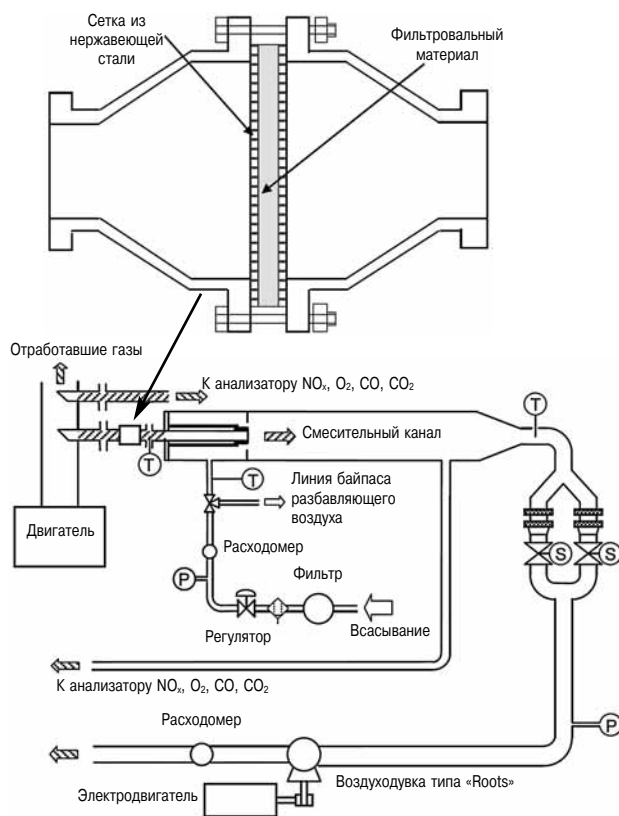


Рис. 1. Схема системы измерения РМ и расположение DPF

Таблица 1

Основные технические характеристики высокооборотного двигателя

Число цилиндров	4
Диаметр цилиндра, мм	110
Ход поршня, мм	125
Максимальная мощность, кВт	103
Скорость, об/мин	2400
Макс, p_{me} , МПа	1,1
Отверстия распылителя	5×0,32 мм



Рис. 2. Судно «Seiun Maru»

Таблица 2

Основные технические характеристики «Seiun Maru»

Валовый регистровый тоннаж, т	5890
Длина, м	116,0
Главный двигатель	MAN B&W
Максимальная мощность, кВт	7722
Скорость двигателя, об/мин	148
Диаметр цилиндра, мм	500
Ход поршня, мм	1620
Макс, p_{me} , МПа	1,64

масла и топлива (основная часть РМ), к стенкам соединительной линии в смесительном канале. Основные характеристики экспериментального высокооборотного судового двигателя NFU приведены в табл. 1. Нагрузка двигателя и его скорость могут задаваться согласно плану эксперимента.

Таблица 3

Свойства топлив

Тип двигателя	Высокооборотный		Низкооборотный
	Газойль	MDO	HFO
Вид топлива	Газойль	MDO	HFO
Плотность, кг/м ³	824,7	879,3	983,0
Кинематическая вязкость, мм ² /с	2,744 (40 °С)	3,193 (40 °С)	359,3 (40 °С)
C, %масс.	86,3	87,5	86,8
H, %масс.	13,7	11,9	10,2
S, %масс.	0,0007	0,54	2,66
N, %масс.	—	0,02	0,23

На рис. 2 показано учебное судно «Seiun Maru», принадлежащее Национальному Институту Подготовки Морских Инженеров, с двухтактным главным двигателем, на борту которого выполнялась часть программы испытаний. Характеристики судна приведены в табл. 2. В табл. 3 приводятся основные характеристики использованных топлив.

2.2. Методика испытаний

В начале определялись характеристики выбросов РМ высокооборотного судового двигателя при работе на газойле, затем определялось снижение выбросов РМ за счет установки фильтра DPF, для чего выполнялись измерения при наличии и отсутствии фильтрующего материала. Анализ РМ производился путем экстракции в аппарате Сокслета. Затем исследования были выполнены по той же программе на малооборотном судовом дизеле, работающем на HFO.

2.3. Результаты экспериментов

На рис. 3 приведены количество выброшенных частиц и их состав при наличии и отсутствии фильтра DPF, на трех различных значениях нагрузки двигателя. Поскольку газойль не содержит серу (см. табл. 3), частицы в данном случае состоят только из SOF и сажи. На рис. 3, а (нагрузка двигателя 25 %) при отсутствии DPF частицы состоят, в основном, из SOF. По мере роста нагрузки содержание сажи в составе РМ при отсутствии DPF возрастает. Возможное объяснение состоит в том, что при малых нагрузках в отработавших газах содержится относительно большое количество несгоревших компонентов топлива из-за низкой температуры. С ростом нагрузки увеличивается топливоподача, поэтому растет количество несгоревшего топлива из-за отклонения условий сгорания от идеальных. Если рассмотреть состав РМ при наличии DPF, то окажется, что установка DPF почти не меняет содержания SOF в отработавших газах, но основная часть сажи оказывается отфильтрованной. По-видимому, это происходит из-за того что температура возгонки компонентов топлива, составляющих основную часть SOF, ниже 350 °С.

Как показано на рис. 1, DPF и труба отбора отработавших газов нагреваются примерно до той же температуры, что и выпускная труба, поэтому SOF проходят через DPF в газообразном состоянии. Это обстоятельство весьма существенно с точки зрения применения DPF в судовых условиях, поскольку, в отличие от автомобильных двигателей, где в составе РМ преобладает сажа, в судовых дизелях основным компонентом РМ являются SOF.

На рис. 4 показаны относительные значения выбросов РМ при наличии и отсутствии фильтра DPF в малооборотном судовом дизеле, работаю-

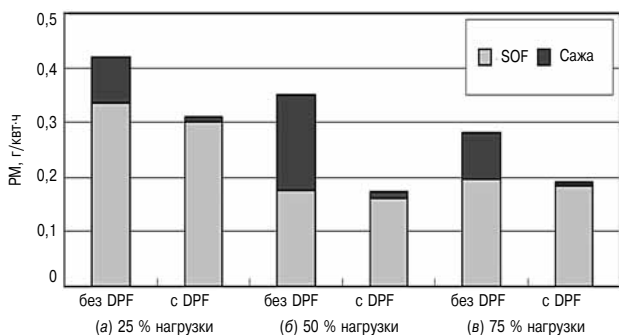


Рис. 3. Изменение количества выброшенных частиц и их состава при наличии и отсутствии DPF на различных режимах работы двигателя

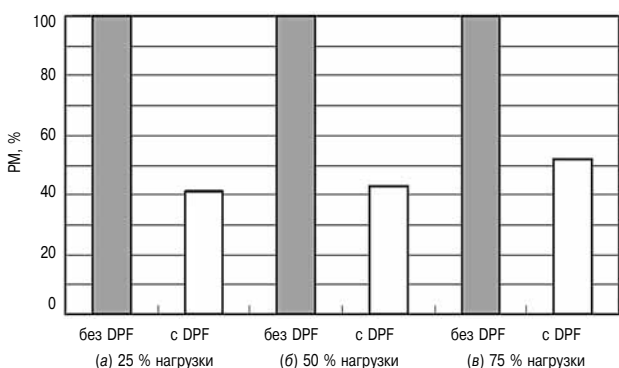


Рис. 4. Влияние DPF на выбросы PM малооборотного судового дизеля, работающего на тяжелом топливе

щем на тяжелом топливе. Установка DPF снижает выбросы PM примерно наполовину.

На рис. 5 показано изменение состава PM в отработавших газах малооборотного судового дизеля в зависимости от нагрузки. Большая часть сажи удаляется фильтром DPF при любой нагрузке. В то же время основная часть SOF и около половины сульфатов проходят через фильтр DPF и выбрасываются в атмосферу. Сообщений о снижении содержания сульфатов в отработавших газах с помощью DPF обнаружить не удалось, так что выполненное

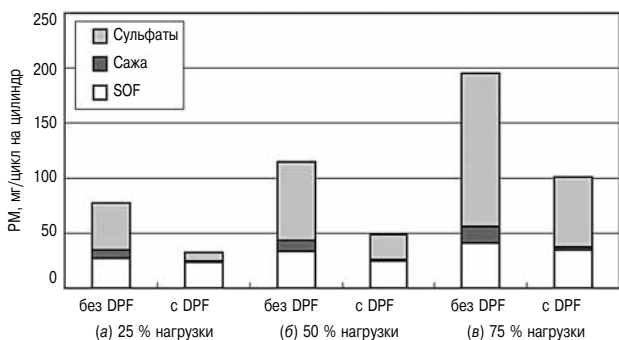


Рис. 5. Изменение выбросов PM и их состава на различных режимах работы малооборотного судового дизеля, работающего на тяжелом топливе, при наличии и отсутствии DPF

исследование содержит первое экспериментальное подтверждение такой возможности. В предстоящих исследованиях, касающихся очистки отработавших газов судовых дизелей от PM, следует сосредоточить внимание на поиске эффективного способа удаления SOF и сульфатов, поскольку обычный DPF, очевидно, с этой задачей не справляется.

3. Температура, необходимая для эффективной регенерации

С целью нахождения оптимальных условий регенерации DPF были проведены опыты, в которых менялись температура и длительность подогрева фильтра в тигле. Результаты этих опытов представлены на рис. 6, где показаны фильтры высокооборотного судового дизеля, работающего при нагрузке 75 %. Снимки сделаны через равные промежутки времени, причем исходное количество частиц, оставшихся на фильтре, и их состав во всех случаях одинаковы. Степень почернения фильтра пропорциональна количеству сажи в PM. При температуре 600 °C цвет фильтра по мере нагрева меняется постепенно и незначительно, при температуре 650 °C поверхность фильтра начинает бледнеть через три минуты, а через девять минут чернота полностью исчезает. При 700 °C чернота почти полностью исчезает за минуту, а при 800 °C это время составляет менее одной минуты. Следовательно, время регенерации можно сократить, повышая температуру нагрева.

Зависимость выгорания PM от времени показана на рис. 7. При температуре 400–500 °C максимальное выгорание (снижение содержания PM) составляет порядка 30 %, и этот процесс заканчивается в течение примерно одной минуты. При использовании газойля в составе PM содержатся только SOF и сажа, поскольку топливо не

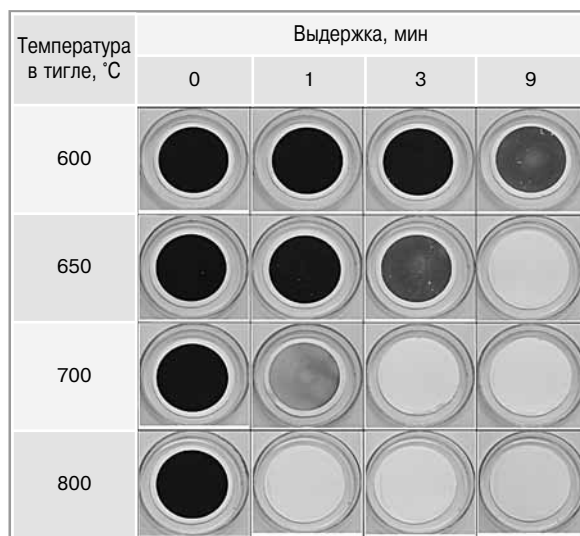


Рис. 6. Регенерация фильтра при различных температурах

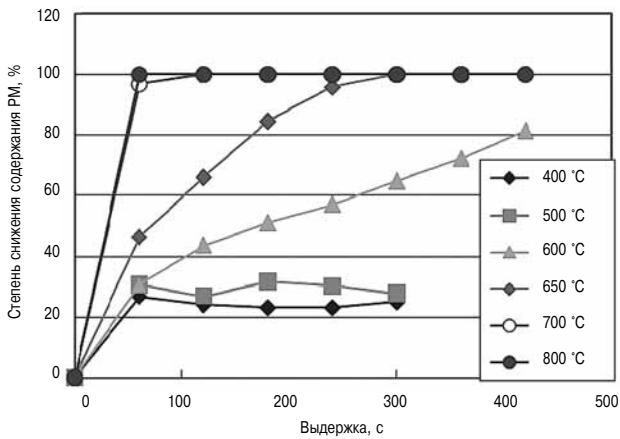


Рис. 7. Степень выгорания РМ при различных условиях регенерации

содержит серы (см. табл. 3). Так как SOF состоят, в основном, из несгоревших компонентов топлива, температура перегонки которых ниже 350 °С, предполагается, что SOF в составе РМ, будут испаряться при температуре ниже 500 °С. Очевидно, однако, что РМ содержит и другие компоненты, которые по прошествии времени исчезают только при температуре 600 °С и выше. Предполагается, что эта часть РМ представляет собой сажу, образующуюся вследствие отклонения условий сгорания топлива от идеальных. При достаточно длительном нагреве эта сажа выгорает; ее количество уменьшается примерно на 80 % после семиминутного нагрева. При повышении температуры в тигле до 650 °С степень выгорания сажи возрастает, и после пятиминутного нагрева масса частиц удаляется полностью. И наконец, при 700 °С и выше время полного удаления частиц не превышает одной минуты.

На рис. 8 показана зависимость степени выгорания РМ от температуры при 10-минутной выдержке фильтра в тигле. Фракцией, которая выгорает при температуре ниже 500 °С, является предположительно SOF. Часть сажи выгорает при температуре от 500 до 650 °С, а полностью РМ

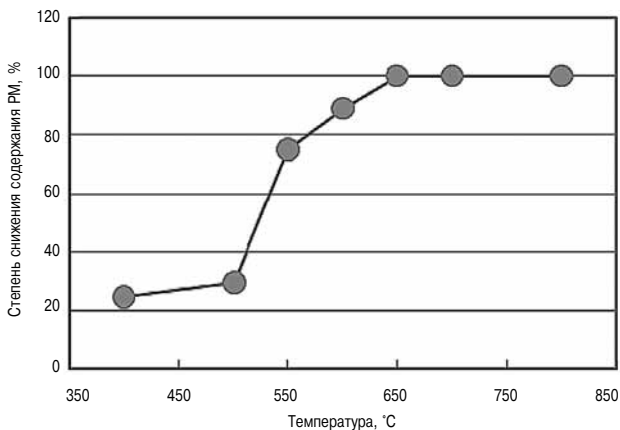


Рис. 8. Степень выгорания РМ в зависимости от температуры регенерации

выгорают при температуре 650 °С и выше. Таким образом, можно считать, что для регенерации DPF достаточно температуры порядка 700 °С.

4. Эффективность разработанного фильтра с точки зрения очистки отработавших газов от РМ

В данной серии экспериментов DPF с встроенным электронагревателем устанавливался в выпускной тракт высокооборотного судового двигателя. Исследовалось влияние данного устройства на степень очистки газов от РМ и на показатели двигателя. Схема DPF, разработанного NFU для промышленного применения, показана на рис. 9. Отработавшие газы поступают в DPF с левого (на рисунке) торца, т. е. со стороны двигателя или выпускной трубы. Они заполняют пространство между нагревателем и фильтром, и выходят через фильтр. При этом фильтр очищается от содержащейся в отработавших газах сажи, хотя, как показано на рис. 3, основная часть SOF проходит через этот фильтр. По мере засорения фильтра его фильтрующая способность падает. В определенный момент срабатывает переключающая заслонка, и поток газов направляется в нижний фильтр. Одновременно включается электронагреватель верхнего фильтра, который сжигает скопившуюся там сажу, то есть работает в режиме регенерации. В это время нижний фильтр работает в режиме очистки газов. Затем, как только верхний фильтр готов к

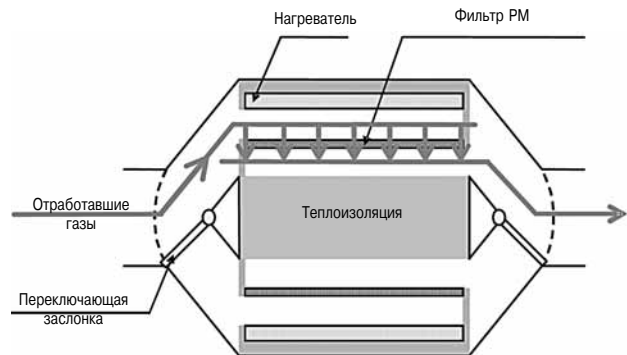


Рис. 9. Схема фильтра DPF для промышленного применения

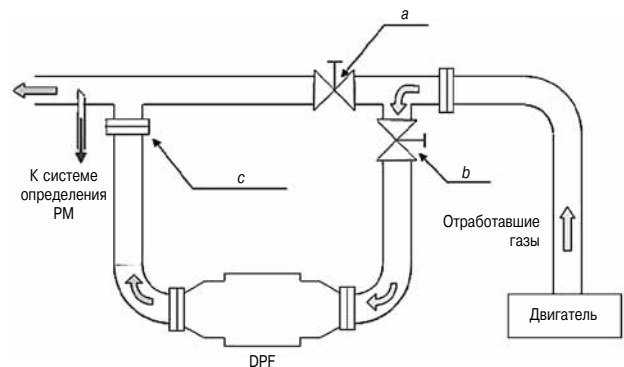


Рис. 10. Схема подключения фильтра DPF

работе, заслонка перебрасывается, и поток газов снова переключается на верхний фильтр. Таким образом, процесс носит циклический характер.

Схема подключения DPF к дизелю показана на рис. 10. DPF находится в выпускной трубе за турбокомпрессором. При необходимости отработавшие газы могут быть направлены в обход фильтра (через байпас) с помощью переключающей заслонки.

Эффективность DPF иллюстрируется фотографиями на рис. 11. На фото слева показаны РМ, собранные при включенном байпасе (т. е. из неочищенных газов), на фото справа — РМ, собранные из газов, прошедших очистку. На верхнем фото справа видны РМ, собранные после только что установленного нового фильтра, на нижнем фото — РМ, собранные после фильтра, прошедшего регенерацию. В обоих случаях фильтр очищает поток газов от РМ практически полностью.

На рис. 12 показано изменение давления за турбиной во времени при циклической реге-

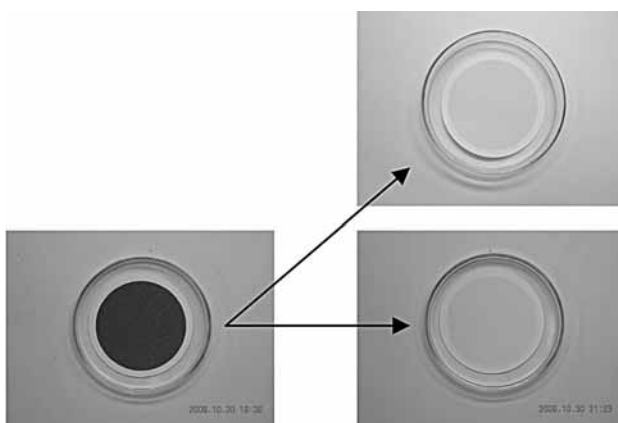


Рис. 11. РМ собранные при наличии DPF (справа) и при его отсутствии (слева)

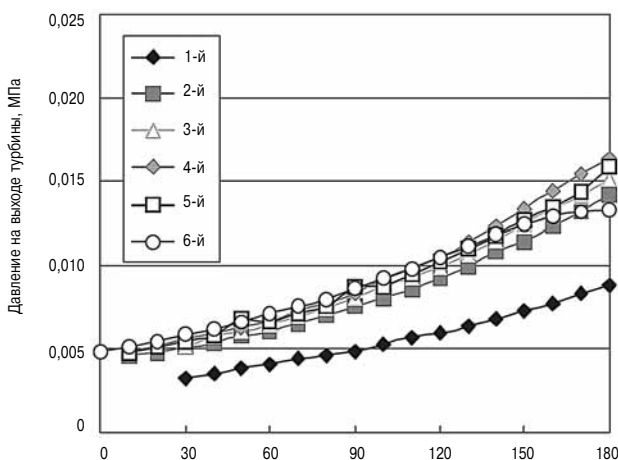


Рис. 12. Изменение давления за турбиной во времени при циклической регенерации DPF

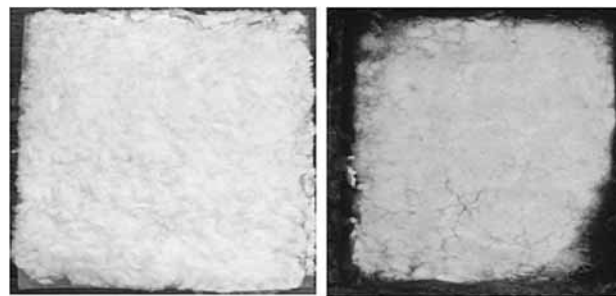


Рис. 13. Фильтр до и после регенерации

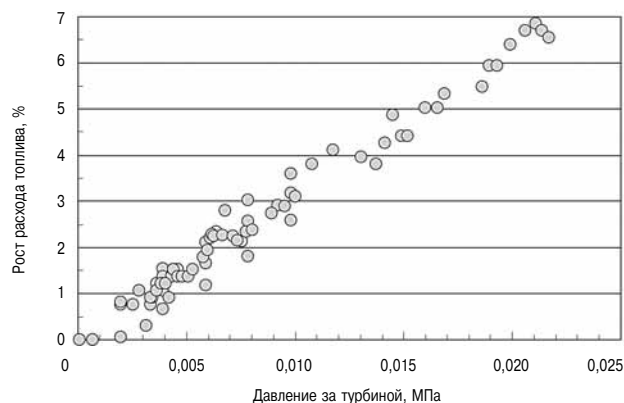


Рис. 14. Увеличение SFC с ростом давления за турбиной

нерации DPF. По мере нарастания отложений РМ на поверхности фильтроэлемента давление за турбиной растет. После регенерации давление за турбиной снижается, но не до исходного уровня. Однако после третьего цикла регенерации фильтр практически возвращается к исходному состоянию. Иначе говоря, предложенная система обеспечивает полное восстановление фильтра.

На рис. 13 показаны фотографии фильтрующего материала DPF до и после регенерации, на которых видны небольшие отложения по периметру фильтра. По-видимому, эти отложения образовались потому, что температура вокруг фильтра была меньше 600 °С из-за недостаточного прогрева.

На рис. 14 показана зависимость между давлением за турбиной и удельным расходом топлива (SFC). Рост давления за турбиной вследствие засорения DPF сажей ведет, естественно, к ухудшению параметров работы двигателя и, следовательно, к росту расхода топлива.

5. Регенерация DPF

Результаты описанных выше исследований были использованы при разработке новой модели фильтра DPF с нагревателем-регенератором. Этот фильтр (расположенный в выпускном тракте двигателя) был поставлен на испытания.

Схема нового DPF с нагревателем-регенератором показана на рис. 15. Внутри DPF находятся

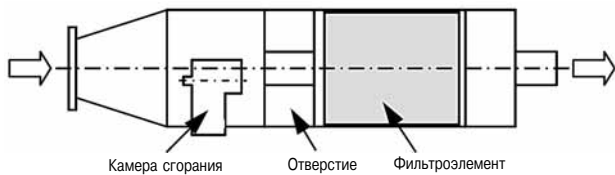


Рис. 15. Схема нового DPF с нагревателем-регенератором

камера сгорания нагревателя и отсек фильтра. Отработавшие газы поступают в камеру сгорания с левой (на рисунке) стороны, проходят через отверстие во внутренней стенке и попадают в фильтр. Фильтр выполнен из керамического материала, используемого в автомобильных системах некаталитической очистки отработавших газов. Когда на фильтре скопится количество частиц, достаточное для того, чтобы заметно повлиять на рабочие параметры двигателя, в камеру сгорания подается топливо, которое при горении сжигает РМ, осевшие на фильтре.

Фильтр DPF новой конструкции, врезанный в выпускную систему двигателя, показан на рис. 16. Этот фильтр имеет только один газовый тракт, что упрощает конструкцию и обеспечивает ее компактность.

На рис. 17, а и б показано, как уменьшается количество РМ в отработавших газах при использовании DPF в двигателях, работающих на газойле и на тяжелом топливе (MDO). При работе на газойле DPF удаляет примерно 70 % РМ, при работе на MDO — порядка 84 %. Эта разница объясняется тем, что в последнем случае удаляется также часть сульфатов.

На рис. 18 показаны процессы изменения противодавления на выпуске, приращения расхода топлива и температуры на выходе DPF при нагрузке двигателя 75 %. По мере накопления РМ в DPF противодавление выпуску растет, соответственно растет и расход топлива. Через



Рис. 16. Фильтр DPF новой конструкции, врезанный в выпускную систему двигателя

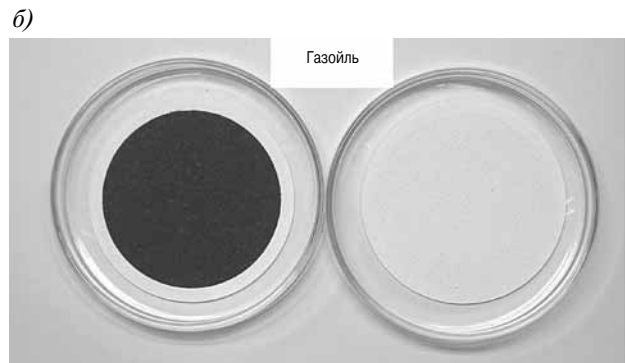
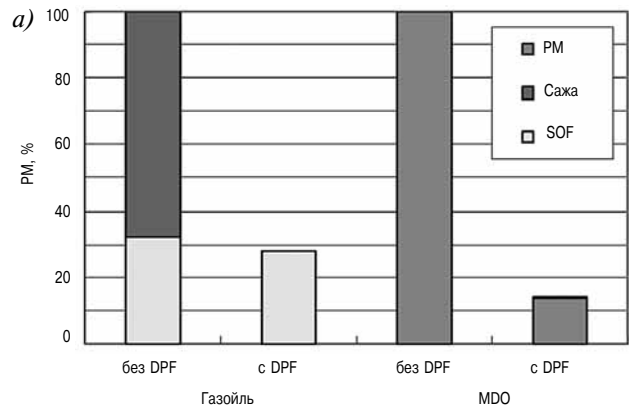


Рис. 17. Степень очистки газов от РМ при работе на газойле и на MDO

160 минут после пуска дизеля нагрузка была снижена до 25 % и выполнена регенерация фильтра. Противодавление выпуску при этом упало, так как уменьшился объем проходящих через DPF газов. Быстрое падение давления на выпуске наблюдалось после того, как температура на выходе DPF достигла 700 °С. Это вызвано выгоранием РМ на фильтре (см. рис б). Примерно на 240-й минуте испытаний двигатель был снова нагружен до 75 %. При этом противодавление выпуску и приращение расхода топлива вернулись к исходным значениям. Это подтверждает возможность регенерации фильтра на работающем двигателе.

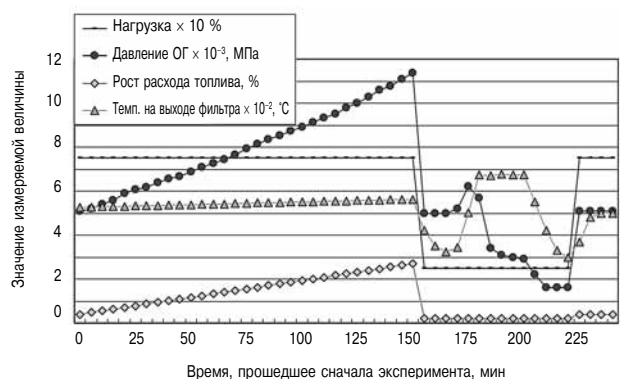


Рис. 18. Изменение во времени давления на выпуске, роста расхода топлива и температуры на выходе DPF

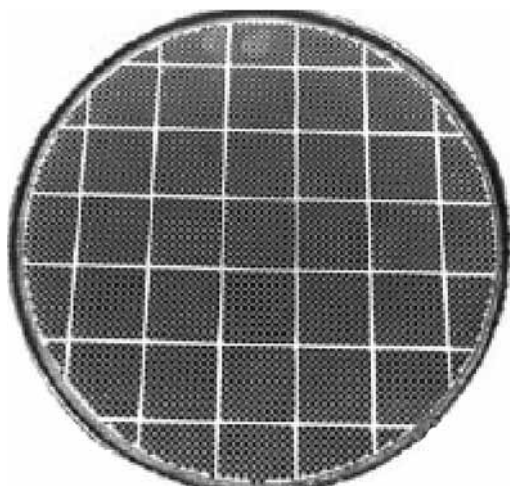


Рис. 19. Фильтр после регенерации

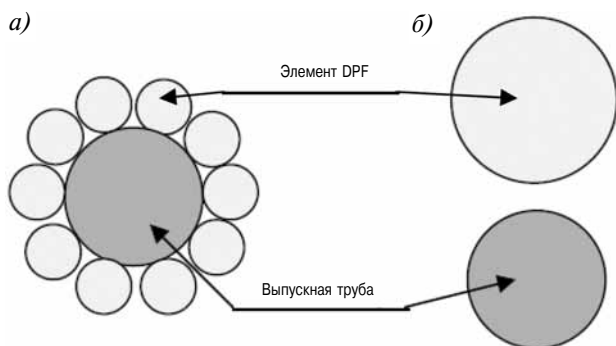


Рис. 20. Вариант установки DPF вокруг дымовой трубы судна

Вид фильтра после регенерации показан на рис. 19.

В процессе регенерации сажа полностью выгорает, и открывается чистая керамическая поверхность. Однако пламя горелки ориентировано преимущественно по оси фильтра, что несколько снижает эффективность регенерации. Это является определенным недостатком данной конструкции, который в дальнейшем должен быть устранен.

На рис. 20 показаны возможные варианты установки системы DPF относительно дымовой трубы судна. Если речь идет о крупнотоннажном судне (а), оптимальным представляется вариант установки нескольких фильтров вне дымовой трубы. При этом габариты установки оказываются минимальными, а DPF легко доступны для осмотра и ремонта. Во время плавания в открытом море используется основная дымовая труба, а

систему с элементами DPF можно использовать во время плавания в прибрежных водах. На каботажном судне малого водоизмещения (б) предпочтительнее использовать единственный фильтр в линии выпуска с байпасом.

6. Выводы

На основании результатов настоящего исследования можно сделать следующие выводы.

➤ Фильтр DPF способен удалять основную часть сухой сажи, но при этом в отработавших газах остаются SOF и сульфаты. Это связано с высокой температурой отработавших газов, проходящих через DPF, при которой SOF и сульфаты остаются в газообразном состоянии.

➤ Для полной регенерации фильтра в течение нескольких минут при минимальном расходе электроэнергии оптимальная температура 650 °С. Более низкая температура увеличивает период регенерации, что нежелательно. Более высокая температура сокращает период регенерации, однако расход электроэнергии и соответствующие затраты возрастают.

➤ DPF удаляет большую часть сухой сажи, а также некоторую часть SOF и сульфатов, поэтому его загрязнение увеличивает удельный расход топлива (SFC). Это увеличение составляет порядка 3 % на каждые 10 кПа перепада давления на фильтре.

➤ Разработан DPF с нагревательным устройством и фильтром. Внутри DPF находятся камера сгорания нагревателя и отсек фильтра. Поскольку в этой схеме используется только один газовый тракт, она оказалась наиболее простой и компактной, к тому же она обеспечивает возможность регенерации при работающем двигателе.

Литература

1. Maeda K. et al. Improvement in Measurement of Particulate Emission on Voyage, CIMAC Congress 2001 Hamburg, p.562–569 (2001).
2. Maeda K. et al. Measurement of PM Emission from Marine Diesel Engines During Voyage, Proc. of International Cooperation on Marine Engineering Systems (ICMES 2003), at the Helsinki University of Technology (HUT) Ship Laboratory and on board MS SILJA SERENADE, Paper № .B18, 19–21 May 2003.
3. Maeda K. et al. Measurement of PM Emission from Marine Diesel Engines, CIMAC Congress 2004 Kyoto, Paper № 107 (2004).
4. Maeda K. et al. PM Emission from Ship — How to measure and reduce PM during voyage, CIMAC Congress 2010 Bergen, Paper № 87 (2010).



НОВОСТИ ЗАО «ТРАНСМАШХОЛДИНГ»

НОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ КОЛОМЕНСКОГО ЗАВОДА

Конструкторами ОАО «Коломенский завод» (КЗ, входит в ЗАО «Трансмашхолдинг») создана новая модель тепловозного двигателя нового поколения — 12ЛДГ500 (ЧН26,5/31). Проект по созданию нового двигателя реализуется в рамках Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база».

Мощность 12-цилиндровой модификации 12ЛДГ500 составляет 6000 л. с. (4412 кВт) при 1000 об/мин. По сравнению с двигателями серии Д49 разработчикам удалось добиться двукратного увеличения агрегатной мощности.

На базе головного образца создается типоразмерный ряд двигателей двойного назначения в диапазоне мощности от 3500 до 7500 кВт. Четырехтактные двигатели в этом диапазоне мощностей ранее в нашей стране не производились. В условиях реализации программы импортозамещения этот проект приобретает особую актуальность.

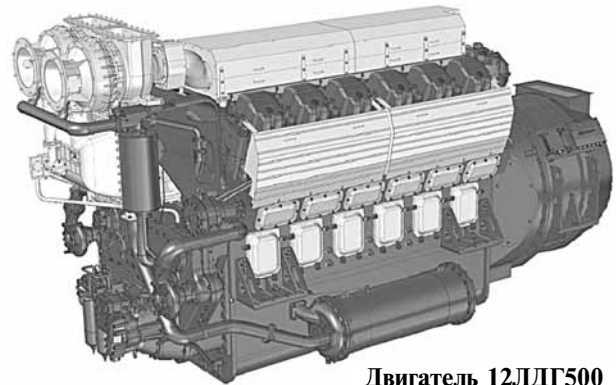
Прогрессивные конструктивные решения, использованные в двигателе 12ЛДГ500, обеспечивают высокую надежность и экономичность по расходу топлива и масла, не уступая по этим показателям лучшим зарубежным образцам дизельных двигателей MTU (Германия), «Wartsila» (Финляндия) и GE (США).

Основные технико-экономические показатели двигателя нового поколения приведены в таблице.

При проектировании двигателя разработчиками было получено 7 патентов на новые конструкторские решения, и четыре заявки находятся в стадии рассмотрения.

Применение оригинальной компоновки и оптимальная средняя скорость поршня обеспечивают при работе двигателя исключительно низкий уровень шума.

Двигатель 12ЛДГ500 соответствует требованиям международных стандартов по выбросам вредных веществ с отработавшими газами в классе железнодорожных дизелей.



Двигатель 12ЛДГ500

В новый мощный ряд войдут двигатели в 12-, 16- или 20-цилиндровом исполнении при мощности от 6000 л. с.

При проектировании и постройке двигателя был решен ряд научно-технических задач, в том числе: разработан и реализован метод расчета температурных полей в масляном клине подшипников скольжения; метод моделирования поведения масла в камере охлаждения поршня с оптимизацией количества масла в камере, а также метод моделирования прочности деталей ЦПГ при одновременном воздействии температурных, монтажных и рабочих напряжений.

Предполагается, что двигатель 12ЛДГ500 будет применен в конструкции специального восьмиосного локомотива для вождения тяжелых составов в Сибири и на Дальнем Востоке.

Двигатель 12ЛДГ500 будет производиться на Коломенском заводе (Московская область). Предприятие обладает мощной производственной базой, квалифицированными конструкторскими и технологическими кадрами для выпуска тепловозных двигателей. Завод располагает современной опытно-экспериментальной базой, оснащенной специальным испытательным оборудованием и измерительной техникой.

В настоящее время ЗАО «Трансмашхолдинг» раз-

вивает инвестирование в дизелестроительное производство. Приобретается современное высокотехнологичное оборудование для изготовления ключевых компонентов новых двигателей, а также уникальное испытательное оборудование.

*Департамент по
внешним связям ЗАО
«Трансмашхолдинг»*

Показатель	Перспективные западные конструкции*	Предлагаемая конструкция ЧН26,5/31
Агрегатная мощность, кВт (л.с.):		
— тепловозный	4412 (6000)	≤4412 (6000)
— судовой (ВМФ)	7200 (9792)	≤7352 (10 000)
— резервный генератор	6200 (8432)	6200 (8432)
Частота вращения, об/мин	900–1000	900–1000
Степень форсирования по p_e , МПа	2,08–2,65	2,58
	185–191	184–185
Удельный расход топлива по ISO 3046-1, г/кВт·ч	195–198,1 ⁽¹⁾	—
	200–203 ⁽²⁾	199–202 ⁽²⁾
Удельный расход масла на угар, г/кВт·ч	0,45–0,6	0,35–0,4
Удельная масса, кг/кВт	5,2–5,95	5,0–5,5
Ресурс до капитального ремонта, тыс. ч	24–50	60

*Осредненные показатели современных двигателей фирм GE, MAN, «Wartsila», «Deutz», MTU.

УДК 621.43

Гальшев Ю.В., Шабанов А.Ю., Румянцев В.В., Хильченко С.В., Ивановский Д.К. Анализ перспективных методов снижения мощности механических потерь в форсированном дизельном двигателе // Двигателестроение. — 2015. — № 3. — С. 3–7.

Ключевые слова: дизельный двигатель, мощность механических потерь, энергосберегающее моторное масло, антифрикционное покрытие, обкаточный состав.

Выполнен анализ возможностей повышения механического КПД двигателя за счет оптимизации работы узлов трения цилиндропоршневой группы. Разработаны антифрикционные покрытия рабочих поверхностей поршня и цилиндровой втулки, энергосберегающее смазочное масло и обкаточный состав.

Ил. 4. Библ. 6.

УДК. 621.43.018

Тер-Мкртчян Г.Г. Трансформация рабочего цикла ДВС при разделении и добавлении тактов // Двигателестроение. — 2015. — № 3. — С. 8–17.

Ключевые слова: поршневой двигатель, трансформированный рабочий цикл, разделенные такты, добавленные такты, 5-тактный двигатель, 6-тактный двигатель, 8-тактный двигатель.

Выполнен анализ возможностей трансформации рабочего цикла двигателей внутреннего сгорания. Дана классификация направлений и методов трансформирования циклов. Рассмотрены циклы с разделенными в пространстве тактами и циклы 5-, 6- и 8-тактных двигателей.

Табл. 1. Ил. 16. Библ. 14.

УДК 621.43

Путинцев С.В., Агеев А.Г. Результаты моделирования деформации юбки поршня быстроходного дизеля от действия гидродинамического давления масла // Двигателестроение. — 2015. — № 3. — С. 18–21.

Ключевые слова: поршень, юбка поршня, гидродинамическое давление масла, деформация юбки поршня.

Разработана расчетная модель для исследования напряженно-деформированного состояния поршня быстроходного дизеля. Представлены результаты моделирования деформации юбки поршня под действием гидродинамического давления масляного слоя на стенах цилиндра. Показана возможность деформации юбки поршня, вызывающей нарушение сопряжения поршня с цилиндром. Ил. 4. Библ. 17.

УДК 62-123

Шестаков Д.С., Кочев Н.С. Методы определения и устранения неравномерности цикловой подачи топлива при настройке ТНВД многоцилиндровых дизелей // Двигателестроение. — 2015. — № 3. — С. 22–25.

Ключевые слова: дизели, топливные насосы, цикловая подача топлива, методы устранения неравномерности подачи.

Представлены результаты испытаний топливных насосов высокого давления российского и зарубежного

производства на безмоторном стенде. Выполнены расчеты цикловой подачи топлива на режимах тепловозной характеристики. Установлены причины неравномерности цикловой подачи топлива и предложены методы ее устранения.

Табл. 1. Ил. 2. Библ. 9.

УДК 621.431

Гумеров И.Ф., Валеев Д.Х., Куликов А.С., Хафизов Р.Х., Борисенков Е.Р., Гатауллин Н.А. Опыт создания стенда для исследований экологических показателей двигателей // Двигателестроение. — 2015. — № 3. — С. 26–30.

Ключевые слова: двигатели КамАЗ, выбросы вредных веществ, испытательный стенд, Правила ЕЭК ООН № 49-05, испытательные циклы, воспроизводимость результатов испытаний, соответствие требованиям Евро-5.

Представлен опыт ПАО КамАЗ в реализации проекта испытательного стенда для исследований экологических показателей двигателей. Предложены технические решения для повышения точности измерения выбросов вредных веществ и воспроизводимости результатов испытаний двигателей КамАЗ по методикам Правил ЕЭК ООН № 49-05.

Табл. 2. Ил. 4. Библ. 7.

УДК 621.456.001

Патрахальцев Н.Н., Пилар Габриэла Борреро Гарсия Анализ возможности повышения эксплуатационной топливной экономичности судового дизеля // Двигателестроение. — 2015. — № 3. — С. 31–33.

Ключевые слова: дизели, корабельная энергетическая установка, режимы малых нагрузок, отключение цилиндров, специальные регулировки.

Проведен анализ возможностей повышения экономичности энергетической установки корабля на режимах малых нагрузок. Показано, что более высокий эффект достигается при сочетании отключения цилиндров со специальными регулировками дизеля.

Ил. 3. Библ. 4.

УДК 621.43

Технологии снижения выбросов NO_x и частиц судовых дизелей (материалы конгресса CIMAC 2013) // Двигателестроение. — 2015. — № 3. — С. 34–52.

Ключевые слова: дизели, вредные выбросы, система очистки газов SCR, двухтопливный двигатель, фильтрация частиц, регенерация фильтра.

Рассмотрены методы снижения выбросов NO_x до уровня требований стандарта IMO Tier 3. Специалистами фирмы «Niigata» создана компактная система SCR, обеспечивающая снижение выбросов NO_x более чем на 80 %. В качестве альтернативного решения разработан двухтопливный двигатель, способный в «газовом» режиме обеспечить соответствие требованиям IMO Tier 3. Специалистами японского университета (National Fisheries University) разработан фильтр твердых частиц (DPF) новой конструкции с нагревателем-регенератором для защиты катализаторов системы SCR от дезактивации.

Табл. 6. Ил. 42. Библ. 6.

UDC 621.43

Galyshev Yu.V., Shabanov A.Yu., Rumyantsev V.V., Khilchenko S.V., and Ivanovsky D.K. How to Reduce Mechanical Losses in High-Powered Diesel Engine // Dvigatelistroyeniye. — 2015. — № 3. — P. 3–7.

Keywords: diesel engine, mechanical losses, energy-saving motor oil, antifriction coating, running-in mixture. Methods are considered of how to improve engine mechanical efficiency through optimization of friction pairs' operating conditions. These authors offered new antifriction coatings for piston and cylinder liner surfaces. Furthermore, they offered energy-saving motor oil and composition for engine running-in mixture. 4 ill., 6 ref.

UDC. 621.43.018

Ter-Mkrtychyan G.G. Transformation of Reciprocation Engine Working Cycle by Strokes Separation/Addition // Dvigatelistroyeniye. — 2015. — № 3. — P. 8–17.

Keywords: reciprocation engine, transformed working cycle, separated strokes, added strokes, 5-stroke engine, 6-stroke engine, 8-stroke engine. Working cycle of a reciprocation engine was analyzed for its transformation potential. Ways and methods of working cycle transformation have been classified. Considered are working cycles with geometrically separated strokes, as well as those of 5-, 6-, and 8-stroke engines. 1 table, 16 ill., 14 ref.

UDC 621.43

Putintsev S.V. and Agheev A.G. Deformation of Piston Skirt in High-Speed Engine Caused by Hydrodynamic Oil Pressure // Dvigatelistroyeniye. — 2015. — № 3. — P. 18–21.

Keywords: piston, piston skirt, hydrodynamic oil pressure, piston skirt deformation. The authors offer computational model for strain/stress analysis of high-speed engine piston. Piston skirt deformation due to hydrodynamic impact of cylinder wall oil layer has been simulated. Such deformation was demonstrated as capable to affect contact between piston and cylinder liner. 4 ill., 17 ref.

UDC 62-123

Shestakov D.S. and Kochev N.S. Prevention of Fuel Injection Rate Non-Uniformity During Mutli-Cylinder Injection Pump Tuning // Dvigatelistroyeniye. — 2015. — № 3. — P. 22–25.

Keywords: diesel engines, fuel injection pumps, injection rate, methods of prevention of fuel injection rate non-uniformity. Presented are the results of tests of domestic-make and imported fuel injection pumps carried out on a dedicated test

stand. Also, fuel injection rate for locomotive diesel engine was evaluated. Causes of fuel injection rate non-uniformity have been identified, and ways to eliminate thereof have been offered. 1 table, 2 ill., 9 ref.

UDC 621.431

Goomerov I.F., Valeyev D.H., Kulikov A.S., Khafizov R.H., Borisenkov E.R. and Gataullin N.A. Development of a Dedicated Stand for Engine Testing for Environmental Performance // Dvigatelistroyeniye. — 2015. — № 3. — P. 26–30.

Keywords: KamAZ engines, pollutant emissions, test stand, UN/ECE Reg 49-05, test cycles, test result repeatability, compliance with Euro-5 standard. The article describes the experience of JSV KamAZ with its newly-developed test stand where diesel engines may be tested for environmental performance characteristics. New technical solutions are presented targeted at better precision of pollutant emission measurement and test result repeatability when engines are tested for compliance with UN/ECE Reg 49-05. 2 tables, 4 ill., 7 ref.

UDC 621.456.001

Patrakhaltsev N.N. and Pilar Gabriela Borrero Garcia Potential of Improving Marine Engine Fuel Efficiency // Dvigatelistroyeniye. — 2015. — № 3. — P. 31–33.

Keywords: diesel engines, marine power plant, low-load operation, switching off cylinders, special tuning. The potential of improving marine engine fuel efficiency during low-load operation has been studied. Partial switching off individual cylinders is demonstrated as the most efficient measure when combined with engine special tuning. 3 ill., 4 ref.

UDC 621.43

Technologies of Reducing NO_x and Particle Emission from Marine Diesel Engines (based on CIMAC 2013 papers) // Dvigatelistroyeniye. — 2015. — № 3. — P. 34–52.

Keywords: diesel engines, pollutants, SCR exhaust gas cleaning system, dual-fuel engine, particle filtering, filter regeneration. Technologies are considered that enable lowering of NO_x emission to IMO Tier 3 specifications. Specialists of «Nigata Company» offered compact SCR system that secures lowering of NO_x emission by more than 80 %. As an alternative, dual-fuel engine has been developed that comply with IMO Tier 3 specifications in «gas» operation mode. Specialists of National Fisheries University (Japan) developed new diesel particulate filter (DPF) with heater-regenerator to protect SCR catalyst from deactivation. 6 tables, 42 ill., 6 ref.

Вниманию авторов

Редакция обращает внимание авторов на тематическую направленность принимаемых к рассмотрению рукописей и необходимость выполнения требований по их оформлению.

Журнал «Двигателестроение» является ежеквартальным научно-техническим изданием, посвященным проблемам развития, проектирования, изготовления и эксплуатации поршневых двигателей.

Тематика публикаций определила следующие основные рубрики журнала:

- расчеты, конструирование, исследования двигателей;
- системы и агрегаты двигателей;
- конструкционные материалы;
- топливо и смазочные материалы, присадки;
- ресурсосбережение;
- эксплуатация и ремонт двигателей;
- автоматизация и диагностирование;
- проблемы экологии;
- гипотезы и дискуссии;
- история развития конструкций (проектов), предприятий и науки о двигателях;
- обзорная и справочная информация.

Текст рукописи должен быть представлен в двух экземплярах на бумаге формата А4, гарнитура Times New Roman 12, через полтора интервала, с обязательным приложением электронной версии на CD (в формате Microsoft Word 2000/2003), полностью соответствующей оригиналу на бумаге. Формулы в электронной версии должны быть набраны с использованием редактора формул Microsoft Equation 3.0. За достоверность набора формул несет ответственность автор. При использовании в наборе специальных шрифтов последние прилагаются в электронном виде. Электронные копии иллюстраций представляются отдельными файлами в форматах: TIF, JPG (не менее 300 dpi, черно-белые полутоновые изображения).

Представляя рукопись статьи в редакцию, автор должен сообщить о ее предыдущих публикациях.

Рукопись статьи должна иметь рекомендацию к публикации в журнале (направление) от организации, где выполнялась работа, а также акт экспертной комиссии с указанием того, что рукопись не содержит сведений, запрещенных к публикации в открытой печати.

Заглавие статьи должно быть кратким (не более 120 знаков), точно отражающим ее содержание.

Для оперативного решения вопросов, связанных с подготовкой рукописи к публикации, а также для размещения электронной версии журнала в НЭБ должны быть представлены сведения об авторах:

- фамилия, имя, отчество (полностью);
- ученая степень и звание;
- полное наименование места работы;
- полный почтовый адрес;
- действующие контактные телефоны, e-mail).

Для представления авторов читателям желательно присылать цветные или черно-белые фотографии авторов размером не менее чем 3×4 см. Допускаются электронные копии в форматах TIF или JPG.

Обязательными приложениями к рукописи являются: реферат, в котором четко и сжато изложены основные цели и результаты работы объемом от 700 до 1200 знаков; код УДК; ключевые слова.

Заглавие статьи, название организаций, ФИО авторов, ключевые слова и реферат необходимо присылать на русском и английском языках.

Объем статьи не должен превышать 25 тыс. знаков, включая таблицы и список литературы. Иллюстрации в виде графиков, диаграмм, схем и фотографий оформляются в виде приложений к тексту рукописи. Все приложения к тексту рукописи представляются на отдельных листах, а в электронной копии — в виде отдельных файлов. Формулы, иллюстрации и таблицы должны быть пронумерованы в порядке упоминания и снабжены поясняющими (подрисовочными) подписями. Все обозначения на иллюстрациях должны быть объяснены (расшифрованы) в тексте или в подрисовочных подписях и соответствовать обозначениям в тексте.

Даже если все иллюстрации заверстаны автором в текст электронной копии рукописи, то их представление в виде отдельных файлов и распечаток на отдельном листе обязательно.

В статьях желательно приводить только те математические формулы, которые необходимы для понимания существа вопроса, исключая их подробные выводы.

Все обозначения, встречающиеся в формулах, должны быть объяснены.

При написании формул необходимо использовать общепринятые обозначения физических величин по Международной системе единиц (ГОСТ 8.417–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин). Ссылки на цитируемые источники необходимо оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 05–2008.

Если представленные в редакцию рукописи не удовлетворяют перечисленным требованиям, то они могут быть доработаны по согласованию с автором сотрудниками редакции. Услуги редакции по доработке рукописей статей платные.

Рукописи статей, поступившие в редакцию, рецензируются специалистами. Если у рецензента имеются обоснованные критические замечания, статья возвращается автору на доработку.

Редакция оставляет за собой право внесения в текст редакторских изменений, не искажающих смысла авторского текста. При поступлении в редакцию обоснованных критических замечаний, касающихся размещенного в журнале материала, редакция оставляет за собой право на их публикацию в порядке дискуссии.

Авторское право на конкретную статью принадлежит авторам. Ответственность за содержание статьи несет также автор. При перепечатке статьи или ее части ссылка на журнал обязательна.

Публикация в журнале учитывается ВАК в качестве печатного научного труда.

Рукописи, направленные в редакцию, авторам не возвращаются.

Редакция журнала